

KÖZETEK GEOLÓGIAI TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA AZ APRÍT- HATÓSÁGRA, ŐRÖLHETŐSÉGRE, KÖZETFIZIKAI ÉS MECHANI- KAI TULAJDONSÁGRA

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Márkus Izabella Rebeka

okl. földtudományi mérnök

okl. bányá- és geotechnikai mérnök

Tudományos témavezetők:

Dr. Rácz Ádám, egyetemi docens

Prof. Dr. Mucsi Gábor, egyetemi tanár

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője: Dr. Szűcs Péter

MHAS, egyetemi tanár

**Miskolc
2025**

Tartalom

1. Bevezetés	1
2. Szakirodalmi összefoglaló	3
2.1. Törési jelenség.....	3
2.2. A kőzet szövet leírása, számszerűsítése	5
2.2.1. A szövet és szerkezet fogalmának meghatározása	5
2.2.2. A kőzettani jellemzők, leírásukra használt alapfogalmak	6
2.2.3. A kőzettani jellemzők meghatározására alkalmazott vizsgálati módszerek	7
2.3. A nyersanyag törési tulajdonságait meghatározó vizsgálatok.....	10
2.3.1. Őrölhetőségi vizsgálatok (Grindability tests)	11
2.3.2. Apríthatósági vizsgálatok (Crushability tests)	13
2.3.3. Egyszemcse törési vizsgálatok (Particle breakage test)	14
2.3.4. Kőzetmechanikai vizsgálatok	21
2.4. Az anyagtulajdonság-törés közötti összefüggések a szakirodalomban	21
2.5. Az anyagtulajdonság és kőzetfizikai tulajdonságok közötti összefüggések a szakirodalomban.....	25
2.6. Adatfeldolgozási módszerek	27
3. Kutatási hiányterületek azonosítása, célkitűzések	29
3.1. A tudományos munka célkitűzése	30
4. Anyag és vizsgálati módszerek	32
4.1. Vizsgálati minták	32
4.1.1. Mintavételi helyek földtani leírása	32
4.1.2. Minták makroszkópos leírása	34
4.2. Kőzettani tulajdonságok számszerűsítése.....	37
4.3. Fizikai tulajdonságok számszerűsítése	38
4.3.1. Egyszemcse törési vizsgálat	38
4.3.2. Kőzetfizikai vizsgálatok	41
4.3.1. Őrölhetőségi vizsgálat	41
4.3.2. Kőzetmechanikai vizsgálatok	41

4.4.	Adatok elemzése	41
5.	Eredmények	43
5.1.	Kőzettani tulajdonságok	43
5.1.1.	Kvalitatív és kvantitatív ásványos összetétel	43
5.1.2.	Kémiai összetétel, mállás	45
5.1.3.	Szöveti megfigyelések	46
5.1.4.	Porozitás	63
5.2.	Igénybevétellel szembeni ellenállás	66
5.2.1.	Egyszemcse törési vizsgálat	66
5.2.2.	Őrölhetőségi vizsgálat	69
5.2.3.	Egytengelyű nyomószilárdság	70
5.2.4.	Kőzetfizikai vizsgálatok	70
6.	Eredmények értékelése	72
6.1.	A kőzettani tulajdonságok hatása a törésre	72
6.1.1.	A törést befolyásoló kőzettani paraméter a szemcseméret függvényében	72
6.1.2.	A törést befolyásoló kőzettani paraméter a kőzettani jellemzők közötti eltérések függvényében	74
6.1.1.	A törést befolyásoló kőzettani paraméter a kőzettani jellemzők közötti eltérések és a szemcseméret változás függvényében	76
6.2.	A kőzet tulajdonságok hatása az őrölhetőségre	86
6.3.	A kőzettani tulajdonságok hatása az egytengelyű nyomószilárdságra	92
6.4.	A kőzet tulajdonságok hatása a kopásállóságra és az aprózódással szembeni ellenállásra	94
6.5.	Mintaminősítés pontozásos megközelítéssel	101
7.	Összefoglaló	104
8.	Summary	109
9.	Köszönetnyilvánítás	113
10.	Irodalomjegyzék	115
11.	Melléklet	129
11.1.	Anyag és vizsgálati módszerek részletes leírása, kiegészítő adatok	129

11.1.1.	Mennyiségi ásványos összetétel	129
11.1.2.	Kémiai összetétel	129
11.1.3.	Szöveti megfigyelések.....	130
11.1.4.	Porozitás	132
11.1.5.	Egyszemcse törési vizsgálat	134
11.1.6.	Kopással szembeni ellenállás	135
11.1.7.	Aprozódással szembeni ellenállás.....	136
11.1.8.	Őrölhetőségi vizsgálat	137
11.1.9.	Kőzetmechanikai vizsgálatok	137
11.2.	Eredmények.....	139
11.2.1.	Minták kémiai összetétele	139
11.2.2.	Szöveti megfigyelések-pásztázó elektronmikroszkópos elemterképek	141
11.2.3.	Egyszemcse törési vizsgálatok.....	152

1. Bevezetés

Az aggregátumok iránti kereslet világszerte növekvő tendenciát mutat, napjainkban volumenben a legnagyobb és értékét tekintve a második legnagyobb bányászati ágazat (Ayuk és mtsai.; Bendixen és mtsai., 2021; Menegaki és Kaliampakos, 2010). Az aggregátumok jelentős részét elsődleges nyersanyagokból állítják elő, a 2022. évben Európát tekintve 1809 millió tonna zúzottkővet állítottak elő 19174 bányaüzemben, míg a másodlagos forrásból származó aggregátum alig érte el a 70 millió tonnát (<https://www.aggregates-europe.eu/facts-figures/figures/>). A 2019-es évben Európában az egy főre eső aggregátum felhasználás 5,6 tonna volt, ezt a szintet a nyersanyag iránti kereslet csak a 2008-as gazdasági válságot megelőző időszakban közelítette meg. A növekvő kereslet mellett, a rendelkezésre álló jó minőségű elsődleges nyersanyagok mennyisége folyamatosan csökken, ezért szükségszerű a gyengébb minőségű kőanyagok hasznosítása is, ugyanakkor a bánya előkészítőműve a megfelelő minőségű termékek előállítására kell törekedjen a legnagyobb kizozatal mellett.

Az aprítási folyamatok energiaszükséglete egy másik sarkalatos kérdése az iparágnak. Az aprítás a mechanikai-fizikai nyersanyagelőkészítés egyik legenergiaigényesebb művelete és ezáltal az egyik legköltségesebb is. Egy bányászati beruházás energiaszükségletének nagyjából 30-50 %-a, de egyes nagyon kemény ércek esetében elérheti akár 70 %-ot is az aprítás energia szükséglete (Napier-Munn és mtsai., 1999). A folyamatba bevezetett összes energiának nagyságrendileg az ~1%-a hasznosul a szemcsék törése során (Donovan és Karfakis, 2004), amely azért lehetséges, mert az aprítóművek tervezése és működtetése során az energiahatékonyság nem volt és mai napig nem elsődleges szempont (Jeswiet és Szekeres, 2016; Napier-Munn és mtsai., 2012; Somani és mtsai., 2017). Egyes becslések szerint (Napier-Munn, 2015) évente 20 milliárd kWh villamos energiát használnak el a zúzottkő előállító létesítmények világszerte.

A jó minőségű elsődleges nyersanyagok elérhetőségének csökkenése, valamint az energiahatékonyság növelés egyrészt a CO₂ kibocsátás, másrészt a magas energiaárak miatt, elkerülhetetlenné tette a törési folyamatok optimalizálását és hatékony technológiák kialakítását a nyersanyagelőkészítés területén. A termelés és az energiafelhasználás optimalizálására irányuló törekvések szükségessé tették az aprítási folyamatokat és a termékminőséget befolyásoló tényezők alaposabb megismerését. A folyamat energiaszükségletét két fő tényező befolyásolja: az alkalmazott aprító berendezés és a feldolgozott nyersanyag tulajdonságai (Popov és mtsai., 2020). A fentiek folytán a feldolgozott nyersanyag tulajdonságai és a nyersanyag apríthatósága közötti kapcsolatok ismerete elengedhetetlen a törési folyamatok optimalizálásához.

Érces ásványi nyersanyagok előkészítéséhez kapcsolódóan számos publikáció született a nyersanyag tulajdonságai és apríthatóságuk témakörében, mivel számos kutatócsoport foglalkozik az ún. mine-to-mill, az az a bányától a malomig integrált személetes kutatásokkal. Ennek a szemléletnek fő célja a fémes komponensek kihozatalának optimalizálása, aminek már gyakorlati alkalmazása is ismert ausztráliai bányákban. A nem érces ásványi nyersanyagok tulajdonságai és az apríthatóságuk közötti kapcsolatok feltárásával jelentősen kevesebb kutatás foglalkozik. Néhány szerekhez kapcsolódó tanulmány fellelhető a szakirodalomban és csekély számú foglalkozik a zúzottkő előállításban használt nyersanyagokkal is.

A disszertáció tárgyát képező kutatás a Magyarországon nagy volumenben bányászott és zúzottkő alapanyagát képező andezit földtani tulajdonságait és apríthatósága közötti kapcsolatot hivatott feltárni. Ezen túl a földtani jellemzők hatását is vizsgálja a termékminőség alakulására.

A téma nemzetközi kontextusban is számos újdonságot hordoz. A nemzetközi szakirodalomban azon tanulmányok, amelyek a zúzottkő alapanyagként használt kőzetek tulajdonságai és apríthatóságuk közötti kapcsolatot vizsgálják nem szisztematikusan, nem egy-egy kőzettípusra koncentrálnak vizsgálják, hanem sokszor jelentősen eltérő, például metamorf kőzeteket hasonlítanak össze magmás eredetű, magas érc tartalmú kőzetekkel, vagy magmás kőzeteket karbonátos üledékes kőzetekkel, sokszor ellentmondásos megállapításokra téve.

2. Szakirodalmi összefoglaló

2.1. Törési jelenség

A szilárd ásványi nyersanyagok aprítása során végbemenő elemi folyamatok és az ezeket befolyásoló tényezők évtizedek óta foglalkoztatják a kutatókat és az ipart. Ezen tényezők kapcsolatának részletes feltárása és megértése az aprítási folyamatok optimalizálásához, valamint az energiahatékony aprítóberendezések tervezéséhez nélkülözhetetlen (Baum, 2014; King, 1994; T. Napier-Munn és mtsai., 2012; Semsari Parapari, Parian, & Rosenkranz, 2020). Az aprítás során a szemcsék törését meghatározó paraméterek az igénybevétel típusa és a törés mechanizmusa.

Az igénybevétel a fizikai mennyiségek hatása, erő vagy momentum, amelyet a szemcsével vagy szemcsehalmazzal feszültégkeltés (mechanical stress) céljából közlünk (Semsari Parapari, Parian, & Rosenkranz, 2020). Az aprítóberendezésekben fellépő leggyakoribb igénybevételi módok a nyomás, ütközés, ütés, nyírás, dörzsölés. Az igénybevétel során a rideg anyagokban a rugalmas potenciális energia felhalmozódása a kristályrácsban elér egy kritikus szintet, amely az atomok közötti kötések felszakadásához vezet. Az atomok közötti potenciális energia értéke az egyensúlyi kötési távolság esetében a legkisebb. Ha a két atom közötti távolságot növelni szeretnénk és ezáltal kimozdítani az egyensúlyi helyzetből, akkor energiát kell befektetnünk, növelni kell a potenciális energiát. A befektetett energiának meg kell haladnia az σ_c anyag kohéziós erőjét ahhoz, hogy a kötések felszakadjanak:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E\gamma}{x_0}}$$

ahol E az anyag Young-modulusza, γ egységnyi felület szabad felületi energiája (J/m^2) és x_0 pedig az egyensúlyi kötési távolság.

Minden anyaghoz tartozik egy, a kohéziós erőktől függő elméleti törési feszültség, amely mért értéke a valóságban nagyságrendekkel kisebb. Ennek oka az anyagban jelen lévő inhomogenitások, mint például a repedések, mivel a terhelés a repedések csúcsaiban koncentrálódik. Az inhomogenitások jelenléte miatt a külső terhelés következtében fellépő belső alakváltozási feszültség nem egyenletes eloszlású, a repedéscsúcsokban ugrásszerűen megnő (Csőke, 2000). A repedés tovább terjedéséhez két feltételnek kell teljesülnie: kellően nagy energia és a kritikus repedéshossz. Az első feltétel teljesülése megkívánja, hogy a repedés differenciált tovább terjedéséhez szükséges energiát a bevezetett energiamennyiség fedezze. Az új felületek kialakulásához energia szükséges, W_0 felületi energia a következő összefüggéssel adható meg:

$$W_0 = 4\gamma c$$

ahol c a repedés hossz (m) és γ egységnyi felület szabad felületi energiája (J/m^2). A repedés terjedése során felszabaduló W_e rugalmas alakváltozási energia mindig nagyobb kell legyen, mint az új repedési felületek létrejöttéhez szükséges energia:

$$W_e = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E}$$

ahol σ a kritikus feszültség (N/m^2) és E az anyagra jellemző Young-modulusz. A Griffith törési modell szerint a repedés akkor terjed tovább, ha elér egy kritikus repedéshosszt, amely a következő összefüggéssel adható meg:

$$c = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma^2}$$

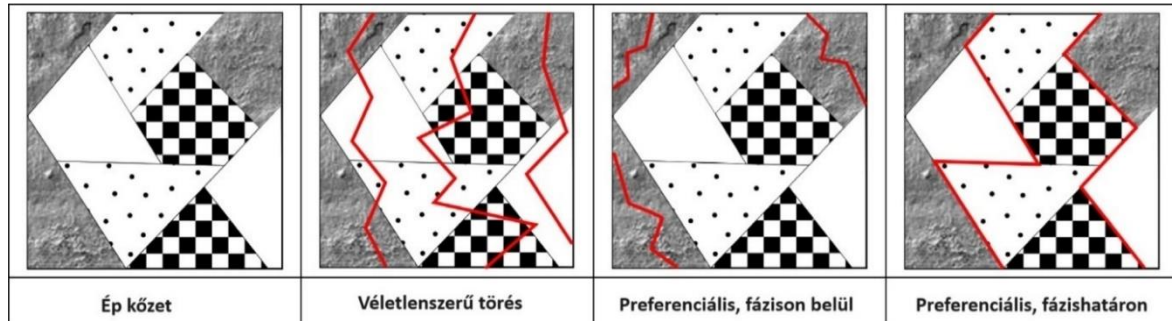
Az a kritikus feszültség, amelynél egy konstans repedéshossz mellett még nem következik be a repedés továbbterjedése:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi c}}$$

A fenti levezetésből látható, hogy a tönkremenetel állandó repedéshossz mellett akkor fog bekövetkezni, ha $\sigma > \sigma_c$, ugyanakkor a feszültség növekedésével a kritikus repedéshossz csökkenni fog, tehát minél nagyobb a repedés annál könnyebben fog instabillá válni (Semsari Parapari, Parian, & Rosenkranz, 2020).

A törési mechanizmust az igénybevételi mód, az aprítási környezet és az anyagtulajdonságok határozzák meg. A törési mechanizmus lehet véletlenszerű (random) és nem véletlenszerű (non-random) (King és Schneider, 1998; Little és mtsai., 2016; Mariano és mtsai., 2016; Semsari Parapari és mtsai., 2020). A véletlenszerű törési mechanizmus a szövettől, ásványos összetételtől, fizikai tulajdonságoktól független törési mechanizmus (Mariano és mtsai., 2016). A nem véletlenszerű törési mechanizmus a szövettől és az ásványos összetételtől függ. King és Schneider (1998) a random törési csoporton belül hat alcsoportot különített el: (1) szelektív törés amikor a törés az alkotók eltérő ridegsége miatt következik be; (2) differenciális törés (differential breakage) esetén a törés az anyag összetételével és mikroszerkezetével áll összefüggésben, az egyes ásványi komponensek eltérő fizikai tulajdonságából adódó belső feszültséggel magyarázható; (3) preferenciális törés (preferential breakage) esetén az egyik ásványi komponensben gyakrabban alakul ki a repedés szétágazása; (4) fázishatár mentén bekövetkező törés (phase.boundary breakage) esetében a törés az egyes ásványi alkotó fázisok határán következik be; (5) leválás (liberation by detachment) amikor az egyik ásványi komponens lazán kötött a mátrixban így erő hatására képes könnyen leválni; (6) határfelületi törés (boundary region fracture) esetében az ásványi komponensek rugalmassági modulusának jelentős eltérése miatt a határfelület közelében mindkét fázis törését eredményezi. Little és

mtsai. (2016), Semsari Parapari és mtsai. (2020) egyszerűsítették King és Schineider (1998) csoportosítását, az első három csoportot összevonta preferenciális törés (preferential breakage) név alatt, míg az utóbbi hármat, fázis határ mentén bekövetkező törésként (phase boundary breakage) értelmezte. Az egyes törési mód típusokat a 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Különböző törési mechanizmusokszemléltetése (forrás: Semsari Parapari és mtsai., 2020)

Petruk (2000) szerint az ásványok kristályosodása és újrakristályosodása során, ha erős kötés alakult ki az egyes fázisok között, akkor a törés véletlenszerű lesz. Ezzel ellenben, ha gyenge kötések jönnek létre az egyes ásványfázisok között, akkor a törés fázishatáron fog bekövetkezni Brattli (1992).

2.2. A kőzet szövet leírása, számszerűsítése

2.2.1. A szövet és szerkezet fogalmának meghatározása

A kőzetek komplex heterogén anyagok (Kekec és mtsai., 2006; Petruk, 2000). A kőzettani jellemzők alatt általában a vizsgált kőzet kémiai és ásványos összetételét, valamint szövet- és szerkezeti jellemzőit értjük. A különböző tudományterületek, mint a nyersanyagelőkészítés, bányászat, geológia, mérnökgeológia által használt fogalmak a szövet és szerkezet, valamint az ezekhez kapcsolódó tartalmak némileg eltérnek, mint arra Bonnici (2012) is rámutat. A klasszikus földtani értelemben vett kőzetszövet (angol nyelven texture) a kőzetet alkotó ásványok alaki sajátosságai, az ásványok egymáshoz való viszonya, kapcsolata, elhelyezkedési módja és mérete határozza meg (Kubovics, 2000). A kőzetszerkezet (angol nyelven structure) a kialakulás módjáról, a kőzetet ért utólagos hatásokról szolgáltat információt, ilyen például az üledékes kőzetek különböző típusú rétegződése, bauxit alkotóinak gömbhéjas felépítése, a metamorf kőzetek redői, lemezessége, a kőzetben található repedések. A különböző típusú kőzetek leírásakor általában együttesen használjuk a kettőt, úgymond szövet-szerkezeti jellemzőkről beszélünk. A nyersanyagelőkészítés területén, és főleg a geometallurgiához kapcsolódó szakirodalomban a „texture” angol nyelvű kifejezést használják, viszont az e mögött álló pontos tartalom általában szerzőnként változik. Hilden és Powell (2017), Wills és mtsai. (2006) szövet alatt a kőzetalkotó ásványok eloszlását, társulását, alakját és térbeli szerkezetét érti. Petruk (2000), Yıldırım (2016) ezt még kiegészíti az ásványszemcsék határán fellépő

kapcsolatokkal, valamint a repedésekkel. Az előző szerzőktől eltérően Popov és mtsai. (2020) különbséget tesznek a szövet (texture) és szerkezet (structure) fogalma között, míg az előbbi alatt az alkotók méretét, geometriáját és viszonyát értik, addig az utóbbin az alkotók térbeli elhelyezkedését. Dominy és mtsai. (2018) a szerkezeti elemeket, mint repedések, vetők, tel-lérek is a szöveti elem részének tekintik. Sok esetben a szövet (texture) fogalmat csak egy, az előkészítés szempontjából vizsgált közettani jellemzőre használják, mint pl. az alkotók mérete vagy alakja (Bonnici, 2012). A fenti példák is jól mutatják, hogy az ásványelőkészítés szakterületén nincs egyértelmű konszenzus azt illetően, hogy a szakirodalomban pontosan mit takar a szövet (texture) fogalma, ezért minden szerző általában saját kutatása kapcsán igyekszik feltüntetni, hogy mit ért a fogalom alatt. Az értelmezést tovább bonyolítja a változatos pórus és üregtípusok kifejlődése, amelyek jelentős mértékben befolyásolják a kőzetek tulajdonságait.

2.2.2. A közettani jellemzők, leírásukra használt alapfogalmak

A disszertáció vizsgálati anyagát képező andezit egy szubvulkáni vagy felszíni magmás kőzettípus, ezért csak a magmás kőzetek földtani és közettani jellemzőinek, osztályozásának rövid ismertetésére térnek ki a szakirodalmi összefoglalóban. A Föld felszínéhez viszonyított helyük alapján három fő csoportba soroljuk a magmás kőzeteket: mélységi magmás kőzetek, ide tartozik gránit, diorit, gabró és peridotit, a második csoportba a felszín közeli vagy szubvulkáni, míg a harmadikba a kiömlési vagy vulkáni magmás kőzetek kerülnek, a bazalt, andezit, dácit és riolit. Az előzőekben felsorolt elnevezéseket a kőzet SiO_2 tartalma alapján sorolják osztályokba, melyek a SiO_2 tartalom mellett jellemző ásványtársulással rendelkeznek. A képződés térbeli helyére, azaz, hogy felszíni vagy mélységi a kőzet, a szemcsemérete alapján tudunk következtetni. A mélységi magmás kőzetekre általában nagyobb, jobban kifejlett saját alakú ásványok jellemzőek, míg a felszíni magmás kőzetekre kisebb méretű alkotók és üveges anyag, esetenként porfíros kifejlődés vagy üveges szövetű (perlit).

A magmás kőzetek szövete változatos, leírásuk során több paraméterre is tekintettel kell lenni. A kristályok, kőzetüveg jelenléte, illetve egymáshoz viszonyított aránya, azaz a kristályosság fok alapján az alábbi típusok elkülöníthetők: holokristályos amely teljesen kristályos; hipokristályos amely kristályokból és kőzetüvegből áll és üveges, amely csak kőzetüvegből áll. Az elegyrészek mérete alapján megkülönböztetünk fanerokristályos és afanitos szövetet, a kettő közötti szemcseméret határ kb. 0,2 mm. Az előbbi esetében az összes lényeges elegyrész szabad szemmel elkülöníthető, míg az utóbbi esetében szabad szemmel csak a nagyobb kőzetalkotók különíthetők el, ha a szabad szemmel nem látható részek mikroszkópban meghatározhatók akkor mikrokristályos, ha mikroszkóppal sem határozható meg akkor kriptokristályos. A szemcsék abszolút mérete alapján beszélünk durvaszemcsés (2-5 mm), közpszemcsés (1-2 mm) és finomszemcsés (<1 mm) kőzetről. Az elegyrészek egymáshoz viszonyított

mérete alapján a kőzet lehet ekvigranuláris, amikor az elegyrészek mérete körülbelül azonos és inekvigranuláris amikor a kőzetalkotó ásványok méretben jelentősen különböznek. Az elegyrészek kifejlődése szerint három csoportot különítünk el: idiomorf, amely saját alakú; hipidiomorf amely részben sajátalakú és az allotriomorf amely teljesen szabálytalan alakú. A kristályok háromdimenziós megjelenésük, alkatuk alapján lehetnek izometrikus, táblás, lemezes, oszlopos vagy tűs-szálas kifejlődésűek. Az elegyrészek egymáshoz viszonyított elrendeződése alapján beszélhetünk irányítatlan és irányított szövetről.

Az ásványelőkészítés szempontjából szintén fontos a kőzet átalakulási (mállási) zónáinak a leírása, jellemzése, mivel ennek hatása az aprításra jelentős lehet. Például egy káliföldpátnban gazdag mállási zóna sokkal nehezebben aprítható, mint egy szericitben gazdag (Bonnici, 2012).

2.2.3. A kőzettani jellemzők meghatározására alkalmazott vizsgálati módszerek

A kőzettani jellemzők vizsgálata különböző módszerekkel történhet, amelyek kiválasztását a vizsgálni kívánt tulajdonságok léptéke és az eredmény elvárt pontossága határozza meg. Mivel a vizsgálati módszerek széles körben elterjedt, rutinszerűen alkalmazott eljárások, csupán azok rövid, vázlatos ismertetését közlöm. A legegyszerűbb, de legszubjektívebb eljárás a makroszkópos, szabad szemmel végzett leírás, amely főként kvalitatív információkat ad, és erősen függ a vizsgálatot végző személy jártasságától. A kőzetek szöveti és szerkezeti jellemzőinek, valamint ezek apríthatósággal való kapcsolatának feltárásához azonban részletesebb, lehetőség szerint kvantitatív leírásra van szükség. E terület folyamatosan fejlődik, különösen a gyors, automatizálható és pontos módszerek irányába.

A mikroszkopikus léptékű kőzetjellemzők kvalitatív leírására leggyakrabban alkalmazott módszercsoport az optikai mikroszkópos és a pásztázó elektronmikroszkópos eljárásokon alapuló módszerek. A polarizációs mikroszkópos vizsgálatok során az ásványfázisok azonosítása, azok jellegzetes optikai tulajdonságainak megfigyelése alapján történik. Ez történhet áteső (transzmissziós) fényben vagy ráeső (reflexiós) fényben. Az áteső fényes optikai mikroszkópos vizsgálatnál egy nikollal az ásvány mérete, alakja, színe, hasadása, törése állapítható meg, míg keresztezett nikollal a kioltási szög, optikai jelleg, interferenciaszín, ikresedés, zárványosság határozható meg.

Az utóbbi évtizedekben a digitális fényképezési technológiák és fényképfeldolgozó szoftverek fejlődése lehetővé tették az alkotók optikai tulajdonságaik alapján történő azonosításának automatizálását (Berry és mtsai., 2011) és ezek kvantitatív leírását (Lane és mtsai., 2008), úgynevezett fázistérképek készítését. A repedések, pórusok és más szövet-szerkezeti elemek

azonosítására és számszerűsítésére is lehetőség adódik az optikai mikroszkópos szürkeárnyalatos fényképek alapján ún. folt-elemzéses (blob analysis) és térstatistikai módszerekkel (spatial statistics) (Pirard és mtsai., 2007). Az optikai mikroszkópos elemzések egyik speciális alkalmazása a kvantitatív közet-szövet elemzés (quantitative microstructural analysis - QMA). A QMA egy gyűjtőfogalom, olyan eljárásokat csoportosít, amelyek alkalmasak a mikroszerkezeti elemek geometriai és mechanikai sajátosságának tanulmányozására (Popov és mtsai., 2020). A vizsgálni kívánt mintából három egymásra merőleges irányú vékonycsiszolatot készítenek, amelyen sztereológiai módszerekkel támogatott polarizációs optikai mikroszkóp segítségével történik a minta leképezése, majd matematikai algoritmus alkalmazásával történik a jellemzők kvantitatív azonosítása.

A közetek szövet-szerkezete és a szilárdság kapcsolatát vizsgáló tanulmányokban gyakran alkalmazott eljárás a közet szöveti koefficiensének (texture coefficient, továbbiakban TC) meghatározása (Askaripour és mtsai., 2022; Esmailzadeh és mtsai., 2017; Howarth & Rowlands, 1987; Ozturk és mtsai., 2014). A módszer részletes leírását Howarth és Rowlands (1987) mutatja be. Optikai mikroszkópos fényképeken meghatározzák a szemcse kerületét és területét, valamint az egyes szemcsék legkisebb és legnagyobb átmérőjét (Feret), napjainkban ez már szoftveres képfeldolgozó eljárással történik, majd ezek felhasználásával számolják a szöveti koefficiens a következő összefüggéssel:

$$TC = AW \left\{ \frac{N_0}{N_0 + N_1} * \frac{1}{FF_0} \right\} + \left\{ \frac{N_1}{N_0 + N_1} * AR_1 * AF_1 \right\}$$

ahol

AW - terület súlyozás, a szemcsék összterületének a vizsgált terület határain belül és a vizsgált terület összterületének a hányadosa, üregeket is tartalmazó üledékes közet esetén értelmezhető, magmás és más típusú közetek esetében értéke 1.

N_0 - azon szemcsék száma, amely oldalaránya 2.0-nál kisebb (a maximális Feret átmérő vagy hossz viszonyítva a max. átmérőhöz vagy szélességhez)

N_1 - azon szemcsék száma, amely oldalaránya 2.0-nál nagyobb (a maximális Feret átmérő vagy hossz viszonyítva a max. átmérőhöz vagy szélességhez)

FF_0 - N_0 szemcsék számtani középértéke

AR_1 - N_1 szemcsék számtani középértéke

AF_1 - N_1 szemcsék szög tényezőjének iránya (angle factor orientation)

Szintén mikroszkópos megfigyelések alapján határozható meg a szemcseméret számszerűsítésére szolgáló átlagos szemseméret index (average grain size index, továbbiakban AGSI), amely a következő összefüggéssel számítható [5]:

$$AGSI = \frac{1}{100} \sum_{k=1}^n P_k$$

ahol

P - a szemcsék teljes százalékos aránya

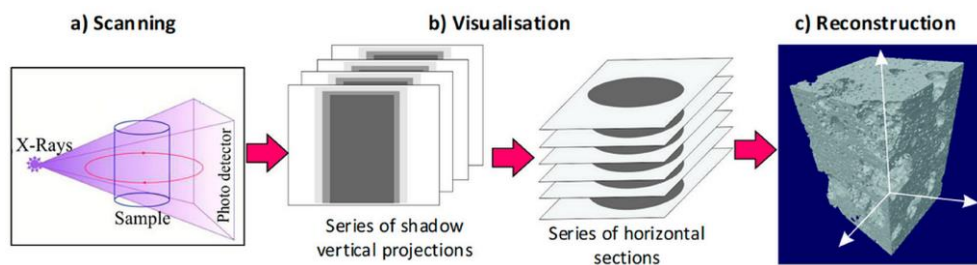
k - osztályok száma, az egyes ásványtípusok száma a mintán belül.

Az optikai mikroszkópos módszerek az utóbbi években jelentősen háttérbe szorultak, köszönhetően a pásztázó elektronmikroszkópok széleskörű elérhetőségének. A pásztázó elektronmikroszkóp esetében jól fókuszált elektronnalábbal végigpásztázzuk a vákuumban lévő minta felületét és a mintából kilépő szekunder elektronokkal vagy a mintából származó egyéb jelekkel (pl. visszaszórt elektronok, röntgensugárzás) leképezzük a minta felületét. Mivel általában a nagyítás 50x és több 10000x tartományban lehetséges, így a μm -es és a μm alatti szerkezeti jellemzőket is tudjuk vizsgálni. A hagyományos elektronmikroszkópos megfigyeléseken túl az automatizált pásztázó elektronmikroszkópos módszerek alkalmazása napjainkban már rutin eljárásnak számítanak az iparban (Warlo és mtsai., 2019). A két leggyakrabban alkalmazott eljárás a QEMSCAN (Quantitative Evaluation Of Minerals By Scanning Electron Microscopy) és a MLA (Mineral Liberation Analyser). Mindkét eljárás esetében az energiadiszperzív röntgenspektrométer (EDS) és a visszaszórt elektronkép (BSE) segítségével történik a minta leképezése, az eltérés a mérési technikában és az adatok feldolgozásában van. (Goodall és mtsai., 2005).

Az polarizációs mikroszkópos és elektronmikroszkópos eljárásokat gyakran egymás kiegészítéseként alkalmazzák. Például azonos törésmutatóval rendelkező ásványokat nem lehet megkülönböztetni a polarizációs mikroszkópos eljárással, de a pásztázó elektronmikroszkópos eljárások erre alkalmasak, ugyanakkor azonos kémiai összetételű ásványok (aragonit és kalcit, SiO_2 polimorfok) elkülönítésére nincs lehetőség az elektronmikroszkóppal, de optikai tulajdonságok alapján ez megtehető. Részben az utóbbi probléma, valamint a pásztázó elektronmikroszkópia magas költségei vezettek újabb vizsgálati eljárások kifejlesztéséhez. López-Benito és mtsai. (2020) az érces fázisok azonosítására és kvantifikálására az AMCO (Automated Characterisation of Ores) optikai mikroszkópos eljárást fejlesztette ki. A módszer egy multispektrális mérési módszer, amely az UV közeli, látható és infravörösközeli tartományú, közet vékonycsiszolatán mért reflexiók értékek alapján azonosíthatók az egyes ásványfajták és számszerűsíthető mennyiségük.

A kétdimenziós síkfelületről nyert információ a közettani jellemzők azonosításakor gyakran nem elegendő, ezért egyre gyakrabban alkalmazott módszer az alkotók és a szövet-szerkezet

kvantifikálására a röntgen komputertomográfia (X-CT). A CT alkalmas a közetporozitás, repedezettség és üregek leképezésére, ezen felül az ún. mikrotomográfia pedig az ásványos összetevők leképezésére a röntgensűrűség alapján. Az eljárás a röntgensugárzás azon tulajdonságát használja ki, hogy valamely tárgyon való áthaladás során a sugárzás intenzitása csökken az anyagra jellemző elnyelési együttható függvényében. A mintát vízszintes tengelye mentén 180° -ban elforgatva lépésenként leképezik, a sugárforrással ellentétes oldalon elhelyezett detektor érzékeli, hogy egy adott pontban mennyi röntgensugárzást nyelt el a minta és ezt grafikus fájl formájában eltárolja. A képhez a röntgensugárzás intenzitása függvényében szűrkeárnyalat rendelhető. A feldolgozás során ezen képfájlok matematikai transzformálása történik és a leképezett függőleges vetületekből vízszintes képszeletek készülnek, amelyek alkalmasak a 3D megjelenítésre (2. ábra).



2. ábra. A CT módszer elvi működése (forrás: Lamberg, 2011)

A módszer nagy előnye az optikai és elektronmikroszkópos eljárásokkal ellentétben, hogy nem igényel speciális mintaelőkészítést, valamint a gyorsasága és az adatok 3D-s megjelenítésének lehetősége. Ugyanakkor az ásványelőkészítés szempontjából hátránya, hogy a szemcse aggregátumokat egy szemcseként érzékeli, amely következtében az egyes ásványfázisok szemcseméret eloszlásáról nem mindig ad helyes képet.

2.3. A nyersanyag törési tulajdonságait meghatározó vizsgálatok

Minden aprítási folyamat egyik legfontosabb tényezője a folyamat energiaszükséglete. Az energiaszükséglet, magas költségei mellett, fontos tényező a berendezés típusának és paraméterének megválasztásakor, ezért szükségessé vált olyan eljárások kidolgozása, amely során laboratóriumi kísérletekből kiindulva meg tudjuk becsülni egy aprítóberendezés várható kapacitását, teljesítményét, energiafelhasználását. Ehhez elengedhetetlen az aprításra kerülő anyag mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállásának ismerete.

Az anyag mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállásának vizsgálatára több módszer létezik, amelyek négy nagyobb csoportban sorolhatók: őrlhetőségi vizsgálatok, apríthatósági vizsgálatok, törési vizsgálatok és közetmechanikai vizsgálatok (Mwaga és mtsai., 2015).

2.3.1. Őrlhetőségi vizsgálatok (Grindability tests)

Az aprító-osztályozó rendszerek tervezése során gyakran alkalmazott vizsgálat csoport az anyag igénybevétellel szembeni ellenállásának megállapítására az őrlhetőségi vizsgálatok. Ezen vizsgálatok eredményeként kapott őrlhetőségi azt mutatja, hogy egységnyi energiaráfordítással milyen őrlési, vagy általánosabban, milyen aprítási eredmény érhető el (Beke, 1974). Az őrlhetőségi mérőszám megállapításának módszere: pontosan körülírt laboratóriumi körülmények között végzett őrlés alapján bizonyos jelzőszámok meghatározása, amelyekből tapasztalati adatok alapján az ipari méretű berendezések energiafogyasztása kisebb-nagyobb pontossággal megbecsülhető. Az ipari gyakorlatban három eljárás terjedt el: Hardgrove-, Zeisel- és Bond-módszer.

A Hardgrove-módszert Ralph Martin Hardgrove eredetileg a szénfajták őrlhetőségének vizsgálatára fejlesztette ki, azonban az eljárást az idők során számos egyéb anyagtípusra is kiterjesztették (Csőke és mtsai., 2013; Haffez, 2012; Mucsi, 2008; Mucsi és mtsai., 2019). A szabadalom elsődleges célja egy olyan szabványos őrlhetőségi eljárás kidolgozása volt, amely lehetővé teszi különböző anyagok őrlhetőségének összehasonlítását, továbbá egy olyan módszer megalkotása, amely minimális számításigénye révén egyszerűen és gyorsan alkalmazható (Faitli és mtsai., 2017). A módszer a Rittinger-féle munkatörvényen alapszik, amely szerint az aprítás munkaszükséglete arányos az aprításkor keletkező friss törési felülettel (Tárján, 1978). Ennek alapján a következő képlettel határozható meg az őrlhetőségi mutató:

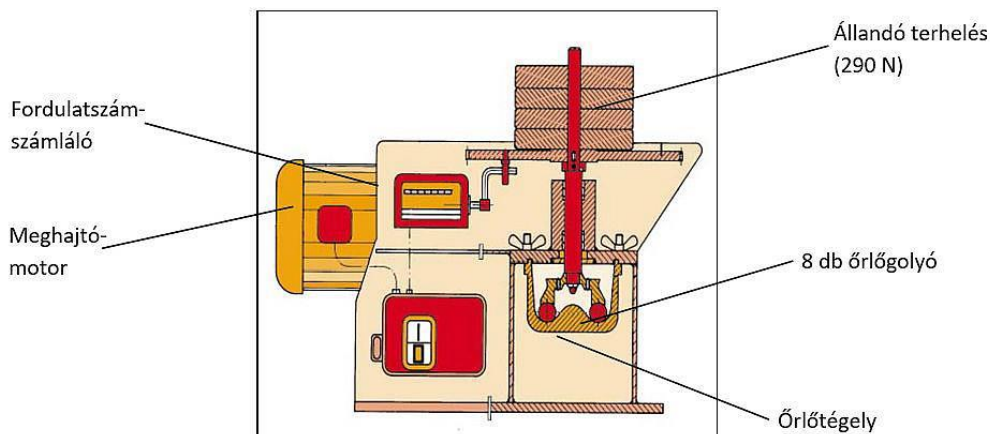
$$H = \frac{\Delta F}{F_0} * 100$$

ahol ΔF a fajlagos felületnövekedés és F_0 az etalon anyag őrlésekor nyert fajlagos felületnövekedés [g/cm^3], amely az USA-beli St. Jerome bányából származó szénminta, melynek fajlagos felület növekedése $565 \text{ g}/\text{cm}^3$. Számos kísérlet alapján a Hardgrove-index számításánál a felületnövekedés figyelembevétele helyett empirikus összefüggést állapítottak meg, amely szerint:

$$HGI = 13 + 6,93m_{75}$$

A képlet két állandója 13 és 6,93 úgy határozták meg, hogy a már fent említett St. Jerome bánya közepesen őrlhető szenének indexe $100HGI$. A fenti empirikus összefüggésben szereplő m_{75} , paraméter meghatározása történik laboratóriumi őrlés során, az eljárás részletes leírását a Melléklet- 11.1 Anyag és vizsgálati módszerek részletes leírása, kiegészítő adatok fejezet mutatja be. Nagyobb m_{75} könnyebb őrlhetőségnek felel meg, ekkor a HGI 100-nál nagyobb, míg nehezen őrlhető anyagok esetén 100-nál kisebb. Nagyobb Hardgrove-szám jobb őrlhetőséget jelent, de nem jelent arányosságot.

Egy Hardgrove-index meghatározásához használatos őrlőberendezés vázlatos rajzát a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. A Hardgrove-malom vázlatos rajza (Faitli és mtsai., 2017)

A Hardgrove-eljárást Zeisel fejlesztette tovább, abból a célból, hogy a módszert az őrlési energia meghatározására is alkalmassá tegye. A módszer a cementipari standard összehasonlító jellegű vizsgálati módszere (Pethő és Csőke, 1983). A Hardgrove-módszernél használt ASTM típusú malmot átalakította úgy, hogy az a nyomatek mérésére alkalmassá tette, és nem állt meg 60 megtett fordulatnál, hanem az őrlési időtartam növelésével az anyagot a gyakorlatban kívánt finomságig őrlötte (Beke, 1974). A módszer a szénak őrlhetőségén túl számos más anyag esetében is alkalmazható, a módszerhez kapcsolódóan számos kutatás folyt az utóbbi évtizedekben a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetben és annak jogelődjeiben (Csőke és mtsai., 2013; Mucsi, 2008, 2009).

A Bond-eljárás az ásványelőkészítés egyik legelterjedtebb, inhomogén nyersanyagokra is alkalmazható laboratóriumi őrlési módszere (Pethő és Csőke, 1983). A nyílt rendszerű őrlésekkel szemben Bond célja a körfolyamatos ipari rendszerek laboratóriumi modellezése volt. Ehhez több száz üzemi mérés alapján dolgozta ki őrlhetőségi mutatóját, amelyet egy $\varnothing 305 \times 305$ mm-es dobmalomban végzett száraz őrléssel határozott meg. Ez a vizsgálat egy $\varnothing 2,44 \times 2,44$ m-es nedves működésű ipari malom körülményeit szimulálja. A folyamat során a finomszemcsés frakció eltávolításával és friss adagolással addig folytatódik az őrlés, amíg az anyagmérték egyensúlyba kerül (Mucsi, 2007).

Bond-próba viszonylag időigényes, kevésbé reprodukálható és összetettebb számításokat igényel, míg a Hardgrove-módszer gyorsabb és jól ismételhető. A két módszer között több szerző korrelációt állapított meg, így a Bond-munkaindex (WiB) a Hardgrove-index (HGI) alapján becsülhető. Bond eredeti összefüggése: (Bond, 1954):

$$W_{iB} = \frac{88}{HGI^{0,5}}$$

amelyet későbbi módosított:

$$W_{iB} = \frac{435}{HGI^{0,82}}$$

Csőke és munkatársai (2004) bauxit őrlési kísérletei alapján pedig a következő képletet javasolják:

$$W_{iB} = \frac{468}{HGI^{0,82}}$$

2.3.2. Apríthatósági vizsgálatok (Crushability tests)

Az aprító berendezések megválasztásának egyik fő szempontja az aprítani kívánt anyag apríthatósága, mivel közvetlen hatással van a törő, pontosabban a törőtér kialakításának és kopó részének megválasztására.

A METSO, az egyik legnagyobb aprítóberendezés gyártó cég a piacon, saját eljárást dolgozott ki az apríthatóság meghatározására (METSO, 2011). Egy 50x25x5 mm-es lapát forog függőlegesen 4500 fordulat/perc sebességgel 5 percen át, egy 90 mm átmérőjű, 100 mm magasú henger alakú edényben, amelyben 500 g 4-6,3 mm-es szemcseméretű került elhelyezésre. 5 perc elteltével az anyagot 1,6 mm-es szitán átszítálják és meghatározzák az áthullott anyag tömegét. Az apríthatóságot a következő összefüggéssel adják meg:

$$CR = \frac{m_{1,6}}{M} [\%]$$

ahol $m_{1,6}$ az 1,6 mm-es szitán átesett anyag tömege és M a kiindulási anyag tömege.

Egyes szerzők szerint (Kameneva és mtsai., 2016) azok a módszerek és eredmények a legmegbízhatóbbak, amely során a közet aprózódási folyamatához szükséges energia intenzitásának megfigyelésére lehetőség van. Kivitelezésük általában félüzemi vagy laboratóriumi törőkben történik, a törési folyamat során mérik a berendezés energia fogyasztását. Kísérleti mérésekre alapozva a következő összefüggést adták meg a törési folyamat energia felvételére:

$$q_{abc} = \frac{N - N_x}{Q} [kWh/t]$$

ahol

N - a berendezés áramfogyasztása [kW]

N_x - az üresjáratban felhasznált áram [kW]

Q - a töret tömegárama [t/h].

Mivel a fajlagos energiafelvétel (specific energy intensity) nő az aprózódás előrehaladtával, a többi tényező viszont azonos marad a folyamat során, a relatív energiafelvételt (relative energy intensity) a következő képlettel adható meg:

$$q_{rel} = \frac{N - N_x}{Q_{(i-1)}} [kWh/t]$$

feltételezve, hogy az aprítás energiafelvétele megegyezik a Bond munkatörvénnyel és arányos az aprítási fokkal $i-1$ -ik lépcsőig.

A közetek apríthatósági indexének (Comminution Index, CI) meghatározása széles körben alkalmazott vizsgálati módszer. A meghatározás jellemzően laboratóriumi törőberendezésben, leggyakrabban pofástörő segítségével történik. A vizsgálathoz 500 g, 9,52–19,00 mm szemcseméret-tartományba eső mintát használnak, amelyet előzetesen 110 °C-on, 48 órán keresztül szárítanak. A szárítást követően a minta a 4–8 mm részméretű laboratóriumi pofástörőbe kerül, majd az így kapott töretet 9,52 mm-es lyukbősségű szitán szitálják át. Legtöbb szerző (Kahraman és mtsai., 2018; Kahraman és Toraman, 2008; METSO, 2018) az apríthatósági indexnek a szitán áteső anyag tömegét adják meg %-ban. Bearman és mtsai., (1991) kúpos törőt, míg Comakli & Cayirli (2019) hengeres törőt alkalmazott az apríthatósági index meghatározás céljából.

2.3.3. Egyszemcse törési vizsgálatok (Particle breakage test)

A szakirodalomban a közettulajdonságok és az apríthatóság közötti összefüggések vizsgálata az egyik legelterjedtebb megközelítés az egyszemcse törési vizsgálatok alkalmazása. Krogh (1980) szerint ahhoz, hogy az aprítás elemi folyamatait tudjuk vizsgálni, az anyag apríthatóságának mértékét kell tudjuk mérni és ennek az értékének függetlennek kell lennie a törőberendezéstől. Az aprítógépekben végzett törési kísérletek során érvényesül a berendezés hatása is, míg az egyszemcse törési kísérletek során csak az anyag és a törési energia kapcsolata. Ugyanakkor rámutat arra is, hogy az egyszemcse törési kísérletek során a különböző törési módozatokat célszerű megkülönböztetni az eredmények felhasználásának függvényében, mint törés ütközéssel, lassú nyomással két felület között vagy nyírással. Napier-Munn és mtsai. (1999). Salman és mtsai. (2007) kiemeli, hogy az aprítás során végbemenő törés, aprózódás egy sorozat mikrófolyamat eredménye. Ezen ipari folyamatok végeredményét az anyag jellemzői, az igénybevétel módja és a környezet hatásának komplex interakciója fogja meghatározni.

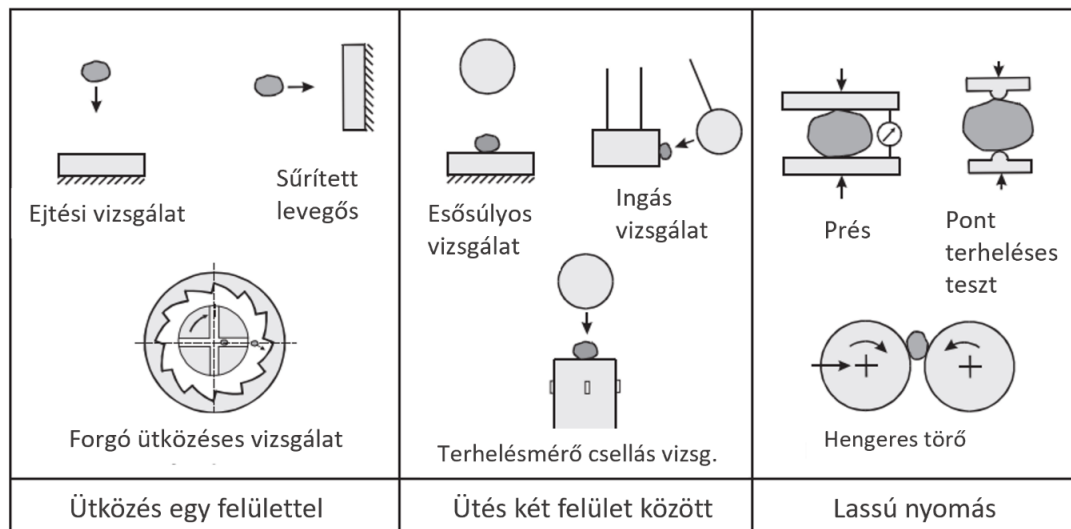
Az egyszemcse törési kísérletek az aprítás során végbemenő számos jelenség felfedésére, tisztázására alkalmazott módszer:

- törési jelenség
- az energiafelhasználás az aprítási folyamat során és a különböző energia veszteségek vizsgálata
- a szemcseméret, szemcsealak, az anyag fizikai tulajdonságainak és az igénybevétel hatásának vizsgálata a törési jellemzőkre
- energia-szemcseméret csökkenés kapcsolatának vizsgálatára
- az anyag alakváltozása az alkalmazott feszültség hatására.

Az egyszemcse törési kísérleteket az igénybevétel átadás módja és az érintkezési pontok száma szerint osztályozhatjuk (Genç és mtsai., 2004; A. Salman és mtsai., 2007):

- egy ütközés (single impact)
- ütés két felület között (double impact)
- lassú nyomás (slow compression)

Az egyes osztályokhoz tartozó vizsgálati eljárásokat a 4. ábra foglalja össze.



4. ábra. Különböző típusú egyszemcse törési vizsgálatok (forrás: Salman (ed) és mtsai. 2007)

Az egy ütközést alkalmazó vizsgálatok csoportján belül az eljárások két alcsoportban sorolhatóak: kis ütközési sebességű- és nagy ütközési sebességű vizsgálatokra. Az első csoportba tartoznak a különféle ejtési, illetve szabadesésen alapuló vizsgálatok, amelyek viszonylag egyszerű műszaki kialakítást igényelnek. Ezek az eljárások jellemzően egy elengedő mechanizmusból, valamint egy ütközőfelületként szolgáló vastag fémlemezről állnak, amelyre a szemcse becsapódik. Mivel ezekben a kísérleti eljárásokban a szabadesés elve érvényesül, a befektetett energia (input energy) E_i , valamint a fajlagos befektetett energia (specific input energy) E_{is} az alábbi összefüggések alapján határozható meg:

$$E_i = m_p g h_0$$

és

$$E_{is} = gh_0$$

ahol m_p a szemcse tömege, h_0 a szemcse alja és az ütközési felszín közötti távolság, g a gravitációs gyorsulás. Mivel a szemcsék törési szilárdsága a szemcseméret csökkenéssel nő, ezért ezen eljárás csak a nagyméretű szemcsék vagy kis szilárdságú anyagok törésére alkalmas (Kim & Cho, 2010; Mörsky és mtsai., 1996), 20 m magasról történő ejtés esetén is csak 200 J kg^{-1} energia adható át (A. Salman és mtsai., 2007). A nagy ütközési sebességet alkalmazó módszerek esetében a szemcsék felgyorsítást követően ütköznek az ütközési felülettel, így nagyobb energia adható át az előző csoporthoz képest. A szemcsék felgyorsítására leggyakrabban alkalmazott módszer a sűrített levegővel történő kilövés, amely révén $50\text{--}60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sebesség is elérhető. Ez a módszer akár $1200\text{--}1800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ nagyságrendű energia átadását is lehetővé teszi (Cleaver és mtsai., 1993; Dan és Schubert, 1990). A centrifugális gyorsulást alkalmazza a szemcsék felgyorsítására a forgó ütközéses törési vizsgálat (rotary impact test) (Shi és mtsai., 2009). A szemcséket egy forgó rotor gyorsítja fel, majd azok egy fűrészfogszerű kialakítású, álló gyűrű felületének ütköznek (Bonfils és mtsai., 2016). A fűrészfogszerű kialakítás lehetővé teszi a szemcsék merőleges becsapódását (4. ábra bal alsó). A módszerrel a szemcsék $60\text{--}140 \text{ ms}^{-1}$ sebességtartományban gyorsíthatók fel, amely akár 10000 J kg^{-1} fajlagos törési energia is elérhető, így a módszer alkalmas kisméretű szemcsék törésére is.

A vizsgált módszercsoportba tartozó eljárások és vizsgálóberendezések jelentős része a második kategóriába sorolható, amelyben az ütközéses igénybevétel két felület között megy végbe. Ebbe a csoportba tartozik: a esősúlyos, a kétingás- és az osztott Hopkinson rudas vizsgálat.

Az egyszemcse törési vizsgálatok egyik legegyszerűbb és gyakran alkalmazott módszere az esősúlyos vizsgálat (drop weight test) (Öfner és Zaurin, 2016; Pauw és Maré, 1988; A. Salman és mtsai., 2007). Az esősúlyos vizsgálóberendezés fejlesztésében meghatározó szerepet töltött be az ausztráliai Julius Kruttschnitt Mineral Research Center a szabványosított berendezés és mérési eljárás kidolgozása és bejegyzése a nevükhöz fűződik. A berendezés pontos műszaki paraméterei nem ismertek, de számos kutató épített azonos elven működő saját vizsgáló berendezést (Bwalya és Chimwani, 2020; Genç és mtsai., 2004; Hosseinzadeh és Ergün, 2012; Krogh, 1980; Pauw és Maré, 1988). A vizsgálat elvégezhető egyedi mintadarabokon, mint fűrómagok, kőzet darabok, illetve szemcsealmazon, utóbbi esetben viszont csak a halmaz viselkedéséről kapunk információt, a halmazt alkotó egyes szemcsékről nem. A vizsgálati berendezés elvi rajzát az 5. ábra mutatja be. Egy tetszőleges méretű és tömegű súlyt a csőrölőberendezés egy előre meghatározott magasságig emel, ahol rögzíti, majd a vizsgálat során egy kioldó mechanizmus segítségével a súly szabadesésben a mintára zuhan, amely az

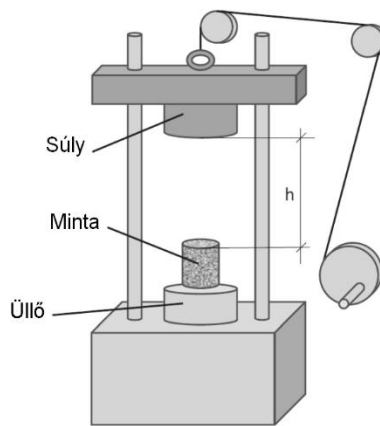
ülőfelületen helyezkedik el. Az aprítási energia a súly tömegének és az ejtési magasságnak a változtatásával szabályozható, amely a következő összefüggéssel adható meg:

$$E_a = m_b * g * (h_k - h_v) [m^2 kg/sec^2]$$

ahol m_b a súly tömege [kg] és h_k a súly aljának magassága az ejtést megelőzően [m] és h_v a súly aljának magassága az ejtést követően [m]. Ebből a fajlagos aprítási energia számítható a szemcse tömegének ismeretében:

$$E_{faj} = E_a / m_{sz} [kWh/t]$$

ahol m_{sz} a szemcsék átlagos tömege [g].



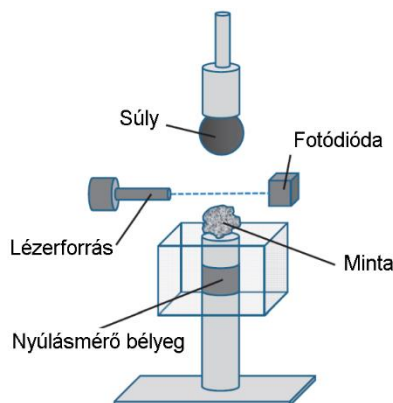
5. ábra. Esősúlyos vizsgálati berendezés vázlatos rajza (forrás: Mwaga és mtsai., 2015)

A törést követően a keletkezett töret szemcseméret eloszlásának meghatározása száraz szítalelemzéssel történik. A kiindulási anyag 1/n-ed részénél kisebb szemcseméretű töret és az aprítási energia között a következő összefüggés írható fel:

$$t_n = A * (1 - e^{-b * E_{faj}})$$

ahol E_{faj} fajlagos aprítási energia [kWh/t], A és b a közetre jellemző paraméterek, amelyek függvény illesztéssel határozhatók meg (Ballantyne és mtsai., 2017; Mwaga és mtsai., 2015; Narayanan és Whiten, 1983; Umucu és mtsai., 2013). Leggyakrabban a t_{10} indexet szokták számolni. A módszer egyik fő előnye az egyszerű berendezéskialakítás, amely lehetővé teszi, hogy a hitelesített mérőeszközökön túl számos kutatólaboratórium saját vizsgálóberendezést fejlesszen. További előny a törési energia széles tartományban való szabályozhatósága, a széles szemcseméret tartományban történő alkalmazhatóság, valamint a rövid vizsgálati idő. Emellett a módszer alkalmas szemcsehalmazok törési jellemzőinek vizsgálatára is, bár ez utóbbi esetben az egyes szemcsék törésére vonatkozó információ nem nyerhető ki, csupán a halmaz szintjén értelmezhetők az eredmények. (Genç és mtsai., 2004). A módszer hátránya, hogy az egyes törési fázisok, illetve a törést megelőző deformáció energiaszükséglete nem mérhető. Szintén hátrányként említhető meg a kiindulási anyag szemcseméretének és alakjának hatása a törésre (Gan és mtsai., 2019; Norazirah és mtsai., 2016; Unland és Al-Khasawneh, 2009).

Az esősúlyos vizsgálat továbbfejlesztésének eredményeként jött létre a műszerezett esősúlyos vizsgálati eljárás. Legelterjedtebb változata a gyors terheléses erőmérő cellával (ultrafast load cell device -UFLC) szerelt esősúlyos berendezés. A módszer működési elve alapvetően megegyezik a korábban ismertetett esősúlyos vizsgálatával, azonban kiegészül a törési folyamat során elnyelt energia pontos mérésének lehetőségével. A vizsgálóberendezés mintatartó egysége egy hosszú, függőleges acélrúd, amelyre nyúlásmérő bélyegeket (strain gauge) rögzítenek a mechanikai igénybevétel regisztrálása céljából (6. ábra). A vizsgálati anyagot a rúd tetejére helyezik, az igénybevétel egy gömb alakú súly ráejtésével történik. A berendezés kiegészül egy lézer forrással és fotodiódával, amely az eső súly sebességének meghatározását szolgálja. A súly ejtését követően a mintatartóban terjedő lökeshullámokat a nyúlásmérő bélyegek mérik és rögzítik (Tavares és King, 1998). A szemcse vagy szemcsék által elszenvedett nyomás nem direkt módon mérhető, hanem számítható az eső súly sebességéből és a mintatartó deformációjából.

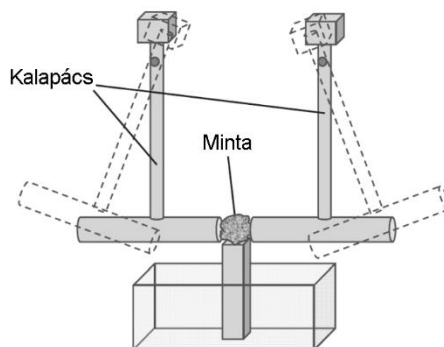


6. ábra. Gyors terheléses erőmérő cellával szerelt esősúlyos berendezés (forrás: A. Salman és mtsai., 2007)

Az esősúlyos vizsgálati csoporthoz kapcsolódó legújabb fejlesztés a HIT (Hardness Index Tester) (Kojovic, 2016), amely egy egyszerűsített, terepi körülmények között használható eljárás. A hagyományos DWT berendezést úgy alakították át, hogy az ültő mintatartó edényre cserélték, míg a súly helyett egy kalapácsszerű szerkezet került beépítésre, amelyet két emelőkar működtet. Amint azt a módszer szabadalmaztatója is hangsúlyozza, nem a DWT és UFCL módszereket hivatott helyettesíteni, ugyanis ezek pontosságát nem tudja reprodukálni, hanem egy terepi körülmények között jól alkalmazható módszer (Kojovic, 2016).

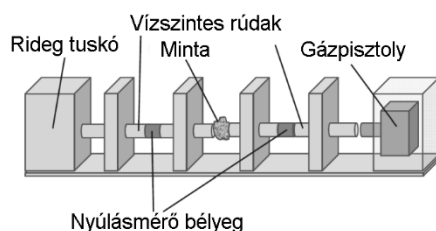
A kétingás vizsgálati eljárás (twin pendulum test) alapötlete az volt, hogy a már fent leírt ejtési vizsgálatok során a minta által a mintatartónak átadott energia és ezáltal az energiavesztesség kiküszöbölhető legyen (Bond, 1946; Eswaraiah és mtsai., 2010). A vizsgálati berendezés egy mintatartóból és két ingára szerelt kalapácsból áll (7. ábra). A mintatartóra rögzített egyedi szemcse törése a meghatározott magasságból elengedett két ingára szerelt kalapács között

történik. A kalapácsok ejtését addig kell ismételni amíg a szemcse tönkremegy, miközben a kalapácsok szögkitérését folyamatosan növekedik.



7. ábra: Kétingás vizsgáló berendezés (forrás: Mwaga és mtsai., 2015)

Az osztott Hopkinson-rudas vizsgáló módszer (Split Hopkinson pressure bar test) széles körben alkalmazott eljárás az anyagvizsgálatban és a közetmechanikában, különösen a feszültség-hullámok által kiváltott deformációk tanulmányozására. A kísérleti berendezés két hosszú, vízszintesen elhelyezett, rugalmas rudból áll, melyek csak rugalmas alakváltozást szenvednek. A vizsgálati minta a rudak közé kerül, keménysége alacsonyabb, mint a rudaké. A mechanikai terhelést leggyakrabban gázipisztollyal generálják: a kilőtt lövedék becsapódik az ütés továbbító rúd, amely az első rúdnak ütközik. Az ütközés hatására feszültség-hullámok keletkeznek, amelyek részben a második rúd, részben visszaverődnek az elsőhöz. A hullámok terjedését nyúlásmérő bélyegekkel mérik. A mintában kialakuló feszültség az impulzus nagyságával arányos, ebből számítható a töréshez szükséges energia. Az első rúd, a második rúd továbbított, illetve visszavert hullámok energiájának különbsége feltételezhetően a minta által elnyelt energia, amely az alakváltozáshoz és töréshez szükséges. Az impulzusok többszöri oda-vissza terjedését egy impulzusblokkoló szerkezet akadályozza meg (Bbosa és mtsai., 2006).



8. ábra: Osztott Hopkinson rudas vizsgáló berendezés vázlatos rajza (forrás: Mwaga és mtsai., 2015)

Az előzőekben bemutatott vizsgálati eljárások az igénybevételi sebesség és az érintkezési pontok száma szerint csoportosítottuk, amely egyben meghatározza az igénybevétel módját. Brown (1997) szerint az egy ponton történő érintkezést alkalmazó módszerek, mint a forgó ütközéssel történő vizsgálat, nagyobb mértékű aprózódást eredményeznek, mint a két felület között végbemenő igénybevételt alkalmazó módszerek. Az igénybevételi sebesség törésre

gyakorolt hatásáról némileg eltér a szerzők véleménye, Wu és Pollard (1993), Shi és Kojovic (2007) szerint az igénybevételi sebességtől függ a törés mivel ez határozza meg a repedés terjedés sebességét, ugyanakkor Tavares és King (1998) szerint az igénybevétel sebességének nincs jelentős szerepe, amelyet Tavares és King (2002) azzal magyarázott, hogy egyes anyagok nem rugalmas viselkedést mutatnak az igénybevétel során a fokozatos repedésfelhalmozódás miatt a tönkremenetelt megelőzően, lassúbb repedésterjedési sebességet mutatva. Ennek értelmében az igénybevételi sebességre adott válasz inkább anyagtulajdonság függő, a rugalmas és plasztikus alakváltozási tulajdonságaik eredménye.

Saeidi és mtsai. (2016a), Saeidi (2016) rámutattak az igénybevételt átadó felület geometriájának hatására is az anyag aprózódása során. A törést egy több szakaszból álló folyamatként modellezik, egy elsődleges törési fázis (primary breakage function) során az igénybevételi energia átadását követően a szemcsében bekövetkezik a tönkremenetel és adott szemcse méret eloszlású töretet eredményez, a szemcsék egy része a törési zónában marad míg egy része távozik onnan, ezt írja le az osztályozási függvény (classification function). Az első törési esemény során bekövetkezett tönkremenetelhez szükséges energiánál általában több adódik át a szemcsének, így a kiválasztást követően újabb törés tud végbe menni, ezt írja le a kiválasztási függvény (classification function). Az igénybevételt átadó felület geometriája, valamint a szemcséhez viszonyított mérete, az anyag ridegségével együtt, fogja meghatározni, hogy az anyag a törési zónában marad-e és ismételt igénybevételnek lesz kitéve.

A lassú nyomást alkalmazó módszerek közül az utóbbi években a nagy nyomású hengerpár, lassú terhelés átadására alkalmas, mint pl. az Istron compression, vizsgáló berendezések terjedtek el. A berendezés két, egymással forgó hengerből áll, egy rögzített és egy hidraulikával mozgatható hengerből, a módszer vázlatos rajza a 4. ábra jobb alsó sarkán látható. A hidraulikus megoldásnak köszönhetően a két henger közötti résméret és a terhelés állítható, a maximálisan átadható igénybevétel 750-20,000 kN között változhat (Alves és mtsai., 2015). A vizsgálati módszerhez kevesebb minta szükséges, mint az előzőekben ismertetett egyszemcse törési vizsgálatokhoz, ugyanakkor Bulled és Husain (2008) rámutat az eljáráshoz szükséges mintamennyiség, leggyakrabban fúrómag darabok, magas költségeire és alternatívaként a statikus nyomás tesztet (Static Pressure Test) vezette be. Számos más, hasonló elvet alkalmazó vizsgálati eljárás ismert különböző szakirodalmi forrásokból (Saeidi és mtsai., 2017; Yahyaei és mtsai., 2014). Az utóbbi években megnövekedett az igény az anyagok törési tulajdonságainak pontosabb meghatározására, ami ösztönözte olyan új vizsgálati módszerek fejlesztését, amelyek alacsony költségvetés mellett, nagy számú minta gyors vizsgálatát teszik lehetővé, miközben megbízható eredményeket szolgáltatnak. A Geopyörő vizsgálati berendezés a bemutatott vizsgálati eljárások közül a legújabb, Bueno és munkatársai 2021-ben

közölték a módszer első leírását A berendezés két egymással szemben forgó fém borítású kerékből áll, amely között a résméret állítható így befolyásolva az aprítási fokot. A mérés során a hengereket állandó kerületi sebességgel forognak, a törés végbemenetele során a töréshez szükséges energiát a kerületi sebesség csökkenéséből számolják. A résméret változtatásával és ezáltal a szemcseméret-résméret arányából adódó aprítási fok változtatásával különböző törési energiák érhetők el a vizsgálat során. A feladás és a töret eltávolítása is automatizált, valamint az adatrögzítés és kiértékelés is, amely felgyorsítja a folyamatot (Bueno és mtsai., 2021, 2024).

2.3.4. Kőzetmechanikai vizsgálatok

A módszercsoportban a Nemzetközi Kőzetmechanikai Társaság által javasolt módszerek tartoznak: egytengelyű nyomószilárdság, brazil húzószilárdság, pont terheléses vizsgálat, Schmidt-kalapácsos vizsgálat, ütmunka meghatározása (Impact strenght test) (Comakli & Cayirli, 2019; Kahraman és mtsai., 2018; Kameneva és mtsai., 2016). Legelterjedtebbek a különböző szilárdsági vizsgálatok, de kivitelezésük időigényes, speciális berendezéseket igényel és érzékeny a vizsgált minta minőségére, ezért a többi módszercsoporthoz viszonyítva ritkábban alkalmazzák. Az aprítási folyamatok modellezésének előtérben kerülésével egyre inkább előtérben kerülnek a módszercsoport eljárásai, főleg az egytengelyű nyomószilárdság és a pont terheléses vizsgálatok, mivel ezek számos modellezési eljáráshoz adnak információt (Barbosa és mtsai., 2023; Esmailzadeh és mtsai., 2017; Saeidi, 2016; Saeidi és mtsai., 2017).

2.4. Az anyagtulajdonság-törés közötti összefüggések a szakirodalomban

A kőzettani jellemzők és az apríthatóság, őrlhetőség, valamint a termékminőség közötti összefüggés évtizedek óta foglalkoztatja a kutatókat. A magyar nyelvű szakirodalomban Beke (1974) utal arra, hogy a cementipari alapanyagok őrlhetőségét elsősorban azok szöveti szerkezete határozza meg. Eredményei ellentmondanak az akkoriban elterjedt nézeteknek, amelyek szerint az őrlhetőséget elsősorban az anyag keménysége, szilárdsága, rugalmassága és porozitása befolyásolja. Csőke (1975, 1976, 1979) a bauxitok dúsíthatóságát tanulmányozta, ennek kapcsán fontos összefüggéseket állapított meg a bauxitok szövete és annak apríthatósága, dúsíthatósága között. A nemzetközi szakirodalomban szintén számos szerző foglalkozik a témával (Abdelhaffez, 2020; Bonnici, 2012; Comakli & Cayirli, 2019; Kecec és mtsai., 2006; Lois-Morales és mtsai., 2022; Pérez-Barnuevo és mtsai., 2013; Petruk, 2000; Tugrul & Zarif, 1999), leginkább az érces ásványi nyersanyagok feldolgozásához kapcsolódik a téma terület kutatása, ahol a fókusz elsősorban a hasznos komponenseket tartalmazó ásványok megfelelő feltártságának elérése és az ehhez vezető aprítási és őrlési folyamatok optimalizálása. A szén tulajdonságai és apríthatósága közötti összefüggések kutatásával is számos szerző foglalkozik (Hower, 1998; Jorjani és mtsai., 2008; Trimble és Hower, 2003; Ural és

Akiylidz, 2004). Az utóbbi évtizedekben egyik meghatározó kutatási irányzat az interdiszciplináris geometallurgia (angolul geometallurgy), amely a geológia, bányászat, gotechnika, metallurgia, bányagazdaságtan és környezet tudományokat ötvözi annak érdekében, hogy a bányászati projekt gazdasági értékét maximalizálja, csökkentse a kockázatot, növelje a rugalmasságot és az erőforrásokkal jól gazdálkodjon (Dominy és mtsai., 2018; López-Benito és mtsai., 2020). A bányától a malomig (from mine to mill) koncepciót követve, koncepció értelmében a kitermelt nyersanyag földtani jellemzőinek feltárása és azok prediktív modellekbe történő integrálása lehetővé teszi az anyag viselkedésének előrejelzését az aprítási és őrlési folyamatok során. Az elmúlt években az aprítási folyamatok optimalizálására irányuló törekvések következtében jelentős hangsúlyt kaptak a különböző modellezési eljárásokkal és azok validálásával foglalkozó kutatások (Bonfils és mtsai., 2016; Klichowicz és mtsai., 2022; Lindqvist és mtsai., 2007; Saeidi és mtsai., 2016b; Wang, 2015). E kutatások célja a kőzetek tulajdonságainak és igénybevétel alatti tönkremenetelének modellezése különböző számítási eljárások alkalmazásával, nagymennyiségű szakirodalmi adat felhasználásával, amelyeket laboratóriumi mintákon végzett mérések eredményeivel validálnak. Általában egy-egy kőzet típusra koncentrálnak, leggyakrabban a gránitra (Klichowicz és mtsai., 2022; G. Liu és mtsai., 2018). A nem érces ásványi nyersanyagokkal – így a zúzottkő gyártás alapanyagául szolgáló kőzetekkel – kapcsolatban viszonylag kevés tanulmány vizsgálja az anyagtulajdonságok és azok apríthatósága közötti összefüggéseket. A szakirodalom túlnyomó része inkább a végtermék tulajdonságaira, például a kopásállóságra és az aprózódással szembeni ellenállásra helyezi a hangsúlyt.

Wills és mtsai. (2006) szerint a hatékony ásványelőkészítési technológiákhoz elengedhetetlen a feldolgozott nyersanyag kőzettani jellemzőinek pontos ismerete, de nem csak a feldolgozás szempontjából értékes és meddő ásványok pontos ismerete, hanem ezek eloszlása, társulása, alakja és térbeli szerkezete, az az a szövet is. Minden szöveti elem, beleértve a kristályossági fokot, szemcsék határán fellépő kapcsolatokat, szemcsék irányítottságát, repedezettséget, de legfőképpen a szemcsék mérete és az egymáshoz viszonyított kapcsolata van leginkább hatással az aprításra, feltárára (Petruk, 2000). A különböző szövet-szerkezeti elemek hatásáról és ezek érvényesüléséről a kutatók véleménye némileg eltér, az átfogó, minden szöveti-szerkezeti elem hatását vizsgáló tanulmányok ritkák, inkább csak a szakirodalmi adatok összefoglalásával foglalkozó cikkek nyújtanak átfogó képet, ugyanakkor ezek gyakran csak általános következtetéseket tartalmaznak.

Cai és mtsai. (2007), Haffez (2012) Kecec és mtsai. (2006), Popov és mtsai. (2020), Wang (2015) szerint a kőzettest szilárdságát annak kőzettani és szerkezeti jellemzői befolyásolják nagymértékben. A kőzetmechanikai és törési vizsgálatokat gyakran alkalmazzák a

törőberendezésekben végbemenő folyamatok modellezésére, ezért felhasználhatók a kőzet-tani jellemzők és apríthatóság közötti kapcsolat vizsgálata során is. Összefoglaló tanulmányokban a kőzetek mechanikai tulajdonságai, ásványtani jellemzői és szemcsemérete közötti összefüggéseket elemezték. Regresszióanalízist végeztek a szakirodalomból származó adatokon, és lineáris kapcsolatot azonosítottak az átlagos szemcseméret és a mechanikai tulajdonságok között. Eredményeik szerint az átlagos szemcseméret növekedése a kőzetek nyomószilárdságának csökkenésével járt együtt. Brattli (1992a) szerint ez különösen igaz az 1 mm-nél nagyobb átlagos szemcseméretű kőzetek esetében, ugyanakkor kiemeli, hogy 1 mm alatt ez a kapcsolat már nem lineáris. Ennek magyarázata lehet, hogy a kisebb méretű szemcsék felülete kisebb és a mikrorepedések hosszúság-szélesség aránya csökken a szemcseméret csökkenésével. A szemcseméret csökkenésével a szemcsék fajlagos felülete nő, ami a kohéziós erők növekedéséhez vezet, ezért a finomszemcsés kőzetek szilárdsága mindig jelentősen nagyobb, mind a közép- és durvaszemcsés kőzeteké (Popov et al. 2020). Comakli és Cayirli (2019) a nagy méretű szemcsék és a mátrix arányának hatását emeli ki. Tanulmányukban a szöveti koeficiens (TC) és a kőzet fizikai és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatot vizsgálták gránit, trachandezit, bazalt, márvány, mészkő és homokkő mintákon. Vizsgálataik során a szöveti koeficiens és az egytengelyű nyomószilárdság között pozitív korrelációt állapítottak meg, akárcsak Esmailzadeh és mtsai. (2017), Ozturk és mtsai. (2004), Howarth és Rowlands (1987). Comakli és Cayirli (2019) tanulmányukban kiemelik, hogy a kőzetek eredet szerinti csoportosítása – magmás, metamorf és üledékes – előnyös a tulajdonságaik közötti korrelációk vizsgálatakor. Eredményeik szerint a regressziós görbék illeszkedése jelentősen eltér a három kőzettípus esetében: a legjobb illeszkedést a magmás kőzeteknél tapasztalták ($R^2 = 0,94$), míg a metamorf kőzeteknél $R^2 = 0,74$, az üledékes kőzeteknél pedig $R^2 = 0,81$ értéket mutattak. Ezen túl a szemcseméret és a TC, valamint az apríthatósági index (CI) és TC kapcsolatát is vizsgálták. Az apríthatósági index meghatározása pofás- és hengerestörő berendezéssel történt. Mindkét esetben negatív lineáris korrelációt azonosítottak a CI és a TC között, vagyis a TC növekedésével a CI értéke csökkent. A hengerestörő esetében a TC hatása erőteljesebbnek bizonyult: az illesztett függvény determinációs együtthatója (R^2) 0,79 volt, míg a pofástörő esetében 0,52. A töret szemcseméret és a TC közötti kapcsolatot a d_{50} és d_{80} nevezetes szemcseméretek alapján elemezték. Mindkét törőberendezés esetében pozitív korrelációt állapítottak meg, azonban a hengerestörőnél erősebb összefüggés mutatkozott. Szintén pozitív korreláció állapítható meg a TC és a porozitás között, mivel minél nagyobb a TC érték annál több a kőzetben a hosszúkás szemcse (Ozturk és mtsai., 2004). Sun és mtsai. (2017) szerint a TC növekedésével lineárisan növekszik az egytengelyű nyomószilárdság, kivételt képezve a vetőbreccsa. Ugyanakkor kiemelik, hogy ugyan számos kutatás foglalkozik a kőzetszövet és szilárdság kapcsolatával, az eredmények között sok a hasonlóság és átfedés, de a különböző típusú és eredetű kőzeteken végzett elegendő mennyiségű és

minőségű adatgyűjtés hiánya nem teszi lehetővé az eredmények validálását. Liu és mtsai. (2018) egy dimenzió nélküli heterogenitási indexet (heterogeneity index-H) vezettek be, amely az átlagos szemcseméreten túl a legkisebb és legnagyobb szemcseméretet is figyelembe veszi és egy mintán belül az alkotó szemcsék szemcsemérete közötti különbséget (grain size difference) számszerűsíti. Kutatási eredményeik szerint az anyag szemcsemérete jelentős hatást gyakorol a repedések kialakulásában és terjedésére, ezáltal a kőzet szilárdsági jellemzőire is. Kecec és mtsai. (2006) az AGSI, porozitás és sűrűség hatását vizsgálták a kőzet apríthatóságára és őrlhetőségére. Kutatásaik rámutattak arra, hogy abban az esetben, ha csak egy típusú kőzet esetében vizsgáljuk ezen jellemzők hatását akkor általában megállapítható valamilyen korreláció, ugyanakkor különböző típusú kőzetek, mint mélységi magmás, kiömlési és metamorf kőzetek adatai esetén próbálunk összefüggést keresni, akkor általában nem mutatható ki korreláció.

Abdelhaffez (2020) a kőzetszövet és a Bond-munkaindex közötti kapcsolatot vizsgálva megállapította, hogy az aprítási energiaigényt elsősorban az érc- és meddőásványok közötti kohézió, a meddőásványok keménysége, valamint a jelen lévő szulfátásványok (pl. pirit, kalkopirit, galenit, szfalerit) eltérő keménysége és mennyisége befolyásolja. Krómérceken végzett kutatásai során kimutatta, hogy a kis keménységű meddő ásványok, mint a szerpentin és magnezit könnyebb őrlhetőséget eredményezett. A szerző kitér arra is, hogy a vetőkkel és átalakulási zónákkal átjárt kőzetek Bond-munkaindexje jelentősen kisebb, mint az üde kőzeteké. Oyarzún és Arévalo (2011) kutatási eredményei szerint a hasonló ásványtani összetétellel rendelkező kőzetek Bond-munkaindexje eltérő, tehát az ásványos összetétel és a Bond-munkaindex közötti egyértelmű kapcsolat nem állapítható meg, ugyanakkor a kőzetszövet hatását a Bond-munkaindexre sikeresen bizonyították kísérlet sorozatokkal. Az általuk vizsgált hasonló ásványtani és kémiai összetételű latit porfír és dácit porfír Bond-munkaindexje eltért, míg az eltérő ásványos összetételű gabbró és tonalit munkaindexje hasonló volt, mely alapján megállapították, hogy minél nagyobb a szemcsék közötti kötési energia, annál nagyobb energia szükséges az aprításhoz. Kecec és mtsai. (2006) szintén arra a következtetésre jutottak, hogy az ásványtani összetétel nincs hatással az őrlhetőségre, valamint a töret szemcseméret eloszlására, ugyanakkor maga a szövet hatással van azonos kőzettípusok esetén az apríthatóságra, őrlhetőségre. Ugyanakkor Wang (2015) szerint az egyes ásványok eloszlásának, valamint a kis és nagy keménységű ásványok arányának jelentős szerepe van a repedések kialakulásában, ugyanis a nagyobb keménységű ásványok feszültség hatására plasztikusan deformálódnak, míg a kisebb keménységgel rendelkező ásványokban valószínűbb a repedések megjelenése, ezért a kis keménységű, puhább ásványok aránya lényegesen befolyásolja a kőzet törési folyamatát.

Pérez-Barnuevo és mtsai. (2013) szerint a szemcseméret, a szemcsehatárok egyenetlenségei és az összenövések típusa van leginkább hatással a kőzet szilárdságra. Kutatásaik során szulfidos rézérccek szövétét, főként a feltártságot és az összenövés típusokat számszerűsítették MLA módszerrel. Az egyes ásványfázisok határának számszerűsítésére szövet komplexitási indexet (ITC) vezették be, amely egy ideális, két szemcse közötti összenövési felület és a ténylegesen mért határfelület arányaként definiálható. Az ásványszemcsék egyenetlen, szinuszos határok menti összenövése és ezen határok mentén lejátszódó másodlagos ásványképződések a szemcsék közötti kötőerő mértékének növekedését eredményezi. Ellenben két egyenletes ásványfelület esetén a kettő közötti kötőerő lényegesen kisebb lesz.

Yildirim (2016) részletesen tanulmányozta az átalakulási zónák és azok ásványtársulásának hatását az aprításra. Az átalakulás intenzitása megállapítható, ha az üde kőzet ásványos összetételét összehasonlítjuk az átalakulási zóna ásványos összetételével, ezen átalakulás leírható az ásványhelyettesítések és a szövet tönkremenetelének leírásával. Kutatásai alátámasztották, hogy az átalakulási zónákat tartalmazó kőzetek Bond-munkaindex csökkent az üde kőzetekéhez képest.

2.5. Az anyagtulajdonság és kőzetfizikai tulajdonságok közötti összefüggések a szakirodalomban

A nyersanyag kőzettani jellemzői és a kopásállóság, valamint az aprózódással szembeni ellenállás (továbbiakban együttesen kőzetfizikai tulajdonságok) kapcsolatának kutatása az építőanyag célú felhasználás fokozódásával előtérbe került. A zúzottkő előállítási folyamatok optimalizálásának felismerése a téma kutatásának, és a témában megjelent publikációk számának növekedését eredményezte, mint azt Strzałkowski és mtsai. (2021) is megállapították. A változó minőségű nyersanyagokból történő, a minőségi követelményeknek megfelelő termék előállítása megköveteli egyrészt a gyártási folyamat hatásának, másrészt az alapanyag tulajdonságainak és azok termékre gyakorolt hatásának pontos ismeretét.

Lindqvist és mtsai. (2007) szerint az egyes ásványi alkotók keménysége, szilárdsága, nyomószilárdsága és rugalmassági modulusa határozza meg a kőzet mechanikai tulajdonságait. Az elsődleges ásványos összetétel, mint pl. a kvarc és földpát tartalom hatásáról a szakirodalomban található eredmények eltérőek. Önmagában ezen ásványok mennyisége és ezek hatása nem minden esetben bizonyított. Számos szerző (Adomako és mtsai., 2021; Askaripour és mtsai., 2022; Strzałkowski és mtsai., 2021) inkább a kvarc és földpát arányának hatását emeli ki. Ademila (2019), Ajagbe és mtsai. (2015) arra a következtetésre jutottak, hogy a kvarc-földpát arány egyenesen arányosságot mutat a Los-Angeles mutatóval (aprózódással szembeni ellenállás). Räisänen (2004) gránitokon végzett kutatásai során a hornblende és LA között

mutatott ki kapcsolatot, ugyanakkor feltételezése szerint ez inkább az ásványszemcsék határainak komplexitásából adódik. Afolagboye és mtsai. (2016) szerint a magas kvarc, földpát vagy kettő együttesen hozzájárul a kőzetek kopással- és aprózódással szembeni ellenállásának növeléséhez. Faruk Apaydin és Yilmaz (2021) szintén bizonyította, hogy a földpáttartalom növekedésével a LA mutató értéke is nő bazaltokon esetében. Okogbue és Aghamelu (2013), Pomonis és mtsai. (2007) ugyanakkor bebizonyította piroklasztitokon és doleriteken végzett mérésekkel, hogy a mállott földpátok inkább csökkentik, mintsem növelik az aprózódással és a kopással szembeni ellenállást. Ajagbe és mtsai. (2015) eredményei szerint az amfibol jelenléte csökkentette a kőzetek kopás- és aprózódással szembeni ellenállását. Brattli (1992), H. Liu és mtsai. (2005) bazikus intrúzív kőzeteken (pl. gabbró) végzett méréseik rámutattak, hogy az általuk vizsgált kőzetek esetében a fizikai tulajdonságokat leginkább a kőzet piroxén- és amfibol tartalma befolyásolja. A másodlagos, mállástermékeként megjelenő ásványok hatásáról is eltérő adatok találhatók a szakirodalomban. Adomako és mtsai. (2021) cikkében a mállási termékként megjelenő szerpentin ásvány hatását vizsgálta ultrabázikus kőzetekben, hatása nem volt kimutatható. A smektit- és illit tartalom, amely szintén mállásra utal, Petrounias és mtsai. (2018) szerint csökkentette az általuk vizsgált andezitek aprózódással szembeni ellenállását. Okogbue és Aghamelu (2013) az amorf fázis és a LA mutató között pozitív korrelációt állapított meg piroklasztitok esetében. A csillámok hatásáról szintén ellentmondásos információk találhatók a szakirodalomban, ami az ásvány genetikájából adódik. Lindqvist és mtsai. (2007) szerint a csillámok hatását a méretük és irányítottságuk befolyásolja, a kisméretű, véletlenszerűen elhelyezkedő szemcsék esetében, mint az Nalsund (2010) esetében is olvashatjuk, akár 20%-os csillámtartalom sincs hatással a kőzetek mechanikai tulajdonságára. H. Liu és mtsai. (2005), Tavares & das Neves (2008) meglátása szerint, a csillámtartalomnak nincs közvetlen hatása az aprózódással szembeni ellenállásra, ugyanakkor, ha a csillámok irányítottak, nagyobb kiterjedésű foliációkban rendeződnek akkor gyengeségi felületként elősegítik a repedésterjedést.

A szövet hatása, akárcsak a törés esetén, igen jelentős és legtöbb szerző erősebb kapcsolatot állapított meg a szövet és a kőzETFizikai tulajdonságok között (Brattli, 1992), mint az ásványos összetétel és a kőzetmechanikai tulajdonságok között. Adomako és mtsai. (2021) szerint általánosan elmondható, hogy az átlagos szemcseméret csökkenésével, főleg az 1 mm-nél nagyobb tartományban, a mechanikai tulajdonságok csökkenését eredményezi. Ezzel ellentétben H. Liu és mtsai. (2005) szerint az 1 mm-nél kisebb szemcseméret esetében jelentős az átlagos szemcseméret hatása a mechanikai tulajdonságokra, míg az 1 mm-nél nagyobb szemcseméret tartományban csökken a kettő közötti kapcsolat linearitása. A szemcseméret és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat azzal magyarázható, hogy az átlagos szemcseméret hatással van a repedésterjedésre, ugyanis a szemcseméret növekedésével a

repedések hosszúság-szélesség aránya nő, a repedés csúcson a feszültség nő, így könnyebben tud tovább terjedni, míg a szemcseméret csökkenésével ennek ellentétje következik be, azaz nagyobb erő kell ahhoz, hogy a repedés tovább terjedése fentartható legyen. Åkesson és mtsai. (2001) kiemeli a szemcseméreten túl a szemcsék közötti méretkülönbség fontosságát, illetve a finomszemcsés mátrix hatását, kimutatva, hogy akár kis mennyiségű finomszemcsés mátrix jelentősen növeli a kopással és az aprózódással szembeni ellenállást is. Kimutatták, hogy az általuk bevezetett mutató, amely az ásványszemcsék felületének komplexitását írja le az által, hogy 1 mm-es vonal mentén hány szemcsehatár található, és a kopás között erősebb kapcsolat van mint, az aprózódás között. Török és Czinder (2017) eredményei alapján a finomporfíros szövetű andezit kopásállósága 7% volt, a durvaporfíros szövetű andezit esetében pedig 16 %. A szemcsehatárok komplexitásának befolyását számos szerző kihangsúlyozza (Adomako és mtsai., 2021; Lindqvist és mtsai., 2007; G. Liu és mtsai., 2018). Åkesson és mtsai. (2003) kutatásai alapján az idomorf szövet, amelyben az ásványok saját alakúak és egyenletes felülettel rendelkeznek, kisebb keménységet és aprózódással szembeni ellenállást mutat, mint a xenomorf szövet, amelyben a szemcsék felülete egyenetlen.

2.6. Adatfeldolgozási módszerek

A különböző közettani és mechanikai paraméterek közötti összefüggések vizsgálatára a szakirodalomban elsősorban két alapvető statisztikai módszert alkalmaznak: a korrelációs számítást és a regresszióanalízist. Mindkét eljárás alkalmas a változók közötti kapcsolat kimutatására, azonban céljuk és alkalmazhatóságuk eltérő. A korrelációs számítás, mint például a Pearson-féle korrelációs együttható (r) vagy a Spearman-féle korrelációs együttható (ρ), a változók közötti kapcsolat irányát és erősségét számszerűsíti. A Pearson-korreláció lineáris kapcsolatra érzékeny, míg a Spearman-féle korreláció nemlineáris, monoton összefüggések vizsgálatára is alkalmas ugyanakkor ezek a módszerek nem szolgáltatnak matematikai modellt az összefüggésre. A Pearson-korrelációt Ajagbe és mtsai., (2015), Czinder & Török (2021), Faruk Apaydın & Yılmaz, (2021) alkalmazta a kőzet tulajdonságok és azok mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatok vizsgálatára, míg a Spearman korrelációt Adomako és mtsai. (2021), Miskovsky és mtsai. (2004), csak néhány recens tanulmányt említve.

A regresszióanalízis ezzel szemben egy matematikai modell segítségével írja le az egyik változó (függő változó) viselkedését egy vagy több másik (független) változó függvényében. A regresszióanalízis statisztikai módszer, amely egy vagy több független változó és egy függő változó közötti összefüggést ír le matematikai modell segítségével. Bár az egyik legismertebb formája az egyszerű lineáris regresszió, amely két változó között a legjobban illeszkedő egyenes meghatározására szolgál, a regresszió általánosabb értelemben nem korlátozódik lineáris kapcsolatokra. A nemlineáris regresszió például exponenciális, logaritmikus vagy egyéb

függvényformák révén képes komplex összefüggéseket is megragadni. Előnye, hogy nem csupán a kapcsolat meglétére utal, hanem kvantitatív modellt is nyújt, amely alapján az egyik változó viselkedése a másik(ak) ismeretében megbecsülhető (Montgomery és mtsai., 2021). A kapcsolat erősségét és a modell illeszkedésének jóságát a determinációs együttható (R^2) fejezi ki, amely megmutatja, hogy a függő változó szórásának mekkora hányada magyarázható a független változó(k) által. A regresszióanalízis alkalmazhatóságát számos szakirodalmi publikáció is alátámasztja, Sun és mtsai. (2017), Tugrul & Zarif, (1999) az ásványos összetétel és a kőzetek mechanikai és fizikai tulajdonságai közötti kapcsolatot vizsgálta a módszerrel, Petrounias és mtsai. (2018) a filoszilikátok hatását a kőzetfizikai tulajdonságokra, Askaripour és mtsai. (2022), Kolay & Baser (2017), Hemmati és mtsai. (2020) a szöveti jellemzők és a mechanikai tulajdonságok kapcsolatát, Adomako és mtsai. (2021), Brattli, (1992), H. Liu és mtsai. (2005) a szövet és a kőzetfizikai tulajdonságok kapcsolatát, míg Esmailzadeh és mtsai. (2017) a szövet és az egytengelyű nyomószilárdság kapcsolatát, csak néhány példát említve a teljesség igénye nélkül

3. Kutatási hiányterületek azonosítása, célkitűzések

Számos tanulmány foglalkozik a kőzetek földtani tulajdonságai (ásványos összetétel, szövet) és az apríthatóságuk, örölhetőségük, kőzetfizikai és mechanikai tulajdonságaik közötti kapcsolatok tanulmányozásával.

A legtöbb tanulmány elsősorban az érces ásványi nyersanyagokra fókuszál, ahol a fő cél az értékes érces komponens minél hatékonyabb feltárása és kinyerése. Ennek megfelelően a kőzet tulajdonságait leíró paraméterek is elsősorban az érces komponens minél pontosabb jellemzésére irányulnak (Abdelhaffez, 2020; Hilden & Powell, 2017; Johnson és mtsai., 2007; Oyarzún M & Arévalo A, 2011; Parian és mtsai., 2018; Semsari Parapari, Parian, Forsberg, és mtsai., 2020; Tøgersen és mtsai., 2018).

A nem érces ásványi nyersanyagok és ezen belül a zúzottkő előállításához használt alapanyagok esetében az átfogó, összehasonlító tanulmányok, amely a földtani tulajdonságok és az apríthatóság kapcsolatát tárgyalja, kisebb számban fellelhető a szakirodalomban (Miskovsky és mtsai., 2004; Přikryl, 2021; Strzałkowski és mtsai., 2021; Strzałkowski & Kaźmierczak, 2021). Ezekben a tanulmányokban gyakran különböző típusú kőzeteken – például magmás (mint a gránit), üledékes (mint a mészkő vagy a travertin), illetve metamorf kőzeteken (mint a gneisz) – végzett mérések eredményeit hasonlítják össze (Kekec és mtsai., 2006), és ezek alapján vonnak le következtetéseket a kőzet szövete és ásványos összetétele hatására vonatkozóan. Szintén gyakori megközelítés, hogy érc tartalmú kőzetek – például magnetitérc – és érc tartalommal nem rendelkező kőzetek – mint a dácit – földtani tulajdonságainak apríthatóságra és örölhetőségre gyakorolt hatását vizsgálják (Lois-Morales és mtsai., 2022; Saeidi és mtsai., 2017). A különböző típusú kőzeteken végzett vizsgálatok eredményei sok esetben elentmondásos megállapításokat eredményeznek. A témában számos szakirodalmi összefoglaló cikk is megjelent, amelyek szintén csak általános következtetéseket mutatnak be (Askari-pour és mtsai., 2022; Lishchuk és mtsai., 2020; Mariano és mtsai., 2016; Mwaga és mtsai., 2015).

A szakirodalomban található tanulmányok jelentős csoportja foglalkozik a kőzetek geológiai jellemzői és a kőzetfizikai tulajdonságok, mint az aprózódással- és kopással szembeni ellenállás kapcsolatának vizsgálatával (Adomako és mtsai., 2021; Åkesson és mtsai., 2001; H. Liu és mtsai., é. n.; Räisänen, 2004; Strzałkowski és mtsai., 2021; Urueña és mtsai., 2022). Ezek kizárólag a zúzottkő alapanyagként felhasznált kőzetekre koncentrálnak, de mivel ezen tanulmányok jelentős része észak-európai területekhez kötődik, így a földtani adottságok miatt nagyrészt gránit, szerpentinit és mészkő a vizsgált anyag.

A szakirodalmi áttekintés alapján a következő hiányterületeket azonosítottam:

- A nem érces ásványi nyersanyagok – különösen a zúzottkő alapanyagául szolgáló kőzetek – esetében a kőzettani tulajdonságok és a törési viselkedés közötti kapcsolat vizsgálata eddig nem számít szisztematikusan feltárt kutatási területnek.
- Különösen hiányoznak az andezit típusú kőzetekre vonatkozó vizsgálatok: a szakirodalom általában eltérő összetételű és szövetű kőzetek (pl. gránit, mészkő, gneisz) eredményeit hasonlítja össze, amelyek lényegesen különböznek az andezit finomszemcsés, inekvigranuláris szövetétől.
- Nem áll rendelkezésre olyan szisztematikus kutatás, amely egyetlen kőzettípuson – például andeziteken – belül, egy bányából, homogén kőzettestből származó mintákon vizsgálná a kőzettani tulajdonságok hatását a törési viselkedésre.
- Az eddigi tanulmányok gyakran egy-egy paraméterre (pl. őrlhetőség – BWi, egytengelyű nyomószilárdság, kopásállóság, aprózódási ellenállás) fókuszálnak, miközben a komplex, több tényezőt együttesen értékelő megközelítések szinte teljesen hiányoznak.
- Kevés adat áll rendelkezésre a porozitás, repedezettség és a mállottság hatásáról, különösen andezitek esetében, ahol e tényezők részletes elemzésére eddig nem született átfogó tanulmány.
- Nem található olyan kutatás, amely átfogó módon vizsgálná a kőzettani jellemzők, a törési tulajdonságok, az őrlhetőség, az egytengelyű nyomószilárdság és a kőzetfizikai paraméterek közötti összefüggéseket egyidejűleg.

3.1. A tudományos munka célkitűzése

A kutatásom elsődleges célja, hogy egy adott kőzettípuson, nevezetesen a Magyarországon zúzottkő előállítására legnagyobb volumenben használt andeziten végezzen szisztematikus vizsgálatokat a földtani tulajdonságok törési viselkedésre és a termékminőségre gyakorolt hatásának feltárása érdekében.

A kutatás rész céljai az alábbiak:

- Mintagyűjtés andezitet termelő magyarországi bányákból, amelyek egy-egy különálló magmás testet tárnak fel. Bár ezek a bányák ugyanahhoz a kőzettípushoz tartozó anyagot termelnek, az ásványos összetétel, a szöveti jellemzők és a kőzetminőség bányán belül is mutathat eltéréseket, továbbá földrajzi távolságból fakadóan a különböző bányákból származó minták között is számottevő különbségek várhatóak.
- A minták földtani tulajdonságainak részletes jellemzése, különös tekintettel a kőzettesteken belüli heterogenitás pontos feltérképezésére.

- A mennyiségi ásványos összetétel meghatározása.
- A szöveti jellemzők kvalitatív és kvantitatív leírása, elsősorban optikai mikroszkópos megfigyelések alapján, elektronmikroszkópos vizsgálatokkal kiegészítve.
- A porozitás mérése és számszerűsítése.
- A mállottsági állapot kvalitatív és kvantitatív értékelése.
- A minták törési tulajdonságainak vizsgálata egyszemcse törési kísérletekkel (DWT szerű), szükséges berendezés megépítése és fejlesztése.
- Az őrlhetőség jellemzése a Hardgrove-index meghatározásával
- Kőzetszilárdság meghatározása, elsősorban egytengelyű nyomószilárdság (UCS) vizsgálatok elvégzésével.
- A kopásállóság- és az aprozódással szembeni ellenállás meghatározása.
- Az egyes módszerekkel kapott eredmények esetében megállapítani, hogy melyik az a földtani jellemző, amely hatással van a törési tulajdonságra, az őrlhetőségre és a kőzetfizikai tulajdonságokra
- A földtani tulajdonságok és a mért paraméterek közötti kapcsolatok feltárása, megállapítása.

4. Anyag és vizsgálati módszerek

4.1. Vizsgálati minták

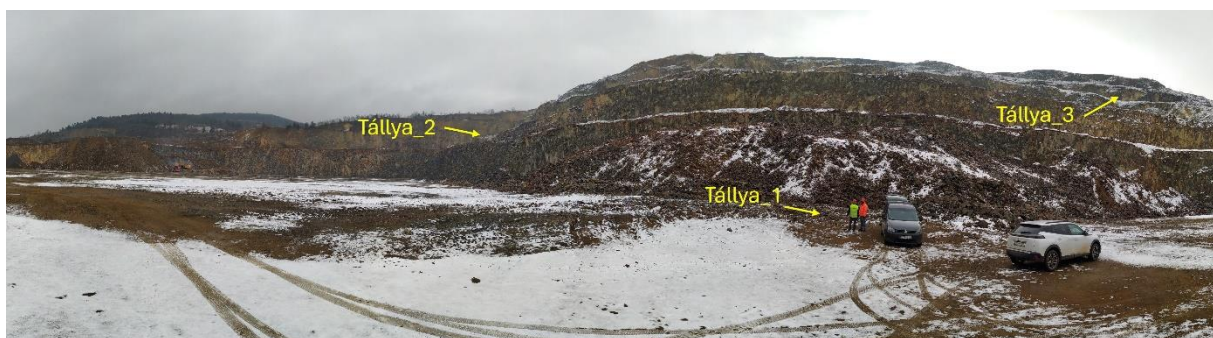
4.1.1. Mintavételi helyek földtani leírása

A mintavételezés a Colas Északkő Kft. két bányájában történt, Tállya bányaüzemben és Recsk bányaüzemben. A mintavételezést földtani tájékozódás előzte meg, amelynek alapján mindkét bányaüzem által termelt nyersanyag piroxénandezit, de a bányák földrajzi elhelyezkedése és a közettestek tömegét adó vulkanizmusok időbeli eltolódása, eltérő ásványos összetételű és szövet-szerkezetű andezitek előfordulását vetíti elő. Az egyes bányákon belül a termelt nyersanyag minőségében is észlelhető eltérés, ami összhangban van a közettani változásokkal. A mintavételezés során az elsődleges cél olyan minták vételezése volt, amelyek eltérő tulajdonságú kőzeteket reprezentálnak az egyes bányákon belül, mivel előzetes szakirodalmi kutatások alapján feltételezhető, hogy az azonos ásványos összetételű, de eltérő szövet-szerkezetű anyagok esetében várható eltérő viselkedés az apríthatósági, őrlhetőségi vizsgálatok során.

A Tállya térségében található Kopasz-hegy andezitje a Tokaji-hegység neogén vulkáni sorozatába tartozik, amelyet a vulkanizmus többlépcsős fejlődése jellemez (Tóth és Latrán, 2018). A Kopasz-hegy térségében a vulkáni tevékenység három fő egységre bontható, a tállyai bányában termelt andezit a Tokaji-hegység déli részén, a szarmata korú (~11,7 millió éves) vulkáni működés eredményeként jött létre (Pécskay et al., 1987). A vulkáni tevékenység több fázisban zajlott, és a jelenleg bányászott közettömeg egy lakkolitszerű testként nyomult be az idősebb, réteges riolittufa-szórásba, amely az erózió hatására mára nagyrészt lepusztult. A benyomulás során a nyomás, hőmérséklet és illótartalom térbeli változásai jelentős hatással voltak a kőzet szerkezetére és szövetére. A lakkolit testre jellemző a szabályos, függőleges vagy kifelé dőlő oszlopos elválás. A gyorsabb lehűlés következtében a peremi részeken kisebb átmérőjű (8–10 cm), míg a mélyebb részeken nagyobb (20–30 cm) oszlopok figyelhetők meg. A központi zónában a kihűlés síkjai méteres tömböket határolnak be. A hólyagüregesség is ennek megfelelően zónás elrendezést mutat: a felszínhez közeli részeken több, de kisebb méretű, szeszélyes formájú hólyagüreg van jelen, míg mélyebben ezek száma csökken, de térfogatuk nagyobb lehet. A hólyagüregekben másodlagos ásványkiválások (szferosziderit, opál, kalcedon) gyakoriak, valamint vas- és mangánoxid bevonatok is jellemzőek az oszlopok felületén. A szövet porfíros, üveges alapanyaggal, amelyben olivin, piroxén és plagioklász elegyrészei figyelhetők meg. A központi részen az oszlopokat lehatároló síkok mentén utólag sötét-fekete, olivines piroxén andezit kisebb szubvulkáni testek nyomultak be, amely kora 9 millió éves. Az ásványtani vizsgálatok alapján többféle andezittípust különítettek el: olivines piroxén–andezitet, üveges textúrájú porfíros szövetű andezitet, valamint erősebben mállott, autohidratációval átalakult típusokat, amelyek esetenként világoszöld, sárgás színnel és

csökkent szilárdsággal rendelkeznek. A bányában az andezit különböző szöveti és ásványos összetételű típusai a kitermelési szinteken belül is elkülönülnek. A kőzetek primer és másodlagos tulajdonságai jól elkülöníthetők makroszkópos és mikroszkópos vizsgálatokkal is.

A terepi szemle során három jól elkülönült szövet-szerkezeti zóna volt megfigyelhető a tályjai bányában. Az alsó két termelési szinten a jó minőségű, üde, oszlopos elvállásokat mutató, kevés hólyagüreget tartalmazó andezit termelése történik. A 3. és 4. szinten közepes minőségű, az előző típushoz viszonyítva több hólyagüreget tartalmazó andezit termelése folyik. A két felső, 5. és 6. termelési szinteken a kőzet erősen mállott, átalakult, az oszlopos elválás már kevésbé markáns, helyenként felismerhetetlen. A mintavételezés az előzőekben leírt három típusból történt, T_1, T-2 és T-3 minták mintavételezési helyei a 9. ábrán láthatók.



9. ábra: A tályai bánya a mintavételi helyekkel.

A recski bányában (10. ábra) termelt haszonanyag világosszürke, karbonátosodott piroxén-andezit. Csak az üvegállomány karbonátosodott, színes elegyrészként üde hipersztén és kevés klinopiroxén található benne. Földtani leírások alapján nagy mennyiségű, mélyből felhozott idegen kőzetzárványt is tartalmaz (Budai és mtsai., 2015). Az összlet keletkezése részben intruzív, részben extruzív. A sorozat felhalmozódásával befejeződött a bádeni (alsó-középső tortónai) vulkáni tevékenység és megkezdődött a posztvulkáni átalakulások szakasza, amely az egyes kőzetváltozásokat szinte a felismerhetetlenségig átalakította. A posztvulkáni időszak után újabb vulkáni működés indult a bádeni (felső tortónai) emeletben. E tevékenység hatására keletkezett felsőandezites összlet uralja a hegység mai morfológiáját. A bánya által feltárt csákánykői andezit a vulkáni összképen belül különleges helyet foglal el, földtani helyzete és szöveti jellegéből adódóan (Nagy, 1965). A benyomulási folyamat során a magma nagyobb mennyiségű mezozóos kőzet karbonátos anyagát olvasztotta be, amely a könnyenilló tartalom hirtelen növekedését eredményezte, amely a maga rendjén nagy mennyiségű üreget és üregkitöltő ásványt eredményezett a kőzetben. A kőzet szövete az intrúzió nagy részén porfíros mikroholokristályos alapanyaggal. Nagy (1965) leírása szerint a porfíros ásványszemcséket plagioklászok, „hipersztén” (=ensztatit), sziderit és magnetit, a mikroholokristályos

alapanyagot pedig plagioklász és karbonátszemcsék alkotják. A porfíros plagioklászok helyenként rezorbeálódtak. A kőzet üregkitöltő ásványai elsősorban karbonátok.

A helyszíni bejárás és mintavétel során négy fő andezittípust azonosítottunk, kékes-szürke üde andezitet, barna, átalakulás nyomait mutató andezitet, ún. „héjas-andezitet” valamint egy erősen mállott andezit típus. A kékes-szürke andezit üde, mállási nyomokat csak ritkán mutató, porfíros interszertális szövetű tömör kőzet, amelyben plagioklász és piroxén fenokristályok figyelhetők meg. A lilás-barnás andezit tömött szerkezetű, porfíros szövetű, finomszemű, kissé mállott barna piroxén andezit. A barnás színt a piroxének mállása okozza, a limonitos elváltozás és nontronitosodás is megfigyelhető. A harmadik kőzettípus az ún. "héjas-andezit", nevét arról kapta, hogy a padosan, tömbösen elváló kőzet a tagoló felületek mentén irányától befele haladva egy barnás-szürke zóna veszi körül a világosszürke közepet. A barna elváltozási kérget tartalmazó piroxénandezit kissé mállott, a kékes-szürke színű tömegesen megjelenő kőzetváltozat üde megtartási állapotú. A barnás színt itt is valószínűleg a piroxének mállása okozza (Gálos & Kárpáti, 2007). A negyedik típus a lilás-barna andezit felszínközeli mállása eredményezte, megtartásán erősen rossz, helyenként morzsalékosan széteső. Mivel a mintavételezés a vizsgálatok előrehaladtán és a szükséges mintamennyiségek növekedésének függvényében két alkalommal történt, a második mintavételezés során a barna andezitből vett mintáról a laboratóriumban történő szemrevételezés után kiderült, hogy nem pont ugyanazt az anyagot sikerült megmintázni mint az első mintavételezés során, így ez a minta típus kikerült a vizsgálatokból. A mintavételezési helyek a recski bányából a 10. ábrán láthatók.



10. ábra: A recski bánya a mintavételi helyekkel.

4.1.2. Minták makroszkópos leírása

T_1 minta

A T₁ (11. ábra) jelű minta, a bánya legalsó termelési szintjéről vett, szürke, mikrokristályos tömör andezit. A minta jó megtartású, üde andezitből áll, amelyen mállás jelei szabad szemmel nem észlelhetők, repedések ritkán fordulnak elő az anyagban. Az anyagot sötétszürke mikrokristályos mátrix jellemzi, amelyben 0,5-1 mm-es kvarc és földpát kristályok figyelhetők meg.

A további mintaelőkészítés során az anyag kagylós törése volt megfigyelhető, amely éles, többnyire lemezes darabokat eredményezett.



11. ábra: T_1 minta

T_2

A T_2 (12. ábra) minta középszürke hólyagüreges andezit. A T_1 mintához képest mállás jeleit mutató andezit típus. A középszürke mikrokristályos alapanyagban földpát és kvarc kristályok észlelhetők. A hólyagüregek mérete a pár mm-től a pár cm-es méretig terjed. A hólyagüregek kitöltöttsége, illetve a kitöltő ásványok változatosak. A megfigyelések szerint a póruskitöltő ásványtársulások a következők: szürkés, gömbös karbonátos kitöltés; pirites-markazitos gömbhéjas kitöltések mohazöld bevonattal; sárgásszürke, gömbös ásvány poros sárgás-szürke felülettel. Ezen túl kitöltés nélküli pórusok is jelen vannak az anyagban. Helyenként foltokban pirít, kalkopirit és markazit volt megfigyelhető.



12. ábra: T_2 minta

T_3

A T_3 (13. ábra) minta erősen mállott andezit, a darabok felületén vastag, vöröses sárgás, földes mállási kéreggel. A mintavételezett andezit erősen mállott, rossz megtartású, az egyes

darabok a mállási felületek és a repedések mentén könnyen szétesnek. A tömbök belseje sötétszürke mikrokristályos andezit, amelyben fehér, mállott 0,5-2 mm-es fenokristályok figyelhetők meg. Gyakoriak a rozsdás, vasas átalakulások és a sárgás-zöldes-barnás üregkitöltések.



13. ábra: T_3 minta

R_1

A R_1 minta (14. ábra) közészürke, tömött, andezit, amelyben elszórtan üregek találhatók. Az alapanyag mikrokristályos, amelyben 0,5-1 mm-es kvarc, földpát és biotit fenokristályok figyelhetők meg. Az üregek átmérője 2,5 mm körüli, benne fennőtt karbonátkristályok azonosíthatók. Helyenként átalakulás nyomai figyelhetők meg megközelítőleg 1 mm-es átmérőjű zöldes-sárgás foltok formájában, amely feltehetőleg kloritosodás.



14. ábra: R_1 minta

R_3

A R_3 minta (15. ábra) úgynevezett „héjas andezit”, amelyben egy általában 3-5 cm-es lilás andezit egy zöldesszürke „magot” vesz körül. Mindkettő anyaga mikrokristályos, tömött

andezit. A zöldesszürke magban biotit és ritkábban kvarc fenokristály figyelhető meg. A lilás rész helyenként sávós, zónás, színét feltehetően Fe-oxid okozza.



15. ábra: Recsk_3 minta

R_4

A R_4 minta (16. ábra) erősen mállott andezit. Földes, erősen morzsolódó, sárgás-barnás Fe-oxidos elválásokkal. Az eredeti kőzet csak helyenként ismerhető fel benne, amely világosszürke színű, fehér, erősen mállott földpát fenokristályokat tartalmaz. A mállás következtében esetenként zónás, gömbhéjas szerkezetű.



16. ábra: R_4 minta

4.2. Kőzettani tulajdonságok számszerűsítése

A kőzettani tulajdonságok számszerűsítéséhez szükséges minták előállításához a minták kisebbítése az MSZ EN 932-2 szabvány (European Committee For Standardization, 2000) szerint nem volt lehetséges a vizsgálatokhoz szükséges minták jellegéből adódóan, ezért úgy választottam ki, hogy lehetőleg jobban reprezentálják a mintaanyagot.

A közzétartott tulajdonságok számszerűsítésére alkalmazott vizsgálati módszerek részletes ismertetését a Melléklet-11.1 Anyag és vizsgálati módszerek részletes leírása tartalmazza.

A kvalitatív és kvantitatív ásványos összetétel meghatározása röntgenpordiffrakciós (XRD) vizsgálattal történt. A teljes kémiai összetétel meghatározása röntgenfluoreszcens spektroszkópia (XRF) alkalmazásával történt. A szöveti jellemzők megfigyelésére és kvantifikálására többféle vizsgálati módszert alkalmaztam. Optikai mikroszkópos vizsgálatokat és a szöveti elemek számszerűsítését közepes vékonycsiszolatokon végeztem. Ezt kiegészítették pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok, valamint elemtérképek készítése. Az alkotók térbeli eloszlásának háromdimenziós feltárását mikro-komputertomográfiás (μ -CT) vizsgálatokkal végeztem. A porozitás meghatározása He-piknométeres módszerrel történt, melyet szintén μ -CT mérések egészítettek ki a pórustér térbeli vizsgálatának érdekében.

4.3. Fizikai tulajdonságok számszerűsítése

Az igénybevétellel szembeni ellenállás meghatározását több, eltérő elven alapuló vizsgálati módszerrel végeztem. A módszerek kiválasztásánál alapvető szempont volt, hogy az alkalmazott eljárások különböző típusú mechanikai igénybevételeket reprezentáljanak, ezáltal a közetek viselkedésének komplex értékelését tegyék lehetővé. Emellett cél volt, hogy a vizsgálati minták különböző szemcseméret-tartományokba essenek, biztosítva ezzel a szemcseméret hatásának vizsgálhatóságát is.

4.3.1. Egyszemcse törési vizsgálat

Az anyagjellemzők és a törési tulajdonságok közötti összefüggések vizsgálatához az egyszemcse törési vizsgálatok közül az esősúlyos eljárás (Drop Weight Test, DWT) került kiválasztásra. A módszer kiválasztását a berendezés egyszerű, bonyolult műszerezettségétől mentes felépítése tette indokolttá. Ezen túl a mérés kivitelezésének egyszerűsége, valamint a mérésekhez szükséges minták előkészítésének egyszerűsége is a módszer mellett szólt.

A méréshez szükséges berendezés megépítése a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet műhelyében történt. A szakirodalomban és kereskedelmi forgalomban található berendezések felépítését áttekintve, azonosítottuk a berendezés fő elemeit és annak paramétereit, így 2021-ben megépült a berendezés első változata, amelyet a 17. ábra mutat be. A törési kísérletek során a berendezés számos hibájára derült fény, így egy második változat megépítése is szükségessé vált, amelyet a 18. ábra mutat be. A berendezés részei: keményfém üllő, keményfém változtatható tömegű (4,36-26,65 kg) és magasságú (0,5-1,1 m) súly, elektromágnes, amely a súly rögzítését és elengedését szolgálja, emelő szerkezet, amely az ejtési magasság beállítását szolgálja, vázszerkezet, amely egyrész a felsorolt elemeket tartja,

valamint egy csúszócsapágyas megoldással a súly kibillenését akadályozza meg esés közben, minimális súrlódás mellett. Az üllő köré egy kinyitható fémlemez védő került, amelynek célja a töret szétszóródásának megakadályozása. A törési kísérletek eredményei szempontjából a legfontosabb kiküszöbölendő probléma az esősúly kibillenése volt az első berendezés esetében. A második berendezés az esősúly beépített csúszócsapágyas vezetésének köszönhetően ezt a problémát kiküszöbölte. A berendezésre jellemző igénybevétel az ütés, amely két felület, az eső súly és az üllő között megy végbe.



17. ábra: Esősúlyos berendezés első konstrukciója



18. ábra: Esősúlyos berendezés második, továbbfejlesztett konstrukciója

A vizsgálatokhoz szűken osztályozott szemcsefrakciók szükségesek, a szakirodalmi példákat áttekintve (Gan és mtsai., 2019; Genç és mtsai., 2004; Ma és mtsai., 2023) választottam ki a vizsgálati frakciók és az azokban tartozó szemcseszámok. A minták szemcseméretét pófástörővel csökkentettem több lépcsőben, különböző résméretek mellett. A törést követően az osztályozott frakciókat szitálással állítottam elő. Mivel a szemcsealak hatása a törésre ismert (Gan és mtsai., 2019; Norazirah és mtsai., 2016; Unland & Al-Khasawneh, 2009), ezért a lemezes szemcséket eltávolítottam a mintákból. Ehhez egy speciális részita került megépítésre, ahol

a részméret állítható és az MSZ EN 933-3 szabvány (European Committee for Standardization, 2012) elvét követve, a részméret a következő összefüggéssel lett számolva:

$$R = D_i/2 \text{ [mm]}$$

ahol R a részméret, D_i a frakció felső határa mm-ben megadva.

A törési kísérleteket mintánként, minden frakció esetében három törési energiát alkalmazva végeztem el. Az egyes vizsgálati frakciókat és az egyes frakciókhoz tartozó szemcseszámot ismétlésenként 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Vizsgálati frakciók és az egyes frakciókhoz tartozó szemcseszám

Frakció [mm]	Szemcsék száma/beállítás [db]
40-45	20
25-31,5	40
20-22,5	50
12,5-16	60
8-11,2	70

A törési energia és a fajlagos törési energia a szemcsék mérete és tömege alapján határozható meg. Az egyes frakciók esetében a frakció középértékét használtam reprezentatív szemcseméretként. A fajlagos törési energia számításához szükséges szemcsetömeget az adott frakció teljes tömegének és az abban található szemcsék számával történő osztásával határoztam meg. Az egyes mintákhoz és frakciókhoz tartozó átlagos tömegeket az 2. táblázat foglalja össze. A törési energiákat szakirodalmi példák alapján választottam ki. Az eredmények gyakorlati alkalmazhatósága érdekében nem az volt az elsődleges szempont, hogy minden frakció és energiaszint esetében ugyanaz legyen a fajlagos törési energia, hanem hogy ugyanazon törési energia alkalmazása mellett a különböző minták hogyan viselkednek, mint az a gyakorlatban a zúzottkő előállításban gyakran történik. Az egyes minták frakcióihoz tartozó fajlagos törési energiáit a Melléklet 11.1.5 Egyszemcse törési vizsgálat fejezetben található 32. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Az egyes minták frakcióihoz tartozó szemcsék átlagos tömege

	40-45 mm	25-31,5 mm	20-22,5 mm	12,5-16 mm	8-11,2 mm
Tállya_1	111,17	37,98	14,46	4,98	1,65
Tállya_2	99,08	31,12	13,11	4,43	1,47
Tállya_3	102,17	31,58	12,52	4,53	1,39
Recsk_1	103,54	36,49	15,70	4,87	1,78
Recsk_3	110,89	36,89	15,57	5,23	1,68
Recsk_4	98,78	39,21	14,01	4,87	1,49

A törési energiákat szakirodalmi példák alapján választottam ki. Az egyes ismétlésekhez tartozó minták szemcséit egyesével törtem le, a törést követően a töretet az üllőről eltávolítottam

és végül a szemcseméret eloszlást száraz szitálással határoztam meg, az egyes ismétlésekhez tartozó szemcsék töretének összegyűjtését követően.

4.3.2. Kőzetfizikai vizsgálatok

A kopásállóság vizsgálatát az MSZ EN 1097-1 Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval) szabvány előírásai szerint végeztem el. A mintaelőkészítést és a módszer részletes leírását a Melléklet - 11.1.6 Kopással szembeni ellenállás fejezetben található meg. Mindkét vizsgálati módszer esetében a minták 11–14 mm-es mérettartományba estek. A kopásállóság vizsgálatánál a fő igénybevétel a dörzsölés, amely nedves közegben, az őrlőtestek és a vizsgált anyag közötti kölcsönhatás során megy végbe. Az aprózódással szembeni ellenállás mérésénél a meghatározó igénybevétel az ütés és ütközés, amely száraz közegben, az őrlőtestek és a minta kölcsönhatásaként jelentkezik.

4.3.1. Őrölhetőségi vizsgálat

Az őrölhetőségi vizsgálatok közül a minták őrölhetőségének meghatározására a Hardgrove-eljárást alkalmaztam. A módszer kiválasztását a viszonylag kis mennyiségű mintamennyiség, ismétlésenként 50 g minta szükséges, és az egyszerű, gyors kivitelezhetőség indokolta. A vizsgálat 590-1190 μm közé eső szemcseméretű anyagon történik, a jellemző igénybevétel pedig a nyomás és dörzsölés. A módszer részletes leírását a Melléklet 11.1.8 Őrölhetőségi vizsgálat fejezet mutatja be.

4.3.2. Kőzetmechanikai vizsgálatok

A kőzetmechanikai vizsgálatok csoportjából az egytengelyű nyomószilárdság (UCS) mérése Controls gyártmányú 3000 kN-os névleges terhelhetőségű nyomógépen történt. A módszer által közvetített fő igénybevétel a lassú nyomás, amely két párhuzamos felület között adódik át a mintatestnek. A módszer és berendezés részletesebb ismertetését a Melléklet 11.1.9 Kőzetmechanikai vizsgálatok fejezetében ismerettem.

4.4. Adatok elemzése

A szakirodalmi példák alapján, a kőzetek geológiai tulajdonságai és a törési tulajdonságuk, őrölhetőségük, mechanikai- és kőzetfizikai tulajdonságaik közötti kapcsolatok feltárásának és számszerűsítésének egyik legelterjedtebb módszere a regresszió analízis. Az összefüggések számszerűsítésére regresszióanalízist alkalmaztam. Az egyváltozós elemzések során első sorban egyszerű lineáris regressziót használtam, ahol a független és a függő változók közötti kapcsolatot egy legkisebb négyzetek módszerével illesztett egyenes írja le. Az illesztést a Grapher 9 szoftver segítségével végeztem, amely a lineáris modellhez tartozó regressziós

egyenletet és a kapcsolat szorosságát jellemző determinációs együtthatót (R^2) automatikusan számítja.

Azokban az esetekben, ahol az adateloszlás vagy a változók közötti kapcsolat nem volt lineáris jellegű, más, például exponenciális, regressziós modellt alkalmaztam, és ezt a megfelelő alfejezetekben külön jelzem. Minden más esetben, ahol nem került külön említésre, a lineáris regresszió eredményeit vettem figyelembe.

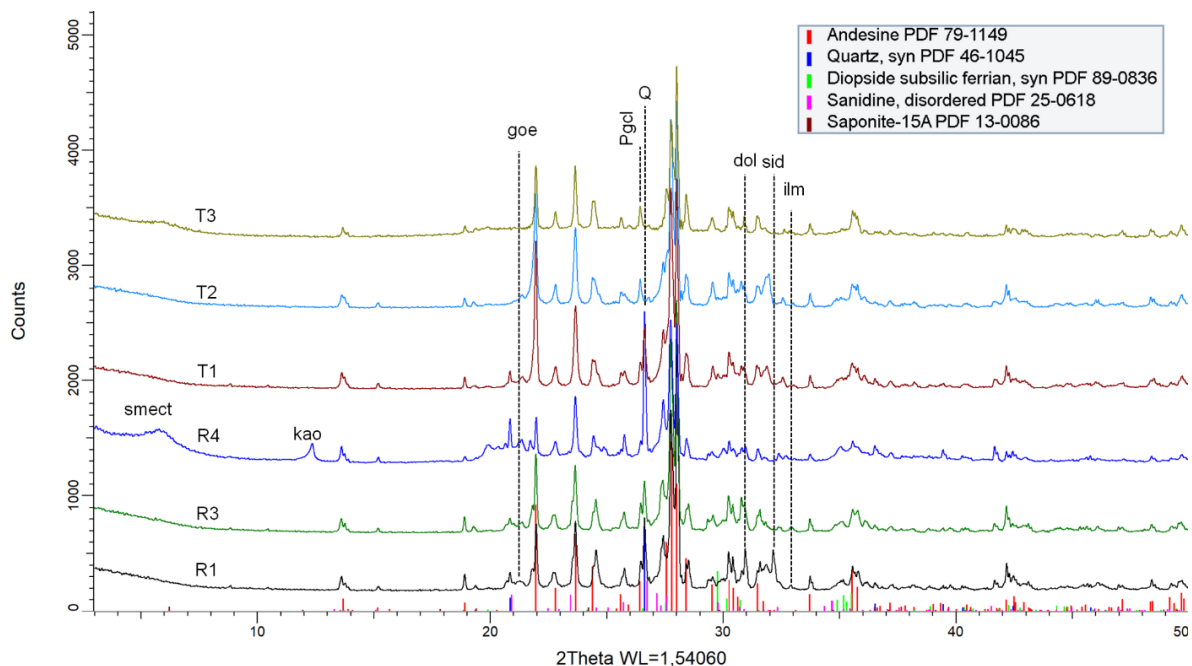
A regresszióanalízis nemcsak a változók közötti kapcsolat meglétének feltárását teszi lehetővé, hanem kvantitatív modellt is szolgáltat, amely segíti a kapcsolatok erősségének értékelését. A determinációs együttható (R^2) értékei alapján következtettem arra, hogy a független változó milyen mértékben magyarázza a függő változó szórását, azaz milyen erősségű a kapcsolat.

5. Eredmények

5.1. Kőzettani tulajdonságok

5.1.1. Kvalitatív és kvantitatív ásványos összetétel

A kvalitatív ásványos összetétel meghatározás során az egyes minták alkotói nem mutattak jelentős eltérést, amelyet a 19. ábrán látható diffraktogramok is jól mutatnak, kivétel képezve az R_4 minta. A fő kőzetalkotó ásványok, a plagioklász földpátok csoportjának különböző szilárd elegyei (eltérő arányú Ca-Na tartalommal) az andezin, oligoklász és labradorit, valamint a kálium tartalmú földpátok csoportjából a sanidín és a mikroklin. További fő kőzetalkotó ásványok a kvarc és a piroxének csoportjából a diopszid és ensztatit. A járulékos kőzetalkotó ásványok közül a titanomagnetit és ilmenit van jelen. A másodlagos ásványképződés eredményeként dolomit, sziderit, goethit, szmektit és kaolinit, valamint amorf anyag volt azonosítható.



19. ábra: A minták röntgen-pordiffraktogramjai (A szerző saját képe)

A kvantitatív ásványos összetétel eredmények alapján, a kőzetalkotó ásványok fajtái azonosak az egyes mintákon belül, de ezek mennyiségében, arányában eltérés figyelhető meg (3. táblázat). A tállyai minták esetében a legnagyobb mennyiségben előforduló kőzetalkotó fázis az oligoklász, melynek mennyisége 27,8-22,1 % között változik. A plagioklász földpát szilárd elegysorának másik két tagja, az andezin és labradorit, szintén jelentős mennyiségben van jelen, előbbi 8,1-33,3 % közötti, míg utóbbi 8,4-13,2 % között változik. Mivel ezek az ásványok szilárd elegysort képeznek, ezért az ásványok fizikai tulajdonságai hasonlóak, így gyakorlati szempontból célszerű egy ásványként kezelni a csoportot. A plagioklász földpátok mennyisége a T_1 minta esetében 49,1 %, T_2 minta esetében 49,4 % míg a T_3 esetében 64,2 %. A recski minták esetében a fő kőzetalkotó fázis szintén a plagioklász földpátok, a labradorit, 9,2-29,06 % közötti összetétellel a leggyakoribb, a szilárd elegysor másik két fázisa is változó mennyiségben van jelen, az andezin 6,67-23,4 % között, míg az oligoklász 9,5-15,2 % között

változik. A recski minták esetében az összesített plagioklász földpát tartalom a következőképpen alakul: R_1 51,01 %, R_3 53,1 % és R_4 26,6 %.

3. táblázat: A minták mennyiségi ásványos összetétele (tömegszázalék, hiba +/- 5 relatív százalék)

Ásvány neve	R_1	R_3	R_4	T_1	T_2	T_3
Andezin	6,67	23,4	7,9	8,1	8,8	33,3
Kvarc	4,60	3,5	8,5	4,2	1,0	0,6
Sanidin Na0.35	12,25	11,0	7,9	14,4	11,7	0,1
Szmektit	2,93	3,1	11,9	1,4	1,4	5,7
Diopszid	4,03	3,2	0,4	4,1	5,0	1,1
Titanomegnetit	0,21	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5
Oligoklász An25	15,28	12,0	9,5	27,8	24,5	22,1
Dolomit	0,74	0,3	0,7	0,6	1,1	0,5
Labradorit An65	29,06	17,7	9,2	13,2	16,1	8,4
Ilmenit	0,28	0,4	1,0	1,2	0,8	0,5
Mikroclin	-	3,6	8,2	2,6	1,2	0,4
Cristobalit	1,23	1,8	1,0	5,8	6,6	1,2
Enstatit	6,36	7,1	-	3,4	3,3	4,9
Sziderit	1,83	-	-	3,2	3,8	0,0
Sziderit magnéziumos	3,40	-	-	-	-	-
Goethit	0,82	1,9	2,9	-	-	-
Kaolinit	-	-	21,0	-	-	-
amorf	10,3	10,7	9,5	9,7	14,8	20,7

A káliföldpátok, a sanidin és mikroclin, a magma hűlése során lejátszódó autometaszomatikus folyamatok eredménye. A magmás intrúzió felszínéhez közeli részeken gyorsabban lejátszódó kihűlési folyamatok a káliföldpát mennyiségének csökkenését eredményezte a tályai minták esetében, a sanidintartalom 14,4-0,1 % között, míg a mikroclintartalom 2,6-0,4 % között változik. A recski minták esetében a sanidin hasonló trendet mutat, az intrúzió felszínéhez közeledve csökken a mennyisége 13,9-7,9 % között változik, míg a mikroclin fordított trendet mutat, mennyisége 0-8,2 % között változik, amely az eltérő közet genetikából adódik. A K-földpátok mivel szintén egy szilárd elegysor képeznek változó Na-K aránnyal, így a csoportba tartozó ásványok fizikai tulajdonságai hasonlóak, így célszerű egy ásványként kezelni a csoportot. Az összesített káliföldpáttartalom az egyes mintákban: T_1 17,0 %, T_2 12,9 %, T_3 0,5 %, R_1 12,25 %, R_3 12,8 %, R_4 16,1%.

A minták karbonáttartalma (sziderit, dolomit) szintén az autometaszomatózis folyamatához köthető. Az amorftartalom az üveges fázishoz köthető, ezért az intrúzió peremi részein a gyorsabb hűlés eredményeként mennyisége nő. A tályai minták esetében ez a trend megfigyelhető, a T_3 minták amorftartalma a legmagasabb. A recski minták esetében az erősen mállott R_4 minta zavarja meg ezt a trendet, egy erőteljes hidrotermás mállás figyelhető meg, amely a magas kaolinittartalmat és a plagioklász földpátok mennyiségének csökkenését és a

mikroclin növekedését eredményezte. A minták szmektit és goethit tartalmának növekedése a hidrotermás rendszer kihűlésének eredménye. A szmektit csoport egyszerűsített használata megfelelően kifejezi a hatást jelző ásványokat, nem szükséges azok fajszintű azonosítása.

5.1.2. Kémiai összetétel, mállás

A kémiai összetételt a Melléklet - 11.1.2 Kémiai összetétel fejezetben található táblázat foglalja össze. Az andezit egy intermediér magmás kőzet, így a minták SiO_2 tartalma a tállyai minták esetében 57,3-59,1 % között, míg a recski minták esetében 53,9-55,9 % között alakul. Ahogy az ásványos összetétel esetében, úgy a kémiai összetétel esetében sem jelentős az eltérés. Az egyes kémiai elemek alakulása, mint a CaO , Na_2O , K_2O összhangban van a különböző földpátfajták alakulásával. A recski minták magasabb MgO tartalma a magasabb piroxén tartalommal függ össze, valamint a R_1 és R_3 minta esetében a magnéziumtartalmú sziderit jelenlétével. A TiO_2 tartalom alakulása az ilmenit és titanomagnetit mennyiségével van összefüggésben, a MnO tartalom pedig részben a piroxén ásványokhoz köthető, másrészt a Fe-karbonátokban elemhelyettesítésként épül be a recski minták esetében, míg a tállyai mintákban valószínűleg a hematitba épül be. A minták nyomelemtartalma szintén nem mutat jelentős eltérést, ezen elemek elemhelyettesítés formájában épülnek be a különböző ásványokban.

A kémiai összetétel, mivel az egyes elemek számos ásványban megjelenhetnek, önmagában nem hordoz információt a kőzet szövetéről és más tulajdonságairól így a kémiai összetétel és a kőzet mechanikai tulajdonságai között nem állapítható meg direkt összefüggés. Ugyanakkor a kőzetek mállásával és az egyes ásványok átalakulásával egyes kémiai elemek mobilissé válhatnak. A szakirodalomból számos mállást számszerűsítő index ismert (Fedo és mtsai., 1995; Harnois, 1988; Nesbitt & Young, 1982; Price & Velbel, 2003; Sergeev, 2023), amelyek a különböző kőzetek és talajok mállásának számszerűsítésére alkalmasak. Ezen mutatók a mállás során a mobilis elemek és az immobilis elemek arányának alakulását számszerűsítik, a különbség az egyes mutatók között, hogy mely elemeket tekintik mobilisnek, Nesbitt & Young (1982) például a K_2O -ot a Na_2O , CaO mellett mobilisnek tekinti, míg Harnois (1988) nem. A szakirodalomban található mutatók közül az andezitek mállása során az elemek mobilitását a Nesbitt & Young (1982) által bevezetett Chemical Index of Alteration (CIA) tükrözi a legjobban:

$$CIA = \left[\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right] * 100$$

ahol CaO^* a szilikát ásványokban beépülő CaO mennyisége, nem tartalmazva az egyéb CaO előfordulásokat mint karbonátok, apatit.

Nesbitt & Young (1982) által bevezetett indexet Fedo et al. (1995) módosította és Plagioclase Index of Alteration (PIA) néven következő összefüggést adta meg:

$$PIA = \left[\frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \right] * 100$$

A plagioklász a szilikátos kőzetekben gyakori alkotó, de a többi szakirodalomban található index ezek mállását a különböző mállási folyamatok során nem mindig tükrözi megfelelően, pl. kálimetaszomatózis esetén azon indexek, amelyek a K-ot nem tekintik mobilisnek, igen magas mállást mutatnak abban az esetben is, ha a kőzet nem mállott.

A tanulmány tárgyát képező recski és tállyai andezitekre vonatkozó CIA és PIA értékeket a 4. táblázat foglalja össze. A CIA értékekből jól látható, hogy bányánként két-két minta, T_1 és T_2, valamint R_1 és R_3 alacsonyabb mállási értéket mutat, míg a T_3 magas és az R_4 kimagasló. Mivel a mintáknak magas a plagioklász földpát tartalma, így az ezekre vonatkozó PIA számolását is célszerűnek találtam. A kapott eredmények (4. táblázat) alapján látható, hogy a tállyai bányából származó (T_1, T_2 és T_3) minták esetében összeségében a plagioklászok kevésbé alakultak át, mint a recski minták esetében.

4. táblázat: A minták CIA és PIA értékei (Szerző saját szerkesztése)

Minta neve	CIA	PIA
T_1	58,91	65,27
T_2	59,50	64,77
T_3	63,99	67,65
R_1	58,93	71,82
R_3	59,83	73,27
R_4	76,41	78,11

5.1.3. Szöveti megfigyelések

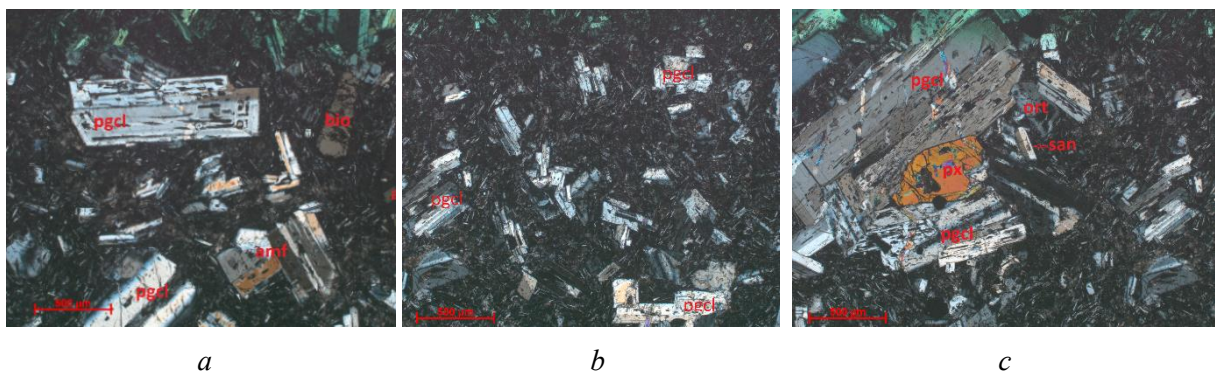
5.1.3.1.1. Optikai mikroszkópos megfigyelések

Az optikai mikroszkópos szöveti megfigyeléseket első lépésben polarizált áteső fényben végeztem, keresztezett nikollal, vékonycsiszolaton. A módszer lehetővé teszi az ásványok azonosítását, habitusának és eloszlásának megfigyelését, illetve a forgatható tárgyasztalnak köszönhetően olyan részletek megfigyelésére is van lehetőség, amely egyes pozíciókban kioltásban vannak, de az asztal forgatásának következtében megvilágításra kerülnek.

A tállyai bányából származó minták szövete jellemzően porfíros holokristályos, idiomorf és hipidiomorf fenokristályokkal. Az alapanyag (mátrix) mikrokristályos, helyenként kriptokristályos, vagyis a kristályok mérete az optikai mikroszkóppal megfigyelhető méretnél kisebbek.

5.1.3.1.2. T_1 minta

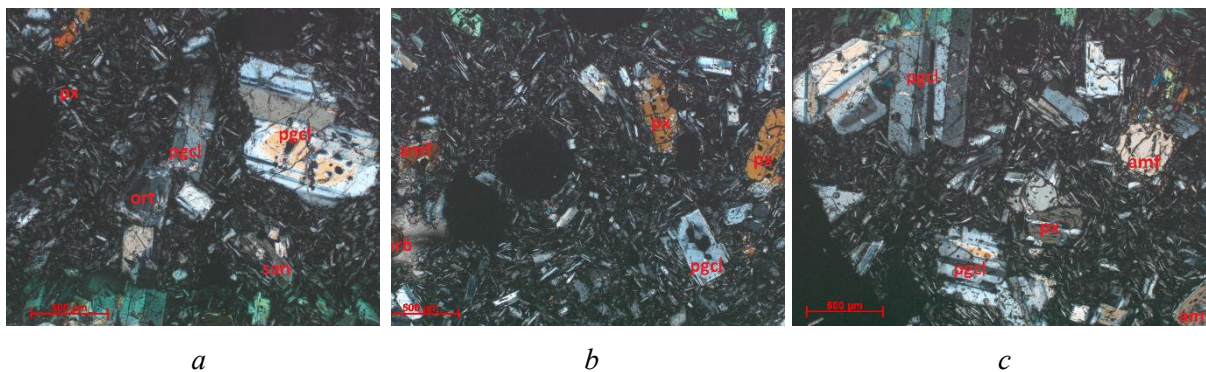
A T_1 mintán készült optikai mikroszkópos fényképek a 20. ábrán láthatóak. A fenokristályok többsége plagioklász, kisebb mennyiségben biotit és piroxén, ritkán szanidin és ortoklász (20. ábra, **c** alábra) figyelhető meg. A fenokristályok, főleg a plagioklász jól kifejtett, saját alakúak (idiomorf), méretük elérheti 700-800 μm , de akár a mm-es méret tartományt. A kisebb méretű plagioklászok (50-100 μm) (20. ábra, **b** alábra) gyakran ikresedettek vagy aggregátumokat képeznek. A földpátokon a mállás nyomai általában nem figyelhetők meg, a piroxén és biotit enyhe mállás jeleit mutatja (20. ábra, **a** és **c** alábra). A mátrix aprószemcsés, tömött, a még azonosítható méretű ásványok jelentős része plagioklász. A plagioklászok nem mutatnak irányítottságot, elhelyezkedésük véletlenszerű a mátrixban. A mátrixban gyakoriak a 10-50 μm -es opak szemcsék, foltok, amelyek feltehetően Fe-oxid szemcsék.



20. ábra: T_1 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol, bio – biotit, px – piroxén, san – szanidin)

5.1.3.1.3. T_2 minta

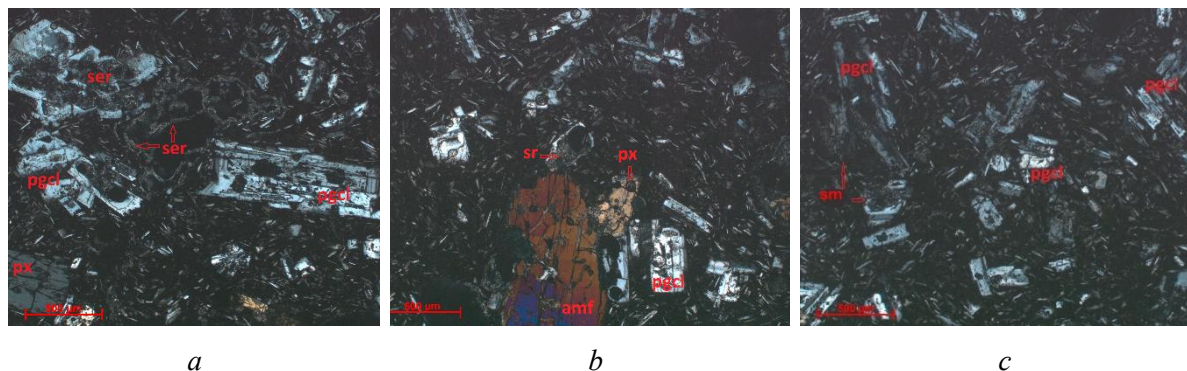
A T_2 minta esetében a fenokristályok mérete csökkent, ugyanakkor itt is megfigyelhetők a többitől jelentősen nagyobb, pár mm-es méretű fenokristályok is. Alakjuk jól felismerhető (anhedrális és szubhedrális) de szegélyük sok esetben visszaoldódott, sarkaik legömbölyítettek (21. ábra), a mállás korai jelei megfigyelhetők a mintán, a piroxén és amfibol fenokristályos mállása hangsúlyosabb. A mintában több helyen is azonosítható volt a karbonátosodás, mint az a 21. ábra, **b** alábráján is látható. Ugyanezen az ábrán látható fekete foltok helyén is feltehetően karbonát ásványok voltak, amelyek a vékonycsiszolat készítése során kiperegtek a mintából. A mátrix összetétele azonos, mint a T_1 mintában, szemcsemérete viszont jelentősen növekedett, többségében plagioklász tűk alkotják. Határozott irányítottság nem figyelhető meg, de a plagioklász tűk a nagyobb szemcsék körül enyhén irányítottak, annak szegélyével nagyjából párhuzamosan helyezkednek el.



21. ábra: T_2 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol, px – piroxén, san – sanidin, ort – ortoklász, karb – karbonát)

5.1.3.1.4. T_3 minta

A T_3 minta esetében a fenokristályok mérete hasonló, mint a T_2 mintában, de a mm-es mérettartományban ezen minta esetében már nem voltak megfigyelhetők fenokristályok (22. ábra). A fenokristályok erősen mállottak, alakjuk sok esetben felismerhetetlen. A szemektit sok esetben megfigyelhető a szemcsék üregeiben és a mátrixban is (22. ábra, a alábra). A mátrix jelentős részét ez esetben is plagioklász alkotja, amely szemcsemérete hasonló, mint a T_2 minta esetében, valamint hasonló szöveti irányítottság figyelhető meg. Ezen túl gyakran megfigyelhetők barnás és opak foltok, amely az amorfanyag, mint a kőzetüveg és a Fe-oxi-hidroxidok jelenlétével hozható összefüggésbe és amely jelentősen megnehezíti az optikai mikroszkópos megfigyelést.

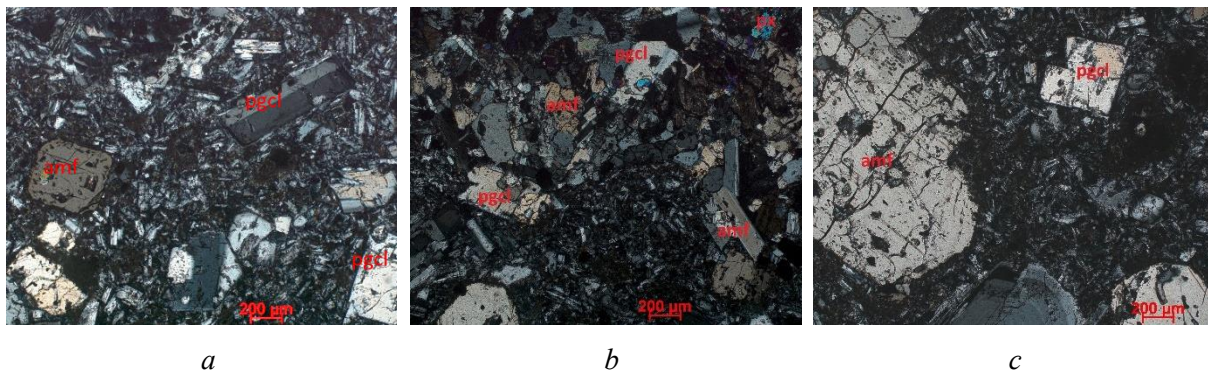


22. ábra: T_3 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol, bio – biotit, px – piroxén, szm – szemektit)

5.1.3.1.5. R_1 minta

A recski bányából származó minták szövete szintén porfíros holokristályos. A fenokristályok hipidiomorf és idiomorfak. A mátrix főként mikrokristályos, de a másodlagos ásványok sok esetben nehezítik a megfigyelést, így teljes pontossággal nem megítélhető. Az R_1 minta esetében a fenokristályokat főként plagioklász alkotja, ritkábban amfibol és piroxén (23. ábra). Kevés kivétellel alakjuk jól felismerhető (anhedrális és szubhedrális), méretük a pár μm -es mérettől

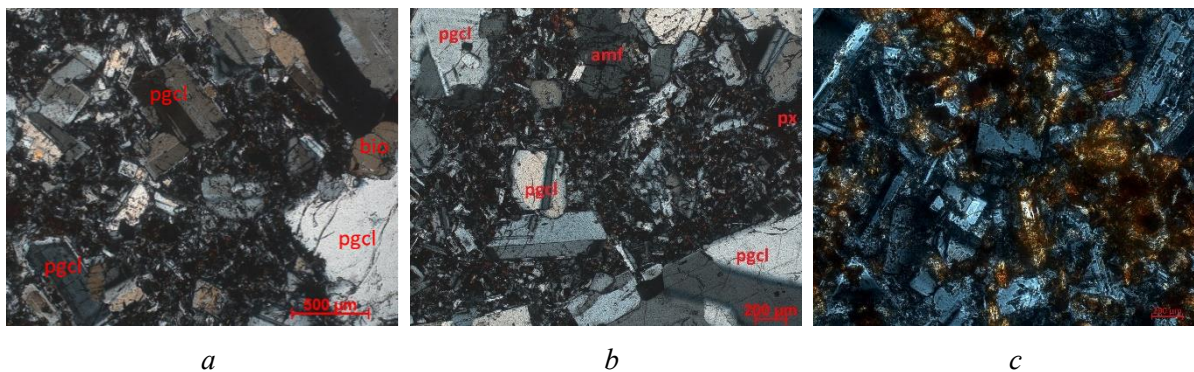
a mm-es mérettartományig terjed, ugyanakkor a mm-es méretet elérő szemcsék ritkábbak, mint a tállyai minták esetében. A szemcsék sarkai sok esetben lekerekítettek, tehát enyhe mállás jeleit mutatják, az amfibol és piroxén erősebben mállott, mint a plagioklászok. Sok esetben nagy méretű és nagyszámú szemcsékből álló aggregátumok voltak megfigyelhetők a mintában (23. ábra, **b** alábra), az azt alkotó szemcsék az esetek többségében mállottabbak, élük lekerekítettebb mint a külön előforduló szemcsék. A mátrix szemcsemérete durvább, mint a tállyai minták esetében, főként plagioklász kristályok azonosíthatók. Gyakoriak a néhány 10 µm-es opakásvány, és a kőzetüveg és a Fe-oxi-hidroxidokhoz köthető barnás-feketés foltok a mátrixban.



23. ábra: R_1 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol, px – piroxén)

5.1.3.1.6. R_3 minta

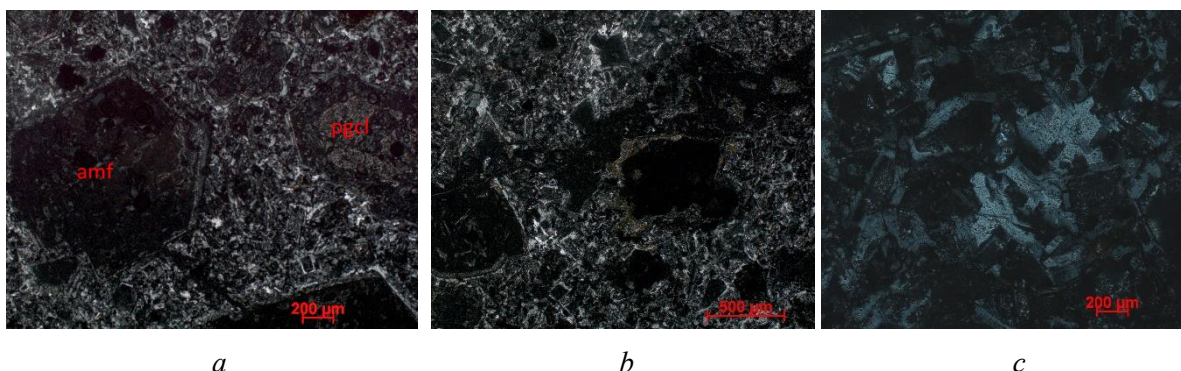
Az R_3 minta esetében a fenokristályok mérete jelentősen nagyobb az R_1 mintához viszonyítva, általában 400-500 µm-nél nagyobbak, előfordulásuk gyakoribb, szinte mindig aggregátumokat alkotnak (24. ábra). Összetételüket tekintve főként plagioklász, ritkábban amfibol és piroxén. Utóbbiak mérete jelentősen kisebb a plagioklászéhoz viszonyítva. A nagy méretű plagioklász kristályok enyhén lekerekítettek, kis fokú mállás jeleit mutatják. Az alapanyagot plagioklász és opak ásványok, valamint barnás-feketés alaktalan foltok alkotják, utóbbiak mennyisége jelentősen nagyobb, mint az R_1 mintában és megnehezíti az optikai mikroszkópos megfigyelést (24. ábra, **c** alábra 20x nagyítás). Az azonosítható plagioklászok mérete a mátrixban hasonló méretű, mint az R_1 mintában.



24. ábra: R_3 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol, bio – biotit, px – piroxén)

5.1.3.1.7. R_4 minta

Az R_4 minta esetében a kőzet teljes átalakulása figyelhető meg (25. ábra). A fenokristályok habitusukról, felismerhetők (25. ábra. **a** alábra), de teljesen átalakultak. Alakjuk alapján elsősorban plagioklász földpát és amfibolt sikerült azonosítani. Méretük jelentősen nagyobb, 500-600 µm felett, viszont számuk jelentősen kevesebb az R_1 és R_3 mintákhoz viszonyítva. A mátrix anyaga nehezen azonosítható (25. ábra, **b** alábra, 20x nagyítás), elsősorban plagioklász alkotja, de gyakoriak az opak ásványok. Az egész mintára egy mállottabb, átalakultabb összkép jellemző.



25. ábra: R_4 mintán készült optikai mikroszkópos felvétel (Szerző saját felvétele) (pgcl – plagioklász, amf - amfibol)

A vizsgált minták szöveti leírásán túl a szöveti elemek számszerűsítése is megtörtént. A szöveti elemek számszerűsítéséhez minden minta esetében mozaik képek készültek. Az inekvigranuláris szövetben jelentős méretkülönbség figyelhető meg az egyes alkotók között. Nincs szigorúan meghatározott mérethatár az alapanyag és a fenokristályok elkülönítésére, a fenokristályok jól elkülöníthetőek, az alapanyaghoz viszonyított relatív méretük a meghatározó (MacKenzie és mtsai., 1983; Winter, 2023). A mintákon megfigyelt méretjellemzők és mérések alapján ezt a határt 100 µm-es maximális Feret-átmérőnél határoztam meg. A maximális Feret-átmérő a szemcse azon legnagyobb kiterjedése, amely két, egymással szemben álló,

párhuzamos érintő egyenes közötti távolságként határozható meg. Ez az érték a Zeiss Axio-Vision szoftver beépített Particle Size Analysis funkciójával automatikusan mérhető. A szakirodalomban található gyakorlattól eltérően, mivel az egyes ásványfázisok között nagyságrendbeli különbségek jellemzők, méretük az alig pár μm -tól a pár száz μm -ig terjed, ezért a szöveti elemek számszerűsítését célszerű volt fenokristályokra és külön az alapanyagra elvégezni.

A kőzetek szövete és a szilárdság kapcsolatát vizsgáló tanulmányokban gyakran a szövet számszerűsítése az alkotók paramétereinek felhasználásával számolt mutatók formájában történik (Askaripour és mtsai., 2022). Az egyik leggyakrabban használt mutató a szöveti koeficiens (texture coefficient, továbbiakban TC) (Esmailzadeh és mtsai., 2017; Howarth & Rowlands, 1987; Ozturk és mtsai., 2004). A tállyai minták fenokristályai esetében a szöveti koeficiens a 5. táblázat foglalja össze, a recski minták esetében a 6. táblázat foglalja össze a TC értékeket. A terület súlyozását (AW) Howarth & Rowlands (1987) üledékes kőzetek esetén indokolja, ugyanakkor Esmailzadeh és mtsai. (2017) rámutat ennek szükségességére más kőzetek esetében is. Ennek tükrében mind a 100 μm -nél nagyobb, mind a 100 μm -nél kisebb szemcsék esetében a terület súlyozása a mért szemcsék területének hányadával történt. A szöveti tulajdonságokból adódóan a minta egy része az optikai mikroszkópos módszerrel elérhető nagyítással üveges masszaként észlelhető, így ennek számszerűsítése nem volt lehetséges, ezért ennek hányada nem került be a számításokba a területsúlyozás által.

5. táblázat: A tállyai minták szöveti koeficiense a 100 μm -nél nagyobb szemcsék esetén (Rövidítések magyarázatáért lásd 2.2.3 fejezet).

	AW	N0/N0+N1	1/FF	N1/(N0+N1)	AR1	AF1	TC
T_1	0,13	0,64	4,85	0,36	2,77	1,00	0,53
T_2	0,18	0,57	6,35	0,43	3,03	0,99	0,89
T_3	0,14	0,60	6,86	0,40	2,83	0,98	0,73

6. táblázat: A recski minták szöveti koeficiense a 100 μm -nél nagyobb szemcsék esetén (.

	AW	N0/N0+N1	1/FF	N1/(N0+N1)	AR1	AF1	TC
R_1	0,04	0,70	6,09	0,30	2,56	0,94	0,20
R_3	0,28	0,56	3,13	0,44	2,90	0,99	0,84
R_4	0,15	0,72	3,31	0,28	2,56	0,94	0,46

7. táblázat: A tállyai minták szöveti koeficiense a 100 μm -nél kisebb szemcsék esetén (Rövidítések magyarázatáért lásd 2.2.3 fejezet).

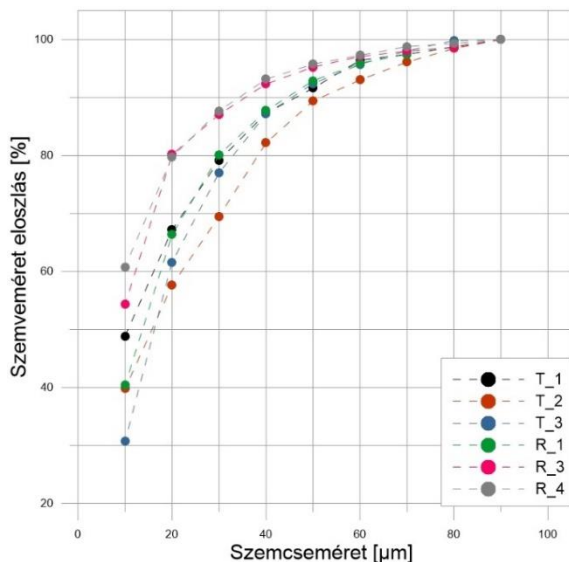
	AW	N0/N0+N1	1/FF	N1/(N0+N1)	AR1	AF1	TC
T_1	0,15	0,57	2,72	0,52	3,19	0,95	0,46
T_2	0,17	0,44	2,41	0,57	3,28	0,86	0,45
T_3	0,22	0,44	1,99	0,56	3,35	0,93	0,57

8. táblázat: A recski minták szöveti koeficiense a 100 μm -nél kisebb szemcsék esetén (Rövidítések magyarázatáért lásd 2.2.3 fejezet).

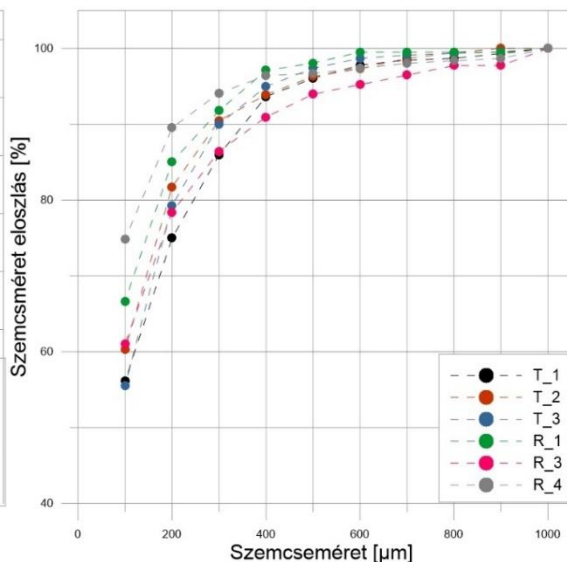
	AW	N0/N0+N1	1/FF	N1/(N0+N1)	AR1	AF1	TC
R_1	0,26	0,71	2,22	0,29	2,67	0,98	0,61
R_3	0,30	0,70	1,75	0,29	2,56	0,99	0,59
R_4	0,37	0,73	1,66	0,27	2,5	0,99	0,70

Askaripour és mtsai. (2022) kiemelik, hogy a bonyolult szöveti jellemzőkkel rendelkező kőzetek szöveti tulajdonságai nem fejezhetőek ki egy mutatóval, egy számértékkel. Példaként a vetőbreccsát hozza fel, amely egyaránt tartalmaz nagyobb ásványszemcséket és finomszemcsés mátrixot, és amely ásványtani és szöveti tulajdonságai eltérnek más kőzettípusoktól, mint a homokkő, mészkő és gránit. A szakirodalomban közölt példák alapján (Askaripour és mtsai., 2022; Esmailzadeh és mtsai., 2017; Räisänen, 2004) megállapítható, hogy ez a mutató bizonyos kőzettípusok – különösen a gránit – esetében szoros korrelációt mutat a kőzet szilárdsági jellemzőivel, ugyanakkor Ozturk és mtsai. (2014), Ozturk és mtsai. (2004) rámutatott, hogy azon kőzetek esetében, amelyek szövete komplex, nehéz korrelációt megállapítani a kőzet szövete és szilárdsága között. Ozturk és mtsai. (2004) andeziteken végzett vizsgálatok alapján megállapították, hogy andezitek esetében a szöveti koefficiens és a kőzet fizikai tulajdonságai között nem állapítható meg korreláció. Így a számítás során kapott részeredmények, valamint a szakirodalomban található andezitekre vonatkozó eredmények alapján, arra a következtetésre jutottam, hogy az andezitekre jellemző inekvigranuláris szövet nehezen vagy egyáltalán nem számszerűsíthető a szakirodalomban található indexekkel.

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok során a szövet számszerűsítése nem hozta a várt eredményeket, ugyanakkor számos fontos információt sikerült kinyernem a szöveti mérések során. A szemcse elemzések során az egyik mért paraméter a Feret-átmérő. Az ebből számolt szemcseméret-eloszlást a mikrokristályos alapanyagra a 26. ábra, a fenokristályokra pedig 27. ábra mutatja be. Az átlagos szemcseméreteket pedig a 9. táblázat foglalja össze. Az átlagos szemcseméreteken túl szintén fontos információ az alkotó ásványszemcsék alakja, amelynek számszerűsítését az alakarány tényezővel (aspect ratio) végeztem el, amely a szemcsék legnagyobb és legkisebb Feret-átmérőjének arányából számolt alakarány tényezők átlaga (10. táblázat). Az alakarány tényező minél nagyobb, annál több a hosszúkas szemcsék aránya a mintában.



26. ábra: Az alapanyag szemcseméret eloszlása.



27. ábra: A fenokristályok szemcseméret eloszlása

9. táblázat: A minták alapanyagának és a fenokristályainak szemcseméret eloszlása.

Minta neve	Alapanyag $\bar{x}$ [µm]	Fenokristályok $\bar{x}$ [µm]
T_1	28,4	250,2
T_2	32,4	231,7
T_3	30,8	236,9
R_1	27,8	214,3
R_3	24,7	256,5
R_4	23,8	208,5

10. táblázat: A minták alakarány tényezője.

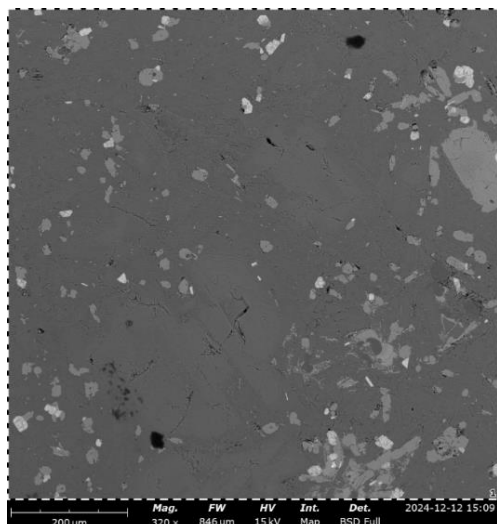
Minta neve	Alakarány tényező [-]
T_1	1,99
T_2	2,19
T_3	2,05
R_1	1,86
R_3	2,14
R_4	14,8

5.1.3.2. Elektronmikroszkópos megfigyelések

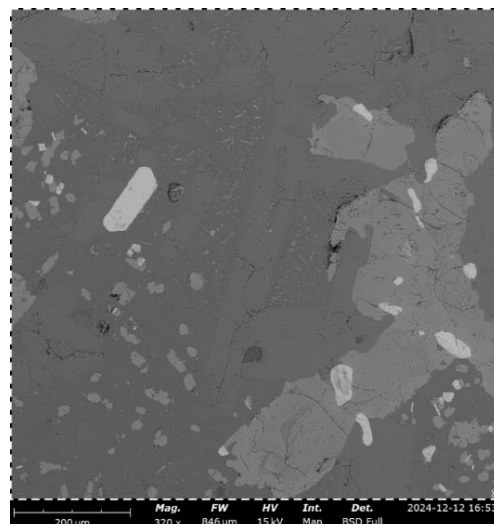
Az elektronmikroszkópos megfigyelések fő célja az optikai mikroszkópos megfigyelések kiegészítése volt. A megfigyelés során több BSE kép, elemtérkép és pontelemzés is történt. Az eredményeket mintánként mutatom be.

5.1.3.2.1. T_1 minta

A T_1 minta jellemző szövetét mutatja be a 28. ábra és 29. ábra. Mivel a minta jelentős részét a különböző összetételű földpátok alkotják, ugyanakkor a kémiai összetételükből adódóan (szilárd elegysor) a visszaszórt elektronképen (BSE) ezek nehezen elkülöníthetők. Az elemtérképekből jól látható, hogy a Ca és Na tartalmú plagioklász földpátok nagyobb méretű kristályokat alkotnak, míg a K-földpátok a mátrixot alkotják, ugyanakkor ezekhez is jelentős Na tartalom társul (Melléklet 158. ábra, 159. ábra).

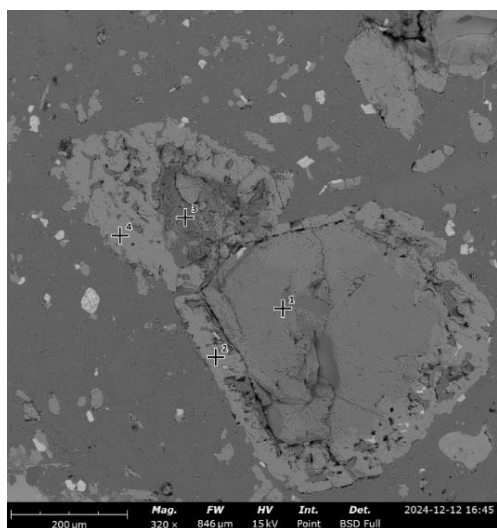


28. ábra: T_1 minta BSE képe



29. ábra: T_1 minta BSE képe

A 29. ábraábrához tartozó, a Melléklet 159. ábraábrához bemutatott elemtérképeken a plagioklász földpátok nagyobb méretéből adódóan jól látszik, hogy a Na az egyes ásványszemcsék szegélyi zónájához kötődik, valamint a kisebb szemcseméretű, a mátrixot alkotó K-földpátokban jelenik meg nagyobb mennyiségben. A Fe, Mg és Mn elszórtan piroxének alkotójaként jelenik meg. A Ti leggyakrabban a Fe-vel társul, az XRD mérések és a morfológia alapján ilmenitet képezve, elszórtan, járulékos ásványként jelenik meg. A 159. ábrán bemutatott elemtérképeken jól látszik, hogy ezek elsősorban a piroxének átalakulási termékeként keletkeznek. A 28. ábrához és 29. ábrához leírt szöveti jellemzőkön túl, kisebb mennyiségben, de jellemző a 30. ábrán látható nagy méretű amfibolok jelenléte. A BSE képeken látható, hogy a peremi zónája mállott, porózus. A 11. táblázat tartalmazza a 30. ábrán jelölt egyes pontokhoz tartozó kémiai összetételt. A kémiai összetétel alapján jól látható az Fe-ban gazdag szegély kialakulása (2. pont) a peremen, aminek a kárára a karbonát képződés és a mállás gyorsabban haladt előre (3. pont).



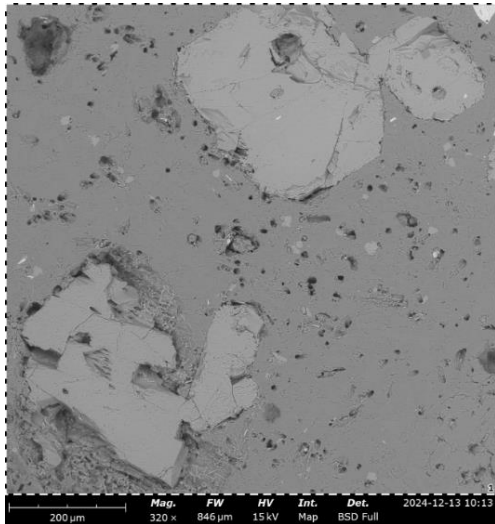
30. ábra: T_1 minta BSE képe

11. táblázat: A 30. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

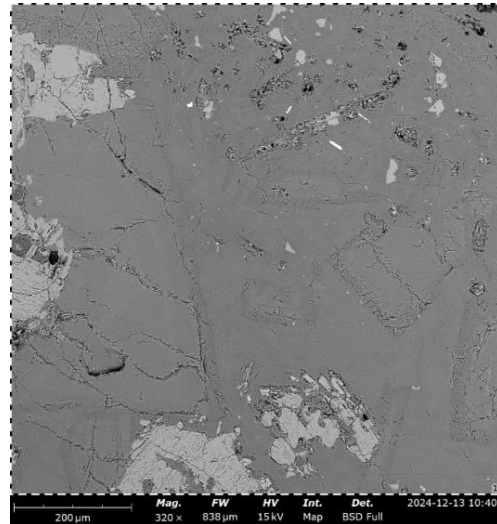
Kémiai elem	1.pont	2.pont	3.pont	4.pont
O	55,7	46,26	42,95	45,90
Si	20,7	23,88	24,10	23,61
Mg	9,8	8,45	1,58	8,52
Ca	8,5	2,77	1,55	2,46
Fe	2,4	17,26	4,27	16,88
Al	2,0	1,39	5,35	1,65
Na	0,9	0	1,14	0,45
K	0	0	4,46	0,26
C	0	0	13,92	0
Ti	0	0	0,69	0,27

5.1.3.2.2. T_2 minta

A T_2 minta jelentősen több pórust tartalmaz, mint a T_1 minta (31. ábra és 32. ábra), ezek eloszlása véletlenszerű, de leggyakrabban a mátrixban jelenik meg. Keletkezésük az alapanyag kihűlés közbeni kigázosodása, széndioxid és vízgőz képződéséhez köthető.



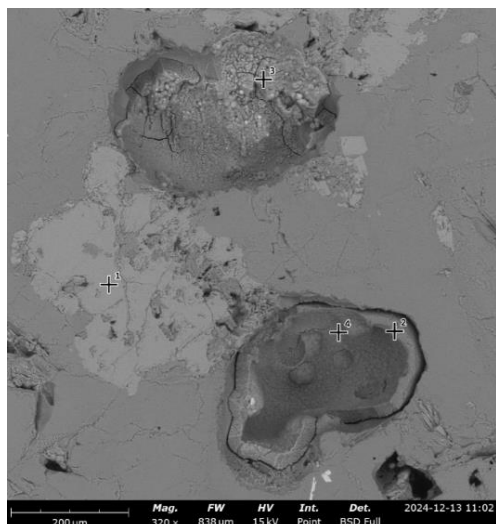
31. ábra: T_2 minta BSE képe



32. ábra: T_2 minta BSE képe

A Melléklet- 160. ábra és 161. ábra által bemutatott elem térképek alapján, jól beazonosítható, hogy ez esetben is a plagioklász földpátokhoz kapcsolódó Ca-tartalom alapján nagyobb méretű kristályok figyelhetők meg, amelyhez főleg a peremi zónákban Na tartalom is társul. A mikrokristályos alapanyagot itt is a káliföldpátok alkotják. A 200-300 µm-es szemcsenagyságú főként Ca, Fe és Mg tartalmú piroxének és a Fe, Mg és Mn tartalmú amfibolok (közepes árnyalatú szürke a BSE képeken) erősen mállottak. A 31. ábra bal alsó negyedében és a 34. ábrán például egy erősen mállott, üreges piroxén látható.

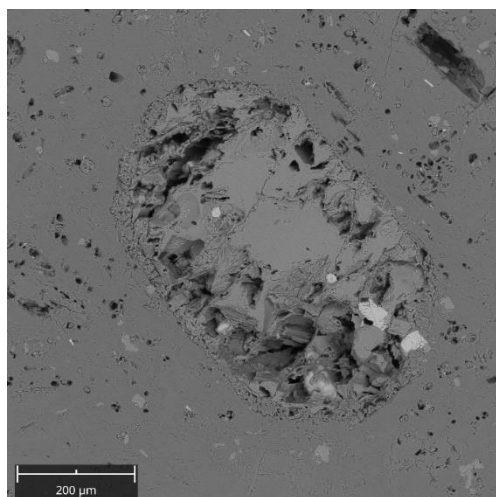
A 33. ábra által bemutatott BSE képen látható, hogy a kőzet mállása során keletkezett nagyobb méretű, 200-300 µm-es üregeket különböző másodlagos ásványtársulások töltik ki. A 12. táblázat 2-3. pont kémiai összetételéből agyagásvány, az XRD eredmények alapján valószínűsíthető, hogy szmektit tölti ki. A 35. ábra nagy kiterjedésű szövet-szerkezeti hézagot mutat be, amelyben saját alakú karbonát, feltehetően sziderit, kristályosodott ki hidrotermás oldatokból. A kristályok felületét pedig agyagásvány bevonat borítja.



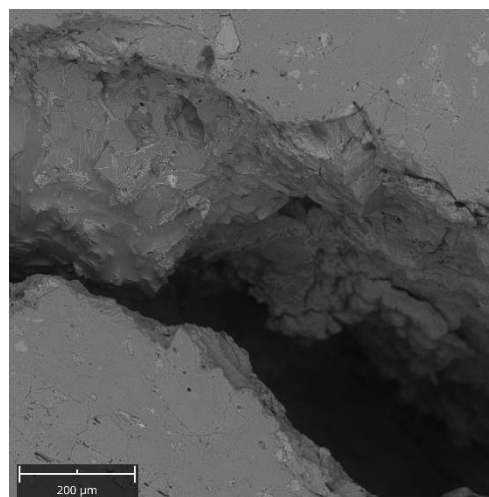
33. ábra: T_2 minta BSE képe

12. táblázat: A 33. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

Kémiai elem	1.pont	2.pont	3.pont	4.pont
O	41,74	52,81	44,16	45,57
Si	19,82	19,65	19,79	15,88
C	12,79	11,78	13,89	10,02
Ca	9,34	1,28	1,78	2,07
Fe	6,88	4,16	14,28	15,10
Mg	6,44	0,52	1,23	1,07
Al	2,20	11,78	3,45	5,04
Na	0,50	0	0	0,81
Ti	0,28	0	0	0
K	0	0,27	0,26	0,44
Mn	0	0	1,16	3,69



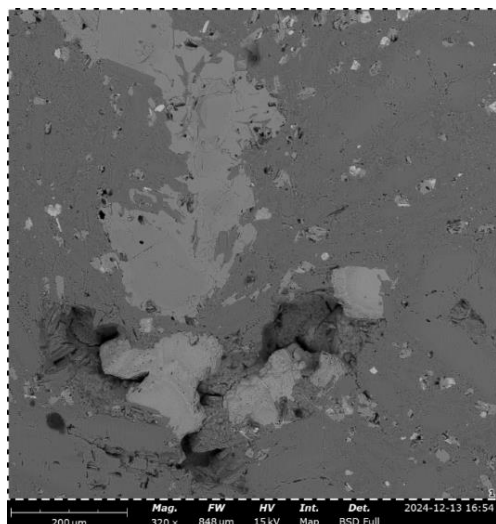
34. ábra: T_2 minta BSE képe



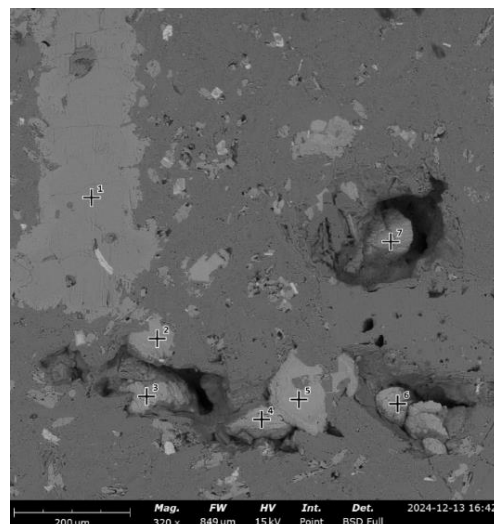
35. ábra: T_2 minta BSE képe

5.1.3.2.3. T_3 minta

A T_3 minta esetében a minta összképe mállottabb. A kis méretű, pár mikronos porozitás mellett, a T_2 mintával ellentétben az ásványok elbomlásából és a pórusokat csak részlegesen kitöltő másodlagos ásványok kialakulásával jelentős méretű pórusok keletkeztek. A 36. ábra és a 37. ábra az alapanyag nagyobb üregeiben kifejlődött alacsony hőmérsékletű (kb. 80-90 °C) sziderit xenomorf halmazait mutatja. A kőzet kevésbé bontott részében a Na-dús (Melléklet- 162. ábra) plagioklász alapanyagban nagyméretű alakatlan piroxénkristályok gyakoriak. Az EDS mérést az XRD eredményekkel összevetve és a 13. táblázat 1. pontja piroxént jelöl. A visszaoldódás során kialakult fogazott felülete ezeknek a kristályoknak növeli a szemcsék közötti kötési erőt és ezáltal a szilárdságot.



36. ábra: T_3 minta BSE képe

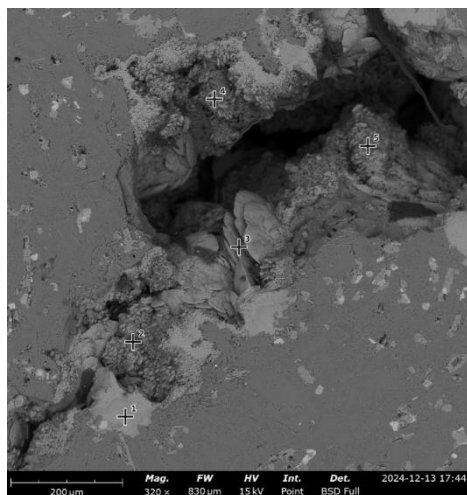


37. ábra: T_3 minta BSE képe

13. táblázat: A 37. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

Kémiai elem	1. pont	2. pont	3. pont	4. pont	5. pont	6. pont	7. pont
O	44,86	46,01	36,94	44,67	45,26	21,44	25,25
Si	20,01	4,29	5,12	4,03	3,61	12,09	14,83
Fe	5,18	27,57	39,78	29,50	34,00	46,79	39,61
Mg	9,27	2,65	1,05	2,74	0,52	0,65	0,75
C	9,04	13,82	12,11	13,76	13,61	7,32	8,31
Al	1,38	1,25	1,86	1,53	1,51	4,86	5,20
Ca	1,02	3,18	1,29	3,55	1,28	1,4	1,49
Mn	0	0,93	1,67	0	0	2,64	2,29
K	0	0,31	0,20	0,21	0,21	0,59	0,52
Na	0	0	0	0	0	2,11	1,73
Ti	0	0	0	0	0	0,11	0

A 38. ábrán látható nagyméretű üregben változatos morfológiájú másodlagos képződésű ásványos összlet figyelhető meg. Az üreg alakja arra enged következtetni, hogy keletkezése a mállás eredménye, az utólagos alacsony hőmérsékletű hidrotermás oldatokban Fe-szilikát ásvány oldódott fel, és a karbonátosodás során sziderit képződött. A sziderit összetételében mindig észlelt Si és Al a szilikát mállásból maradt vissza (14. táblázat)



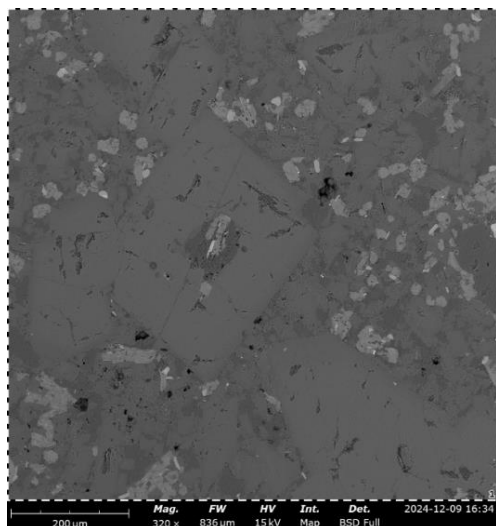
38. ábra: T_3 minta BSE képe

14. táblázat: A 38. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

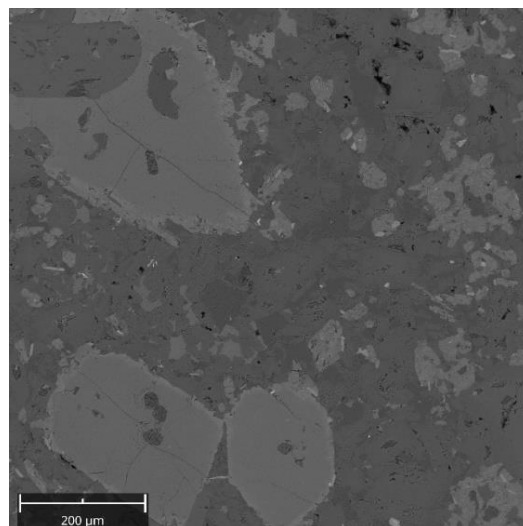
Kémiai elem	1. pont	2. pont	3. pont	4. pont
O	44,24	26,17	20,93	52,15
Fe	36,04	44,00	54,53	24,24
C	13,20	10,67	9,69	15,32
Si	3,59	9,99	5,78	3,93
Al	1,33	3,25	2,03	1,14
Ca	1,08	1,14	0,94	0,72
Mg	0,52	0,77	0,63	0,77
Mn	0	1,86	4,10	1,65
Na	0	1,29	0,95	0
K	0	0,51	0,29	0
Ti	0	0,35	0,13	0,09

5.1.3.2.4. R_1 minta

A 39. ábrán látható nagyméretű, saját alakú plagioklász kristályok a Ca dús (Melléklet- 163. ábra), magas hőmérsékletű kristályosodást jelzik, az XRD szerint azonosított labradoritnak felelnek meg. Az alapanyagban saját alakú albitos plagioklászok uralkodnak, hézagkitöltő szanidinnel (Melléklet- 163. ábra). A világosabb szürke szemcsék piroxén kristályai, a sötétszürke üregkitöltő anyag pedig agyagásvány. A 40. ábra nagyméretű idiomorf piroxén fenokristályokat ábrázol, amelyekben szmektit kitöltések láthatók, a peremük pedig vasban dúsul. Az alapanyag albitos és szanidines, a kisebb méretű piroxénkristályokkal együtt.

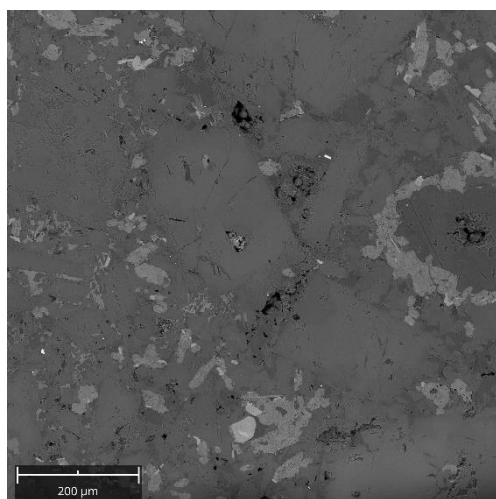


39. ábra: R_1 minta BSE képe

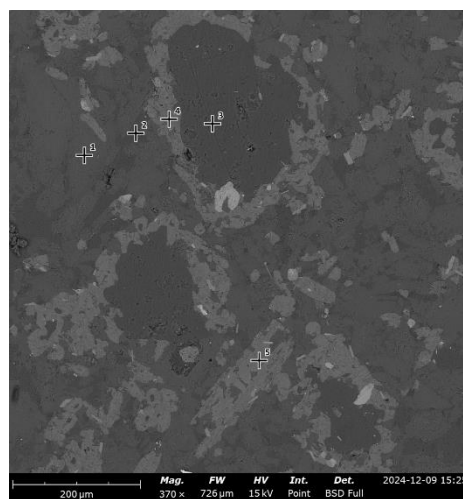


40. ábra: R_1 minta BSE képe

A 41. ábrán a szemcsehatárokon kialakuló porózus, szmektittel kitöltött részek gyengíthetik a kőzet szerkezetét. Továbbá a piroxénkorona által övezett plagioklász kristályok belsejében is találni szmektittartalmú üregeket, ami a hidrotermás oldatok átitató jellegét támasztja alá. A 42. ábrán az XRD eredményekkel összefüggően kvarckristályok figyelhetők meg, piroxénkorona által övezve.



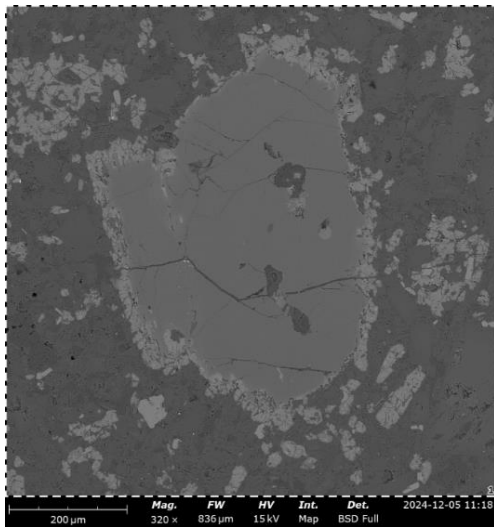
41. ábra: R_1 minta BSE képe



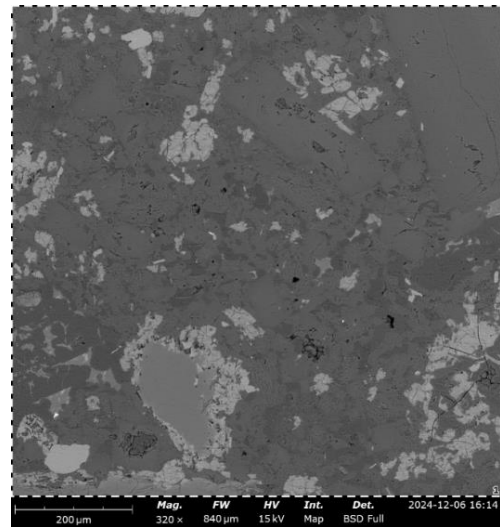
42. ábra: R_1 minta BSE képe

5.1.3.2.5. R_3 minta

Az R_3 minta fokozatosan előrehaladó elváltozást mutat a makroszkópos megfigyelésekkel összhangban, a hipidiomorf piroxén fenokristályok (43. ábra) peremén második generációs Fe-gazdag mikrokristályokban kifejlődő piroxén koszorú jellemző (Melléklet- 165. ábra). Ez a mikrokristályos piroxéngeneráció fokozatosan goethitté alakul át (44. ábra), megtartva a Mg, Ca és K alacsony mennyiségű jelenlétét (Melléklet- 166. ábra). Ennek magyarázata lehet az is, hogy az átalakulás közben a goethittel párhuzamosan agyagásványok is keletkeztek. A helyettesítés teljes térfogatkitöltéssel történt a piroxénkristályok helyét átvéve. Az alapanyag az R_1 mintához hasonlóan Na-gazdagabb plagioklász finomszemcsés tömege.

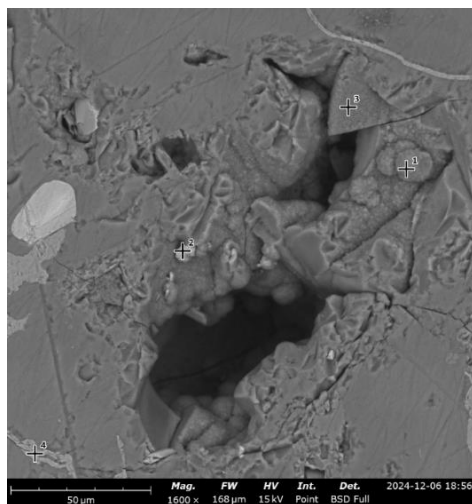


43. ábra: R_3 minta BSE képe



44. ábra: R_3 ábra BSE képe

A 45. ábra üreg falán saját alakú fennőt kvarckristályokat szemléltet, amelyek felületén agyagásvány bevonat képződött. Az üreg és a kiválások alacsony hőmérsékletű hidrotermás fluidumok áramlására utal. Ezeknek a hidrotermás fluidumoknak szerepe lehetett a kisebb méretű piroxének goethitté való átalakulásában is. Szulfidásványok képződése nem figyelhető meg a hidrotermás folyamatokhoz kapcsolódóan.



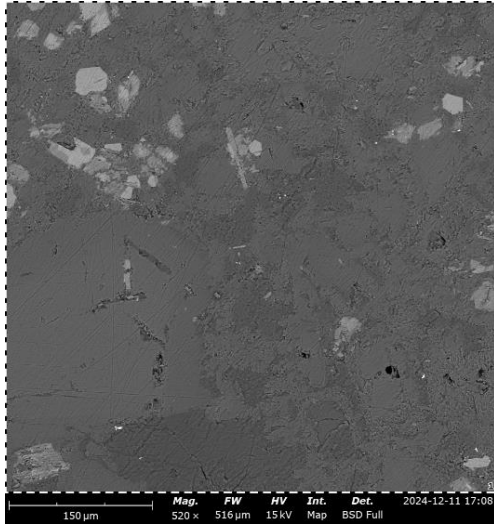
45. ábra: R_3 ábra BSE képe

15. táblázat: A 45. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

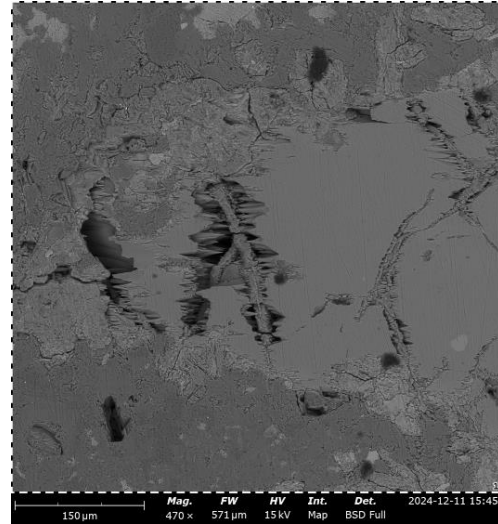
Kémiai elem	1. pont	2. pont	3. pont
O	60,30	54,09	53,72
Si	25,07	6,61	27,78
C	12,73	7,94	11,97
Al	1,91	1,29	2,51
Ti	0	27,32	0,11
Fe	0	1,39	1,79
Ca	0	0,50	0,82
Na	0	0,41	0,46
Mg	0	0,39	0,62
K	0	0,09	0,22

5.1.3.2.6. R_4 minta

A 46. ábra a kismértékben bontott plagioklász fenokristályokat és a Na-ban dúsabb mikrokristályos plagioklászok és a részben goethit által helyettesített piroxénkristályok alkotta alapanyagot mutatja be. A plagioklász fenokristályok belseje Ca-ban gazdagabb (Melléklet-167. ábra) ami az R_1 és R_3 mintákban is megfigyelhető volt, hasonló képződési körülményekre utalva, amit az utólagos bontás intenzitása írt felül.

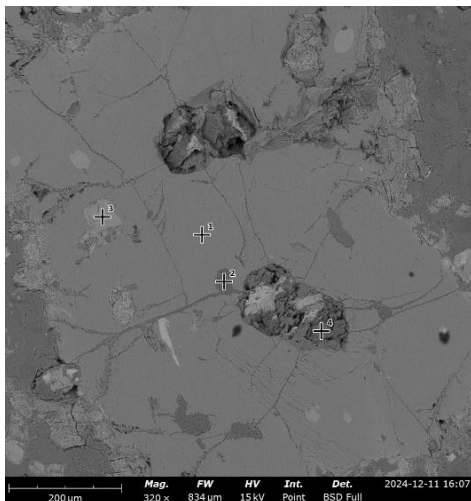


46. ábra: R_4 minta BSE képe



47. ábra: R_4 minta BSE képe

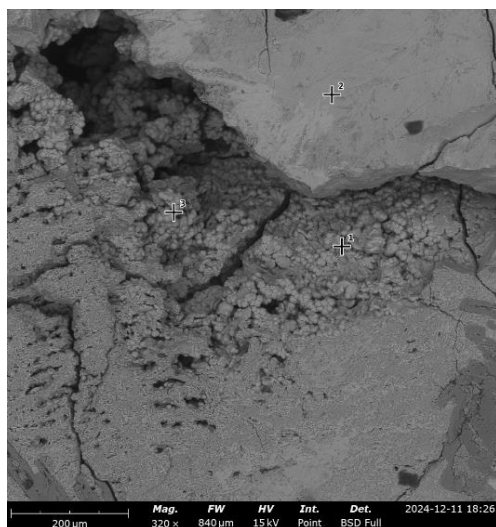
A piroxén fenokristályok (Melléklet 168. ábra) jellemzően Mg-ban gazdagabbak, mint az R_1 és R_3 mintában, ezzel összefüggésben nem a goethit általi helyettesítés, hanem a kioldódás, mint mállási folyamat az uralkodó bélyeg. Ennek következtében anyageltávolítás és a piroxéneket övezően szmektit képződés lép fel (Melléklet- 168. ábra). A kétféle módon megjelenő átalakulási szövet egyik típusa a fenokristályok belsejében, repedésekben és üregekben kicsapódó mállástermékek (48. ábra). A másik típus amikor a kiöblített elemekből a reziduális Fe, ami nem épül be az agyagásványokba, goethitsávokat (49. ábra) képez, ami a kőzetaprózódást jelentős mértékben gyorsító tényező.



48. ábra: R_4 minta BSE képe

16. táblázat: A 48. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

Kémiai elem	1. pont	2. pont	3.pont	4. pont
O	42,39	46,01	43,69	37,80
Si	18,66	26,45	14,76	22,24
C	14,73	13,93	12,53	15,21
Fe	12,69	5,95	24,58	9,22
Mg	9,65	1,97	1,43	2,67
Al	0,99	4,51	1,66	10,68
Ca	0,89	1,18	1,34	1,95
K	0	0	0	0,23



49. ábra: R_4 minta BSE képe

17. táblázat: A 49. ábrához tartozó mérési pontok kémiai összetétele tömegszázalékban (wt%)

Kémiai elem	1. pont	2. pont	3. pont
Fe	60,04	30,12	27,89
O	23,28	45,12	49,37
Si	7,71	12,99	9,61
C	6,98	9,86	7,31
Al	1,32	1,01	1,76
Ca	0,68	0,90	0,65
Mn	0	0	3,07

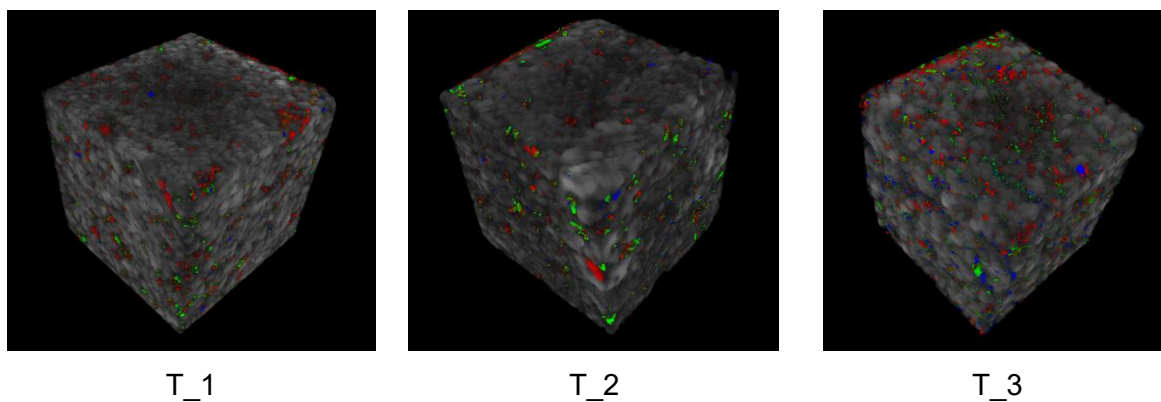
5.1.3.3. Mikro-CT megfigyelések

A μ -CT módszer az egyes alkotókat elnyelési együttható értékük alapján képes megkülönböztetni. A vizsgált minták közetalkotó ásványainak elnyelési együtthatóit a 18. táblázat foglalja össze. Az értékekből látható, hogy a fő közetalkotó földpátok esetében, valamint a SiO_2 módosulatok, mint a cristobalit és kvarc és néhány, a mintában kis mennyiségben előforduló agyagásványok mint a kaolinit és szmektit ezen értékek közel esnek egymáshoz, így ezek elkülönítésére nem volt lehetőség. Ugyanakkor a módszer lehetővé tette négy nagyobb csoport elkülönítését: a fent említett ásványcsoport, amelyet az 50. ábra és 51. ábra esetében a szürke árnyalatú szín, a dolomitot a piros szín, a piroxéneket (ensztatit és diopszid) a zöld, és a Fe és Ti tartalmú másodlagos ásványokat (sziderit, ilmenit, goethit, titanomagnetit) a kék szín jelöli.

18. táblázat: A mintákban azonosított ásványfázisok elnyelési együtthatói

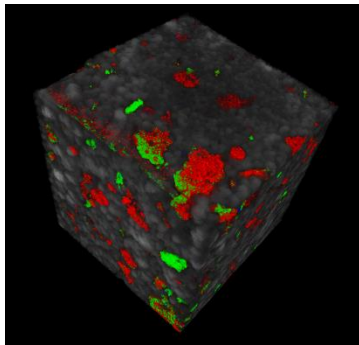
Ásvány	Kaolinit	Cristob.	Smek.	Szani.	Kvarc	Oligokl.	Mikrokl.	Andezin	Labrad.	Dolomit	Enszt.	Diopsz.	Sziderit	Ilmenit	Goethit	Titano-
Elnyelési együttható	0,0193	0,0250	0,0258	0,0261	0,0267	0,0268	0,0272	0,0280	0,0284	0,0338	0,0366	0,0412	>0,0940			
Szürke-skála	31-81									82-96	97-127	128- 256				
Szín	Szürke									Piros	Zöld	Kék				

Az egyes fázisok térfogatarányos eloszlását 19. táblázat tartalmazza. A módszerrel kapott eredmények direktben nem összehasonlíthatók az XRD-vel mért mennyiségi ásványos összetétellel, mivel azok tömegszázalékban vannak kifejezve, míg a mikró-CT-vel kapott eredmények térfogat százalékban. A tályai minták esetében (50. ábra) a dolomittartalom nagyjából hasonló, amelyet az XRD eredmények is alátámasztanak. A piroxéntartalom enyhén változó a mintacsoporton belül, ezek általában nagyobb kristályok és aggregátumok formájában jelennek meg, mint az az elektronmikroszkópos képeken is megfigyelhető volt. A negyedik csoportban tartozó ásványok közül, a T_2 és T_3 mintában főleg a sziderit volt jellemző üregkitöltő ásványokként. Ha az 50. ábrán látható kék zónákat és a 52. ábrán megjelenített porozitás helyzetét összehasonlítjuk, láthatjuk, hogy a nagyobb kiterjedésű kék színű zónák ezekkel nagyjából azonos helyen jelennek meg.

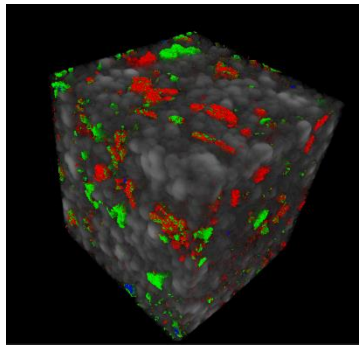


50. ábra: A tályai mintákon μ -CT-vel azonosított fázisok (mintatest mérete 1x1x1 cm)

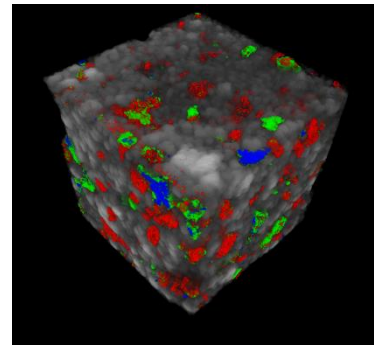
A recski minták esetében (51. ábra, 19. táblázat) látható, hogy a kőzetalkotó ásványok hányada kismértékben különbözik a tályai mintáktól. Ugyanakkor dolomit, piroxének és a Fe valamint Ti tartalmú ásványok aránya jól tükrözi a mikroszkópos megfigyelések szerinti mállottsági sorrendet. Ezeknek a lehatárolható fázisoknak a szemcsemérete, alakja és eloszlása is értelmezhető mikro-CT felvételeken. Többnyire megnyúlt, szferoidális testeket alkotnak viszonylag egyenletes eloszlásban. Méretük a tályai mintákhoz viszonyítva többszörösen nagyobb. A dolomit mennyisége a recski mintákban jelentősen nagyobb. Jelenlétét az XRD eredmények is igazolták, az optikai mikroszkópos megfigyelések során nem sikerült azonosítani feltehetőleg a kis szemcsemérete miatt, az elektronmikroszkópos megfigyelések során pedig egyrészt a C gőzölés másrészt a Ca és Mg elszórt, több fázishoz köthető jelenléte nem tette lehetővé.



R_1



R_3



R_4

51. ábra: A recski mintákon μ -CT-vel azonosított fázisok (mintatest mérete 1x1x1 cm)

19. táblázat: Az egyes lehatárolt fázisok térfogatarányos eloszlása a mintákban tömegszázalékban kifejezve

Minta neve	T_1	T_2	T_3	R_1	R_3	R_4
Szürke	94,27	93,09	92,24	88,08	90,73	88,33
Piros	3,75	2,06	3,61	8,63	5,49	7,00
Zöld	1,51	0,70	2,15	2,92	2,97	3,29
Kék	0,23	0,15	0,59	0,11	0,61	0,31

5.1.4. Porozitás

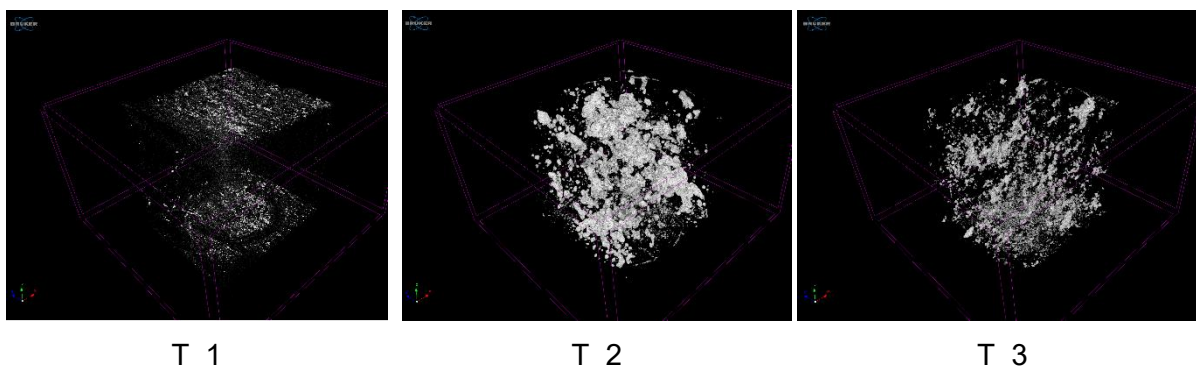
A minták porozitásának meghatározását több módszer alkalmazásával végeztem el. Első lépésként He-piknométeres módszert alkalmaztam. A mérési módszer lehetővé teszi a porozitás és az anyag sűrűségének egyidejű meghatározást, a mérési eredményeket a 20. táblázat foglalja össze. Az eredmények értelmében a tályai minták esetében a T_1 minta porozitása volt a legkisebb, míg a T_3 minta porozitása a legnagyobb. A minták sűrűsége nem mutatott jelentős eltérést. A recski minták esetében az R_1 minta porozitása volt a legkisebb és sűrűsége a legnagyobb. Az R_4 minta porozitása jelentősen nagyobb, mint a lelőhelyről származó másik két mintáé. A He piknométeres mérés széles körben alkalmazott módszer a kőzetek sűrűségének mérésére. Pontossága a porozitás meghatározásban azonban a kőzet pórusszerkezetétől és a porozitás jellegétől függ. A módszer pontosan méri a sűrűséget és a nyílt porozitást, azonban nem feltétlenül megbízható a teljes porozitás meghatározásában, különösen jelentős zárt pórusokkal rendelkező magmás kőzetek esetében. A teljes porozitás pontos meghatározásához célszerű kombinálni más technikákkal, mint a mikro-CT mérések. A mikro-CT alkalmas a kőzetben található összes porozitás kimutatására, függetlenül attól, hogy az nyitott vagy zárt porozitás.

20. táblázat: A He piknométeres porozitás és sűrűségmérés eredményei.

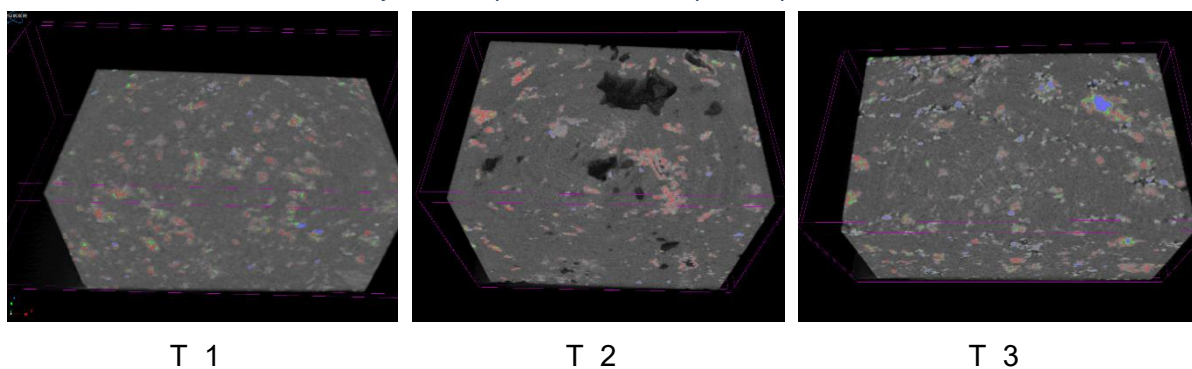
Minta neve	T_1	T_2	T_3	R_1	R_3	R_4
He-piknométer [%]	0,39	1,4	1,8	0,9	1,08	4,62
Sűrűség [g/cm ³]	2,68	2,60	2,61	2,74	2,62	2,60

A mikro-CT mérés eredményeit a 21. táblázat foglalja össze, valamint a módszerrel mért porozitás vizuális megjelenítést az 52. ábra és 54. ábra mutatja be. A mikro-CT eredmények

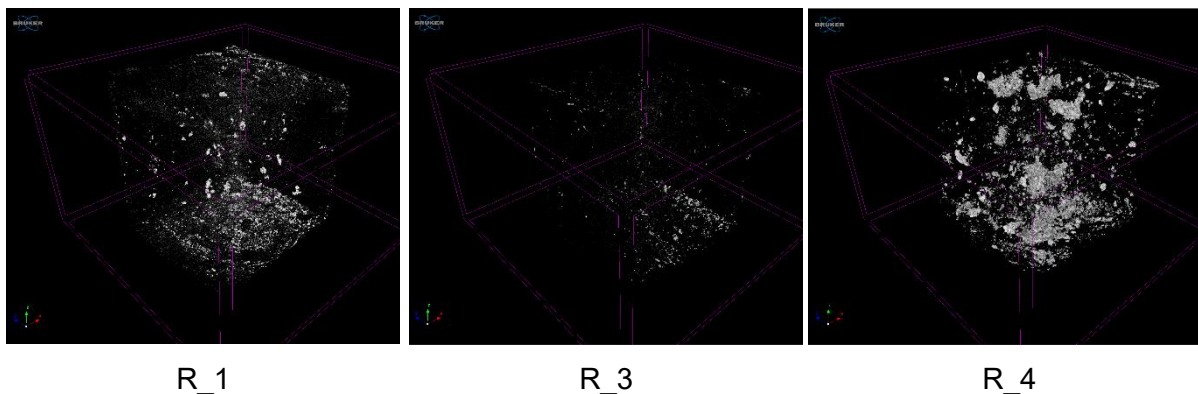
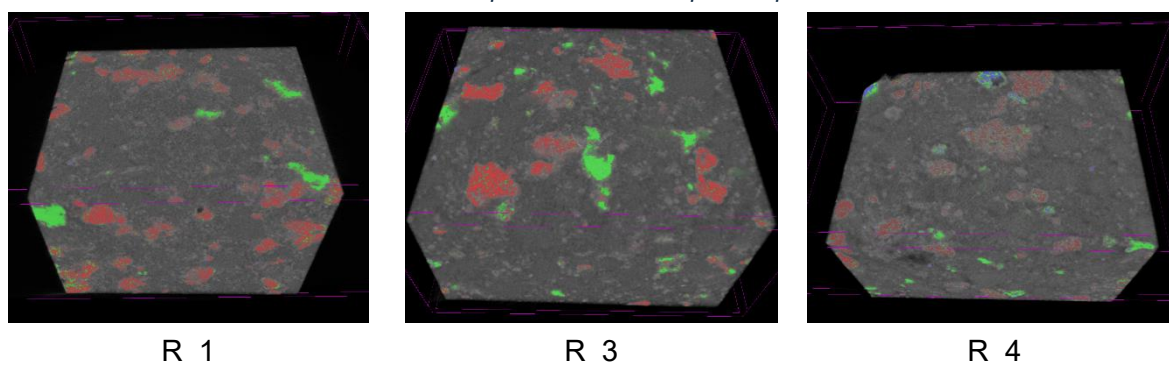
alapján látható, hogy a minták tartalmaznak olyan zárt pórusokat, amely a He-piknométeres mérések során nem voltak mérhetők. A 21. táblázatban látható a minta térfogata, amely a mérés során beszkenelt és a szoftveres rekonstrukció során megjelenítette térfogat. Ebből a térfogatból határoztam meg a porozitás össztérfogatát és a százalékos arányát. A táblázat utolsó két sora tartalmazza százalékban kifejezve a nyílt porozitást és a zárt porozitást. A T_2 minta esetében jól látható, hogy a mikro-CT mérések alapján a mért teljes porozitáson belül a zárt pórusok 2,29 %-os aránya jelentősen nagyobb, mint a többi minta esetében, ahol a zárt porozitás jellemzően 0,61 és 0,03 % között van. A T_2 mintában a nagyméretű pórusok a makroszkópos leírás során is megfigyelhetők voltak és az 53 ábrán is jól látható. A recski minták esetében megfigyelhető, hogy a porozitásuk alacsony és a teljes porozitáson belül a zárt pórusok aránya alacsony, különösképpen az R_1 és R_3 minták esetében. Ez valószínűleg a másodlagos ásványképző folyamatok hatásával hozható összefüggésbe. Az egyes mérési módszerek közötti eltéréshez részben az is hozzájárul, hogy a méréseket nem ugyanazon a mintatesten végeztem el, mivel ezt a módszerek nem tették lehetővé. Az R_4 minta esetében szintén jelentős eltérés figyelhető meg, itt a mikro-CT mért alacsonyabb porozitást. Ennek oka feltételezhetően az erősen mállott és ezáltal inhomogén minta, amely nem tette lehetővé hasonló paraméterekkel rendelkező mintatestek kialakítását.



52. ábra: A tállyai minták porozitásának leképezése μ -CT módszerrel:



53. ábra: A porozitás eloszlása a köztétőmegén belül a tállyai minták esetén.

54. ábra: A recski minták porozitásának leképezése μ -CT módszerrel:

55. ábra: A porozitás eloszlása a közettömegben belül a recski minták esetén.

21. táblázat: A μ -CT mérésekből származó porozitás adatok

Minta neve	T_1	T_2	T_3	R_1	R_3	R_4
Minta térfogata [mm ³]	3309,1	3134,6	3094,5	3538,1	3198,35	3556,20
Pórus össz-térfogat [mm ³]	7,84	124,83	43,56	9,09	6,19	37,7
Porozitás [%]	0,23	3,98	1,40	0,26	0,20	1,06
Nyitott porozitás [%]	99,81	97,59	99,21	99,84	99,91	99,52
Zárt porozitás [%]	0,12	2,29	0,61	0,09	0,03	0,30

A két különböző mérési módszerrel kapott porozitás eredményekből látható, hogy a T_1, T_3 és az R_1, R_3 minták esetében látható, hogy a porozitás értéke között nincs jelentős eltérés. A mért eltéréseket a módszerbéli különbség, valamint a nem azonos mintatesteken végzett mérés is okozhatja. Az R_4 minta esetében valószínűsíthető, hogy a jelentős eltérést a két eredmény között a minta inhomogenitása okozta, mivel a μ -CT-vel mért zárt porozitás hányada nem indokol ilyen mértékű eltérést. Figyelembe véve az előbbieket, az eredmények kiértékelése során a két mérési módszerrel kapott porozitás eredmények átlagát vettem figyelembe. A T_2 minta esetén a μ -CT mérések bizonyították, hogy a porozitás jelentős hányada zárt porozitás formájában jelenik meg, amely a He-piknométeres módszerrel nem mérhető, így ezen

minta esetében a μ -CT módszerrel mért porozitást tekintetem mérvadónak. A porozitás értékeit a 22. táblázat mutatja be.

22. táblázat: A minták porozitása

Minta neve	T_1	T_2	T_3	R_1	R_3	R_4
Porozitás [%]	0,31	3,98	1,60	0,58	0,64	2,84

5.2. Igénybevétellel szembeni ellenállás

5.2.1. Egyszemcse törési vizsgálat

Az egyszemcse törési kísérletek eredményeinek kiértékelésére első lépésként a szemcseméret eloszlásának meghatározása történt. A szemcseméret eloszlás és a közettani tulajdonságokat leíró és számszerűsítő mutatók közötti kapcsolatok vizsgálatára a szemcseméret eloszlást egy mutatóval célszerű jellemezni.

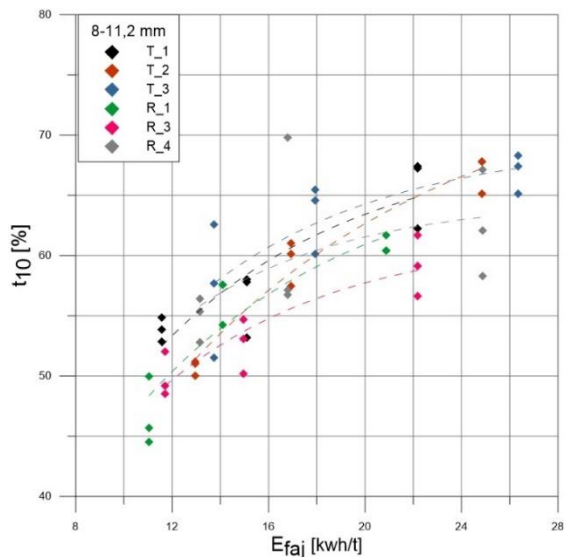
Az esősúlyos vizsgálatok esetében a két felület között végbemenő törés a Narayanan & Whiten (1983) által bevezetett szemcseméret csökkenés-energia modellel jellemezhető.

Ennek értelmében a kiindulási anyag $1/n$ -ed részénél kisebb szemcseméretű töret és az aprítási energia között a következő összefüggés írható fel:

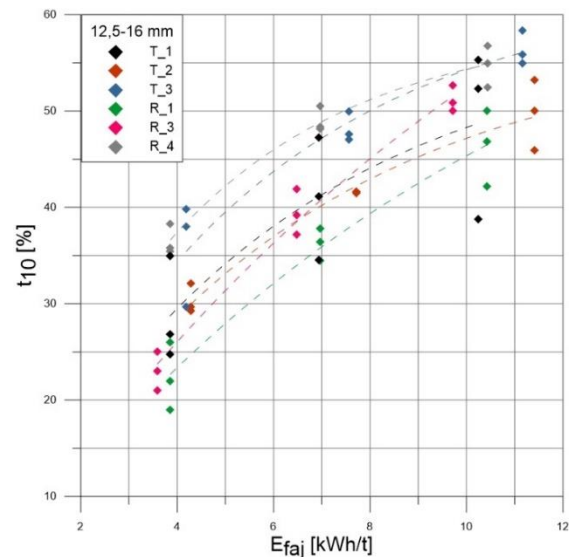
$$t_n = A * (1 - e^{-b * E_{faj}})$$

ahol E_{faj} fajlagos aprítási energia [kWh/t], A és b a közetre jellemző paraméterek. Ahol A a görbe aszimptotikus értéke (maximum t_{10} érték), a magasabb A érték nagyobb hajlamot jelez a finomszemcsés anyag keletkezésére a törés során. A b a görbe meredeksége, vagyis az anyag úgynevezett energiaérzékenysége, a nagyobb értéke azt jelöli, hogy a közet kisebb energiaráfordítással aprozódik. A közet törési „hajlama” a fenti összefüggésből kapott mutatóval jellemezhető. A gyakorlatban leggyakrabban a t_{10} indexet szokták alkalmazni, amely azt az anyagmennyiséget jelöli %-ban kifejezve, amely a kiindulás anyag szemcseméretének egytizede alá csökkent. Példaként, ha a kiindulási szemcseméret 20 mm, akkor azt az anyagmennyiséget fogja jelölni a t_{10} index, amely kisebb mint 2 mm.

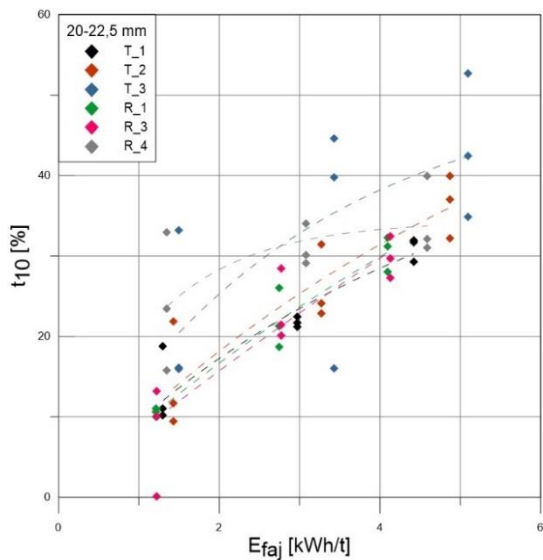
A t_{10} indexet a szemcseméret eloszlási görbékről határoztam meg (Melléklet 169. ábra- 198. ábra), kiindulási szemcseméretnek a frakció középértékét választottam. Az egyes frakciókhoz és ezen belül mintákhoz és ismétlésekhez tartozó értékeket a Melléklet 34. táblázat-38. táblázat foglalja össze.



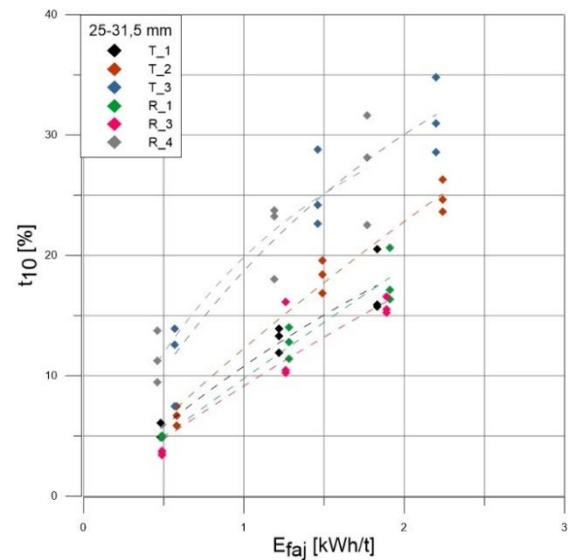
56. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a 8-11,2 mm-es frakció esetében



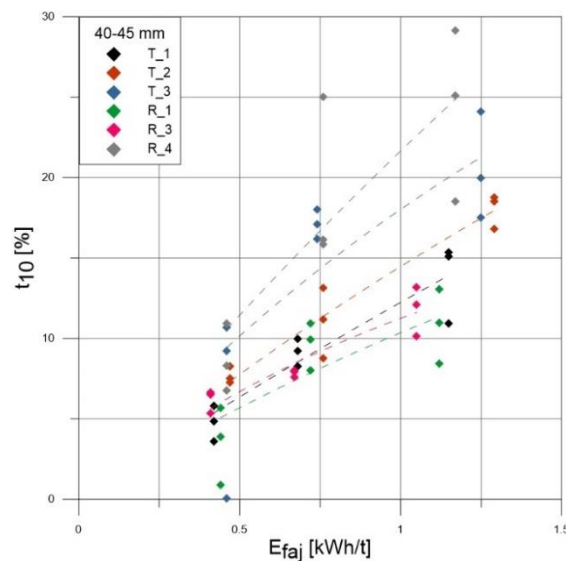
57. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a 12,5-16 mm-es frakció esetében



58. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a 20-22,5 mm-es frakció esetében



59. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a 25-31,5 mm-es frakció esetében



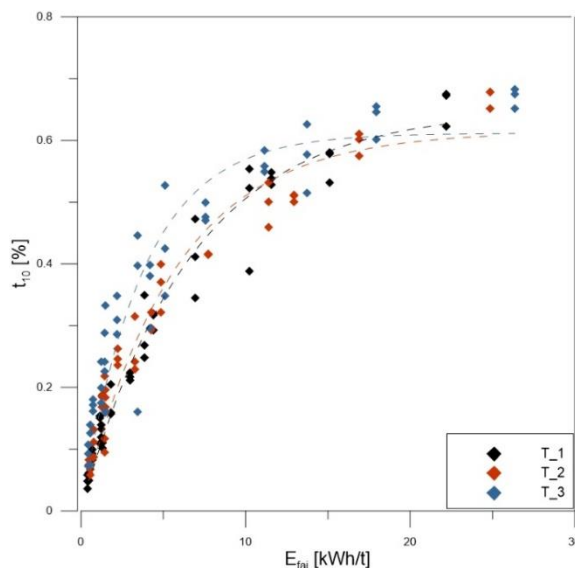
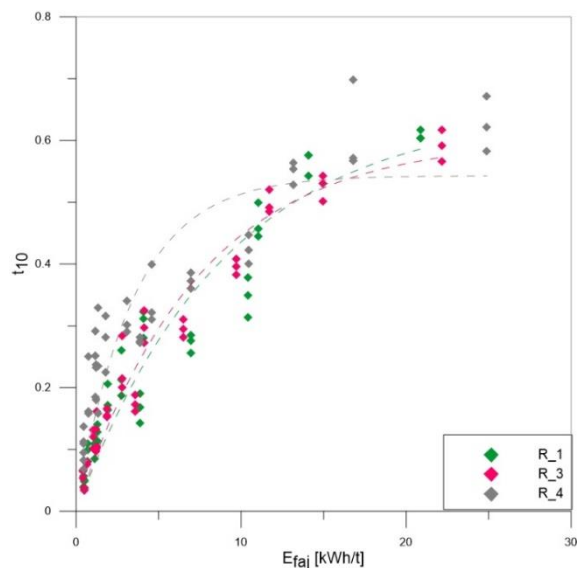
60. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a 40-45 mm-es frakció esetében

A szemcseméret eloszlás görbékről leolvasott t_{10} értékek ábrázolását a fajlagos törési energia függvényében (E_{faj}) 56. ábra- 60. ábra tartalmazza. Az A és b paraméterek meghatározása a korábban ismertetett modellt illesztettem az adatokra. A kapott A és b értékeket, valamint az ebből számolt Axb a 23. táblázat tartalmazza.

23. táblázat: A minták Axb mutatói

Frakció	Minta	A	b	Axb	Frakció	Minta	A	b	Axb
8-11,2 mm	T_1	69,59	0,12	8,44	25-31,5 mm	T_1	40,07	0,31	12,58
	T_2	75,93	0,09	6,62		T_2	87,56	0,15	13,21
	T_3	69,62	0,13	8,94		T_3	47,45	0,50	23,79
	R_1	68,23	0,11	7,62		R_1	168,71	0,06	10,06
	R_3	61,83	0,14	8,36		R_3	62,05	0,16	9,91
	R_4	64,70	0,15	9,77		R_4	35,69	0,81	28,98
12,5-16 mm	T_1	58,31	0,18	10,28	40-45 mm	T_1	83,65	0,16	13,24
	T_2	57,51	0,17	9,87		T_2	57,03	0,29	16,70
	T_3	63,08	0,20	12,42		T_3	30,54	0,94	28,59
	R_1	74,11	0,09	6,67		R_1	19,46	0,77	15,01
	R_3	96,39	0,07	6,75		R_3	21,00	0,77	16,12
	R_4	59,21	0,24	14,21		R_4	105,37	0,23	24,24
20-22,5 mm	T_1	49,32	0,22	10,62					
	T_2	67,50	0,16	10,58					
	T_3	51,71	0,34	17,36					
	R_1	80,52	0,12	9,35					
	R_3	54,32	0,20	10,61					
	R_4	34,36	0,87	29,84					

A t_{10} módszer lehetővé teszi, hogy az egyes mintákat, a szemcsemérettől függetlenül egyetlen Axb mutatóval jellemezzük. Az egyes mintákhoz tartozó t_{10} értékeket ezúttal is a fajlagos energia függvényében ábrázoltam (61. ábra, 62. ábra), majd a mintánként rendelkezésre álló összes pontra modell került illesztésre. Az így kapott A és b paraméterek, valamint az ezekből számított Axb mutató értékei a 24. táblázat foglalja össze.

61. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a tállyai minták esetében62. ábra: t_{10} - E_{faj} kapcsolata a recski minták esetében

24. táblázat: A minták Axb mutatója mintánként.

Minta	A	b	A×b
T_1	64,92	0,15	9,74
T_2	61,45	0,18	11,06
T_3	61,15	0,27	16,51
R_1	65,00	0,11	7,15
R_3	60,29	0,135	8,14
R_4	54,30	0,29	15,47

5.2.2. Őrölhetőségi vizsgálat

Az őrölhetőségi vizsgálatok közül a módszer hozzáférhetősége és a vizsgálathoz szükséges kis mintatömeg miatt esett a választás a Hardgrove őrölhetőségi vizsgálatra. A szabvány szerinti előírás értelmében mintánként két mérést végeztem, amelyek eredményeit külön, illetve az ezekből számított átlagot a 25. táblázat foglalja össze. A tállyai minták esetében a HGI értékek nem mutatnak jelentős eltérést. A legnehezebben a T_2 minta volt őrölhető, míg legkönnyebben a T_1 minta. A recski minták esetében az egyes minták közötti eltérés jelentős, az R-1 minta a legnehezebben őrölhető, HGI indexe 36,91 míg a legkönnyebben az R_4 minta, melynek HGI indexe 58,36.

25. táblázat: A minták Hardgrove indexe és az ebből számolt Bond őrölhetőségi mutató

Minta neve	HGI [-]			W_{ib} számított [kwh/t]
	1. ismétlés	2. ismétlés	Átlag	
T_1	45,29	45,84	45,56	20,43
T_2	41,62	41,41	41,51	22,04
T_3	43,49	44,11	43,8	21,09
R_1	37,05	36,77	36,91	24,27
R_3	42,66	42,18	42,42	21,65
R_4	59,02	57,7	58,36	16,67

5.2.3. Egytengelyű nyomószilárdság

Az egytengelyű nyomószilárdság mérés eredményeit a 26. táblázat foglalja össze. Az eredmények számítása és értelmezése az MSZ EN 1926 szabvány C melléklete szerint történt. Mintánként 3 párhuzamos mérést végeztem el, kivétel a T_3 minta, amely esetében a rossz megtartású közet nem tette lehetővé további mintatestek kialakítását.

26. táblázat: Egytengelyű nyomószilárdság vizsgálat eredményai

Minta neve	σ [MPa]	Átlag	Szórás	CV
T_1	311,27	199,06	113,45	0,57
	84,4			
	201,5			
T_2	140,04	105,12	40,429	0,3846
	114,5			
	60,83			
T_3	97,18	95,36	2,5739	0,027
	93,54			
R_1	204,14	229,86	24,694	0,1074
	232,07			
	253,38			
R_3	269,75	239,12	46,89	0,1961
	262,47			
	185,14			
R_4	202,99	104,5	85,522	0,8184
	49,06			
	61,44			

A T_1 minta esetében a 84,4 MPa nyomószilárdság és a T_2 minta esetében a 60,83 MPa nyomószilárdság eredményeket a mintában meglévő repedések eredményezték, amelyek mentén már kis terhelésnél bekövetkezett a tönkremenetel. Az R_3 minta esetében a 185,14 MPa nyomószilárdság szintén egy meglévő repedés eredményezte, ugyanakkor a repedésben kitöltés volt megfigyelhető, amely feltehetően növelte a minta nyomószilárdságát. Ezek eredményeként a legnagyobb szórás és szórástényező (CV) a T_1 minta esetében figyelhető meg. Az R_4 minta esetében a nagy szórást és szórástényező értékeket a közet erősen inhomogén jellege eredményezte. A közetre jellemző, hogy egyes darabjai jó megtartásúak, míg más részei erősen mállott, földes jellegűek.

5.2.4. Kőzetfizikai vizsgálatok

A kopásállóság (mikro-Deval) és az aprózódással szembeni ellenállás (Los Angeles) vizsgálat a szabványi előírásoknak megfelelően, mintánként két ismétlés történt. Kivételt képez az R_4 minta esetében az aprózódással szembeni ellenállás vizsgálata, ahol a minta túlaprózódása miatt csak egy vizsgálati minta előállítására volt lehetőség. Az aprózódással szembeni

ellenállás vizsgálat eredményeit a 27. táblázat foglalja össze. Mindkét lelőhelyről származó minta csoporton belül a Los Angeles mutató értéke növekedett a kőzet minőségének romlásával. A mikro-Deval értékek esetén is növekvő trend volt megfigyelhető (28. táblázat), ugyanakkor a Los Angeles mutatótól eltérően, a T_2 és T_3 minta közötti, valamint az R_3 és R_4 minta közötti különbség jelentősen nagyobb volt.

27. táblázat: A minták Los Angeles mutatója

Minta neve	1. ismételtes	2. ismételtes	Átlag
T_1	14,8	14,9	14,85
T_2	22,5	23,6	23,05
T_3	36,9	37,5	37,2
R_1	17,76	15,92	16,84
R_3	20,74	19,14	19,94
R_4	31,26	-	31,26

28. táblázat: A minták mikro-Deval értékei

Minta neve	1. ismételtes	2. ismételtes	Átlag
T_1	3,94	3,7	3,82
T_2	8,79	8,58	8,69
T_3	20,66	20,91	20,79
R_1	4,79	5,17	4,98
R_3	8,54	8,17	8,35
R_4	23,79	24,64	24,21

6. Eredmények értékelése

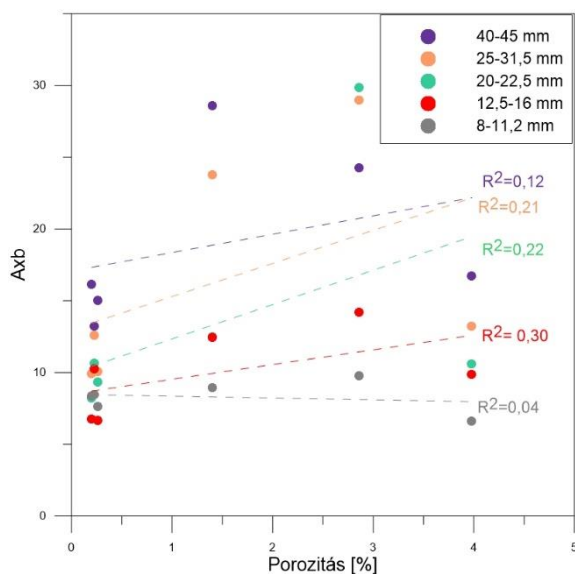
6.1. A közettani tulajdonságok hatása a törésre

Az egyes közetjellemző paraméterek számszerűsítését, illetve amikor erre nem volt lehetőség, kvalitatív leírásukat követően megvizsgáltam, hogy a törési mutatók és ezen paraméterek között milyen kapcsolatok írhatók le. Erre több megközelítést alkalmaztam, egyrészt azt vizsgáltam meg, hogy az egyes frakciókhoz tartozó minták esetében ugyanaz a közettani jellemző hatása érvényesül vagy a szemcseméret változásával van-e eltérés. Másrészt, hogy az egyes lelőhelyekről származó minták esetében a jellemzők közötti eltérések, milyen hatást fejtenek ki a törésre, illetve a szemcseméret függvényében ezek hatása hogyan alakul.

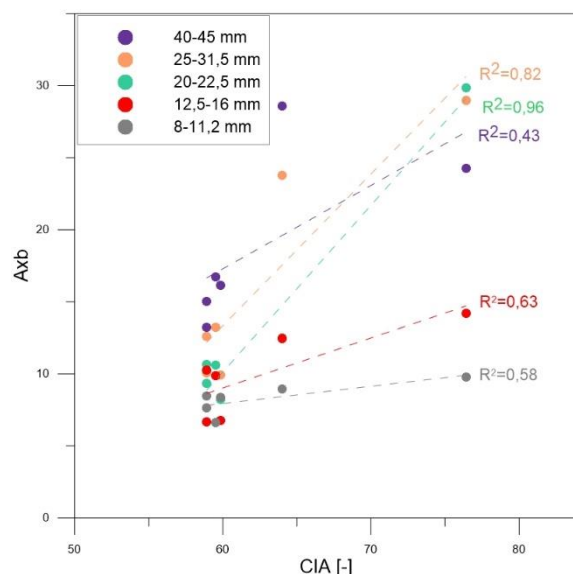
6.1.1. A törést befolyásoló közettani paraméter a szemcseméret függvényében

6.1.1.1.1. Porozitás és mállás

A szakirodalomból ismert (Gan és mtsai., 2019; Tavares & King, 1998), hogy a szemcseméret csökkenése magával vonja a fajlagos törési energia növekedést. Ennek oka, hogy a szemcseméret csökkenéssel csökken a hibahelyek, mint a repedések és pórusok, száma és mérete így a tönkremenetelhez nagyobb energia befektetés szükséges. A t_{10} függvények illesztésével kapott $A \times b$ értékeket és a porozitás (63. ábra), valamint a mállás (64. ábra) közötti kapcsolat vizsgálata alapján megállapítható, hogy az anyag törési hajlamát jellemző $A \times b$ mutató monoton növekvő összefüggést jelez a mállással, különösen a 20–22,5 mm-es frakció esetében, ahol a legszorosabb összefüggés tapasztalható. A porozitás hatása gyengébb, ugyanakkor több frakció esetében az $A \times b$ értékekkel gyenge, monoton növekvő tendencia volt azonosítható, kivéve a 8–11,2 mm-es frakciót, ahol ez a tendencia nem érvényesült.



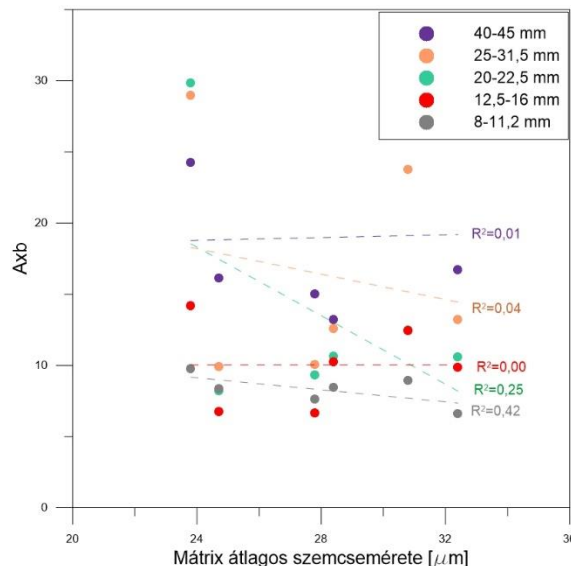
63. ábra: Az $A \times b$ értékek és a porozitás kapcsolata



64. ábra: Az $A \times b$ érték és CIA kapcsolata

6.1.1.1.2. Szövet

Az A_{xb} és a porozitás és mállás kapcsolatát megvizsgálva (63. ábra, 64. ábra), az eredmények alapján látható, hogy a kapcsolat kimutatható, ugyanakkor annak erőssége arra utal, hogy a vizsgált szemcseméret-tartományokban más tényezők is befolyásolják a törési hajlamot. Az optikai mikroszkópos módszerrel mért szöveti jellemzők hatását megvizsgálva kijelenthető, hogy a szöveti koefficiens (TC) és a törési tulajdonság között nem volt megállapítható kapcsolat. Az egyes alkotók szemcseméretének hatását több szempontból is megvizsgáltam. A fenokristályok átlagos szemcsemérete és a törési tulajdonságok között nem, vagy csak nagyon gyenge monoton növekvő kapcsolat volt kimutatható ($R^2 = 0,1-0,2$). A mátrix átlagos szemcsemérete esetében kizárólag a 8–11,2 mm-es frakciónál jelentkezett közepes erősségű, negatív irányú monoton összefüggés (65. ábra), míg a többi frakció esetében a kapcsolat vagy elhanyagolható volt, vagy nem volt értékelhető regressziós modell az adatokra. (Åkesson és mtsai., 2001; G. Liu és mtsai., 2018) rámutatott, hogy egyes esetekben az alkotó szemcsék mérete kevésbé meghatározó, mint inkább a méretbeli különbségek. Ennek számszerűsítése mintánként, a fenokristályok és az alapanyag átlagos szemcseméretének különbségeként történt, viszont ennek esetében nem volt megfigyelhető kapcsolat. A szemcse alakot az alakarány tényezővel (aspect ratio) jellemeztem, melyet a szemcsék legnagyobb és legkisebb Feret-átmérőjének arányából számolt alakarány tényezők átlaga, ezen mutató esetében nem, vagy csak nagyon gyenge kapcsolat volt megállapítható.

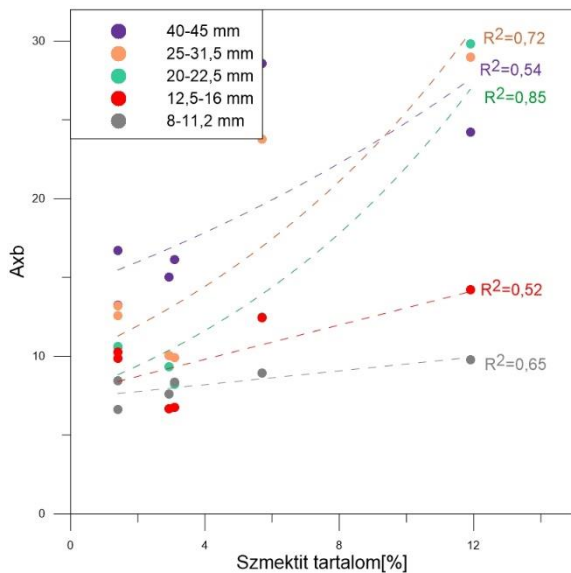


65. ábra: Az A_{xb} értékek és a mátrix átlagos szemcseméretének kapcsolata

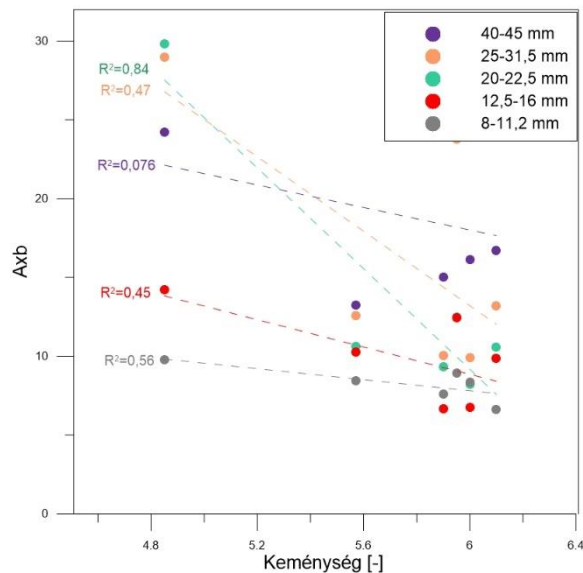
6.1.1.1.3. Ásványos összetétel

A törési tulajdonságokat befolyásoló tényezőkkel foglalkozó tanulmányok többsége (Abdelhafez, 2020; Oyarzún M & Arévalo A, 2011; Yuçe, 2017) nem állapít meg egyértelmű kapcsolatot az ásványos összetétel és a törési tulajdonság között. A hangsúly az egyes ásványfajták,

legyen szó elsődleges vagy másodlagos eredetű ásványokról, keménységére helyeződik, illetve az egyes alkotók keménysége közötti eltérésre. A minták fő kőzetalkotó ásványai a földpátok, ezen ásványok és az Axb mutató között nem volt kimutatható kapcsolat. A nagy keménységgel rendelkező kristályos SiO_2 módosulatok, jelen minták esetében kvarc és cristobalit, hatása szintén nem volt kimutatható. A másodlagos, kőzetátalakulási folyamatokból származó ásványok közül a mállás indikátoraként szolgáló szmektittartalom hatását vizsgáltam, a 66. ábra mutatja be az Axb mutató és a szmektit közötti kapcsolatot. A 40–45 mm, 25–31,5 mm és 20–22,5 mm-es frakciók esetében exponenciális jellegű összefüggés volt azonosítható, ahol az illesztett függvények mérsékeltől erősig terjedő illeszkedést mutattak. Ezzel szemben a 12,5–16 mm és 8–11,2 mm-es mérettartományban a lineáris modell bizonyult megfelelőbbnek, ugyanakkor az R^2 értékek alapján az illeszkedés itt is legfeljebb mérsékeltnek tekinthető. Tekintettel a magas amorfanyag tartalomra, ennek hatását is megvizsgáltam, ugyanakkor ez esetben nem volt kimutatható kapcsolat. A többi másodlagos és járulékos ásvány mennyisége nem számottevő, illetve ezek hatásáról a szakirodalom sem értekezik. Az egyes ásványfázisok keménységét figyelembe véve minden vizsgált mintára meghatároztam az átlagos keménységi értéket, ahol az egyes ásványok keménységét tömegszázalékos arányukkal súlyozva vettem figyelembe. A 67. ábrán alapján a lineáris regresszió eredményei negatív irányú összefüggést jeleznek az átlagos keménység és az Axb érték között: a kőzet átlagos keménységének növekedésével az Axb érték csökkenő tendenciát mutat.



66. ábra: Az Axb érték és szmektit tartalom kapcsolata

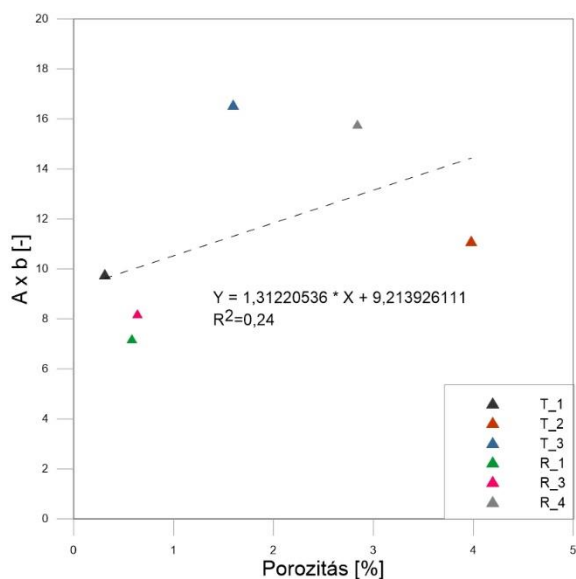


67. ábra: Az Axb érték és a keménység kapcsolata

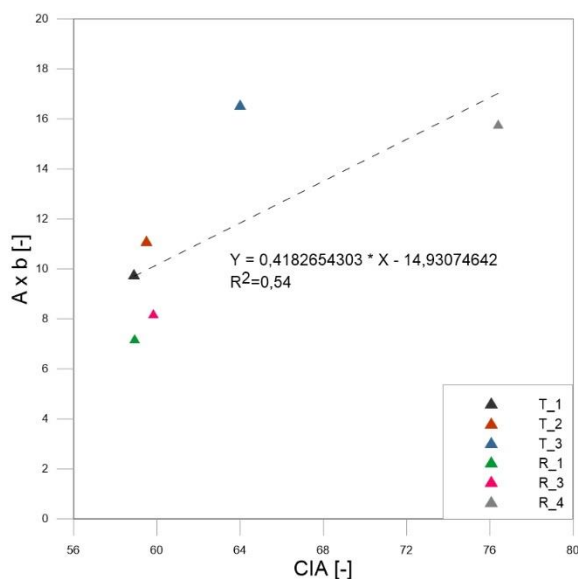
6.1.2. A törést befolyásoló kőzettani paraméter a kőzettani jellemzők közötti eltérések függvényében

Az egyes mintákhoz tartozó Axb értékek esetében is vizsgáltam, hogy fennáll-e bármilyen összefüggés az ásványos összetétellel, a kőzet szöveti jellemzőivel, a porozitással, illetve a

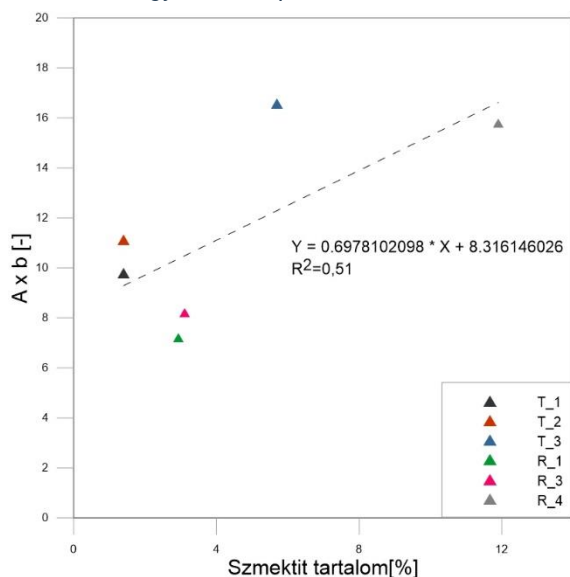
mállottsági állapottal. A porozitás és az Axb mutató között (68. ábra) csak gyenge kapcsolat írható le. A mállás (69. ábra) és szmektit tartalom (70. ábra) esetében az illesztett regressziós modell erősebb pozitív tendenciát jelzett, ami arra utal, hogy e paraméterek növekedése meghatározott határok között az Axb érték emelkedésével járhat. A keménység hatása az Axb értékekre ugyanakkor gyengének bizonyult (71. ábra). A többi vizsgált közettani paraméter esetében a regressziós modellek alapján nem volt kimutatható érdemi összefüggés. A szakirodalomban gyakran előfordul, hogy a kőzeteket egyetlen paraméterrel jellemzik, ugyanakkor az eredményekből látható, hogy ebben a megközelítésben kevésbé kimutatható a közettani jellemzők hatása a vizsgált andezitek esetében.



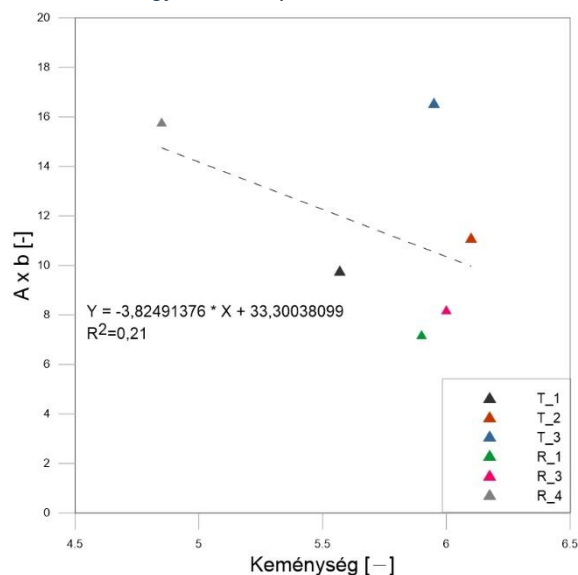
68. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata az egyes mintatípusok esetében



69. ábra: Az Axb érték és a mállás kapcsolata az egyes mintatípusok esetében



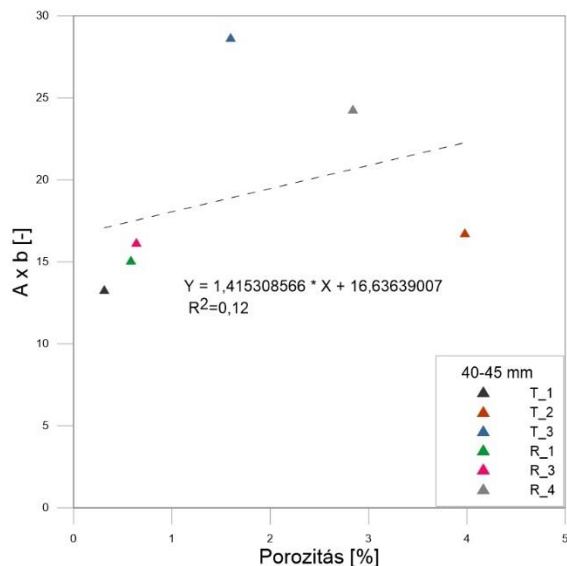
70. ábra: Az Axb érték és szmektit tartalom kapcsolata az egyes mintatípusok esetében



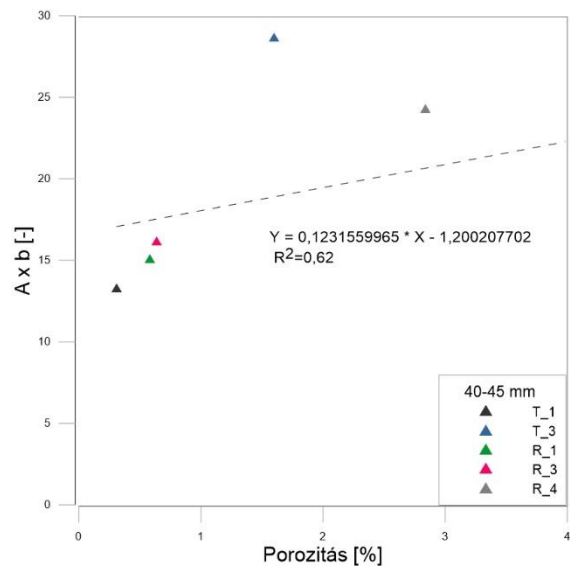
71. ábra: Az Axb érték és a keménység kapcsolata az egyes mintatípusok esetében

6.1.1. A törést befolyásoló közettani paraméter a közettani jellemzők közötti eltérések és a szemcseméret változás függvényében

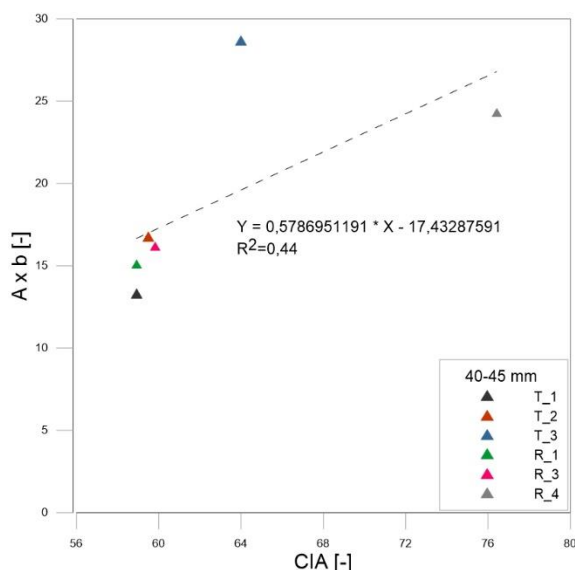
A különböző közettípusok esetében a szemcseméret függvényében is értékeltem a közettani jellemzők törési viselkedésre gyakorolt hatását. A 40-45 mm-es frakció esetében a porozitás és az Axb mutató között gyenge kapcsolat volt kimutatható (72. ábra). A porozitás eredmények rámutattak, hogy a T_2 minta esetében jelentősen nagyobb a zárt porozitás hányada a többi mintához viszonyítva. A T_2 minta kihagyásával végzett elemzés alapján a porozitás és az Axb mutató között a lineáris regresszió szerint közepes erősségű, monoton növekvő tendencia írható le (73. ábra). Hasonlóan, a mállás esetében is a lineáris modell adta a legjobb leírást (74. ábra). A szmekttartalom esetében ugyanakkor az exponenciális modell illeszkedett jobban az adatokhoz (75. ábra). A többi közettani jellemző esetében csak nagyon gyenge, vagy egyáltalán nem volt kapcsolat megállapítható az Axb mutató és a közettani paraméterek között.



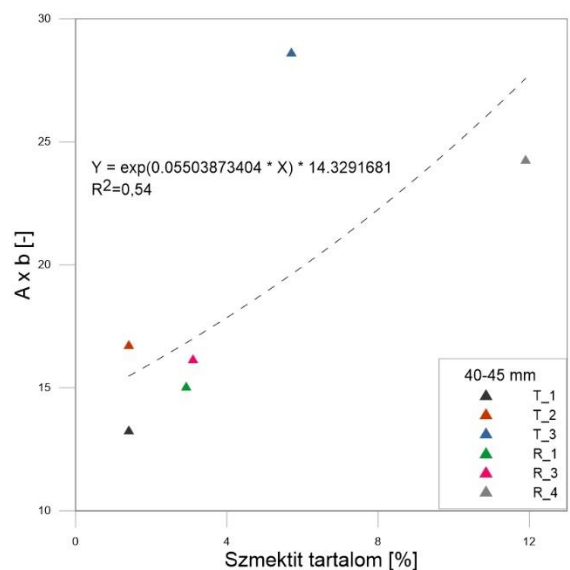
72. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében



73. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata a T_2 minta nélkül 40-45 mm-es frakció esetében

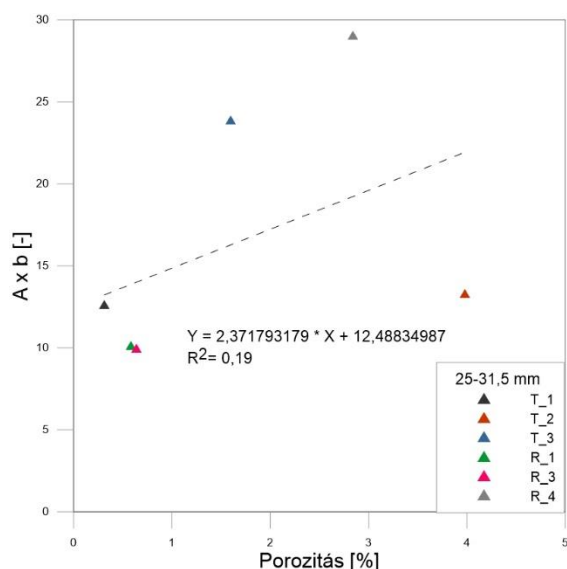


74. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében

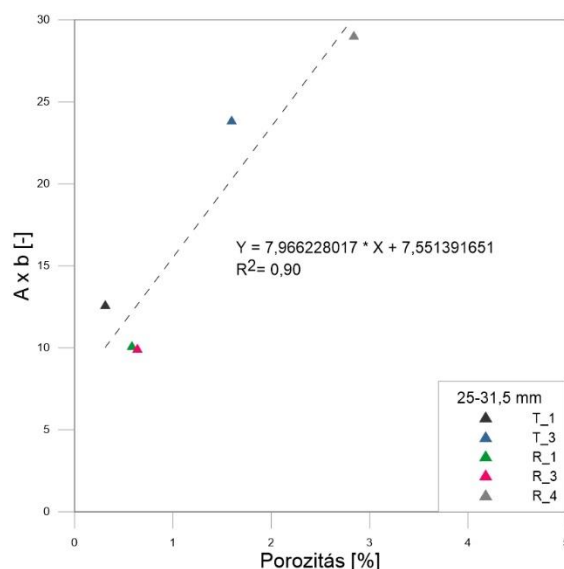


75. ábra: Az Axb értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 40-45 mm-es frakció esetében

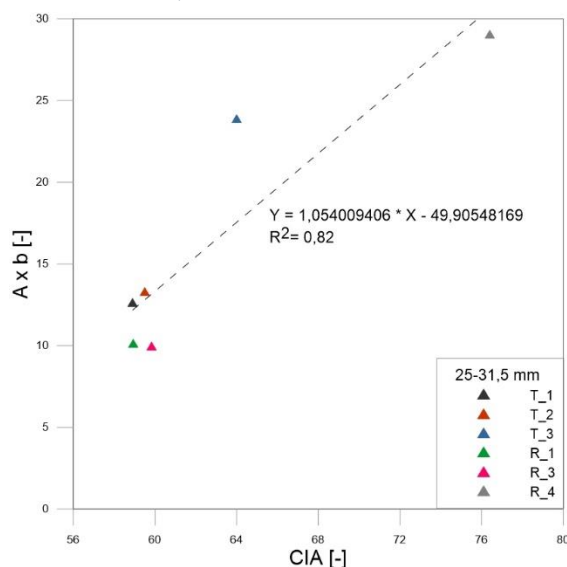
A 25–31,5 mm-es frakció esetében az Axb és a porozitás között (76. ábra) csak gyenge összefüggés volt leírható, ugyanakkor a T₂ minta kihagyásával (77. ábra) a kapcsolat erőssége számottevően javult, amit az R² érték növekedése is jelez. A mállás (78. ábra) és a szmektit tartalom (79. ábra) esetében ennél a frakciónál is a regressziós elemzés erős, monoton növekvő tendenciát mutatott. A 40–45 mm-es frakcióval szemben a 25–31,5 mm-es frakciónál a keménység mérsékelt hatása is kimutatható volt: a keménység növekedésével az Axb értékcsökkenést mutatott.



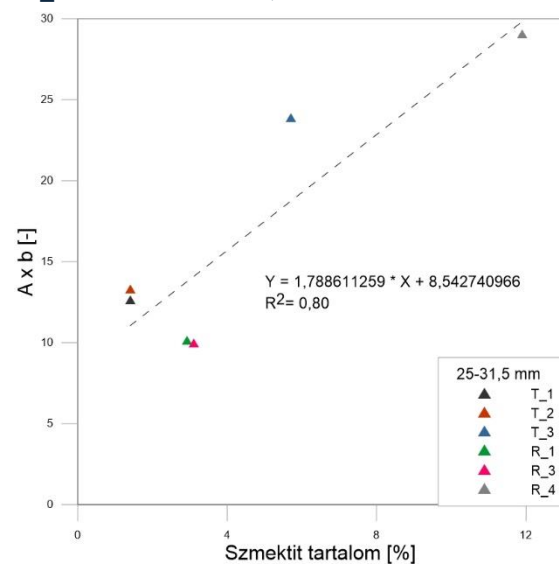
76. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata 25-31,5 mm-es frakció esetében



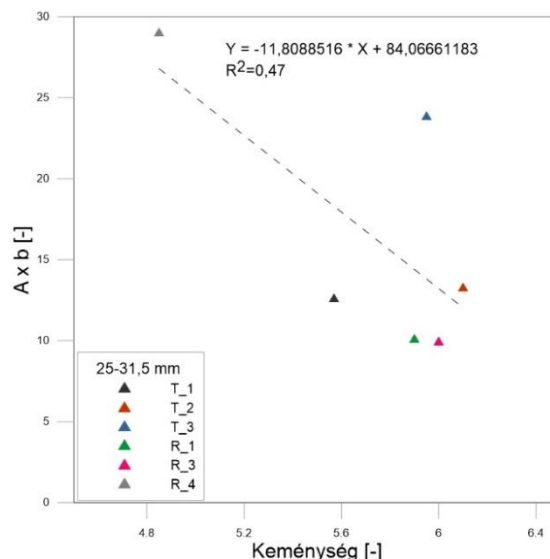
77. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata a T₂ minta nélkül 25-31,5 mm-es frakció esetében



78. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 25-31,5 mm-es frakció esetében

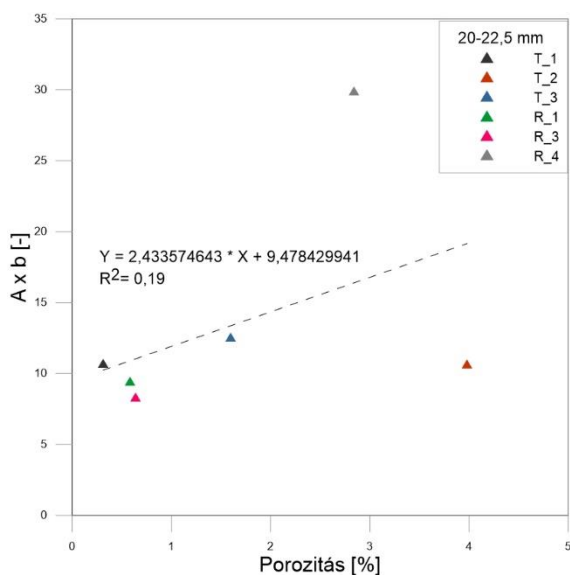


79. ábra: Az Axb értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 25-31,5 mm-es frakció esetében

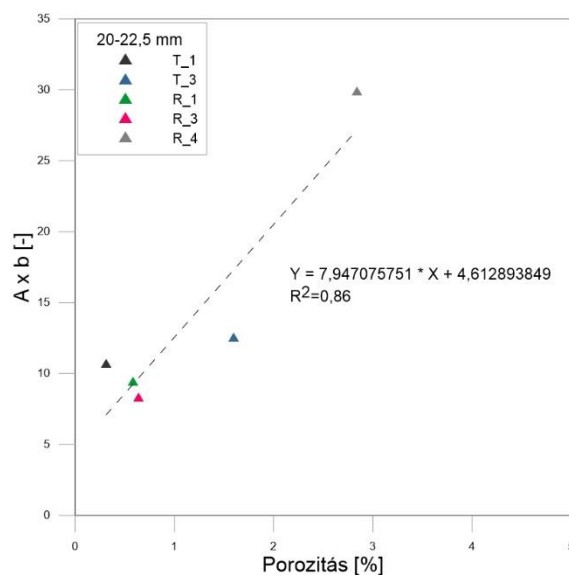


80. ábra: Az Axb értékek és a keménység kapcsolata 25-31,5 mm-es frakció esetében

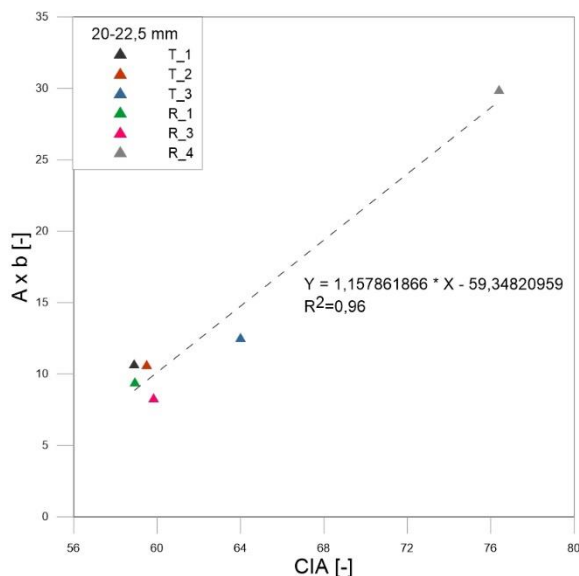
A 20–22,5 mm-es frakció esetében az illesztett lineáris regresszió alapján az Axb és a porozitás között csak gyenge kapcsolat volt azonosítható (81. ábra), ugyanakkor a T₂ minta elhagyásával a kapcsolat erőssége számottevően javult, amit az R^2 érték jelentős növekedése is jelez (82. ábra). Ugyanezen frakciónál a mállás (83. ábra) és a szmektit tartalom (84. ábra) esetében a regressziós elemzés erős, monoton növekvő tendenciát mutatott. Az ásványos összetételből számított keménység esetében (85. ábra) – a 40–45 mm-es frakcióval ellentétben – a keménység növekedése mérsékelt csökkenést eredményezett az Axb értékben.



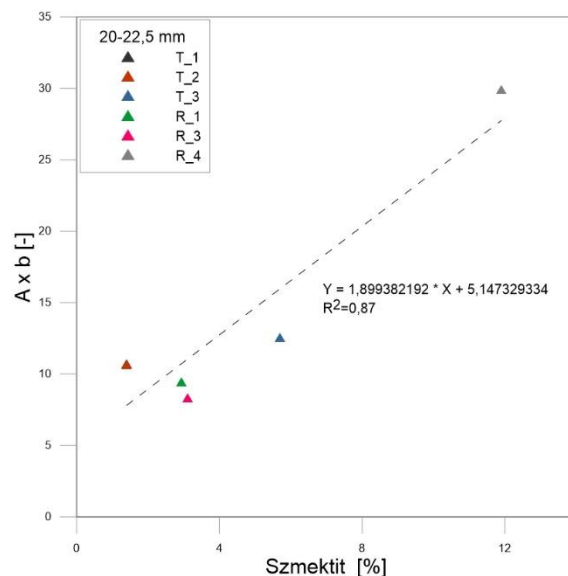
81. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében



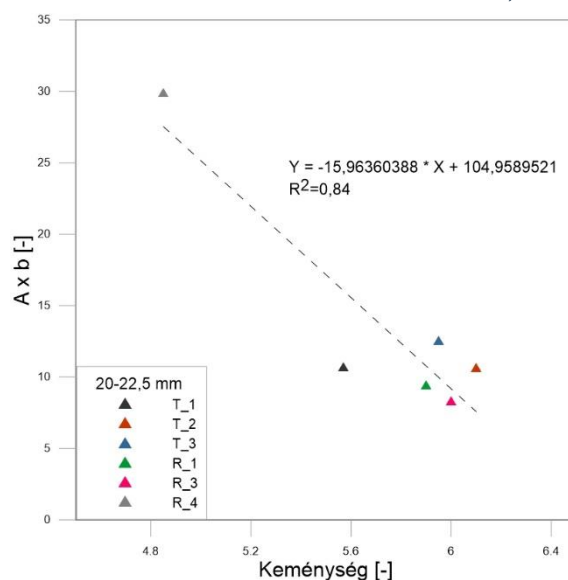
82. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata a T₂ minta nélkül 20-22,5 mm-es frakció esetében



83. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében

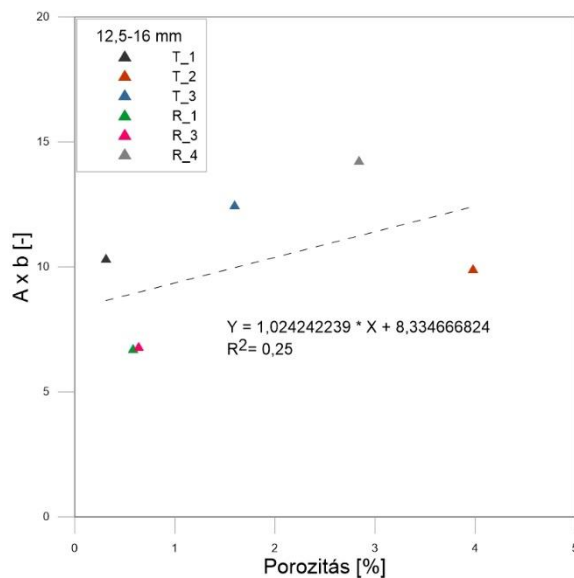


84. ábra: Az Axb értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében

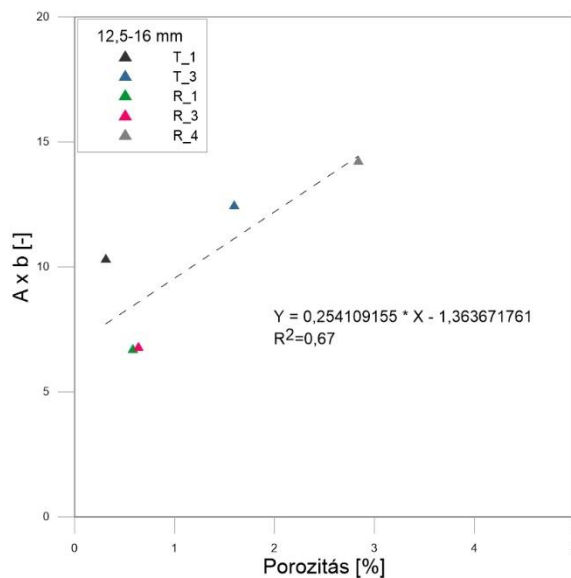


85. ábra: Az Axb értékek és a keménység kapcsolata 20-22,5 mm-es frakció esetében

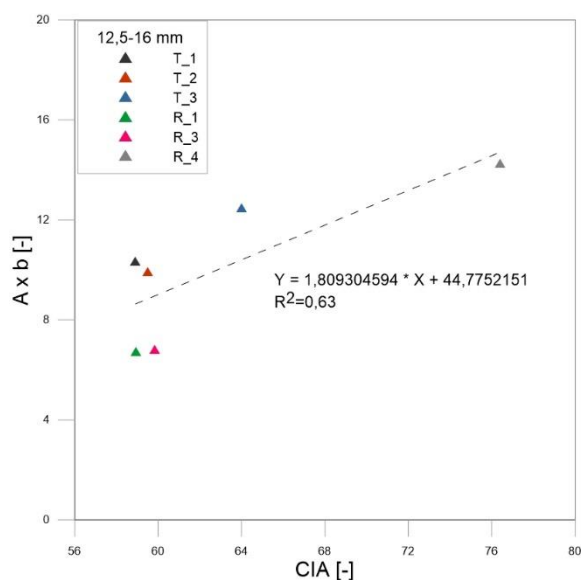
A 12,5–16 mm-es frakció esetében hasonló tendencia volt megfigyelhető. A porozitás és az Axb mutató között nem mutatkozott értelmezhető kapcsolat (86. ábra), azonban a T₂ minta elhagyásával végzett regressziós elemzés alapján a porozitás (87. ábra), a mállás (88. ábra) és a szmektit tartalom (89. ábra), erős, monoton növekvő összefüggést mutattak az Axb értékkel. A keménység esetében (90. ábra) a regressziós modell illeszkedése (R^2) számottevően javult a 20–22,5 mm-es frakcióhoz képest, ami arra utal, hogy ebben a mérettartományban a keménység hatása jelentősebb. A többi vizsgált kőzettani paraméter esetében a kapcsolat gyenge volt, vagy nem volt egyértelműen értelmezhető.



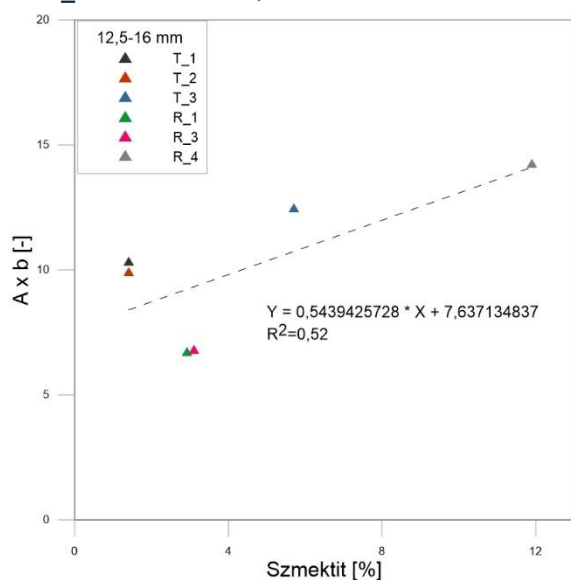
86. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata 12,5-16 mm-es frakció esetében



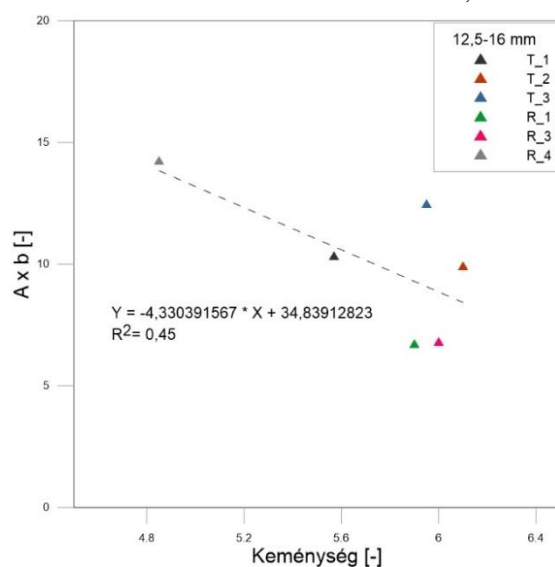
87. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata a T_2 minta nélkül 12,5-16 mm-es frakció esetében



88. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 12,5-16 mm-es frakció esetében

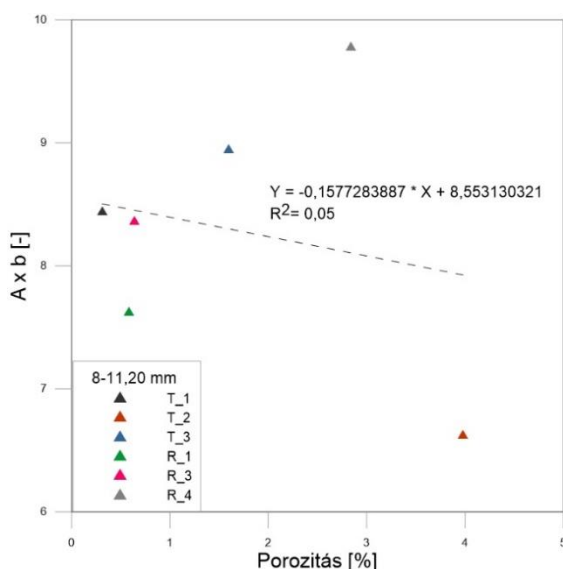


89. ábra: Az Axb értékek és a szektit tartalom kapcsolata 12,5-16 mm-es frakció esetében

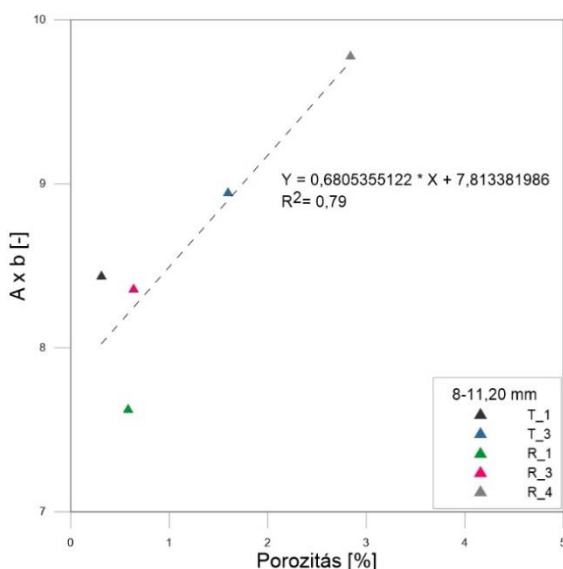


90. ábra: Az Axb értékek és a keménység kapcsolata 12,5-16 mm-es frakció esetében

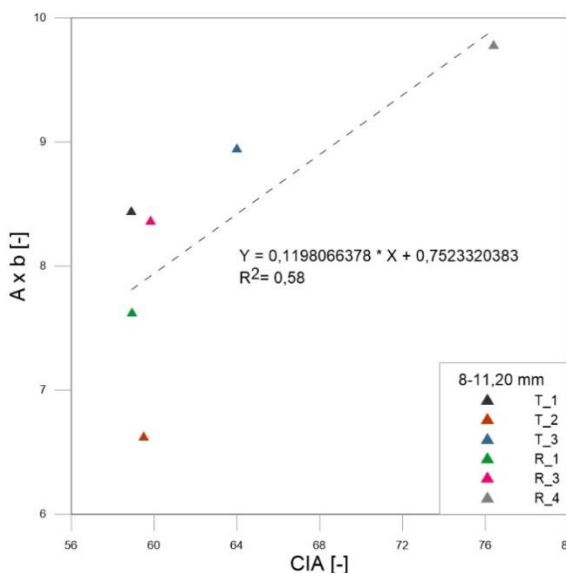
A 8-11,2 mm-es frakció esetében a porozitás (91. ábra), a T₂ minta nélküli porozitás (92. ábra), a mállás (93. ábra) és szmektit tartalom (94. ábra), valamint a keménység (95. ábra) hatása hasonló tendenciát mutatott, mint a 12,5–16 mm-es frakcióban. Az ásványos összetételből számított, hasadással rendelkező ásványok arányára illesztett regressziós elemzés alapján az Axb és e paraméter között közepes erősségű, monoton csökkenő összefüggés volt kimutatható (96. ábra). Hasonlóan, a mátrix átlagos szemcsemérete (97. ábra) és piroxéntartalom (98. ábra) esetében is közepes erősségű monoton csökkenő kapcsolat mutatkozott az Axb értékkel.



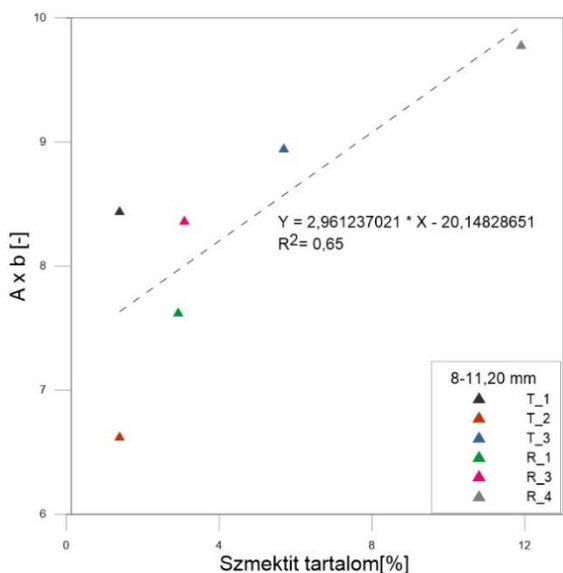
91. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



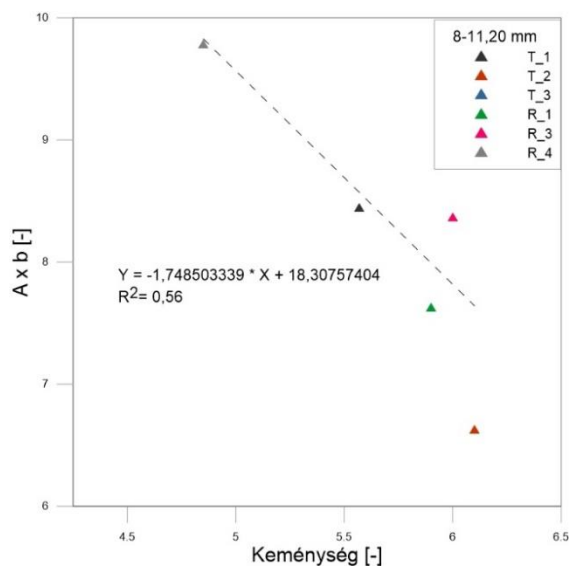
92. ábra: Az Axb értékek és a porozitás kapcsolata a T₂ minta nélkül 8-11,2 mm-es frakció esetében



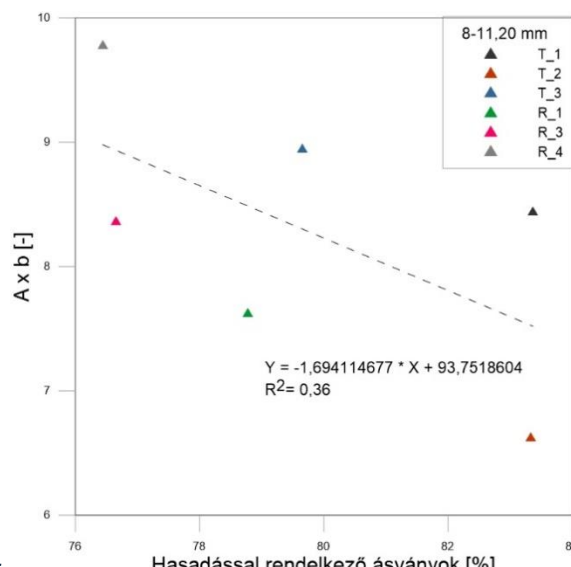
93. ábra: Az Axb értékek és a mállás kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



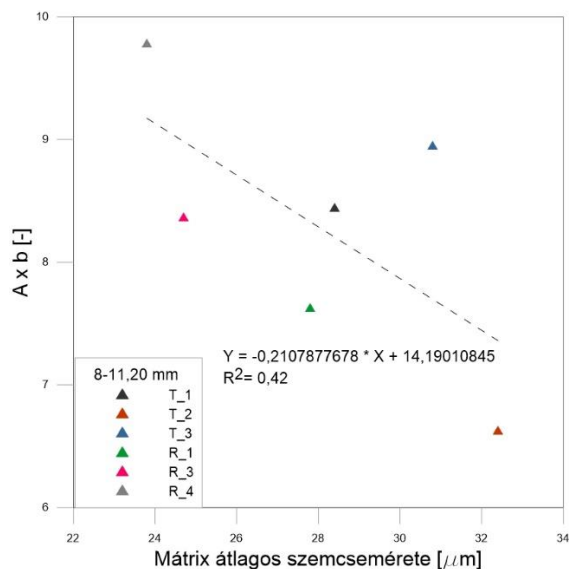
94. ábra: Az Axb értékek és a szmektit tartalom kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



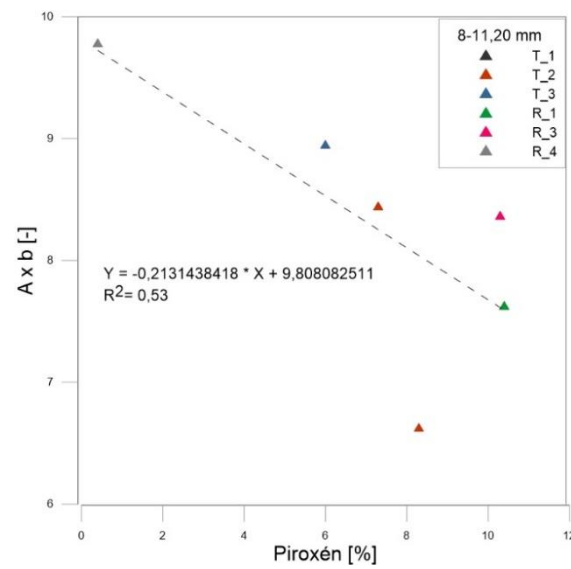
95. ábra: Az Axb értékek és a keménység kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



96. ábra: Az Axb értékek és a hasadás kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



97. ábra: Az Axb értékek és a mátrix átlagos szemcseméretének kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében



98. ábra: Az Axb értékek és a piroxén tartalom kapcsolata 8-11,2 mm-es frakció esetében

A vizsgált közettani paraméterekre illesztett regressziós modellek R^2 értékei arra utalnak, hogy a törési tulajdonságokat ebben a szemcseméret-tartományban további, a vizsgálat során nem számszerűsített tényezők is befolyásolhatják. A 29. táblázat foglalja össze a 8-11,2 mm-es frakció Axb értékeit. A táblázatból látható, hogy a nagy porozitás ellenére a T_2 minta kevésbé hajlamos az aprózódásra, Axb értéke a legkisebb, míg a kisebb porozitással és hasonló mállási fokkal rendelkező T_1 és R_1 minta jobban aprózódott.

29. táblázat: A 8-11,2 mm-es frakció Axb értékei

Frakció	Minta	A	b	Axb
8-11,2 mm	T_1	69,59	0,12	8,44
	T_2	75,93	0,09	6,62
	T_3	69,62	0,13	8,94
	R_1	68,23	0,11	7,62
	R_3	61,83	0,14	8,36
	R_4	64,70	0,15	9,77

Az 5.1.3 Szöveti megfigyelések fejezetben bemutatott optikai mikroszkópos és elektronmikroszkópos felvételeken mikroszöveti eltérések voltak megfigyelhetők az egyes közettípusok esetében. A T_1 minta esetében a nagyméretű fenokristályok felülete sima, sarkaik sokszor lekerékített, az elektronmikroszkópos felvételeken a nagy méretű amfibolok peremi zónája mállott, porózus. A T_2 minta esetében az optikai mikroszkópos megfigyelések, hasonló szövetet mutattak, mint a T_1 esetében. A T_2 minta porozitás jelentősen nagyobb volt, ugyanakkor az elektronmikroszkópos megfigyelések rámutattak, hogy kevés kivétellel a keletkezésük az alapanyag kihülés közbeni kigázosodása és nem a mállás eredményeként keletkeztek. A pórusokban elsősorban karbonátásvány képződése figyelhető meg. A T_3 minta jelentősen mállottabb, porózusabb. Az optikai mikroszkópos felvételeken látható, hogy a szemcsék felülete egyenetlenebb. Az elektronmikroszkópos felvételeken látható, hogy a kis méretű, pár mikronos porozitás mellett, a nagyobb méretű pórusok az ásványok mállásával keletkezett, részlegesen másodlagos ásványok töltik ki, elsősorban karbonátok.

Az R_1 minta esetében az optikai mikroszkópos megfigyelések során lekerekített plagioklász fenokristályokat, és erősen mállott, amfibolokat és egyenetlen felületű azonosítottam. Az elektronmikroszkópos megfigyelések alapján, a T_1 mintához hasonlóan, a piroxének a szemcsehatárokon porózus, szmekttel kitöltött részek figyelhetők meg, valamint a piroxén koszorú által övezett nagyméretű plagioklászok és kvarcok jellemző szövetelemek. A szmektit sok esetben a plagioklászok belsejében is megjelenik, ami a hidrotermás oldatok átítató jellegét támasztja alá. Az R_3 mintában az optikai mikroszkópos megfigyelések rámutattak, hogy a fenokristályok nagyobb mennyiségben vannak jelen, gyakran aggregátumokat képezve. Az R_3 mintában az R_1 mintához képest, a piroxének peremén keletkezett második generációs piroxén figyelhető meg, amely fokozatosan goethitté alakul. Az átalakulás nyomán nem keletkezik porozitás, ez teljes térfogat kitöltéssel történik. A hidrotermás fluidumok áramlásának eredményként az üregekben kvarcképződés figyelhető meg. Az R_4 minta esetében az R_1 és R_3 mintákhoz hasonló kiindulási szövetet az utólagos bontás írta felül, az optikai mikroszkópos felvételeken látható az erősen átalakult jellege. Az átalakulás egyrészt megjelenik a fenokristályok belsejében, repedésekben és üregekben kicsapódó mállástermékek, főleg

szmektit formájában, másrészt a kioldódás eredményeként a kiöblített elemekből a reziduális Fe goethitsávokat és erezeteket képez jelentős porozitás mellett.

Az aprózódás során ezen mikroszöveti tényezők hatása, mivel ezek nem számszerűsítettek, függvény illesztéssel vagy korrelációval nem vizsgálható. Ugyanakkor, ha megfigyeljük az Axb értékeket, feltételezhetjük, hogy nem kizárólag a porozitás mennyisége van hatással a törésre, hanem annak genetikája. A kőzetképződéssel egyidőben kialakult zárt porozitás nem gyengíti olyan mértékben a szövetet, mint a mállás során kialakult porozitás. A mállás során kialakult porozitás eltérő léptékű, a szemcsék peremi zónájában kialakuló pár mikrométerestől a több tíz mikronméteres üregekig. Igazolható, hogy a fenokristályok peremén kialakuló porozitás elősegíti a repedés kialakulását és terjedését és ezáltal csökkenti a kőzet szilárdságát. A nagyobb méretű, ásványok bomlásából keletkező pórusok szintén gyengítik a szövetet. Ugyanakkor, ha a porozitáshoz másodlagos karbonátképződés társul, mint az a tállyai minták esetében látható, akkor ez erősíti a szövetet. A fokozatosan előrehaladó, a Fe mobilizációjával és új Fe-oxidos fázisok kialakulásával járó mállás némileg gyengíti a szövetet, amint arra a recski bányából származó minták rámutattak. A teljes térfogatkitöltéssel történő másodlagos ásványképződés esetében is a kőzetszilárdság csökkenése volt megfigyelhető.

Az egyes mintákon belül található szemcsék morfológiájának hatását nehéz megítélni, míg ugyanazon kőzeten belül a mállás során egyes ásványfajok felülete lekerekített lesz, mint például a plagioklászok, addig más ásványfajták felülete egyenetlen lesz a mállás során. Amint, azt a piroxéntartalommal megfigyelhető közepes mértékű monoton csökkenő kapcsolatot igazoltam, feltételezhető, hogy a mállás előrehaladtával az egyre egyenlőtlenebb piroxén szemcse határok növelik a szemcsék közötti kötőerőt és ezáltal a szilárdságot.

Az eredmények alapján levonható következtetések:

- A kőzettani paraméterek törésre gyakorolt hatásának vizsgálata során a választott értékelési egység – legyen az a teljes kőzet, különböző frakciók kőzettípustól függetlenül, vagy frakciók egyes kőzettípusok szerint – meghatározó szerepet játszhat az eredmények értelmezésében.
- A szemcseméret szerinti megközelítésben a kőzettani jellemzők és a törési viselkedés közötti kapcsolat minden vizsgált mérettartományban – a kőzettípustól függetlenül – kimutatható, és minden esetben azonosítható egy domináns kőzettani paraméter, amely meghatározó hatást gyakorol a törési mechanizmusra. A 40–45 mm-es és a 25–31,5 mm-es frakciók esetében elsősorban a porozitás bizonyult meghatározónak, míg a 20–22,5 mm-es és a 12,5–16 mm-es tartományban a mállottság dominált. A legkisebb, 8–11,2 mm-es mérettartományban a szöveti jellemzők befolyása volt a

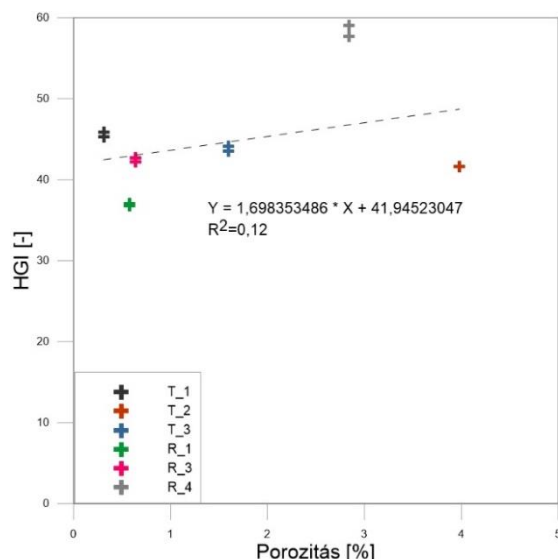
legjelentősebb. Külön kiemelendő a szemkittit tartalom, hatása, amely a nagyobb szemcsetartományokban exponenciális kapcsolatot mutatott

- A teljes mintatípusra vonatkozóan egyetlen törési mutató alkalmazásával a közettani paraméterek hatása kevésbé volt egyértelműen azonosítható; ugyanakkor a mállottság, illetve a szemkittit tartalom egyértelmű kapcsolatot mutatott a törési viselkedéssel.
- A szemcseméret és közettípus szerinti megközelítésben, kijelölhetőek azon paraméterek, amelyek hatással vannak a törésre. A 40–45 mm-es és a 25–31,5 mm-es mérettartományban ez esetben látszólag a porozitásnak kisebb hatás tulajdonítható. Ha megvizsgáljuk a porozitás genetikáját és csak a málláshoz köthető porozitás függvényében vizsgáljuk ennek hatását, akkor viszont erős kapcsolat mutatható ki. Ez rámutat arra a tényre, hogy a porozitás genetikája, a közetképződéssel egyidőben keletkezett, vagy utólag a mállás során, befolyásolja annak hatását. A szemcseméret csökkenésével a mállás és szemkittit tartalom hatása hangsúlyosabbá válik, ugyanakkor a 12,5-16 mm-es méret tartománytól az ásványos összetételből számolt elméleti keménység hatása is kimutatható. A 8-11,2 mm-es mérettartományban egyértelműen kimutatható a mikroszöveti jellemzők hatása.
- A vizsgált minták közettípusából adódóan a közetalkotó ásványok nagyságrendbeli különbségei optikai mikroszkópos megfigyeléseken alapuló, a szakirodalomból ismert szövetet számszerűsíteni hivatott mutatók (TC) az andezitek esetében nem alkalmazható, a kapott mutatók és a törési jellemzők között nem volt kimutatható kapcsolat. Az elektronmikroszkópos megfigyeléseken és a mikro-CT elemzésen alapuló fázis azonosítás az összetétel szempontjából szilárd elegysort képező ásványtípusok miatt nehézkes, a szövet számszerűsítéséhez nem alkalmazható.
- A mállás hatása a törésre kevésbé kutatott és ismert a nemzetközi szakirodalomban. Az általam alkalmazott CIA mutató jó kapcsolatot mutatott a vizsgált közettípus esetében.

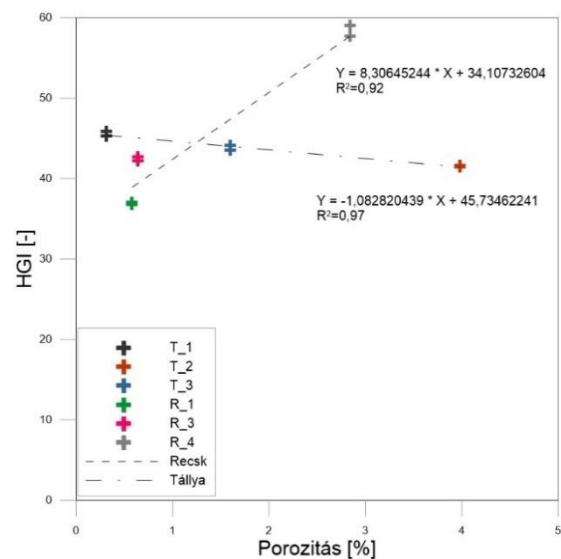
6.2. A kőzet tulajdonságok hatása az őrlhetőségre

A Hardgrove-index értékek a tállyai minták esetében az eltérő szövet-szerkezeti jellemzők ellenére, egymáshoz közeli értékeket mutattak, míg a recski minták esetében jelentősebb különbségek voltak az értékek között. A kőzet tulajdonságok hatását az őrlhetőségre minden számszerűsített kőzetjellemző paraméterre megvizsgáltam, ugyanakkor csak azon paraméterek esetében ismertetem, amely mutatott korrelációt vagy amely az egyszemcse törési vizsgálatok esetében mutatott korrelációt. Az egyes paraméterek hatását megvizsgáltam egyben, az összes mintára, és külön-külön leölhelyenként is.

A porozitás és a HGI értékek között (99. ábra) összességében csak nagyon gyenge kapcsolat volt azonosítható. Mintánkénti vizsgálatban (100. ábra) azonban eltérő trendek jelentek meg: a recski minták esetében erős pozitív korreláció mutatkozott, addig a tállyai mintákra negatív kapcsolat rajzolódott ki. A porozitás eredmények rámutattak, hogy a T_2 minta esetében jelentős a zárt porozitás, a T_3 minta esetében is nagyobb a T_1 mintához viszonyítva. A micro-CT felvételeken látható, hogy ezek mérete akár a mm-es mérettartományt is eléri. A Hardgrove őrlhetőségi vizsgálat 590-1190 μm -es szemcseméret tartományban eső anyagon történik, így a nagyméretű pórusok megszűnnek. Hasonló eset alakulhat ki a T_3 minta esetében is, ahol szintén jellemzőek voltak a nagyobb méretű, pár száz μm -es üregek, ezért a tállyai minták esetében a kimutatott negatív korreláció félrevezető lehet. Ugyanakkor feltételezhető az is, hogy a T_2 és T_3 minta esetében a kisméretű elsődleges pórusok, amelyek egyenletesen elszórva jelennek meg az alapanyagban, valamilyen szinten méretükből adódóan gátolták a repedésterjedést és ezáltal a tönkremenetelhez nagyobb energiabefektetésre lehet szükség.



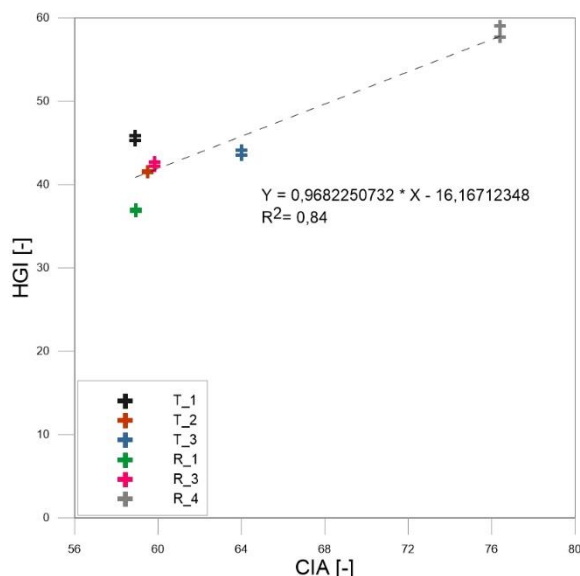
99. ábra: A HGI és a porozitás kapcsolata



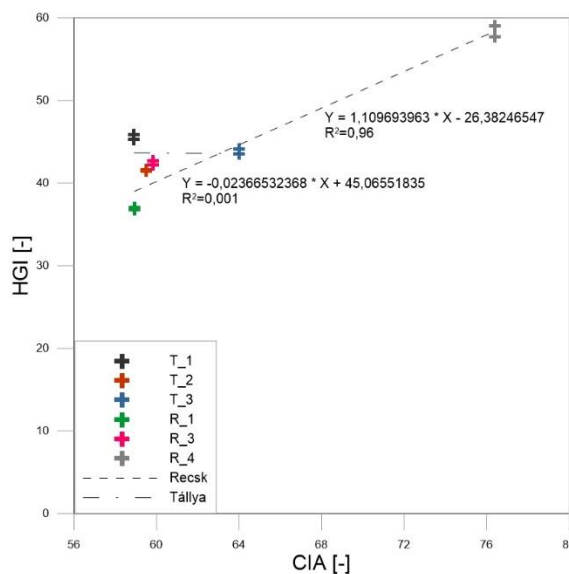
100. ábra: A HGI és a porozitás kapcsolata mintánként

A teljes mintahalmazra illesztett modell eredményei alapján a mállottság és az A×b értékek között egyértelmű, monoton növekvő összefüggés volt kimutatható (101. ábra), ugyanakkor a

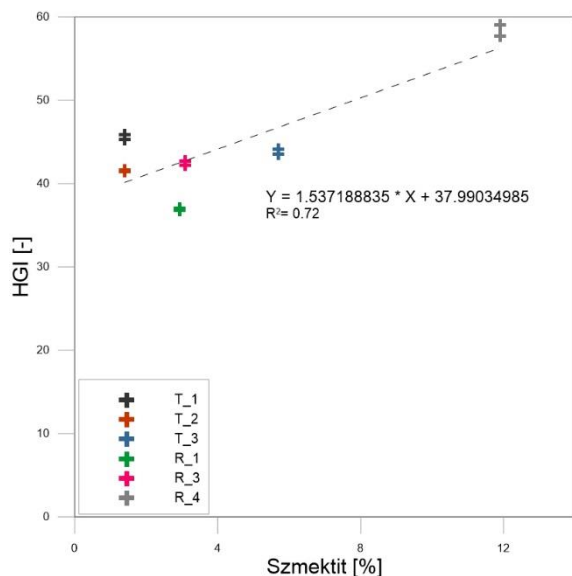
Recskről származó minták esetében erős pozitív trend rajzolódott ki, míg a tállyai minták esetében nem volt számottevő összefüggés (102. ábra). Hasonló trend figyelhető meg a szmektit-tartalom esetében is (103. ábra, 104. ábra). Ennek hátterében a szöveti sajátosságok állhatnak: az optikai és elektronmikroszkópos vizsgálatok alapján a két lelőhely mintái eltérő mállási folyamatokon és az ezekhez kapcsolódó másodlagos ásványképződésen mentek keresztül. A tállyai mintákban gyakoriak az üregkitöltő karbonátok, amelyekhez gyakran szmektit társul. A mintaelőkészítés során a pórusok feltársa és megszűnése feltehetően hozzájárult ahhoz, hogy a szmektit az 590 µm alatti frakcióban dúsuljon, így az a Hardgrove-vizsgálathoz használt mintába alig vagy egyáltalán nem került be. Ez magyarázhatja, hogy a tállyai minták esetében sem a mállottsággal, sem a szmektittartalommal nem volt kimutatható érdemi tendencia.



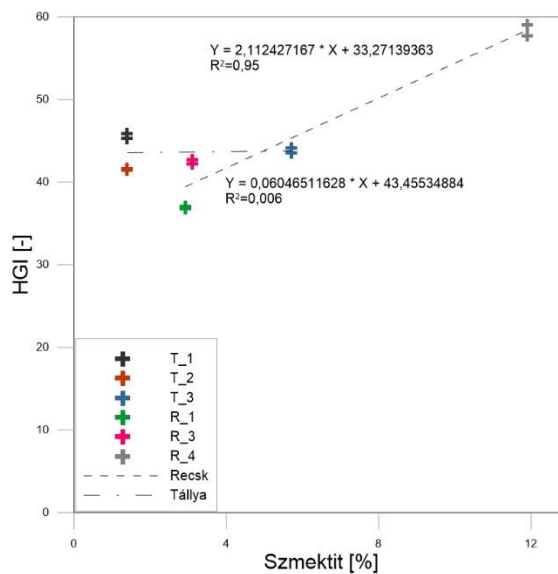
101. ábra: A HGI és a mállás kapcsolata



102. ábra: A HGI és a mállás kapcsolata mintánként



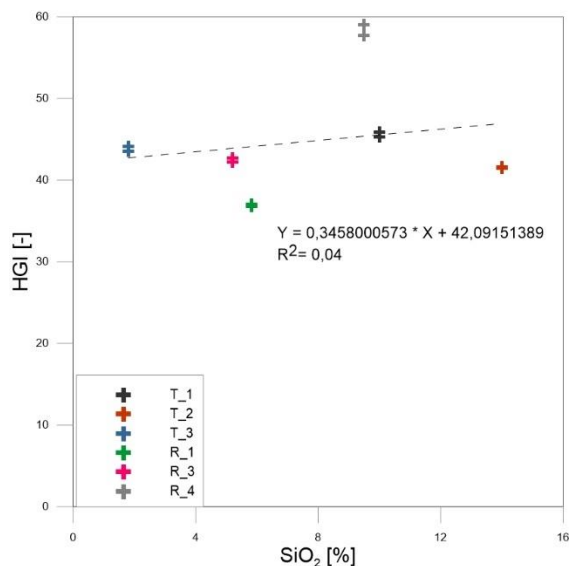
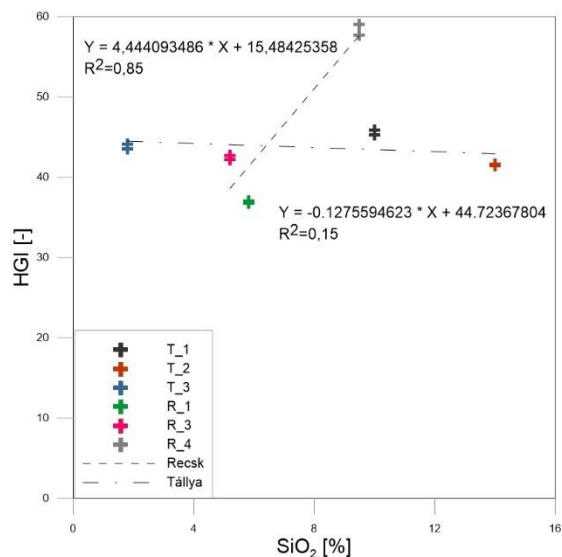
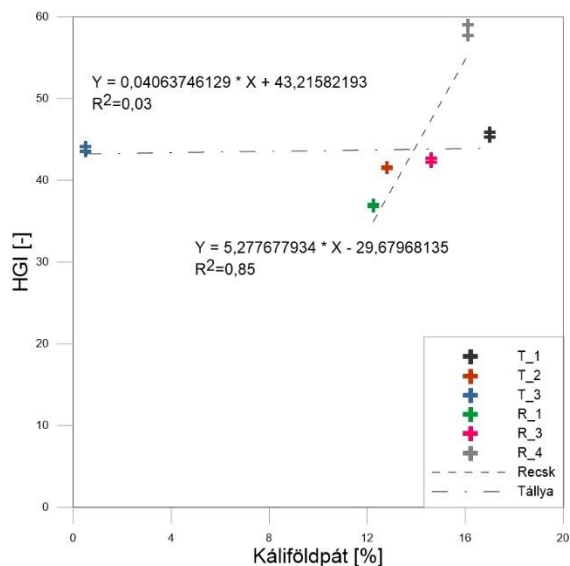
103. ábra: A HGI és a szmektit tartalom kapcsolata



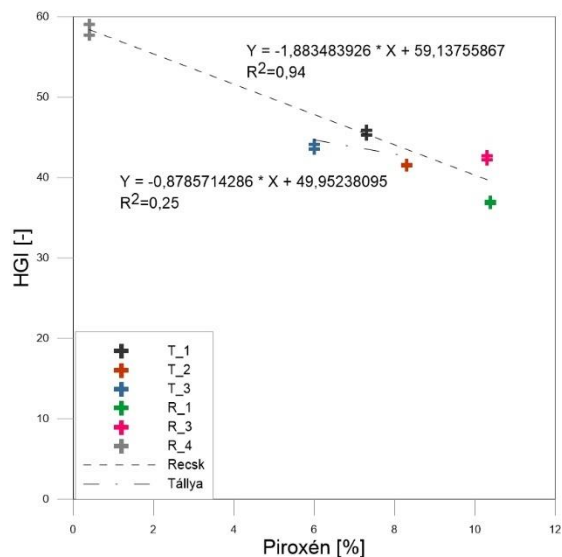
104. ábra: A HGI és a szmektit tartalom kapcsolata mintánként

A nagy keménységű ásványok hatása az őrlhetőségre ismert a szakirodalomból (Abdelhafez, 2020; Hafez, 2012; Lois-Morales és mtsai., 2022). a kristályos SiO_2 fázisok és a HGI értékek között nem volt kimutatható kapcsolat (105. ábra). Lelőhelyek szerinti bontásban ugyanakkor a recski minták esetében erős pozitív tendencia volt megfigyelhető (106. ábra) míg a tályai minták esetén ezúttal sem mutatkozott érdemi összefüggés. Ennek oka szintén a szöveti és mikroszvöveti jellemzőkben keresendő. Az optikai mikroszkópos megfigyelések során a recski mintában azonosítható volt a kvarc. Ezt alátámasztották az elektronmikroszkópos felvételek is, ahol a kristályos SiO_2 módosulatok ásványszemcsékként és üregkitöltő, sajátalakú ásványokként is megfigyelhetők voltak. Ezzel ellentétben a tályai minták esetében nem volt azonosítható a kristályos SiO_2 fázis, az elektronmikroszkópos megfigyelések során is elvértve. Ennek magyarázata, hogy a mennyiségi ásványos összetételt megvizsgálva látható, hogy a tályai mintákban a kristályos SiO_2 fázis nagyobb hányadát a cristobalit alkotja, amely az alacsony hőmérsékletű, hidrotermás opál típusú kovakiválás formájában jelenik meg, amely kis szemcsemérete miatt nem látható az optikai mikroszkópos megfigyelések során és az elektronmikroszkópos mérések során is nehezen azonosítható. Az alacsony hőmérsékletű hidrotermás mállást támasztja alá az elektronmikroszkópos mérések során megfigyelt mállás-típus és másodlagos Fe-karbonátképződés is. A káliföldpát tartalom a kristályos SiO_2 fázisokhoz hasonló trendet mutatott (107. ábra), a tályai minták esetében a káliföldpáttartalom nincs hatással az őrlhetőségre, míg a recski minták esetében ennek mennyiségi növekedése együtt jár az őrlhetőség növekedésével. A vizsgált ásványfázisok közül a piroxén tartalom mutatott kimutatható kapcsolatot az Axb értékekkel a recski minták esetében (108. ábra). A regresszióanalízis alapján a piroxén mennyiségének növekedésével csökkent az őrlhetőség, ami összefüggésbe hozható a mállási folyamatokkal, mivel a piroxén tartalom csökkenése az Fe mobilizációval járó mállás következménye

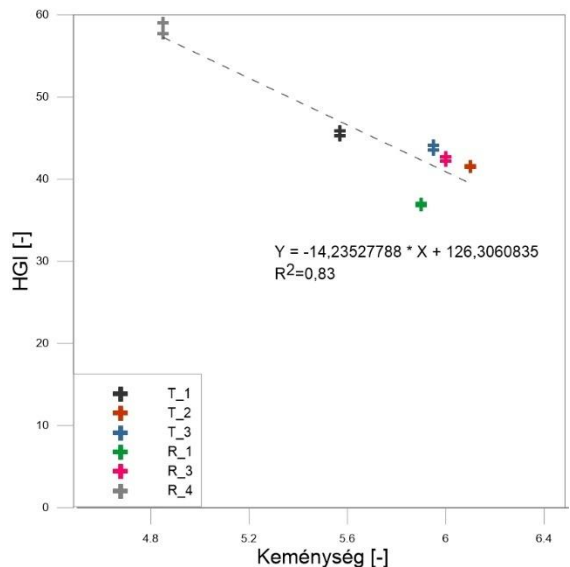
A regresszióanalízis eredményei alapján a minták átlagos keménysége és a HGI értékek között erős, monoton növekvő kapcsolat volt megfigyelhető, mind a teljes mintahalmaz esetében (109. ábra), mind a lelőhelyek szerinti bontásban (110. ábra). A mátrix átlagos szemcsemérete szintén befolyásolta a HGI értékeket: mintánként vizsgálva erős, monoton csökkenő tendencia volt azonosítható (112. ábra), míg az egész mintahalmazra vonatkozóan csupán gyenge összefüggés mutatkozott (111. ábra).

105. ábra: A HGI és a SiO₂ tartalom kapcsolata106. ábra: A HGI és a SiO₂ tartalom kapcsolata mintánként

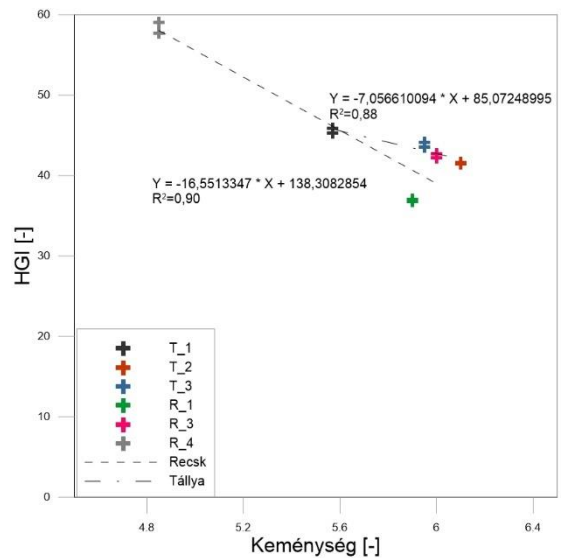
107. ábra: A HGI és a kálföldpát tartalom kapcsolata mintánként



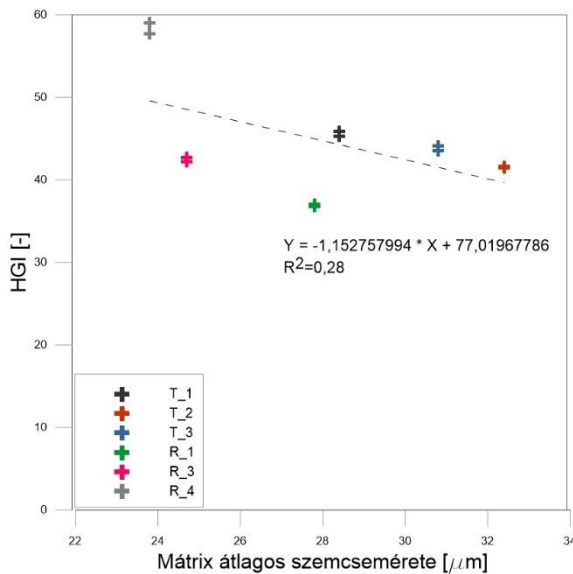
108. ábra: A HGI és a piroxén tartalom kapcsolata mintánként



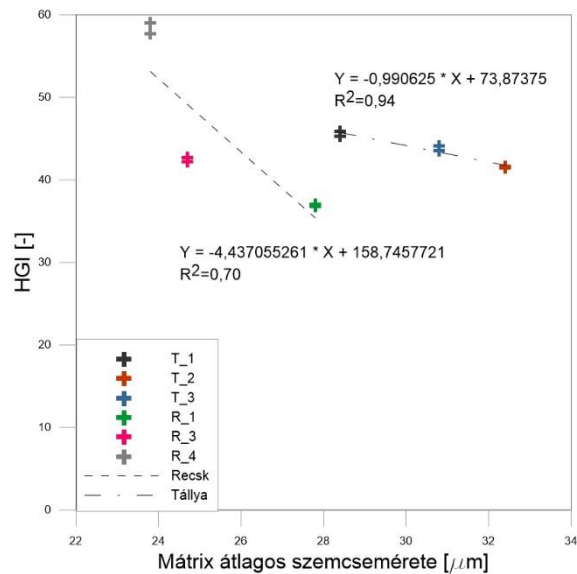
109. ábra: A HGI és a keménység kapcsolata



110. ábra: A HGI és a keménység kapcsolata mintánként



111. ábra: A HGI és a mátrix átlagos szemcseméretének kapcsolata



112. ábra: A HGI és a mátrix átlagos szemcseméretének kapcsolata mintánként

A két lelőhelyről származó minták őrlhetőségét befolyásoló paraméterek eltérő tendenciát mutattak. A recski bányából származó minták esetében szinte az összes vizsgált paraméterrel mutatott korrelációt. Ugyanakkor az R_4 minta esetében az XRD elemzések 21 % kaolinit tartalmat mutattak, amely kizárólag csak ebben az egy mintában volt jelen, így valószínűleg ez hatással van a minta őrlhetőségére, amely az eredmények torzításához vezethet.

A tállyai minták esetében a komplex porozitás, mállási folyamatok és az ezzel járó ásványi átalakulások árnyaltabbá tették az összképet, így ezen minták esetében csak a keménységgel és a mátrix átlagos szemcseméretével volt kimutatható egyértelmű korreláció.

Az eredmények alapján levonható következtetések:

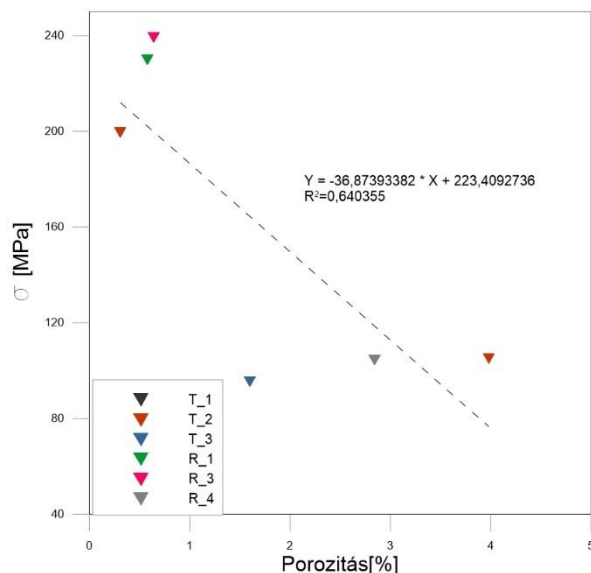
- Az őrlhetőségi vizsgálatok során az egyes lelőhelyekről származó minták eredményei jelentős eltéréseket, esetenként ellentmondásokat mutattak. Bizonyos kőzetjellemzők, esetében nem volt egyértelműen igazolható ezek befolyása az őrlhetőségre:
- A vizsgálathoz szükséges mintaelőkészítés megszüntette a nagyméretű pórusokat, így a nagyobb szemcseméretű anyagon mért porozitás nem tükrözi a minta valós porozitását
- A mállás általában gyengeségi felületek kialakulásával, másodlagos ásványképződéssel jár, amely a minta szemcseméretéből adódóan nem azonos a mért értékekkel, így nem tükrözi azt.
- A szmektit kis keménységéből adódóan a vizsgálati mintánál kisebb frakcióban dúsul, ez különösen igaz a tállyai mintákra, így ennek hatása nem mutatható ki, ugyanakkor a piroxének mennyisége, amely könnyen málló ásvány, kimutatható volt.

- Az ásványos összetétel hatása, a káliföldpát és kristályos SiO_2 fázisok, az utólagos kőzetet ért hatások eredményeként nem azonos módon befolyásolják az őrlőhetőséget.
- Hasonló összetételű kőzetek esetén az ásványos összetétel hatása néha ellentmondó, meghatározóbb az utólagos átalakulások és az ezekhez kapcsolódó ásványos és szöveti jegyek hatása. Ugyanakkor az ásványos összetételből számolt keménység hatása bizonyított.
- A szövetet számszerűsíteni hivatott mutató ez esetben sem mutatott korrelációt, feltehetően az ismert módszerek hiányosságai miatt, amely nem teszi alkalmassá az andeziteken történő alkalmazásra. Ugyanakkor az alapanyag átlagos szemcseméretének hatása kimutatható volt.
- A vizsgálati minta szemcseméretéből adódóan elsősorban a szöveti jellemzők és az ásványos összetétel hatása bizonyított.
- A kőzettani jellemző és az őrlőhetőség vizsgálata esetén érdemes a korrelációt az egész minta halmazra és külön-külön származási helyenként is megvizsgálni, mert jelentős eltérésekre világíthat rá.

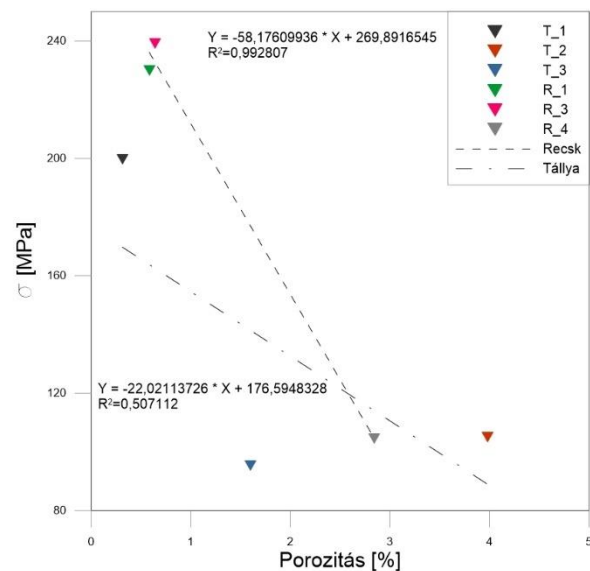
6.3. A közettani tulajdonságok hatása az egytengelyű nyomószilárdságra

Az egytengelyű nyomószilárdság vizsgálata esetén láthattuk, hogy egyes minták esetében nagyon nagy a szórás. Ezen minták vagy nagyon inhomogének, mint az R_4 minta, vagy nagy keménységgel rendelkeznek, mint a T_1 minta, de egy kisebb gyengeségi felület, mint egy repedés gyors tönkremenetelt eredményez.

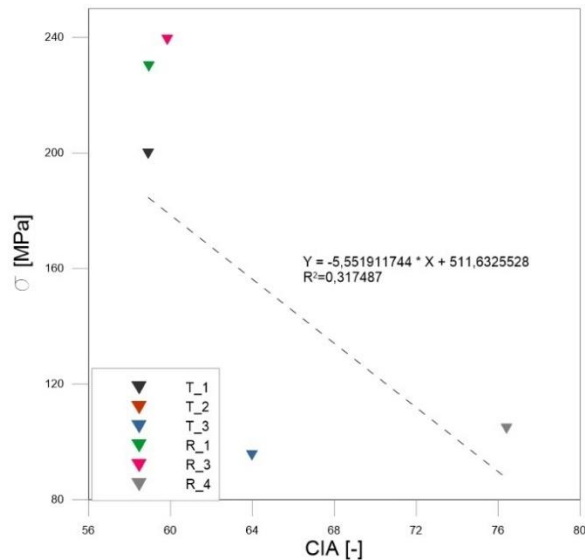
A porozitás hatása az egytengelyű nyomószilárdságra egyértelműen kimutatható volt (113. ábra): növekedése az egytengelyű nyomószilárdság csökkenését eredményezi, ugyanakkor a recski és a tállyai minták esetében mértéke eltérő (114. ábra). A mállás (115. ábra, 116. ábra) és a szmektit tartalom (117. ábra, 118. ábra) esetében monoton csökkenő kapcsolat volt azonosítható az egytengelyű nyomószilárdsággal, amelynek erőssége lelőhelyenként különbözött. A keménység esetében (119. ábra, 120. ábra) nem volt egyértelmű tendencia megfigyelhető az illesztett modellek alapján.



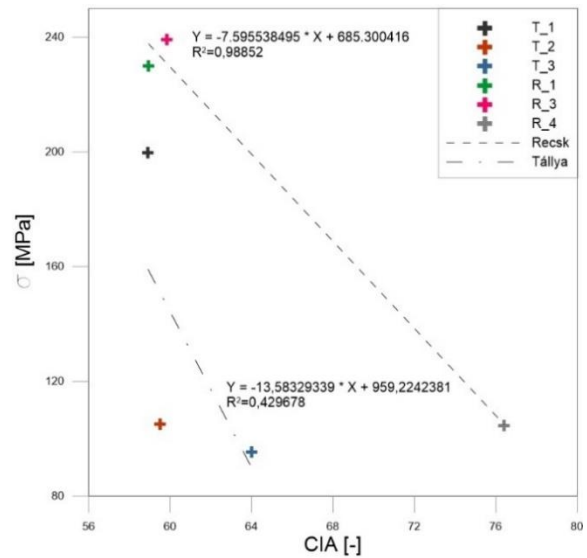
113. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a porozitás kapcsolata



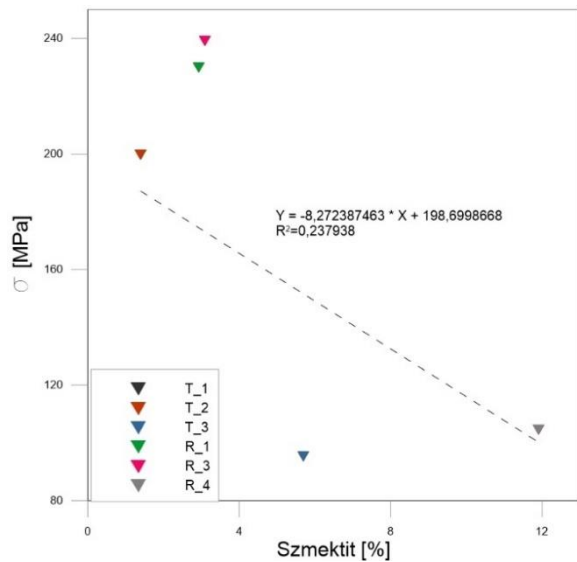
114. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a porozitás kapcsolata mintánként



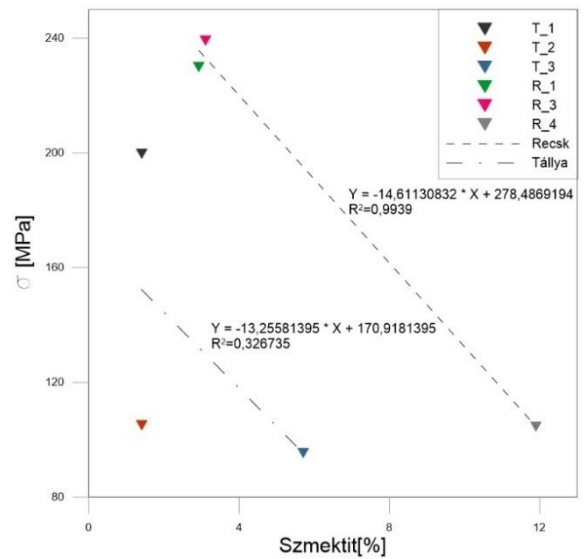
115. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a mállás kapcsolata



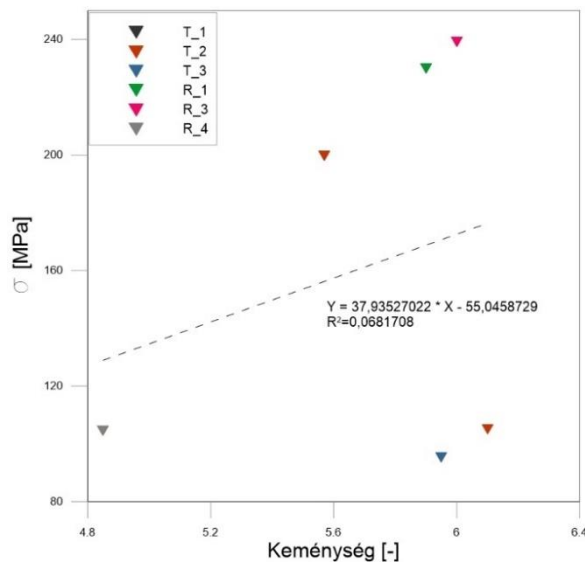
116. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a mállás kapcsolata mintánként



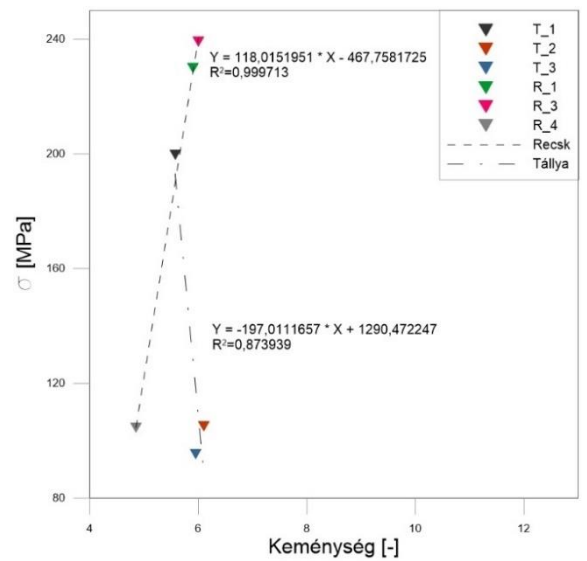
117. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a szektit tartalom kapcsolata



118. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a szektit tartalom kapcsolata mintánként



119. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a keménység kapcsolata



120. ábra: Egytengelyű nyomószilárdság és a keménység kapcsolata mintánként

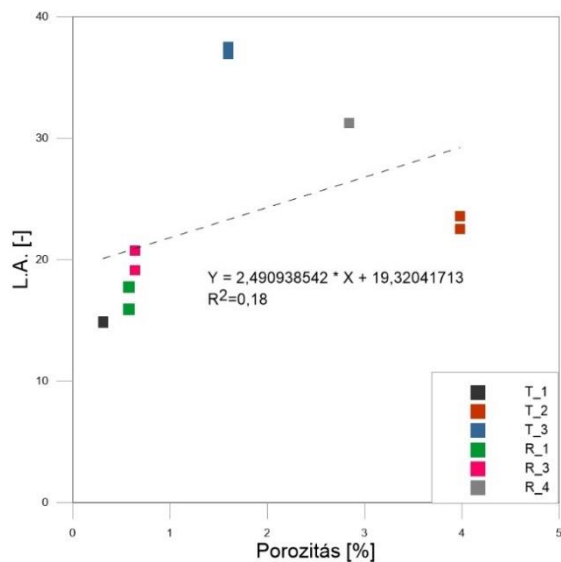
Az eredmények alapján levonható következtetések:

- Az egytengelyű nyomószilárdság vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a kőzetekben jelen lévő repedéshálózat jelentős mértékben hozzájárult a szilárdság csökkenéséhez, és a tönkremenetel jellemzően ezen gyengült zónák mentén következett be.
- A porozitás és mállás, valamint a málláshoz kapcsolódó szmektit tartalom hatása kimutatható.
- A mintatest méretéből adódóan a hibahelyek, főleg a nagyméretű repedések és a gyengeségi felületek hatása az egytengelyű nyomószilárdságra meghatározó.

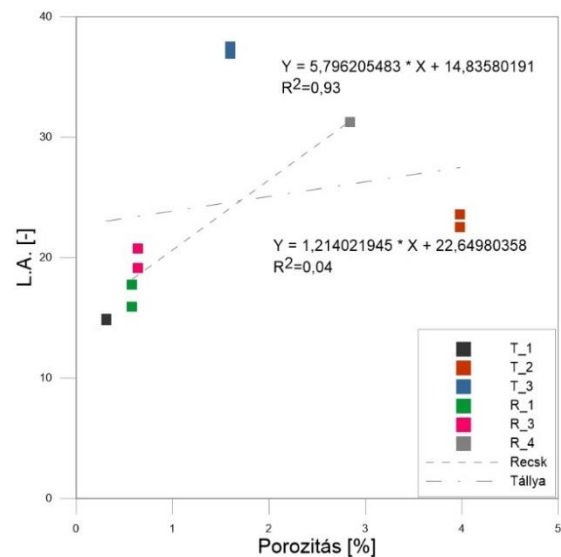
6.4. A közettulajdonságok hatása a kopásállóságra és az aprózódással szembeni ellenállásra

A közetfizikai vizsgálatok során, a porozitás és az aprózódással szembeni ellenállás (L.A. mutató) közötti kapcsolat elemzésekor az egész mintahalmazra illesztett modell csak gyenge összefüggést jelzett (121. ábra). Lelőhely szerinti bontásban a recski minták esetében erős, monoton növekvő kapcsolat volt azonosítható, míg a tályai mintáknál ilyen tendencia nem jelentkezett. (122. ábra), tehát Recsk esetében a mállásból fakadó porozitás növekedése a minőség csökkenéséhez vezet. Tályai esetben, hasonlóan az egyszemcse törési vizsgálatokhoz, a porozitás genetikája meghatározó, így hiába a T₂ minta nagy porozitása, mivel azt nem a mállás hozta létre első sorba így ennek nincs hatása az aprózódással szembeni ellenállásra.

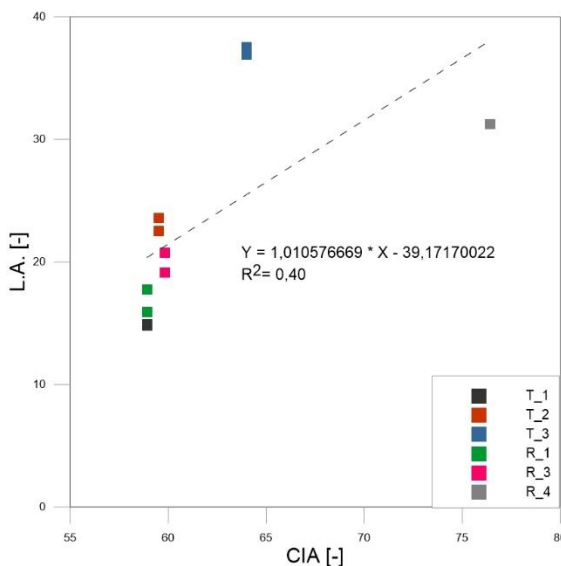
A mállás és a Los Angeles mutató között a teljes mintahalmazra, valamint lelőhelyenként elkülönítve is erős, monoton növekvő összefüggés volt kimutatható (123. ábra, 124. ábra). Ez utóbbi esetben mindkét bányából származó minták hasonló tendenciát mutattak. A szmektit-tartalom esetében is hasonló jelenség figyelhető meg (125. ábra, 126. ábra) ugyanakkor a tályai mintákra illesztett modell alacsonyabb R² értéke a málláshoz képest gyengébb kapcsolatot jelez.



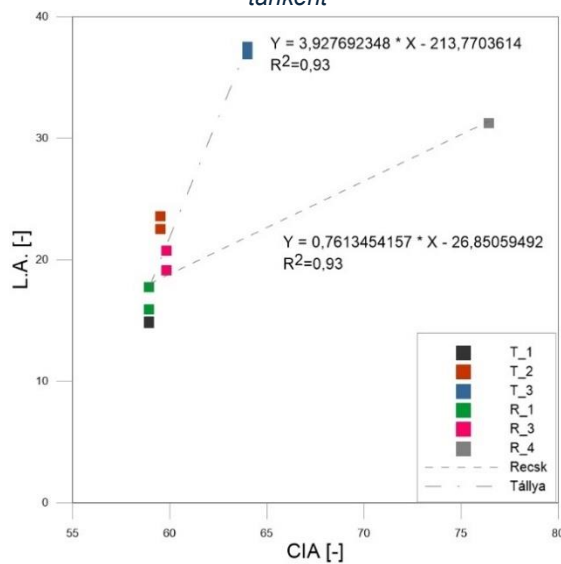
121. ábra: A L.A. mutató és a porozitás kapcsolata



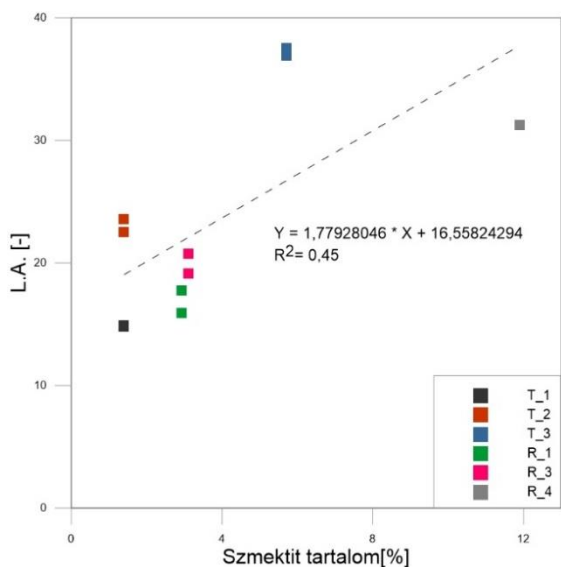
122. ábra: A L.A. mutató és a porozitás kapcsolata mintánként



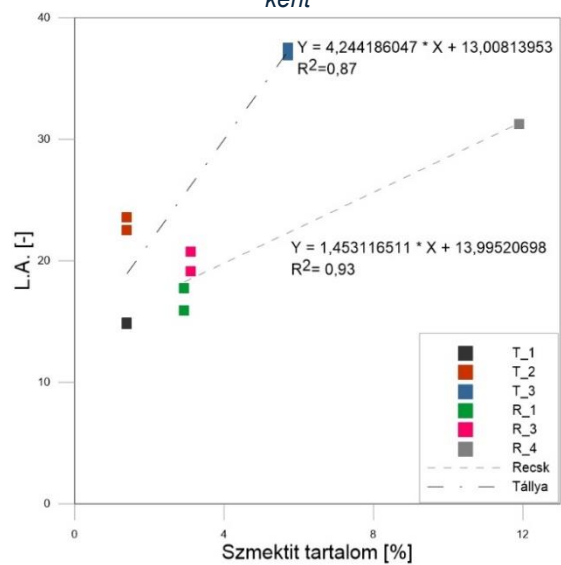
123. ábra: A L.A. mutató és a mállás kapcsolata



124. ábra: A L.A. mutató és a mállás kapcsolata mintánként

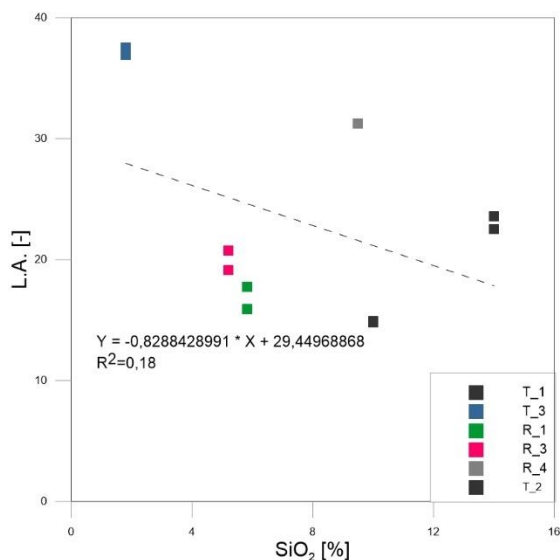


125. ábra: A L.A. mutató és a szektiit tartalom kapcsolata

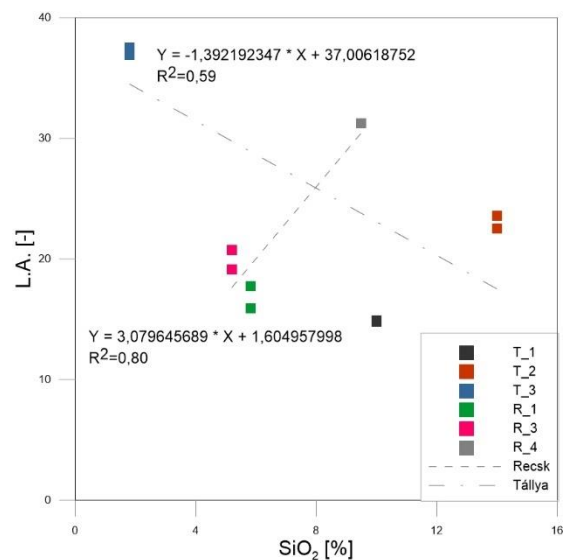


126. ábra: A L.A. mutató és a szektiit tartalom kapcsolata

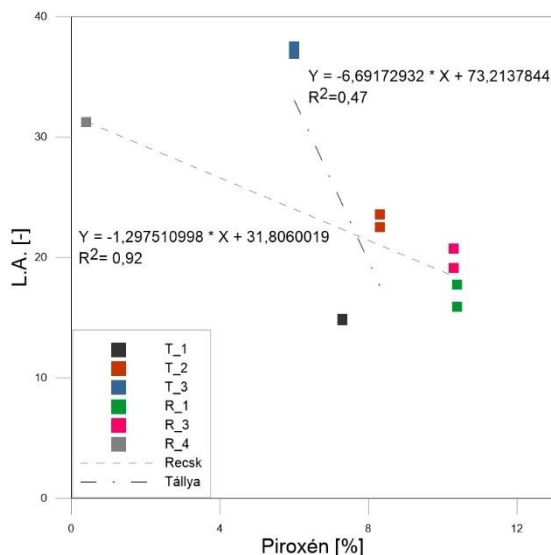
A kristályos SiO_2 tartalom a teljes mintahalmaz esetében csak gyenge kapcsolatot mutatott az aprózódási ellenállással (127. ábra). Lelőhelyenként vizsgálva azonban a recski minták esetében erőteljesen monoton növekvő tendencia volt megfigyelhető, míg a tályai mintákra mérésenként monoton csökkenő összefüggés volt jellemző (128. ábra). Ez feltehetően a kristályos SiO_2 megjelenési formájával van összefüggésben, a tályai minták esetében az optikai mikroszkópos és elektronmikroszkópos megfigyelések esetében csak nagyon ritkán volt megfigyelhető, valamint az XRD eredményekben látható volt, hogy a cristobalit nagyobb hányadban van jelen, amely az alacsony hőmérsékletű, hidrotermás opál típusú kovakiválás formájában jelenik meg, amely növeli a minta aprózódással szembeni ellenállását. Ezzel ellentétben a recski mintákban a nagyobb méretű kvarcsejtszémcsék voltak megfigyelhetők. A piroxéntartalom mindkét lelőhely mintáinál monoton csökkenő tendenciát mutatott az aprózódási ellenállással (129. ábra): A piroxéntartalom mindkét lelőhely mintáinál monoton csökkenő tendenciát mutatott az aprózódási ellenállással. A káliumföldpát-tartalom hatása a két lelőhely mintáinál ellentétes tendenciát mutatott (130. ábra), amely magyarázata a kőzetet ért utólagos átalakulásokkal áll összefüggésben. Az ásványos összetételből számolt keménységgel és a Los Angeles mutató között sem volt egyértelmű kapcsolat kimutatható (131. ábra, 132. ábra : a recski minták esetében a regressziós elemzés negatív tendenciát jelezett a keménység és a Los Angeles mutató között, míg a tályai mintáknál gyenge pozitív tendencia volt megfigyelhető, amely feltehetően a másodlagos átalakulásokhoz köthető szöveti jellemzőkkel állhat összefüggésben.



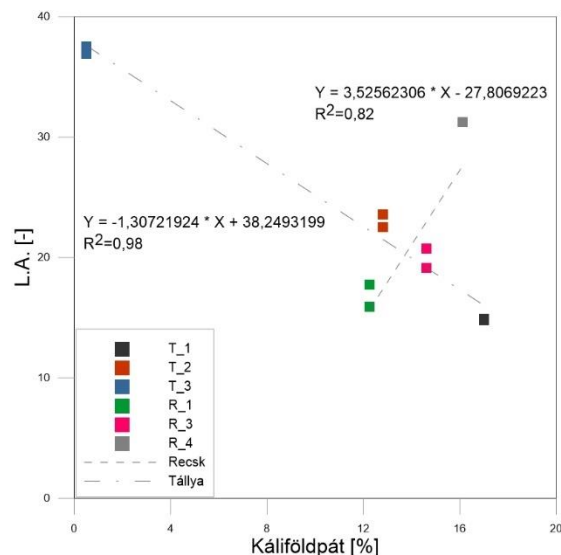
127. ábra: A L.A. mutató és a kristályos SiO_2 fázis tartalom kapcsolata



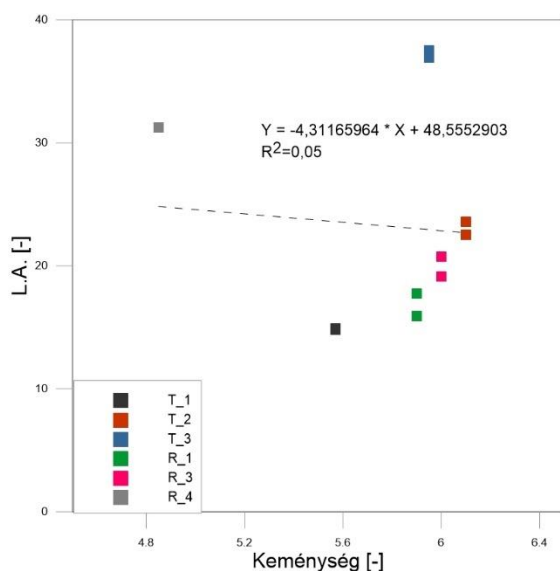
128. ábra: A L.A. mutató és a kristályos SiO_2 fázis tartalom kapcsolata mintánként



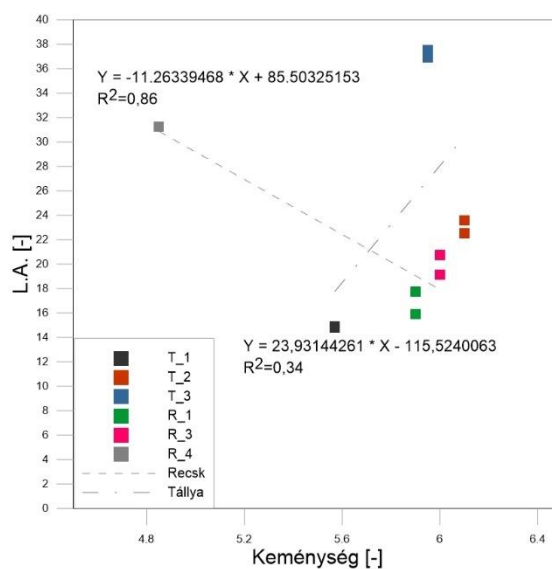
129. ábra A L.A. mutató és a piroxén tartalom kapcsolata mintánként



130. ábra: A L.A. mutató és a káliföldpát tartalom kapcsolata mintánként

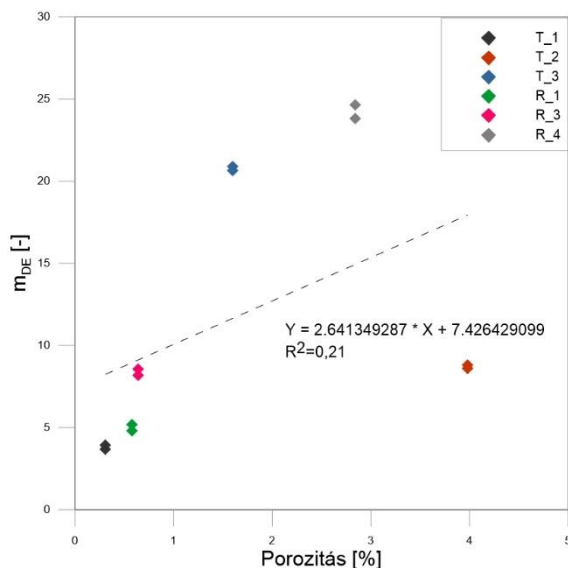


131. ábra: A L.A. mutató és a keménység kapcsolata

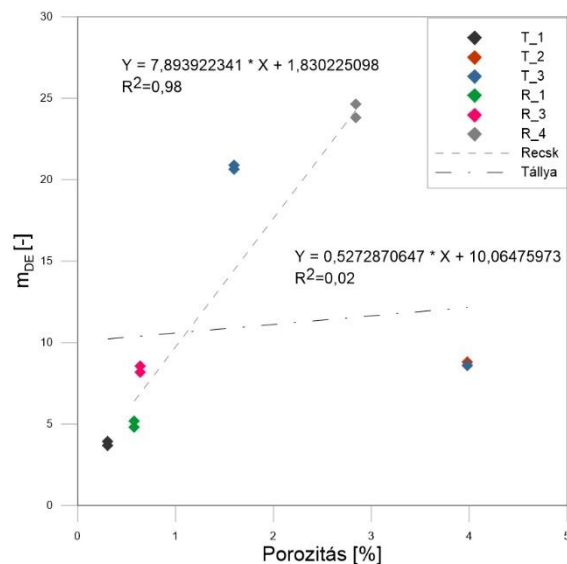


132. ábra: A L.A. mutató és a keménység kapcsolata mintánként

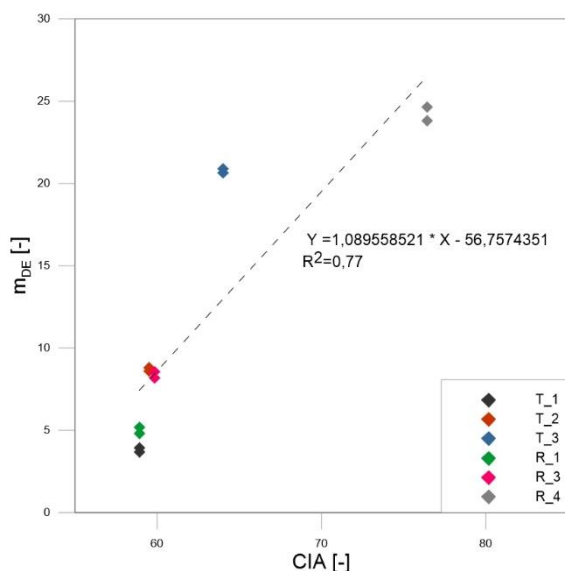
A kopásállóság és a porozitás között csak gyenge összefüggés volt kimutatható (133. ábra), míg a recski minták esetében jól kivehetően monoton növekvő tendencia mutatkozott (134. ábra). A mállás esetében szintén monoton növekvő kapcsolat volt megfigyelhető (101. ábra, 102. ábra) akár csak a szmektittartalom esetében (103. ábra, 104. ábra), bár utóbbi hatása a tállyai minták esetében mérsékeltebbnek bizonyult, hasonlóan az aprozódással szembeni ellenállásnál tapasztaltakhoz.



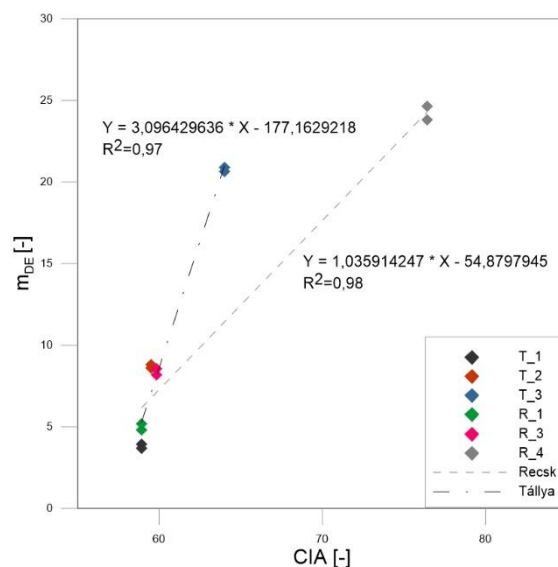
133. ábra: A mikro-Deval érték és a porozitás kapcsolata



134. ábra: A mikro-Deval érték és a porozitás kapcsolata mintánként

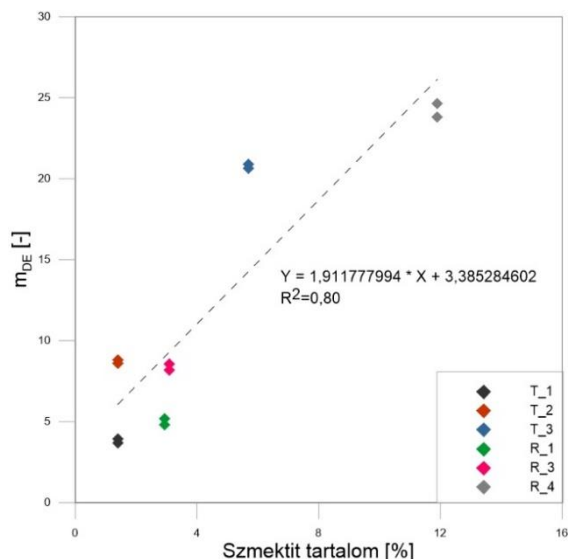


135. ábra: A mikro-Deval érték és a mállás kapcsolata

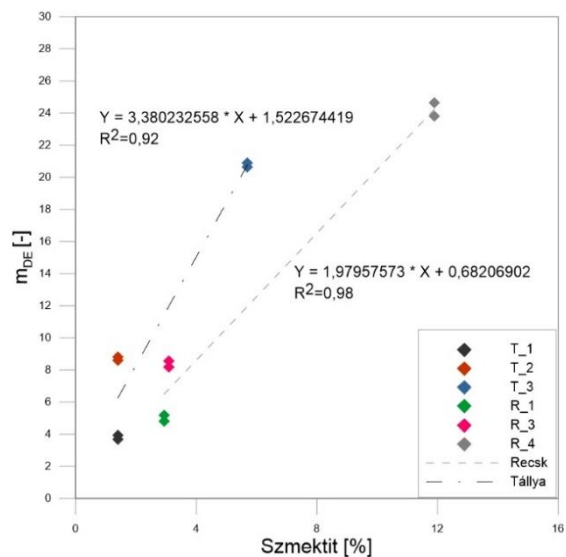


136. ábra: A mikro-Deval érték és a mállás kapcsolata mintánként

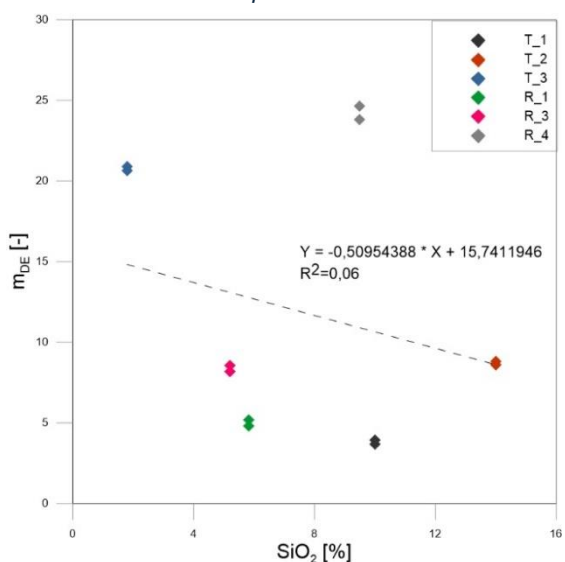
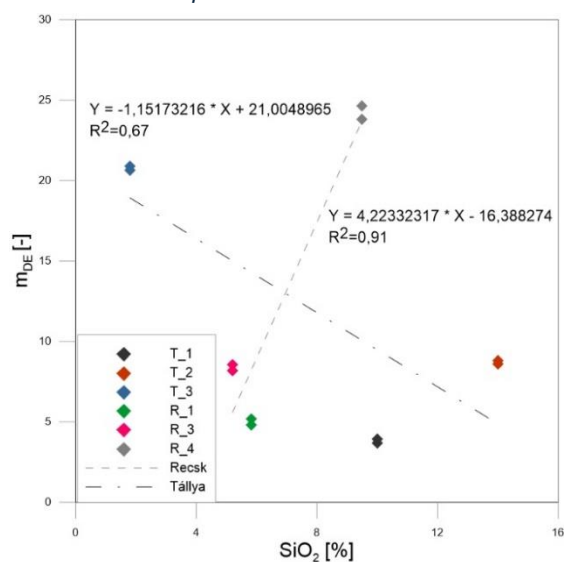
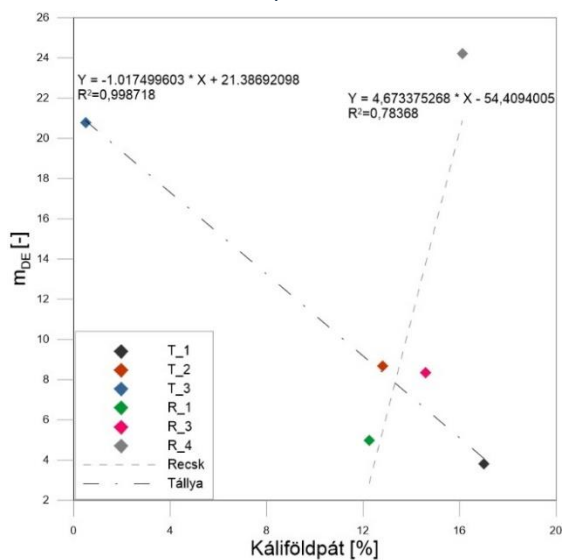
A kristályos SiO_2 fázis (139. ábra, 140. ábra) esetében nem volt egyértelmű tendencia azonosítható, hasonlóan az aprózódással szembeni ellenállás és az őrlhetőség esetében tapasztaltakhoz. A káliföldpáttartalom (141. ábra) recski mintáknál monoton növekvő, míg a tállyaiaknál monoton csökkenő tendenciát mutatott, amely feltehetően a korábban ismertetett másodlagos átalakulásokkal magyarázható. A piroxéntartalom (142. ábra) minden esetben monoton csökkenő kapcsolatot jelzett, ugyanakkor a tállyai minták esetében ez mérsékeltebb volt, ami valószínűsíthetően a piroxének mállottságával áll összefüggésben. A keménység és a kopásállóság között kizárólag a recski minták esetében volt kimutatható kapcsolat, amelynek jellege monoton csökkenő (143. ábra, 144. ábra).



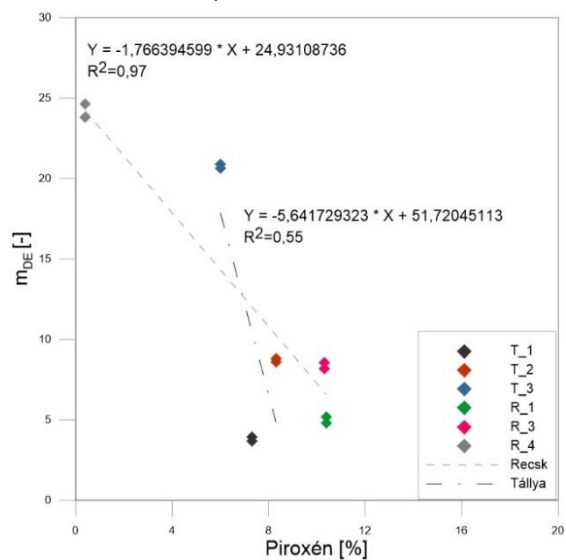
137. ábra: A mikro-Deval érték és a szektit tartalom kapcsolata



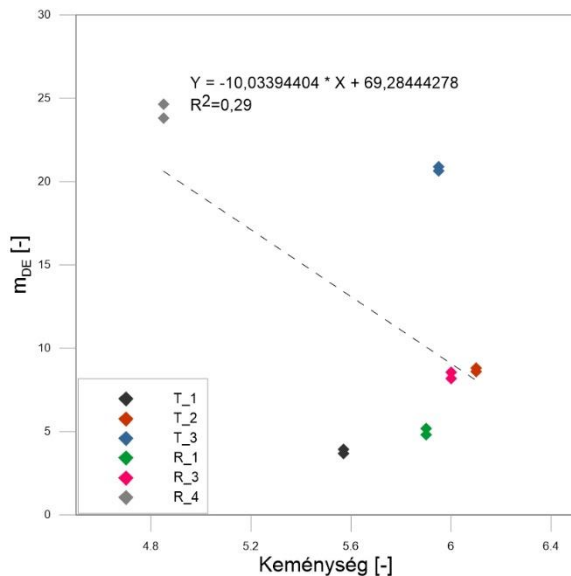
138. ábra: A mikro-Deval érték és a szektit tartalom kapcsolata mintánként

139. ábra: A mikro-Deval érték és a kristályos SiO₂ tartalom kapcsolata140. ábra: A mikro-Deval érték és a kristályos SiO₂ tartalom kapcsolata mintánként

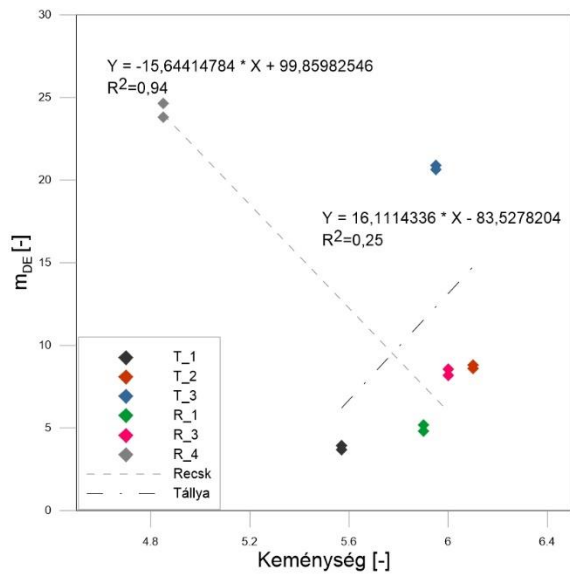
141. ábra: A mikro-Deval érték és a kálföldpát tartalom kapcsolata mintánként



142. ábra: A mikro-Deval érték és a piroxén tartalom kapcsolata mintánként



143. ábra: A mikro-Deval érték és a keménység kapcsolata



144. ábra: A mikro-Deval érték és a keménység kapcsolata mintánként

Az eredmények alapján levonható következtetések:

A kopásállóság és az aprozódással szembeni ellenállás vizsgálata eredményei kapcsán megállapítható, hogy:

- A mállás és az ezzel összefüggésben megjelenő szemkittartalom hatása egyértelműen kimutatható volt; a mállottság kedvezőtlenül befolyásolta mind a Los Angeles-, mind a mikro-Deval-értékeket. A piroxén jelenlétének hatása szintén a mállottsági állapottal hozható összefüggésbe.
- A porozitással nem volt megállapítható egyértelmű kapcsolat, ellentmondásos eredményeket mutatott, amely ez esetben is a pórusok genetikájával magyarázható.
- Az elsődleges kőzetalkotó ásványok nem mutattak egyértelmű hatást, annak ellenére, hogy a szakirodalmi példák és tapasztalati ismeretek alapján a kopásállóság esetében ez várható lett volna. Ezen túl az ásványos összetételből számolt keménység sem volt hatással.
- A szöveti jellemzők hatása nem volt kimutatható. Sem a számolt szöveti mutató, sem az alkotók átlagos szemcsemérete és az ebből számolt mutatók esetében sem volt megállapítható ezek hatása.
- Hasonló ásványos összetételű és szövetű kőzetek esetén a kőzetet ért másodlagos kőzetátalakulási folyamatok hatása meghatározó.
- A kopásállóság és az aprozódással szembeni ellenállás vizsgálata során két különböző igénybevételi mechanizmus érvényesül két eltérő közegben, előbbi esetében dörzsölés nedves közegben, míg utóbbi esetében ütés, ütközés száraz közegben, ugyanakkor az egyes kőzettani jellemzők hatását tekintve nem volt észlelhető jelentős eltérés.

6.5. Mintaminősítés pontozásos megközelítéssel

A különböző geológiai jellemzők – mint például a porozitás, a mállottság mértéke, a szmektit-tartalom vagy az ásványos összetételhez kapcsolódó keménység – együttesen alakítják ki a kőzetek mechanikai viselkedését. A korábbi fejezetekben bemutatott vizsgálati eredmények alapján egyértelművé vált, hogy ezen tényezők hatása sok esetben csak összetetten értelmezhető. Ennek szemléletes és összehasonlítható módon történő bemutatására egy kvalitatív alapú pontozásos rendszert dolgoztam ki. Ez a pontozásos szemlélet alkalmas lehet az eltérő eredetű és eltérő minőségű kőzetminták előzetes minősítésére, és támogatja a geológiai jellemzők komplex hatásainak rendszerezett értékelését is.

Az alkalmazott értékelési megközelítés célja, hogy az egyes minták legfontosabb kőzettani paramétereit – például porozitás, mállás, szmektittartalom, elméleti keménység – pontértékekkel jellemezze egy 1–3-as skálán, ezáltal lehetőséget teremtve az összesített jellemzésre. A pontozás során alkalmazott kritériumokat a 30. táblázat foglalja össze.

30. táblázat: A minták pontozása során alkalmazott pontozási kritériumok

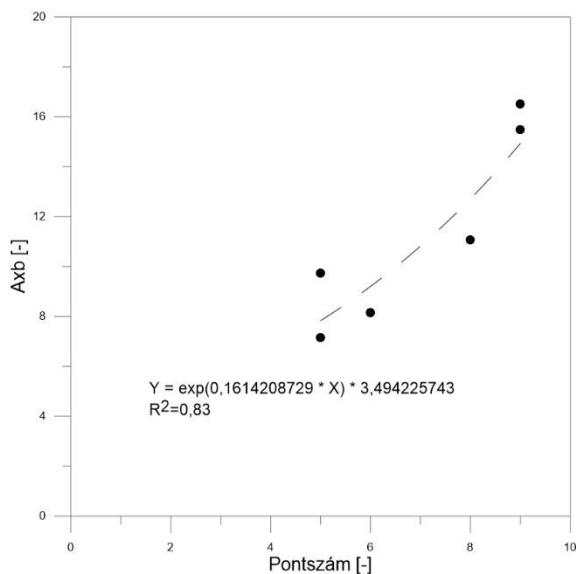
Tulajdonság	1 pont – kedvező	2 pont – közepes	3 pont – kedvezőtlen
Porozitás	< 1 %	1-2 %	>2%
Mállás / CIA	< 60	60-70	> 70
Szmektit tartalom	< 5 %	5-10 %	> 10 %
Elméleti keménység	< 5	5-6	> 6

Az egyes minták főbb kőzettani jellemzőinek kvalitatív értékelését a 31. táblázatban bemutatott pontozásos szempontrendszer tartalmazza, melynek segítségével egy összesített pontszám alapján a kőzetek minősítése egységes mutatóval elvégezhető.

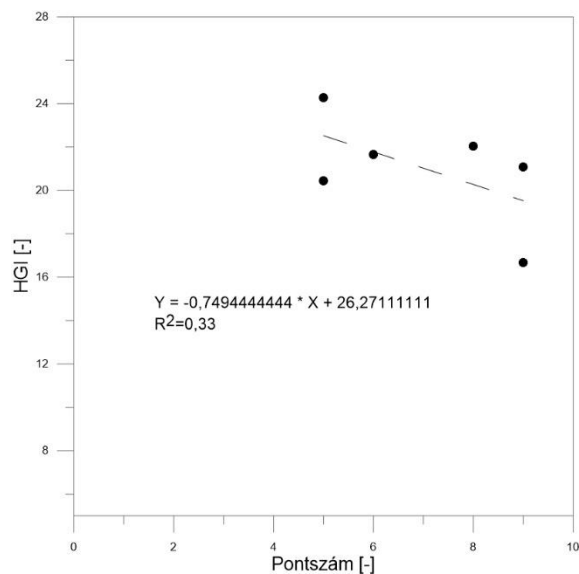
31. táblázat: A minták pontozásos értékelése

	T-1	T_2	T_3	R_1	R_3	R_4
Porozitás	1	3	2	1	1	3
Mállás	1	1	2	1	1	3
Szmektit tartalom	1	1	3	1	1	2
Keménység	2	3	2	2	3	1
Pontszám	5	8	9	5	6	9

A kialakított mátrix az anyagok mechanikai viselkedésének kvalitatív előrejelzésére is alkalmas, mivel az összesített pontszámok és a mért jellemzők (például Los Angeles, mikro-Deval, Axb, HGI) között jól követhető kapcsolat azonosítható. A törési hajlamot jellemző Axb mutató és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti összefüggést a 145. ábra szemlélteti, ahol az adatok illeszkednek a meghatározott exponenciális modellhez, alátámasztva a kvalitatív értékelés megbízhatóságát. A HGI esetében (146. ábra) a kapcsolat kevésbé volt jelentős, az adatok a meghatározott monoton csökkenő függvényhez gyengén illeszkednek.

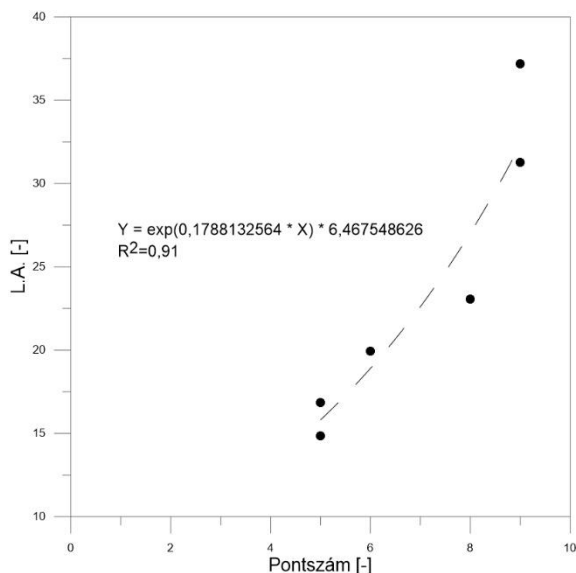


145. ábra: Az Axb mutató és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti kapcsolat

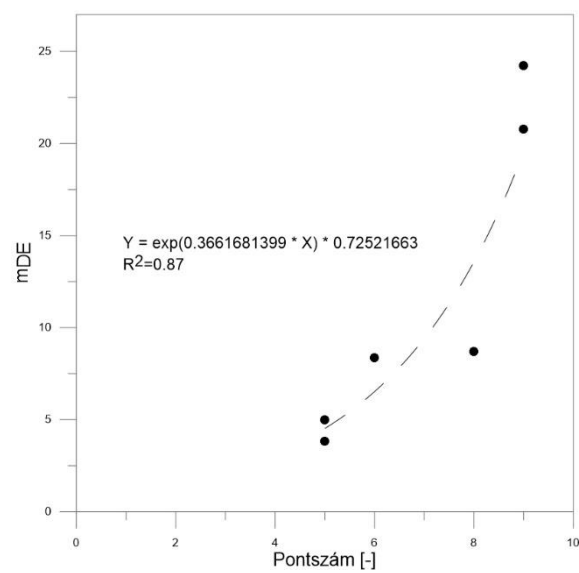


146. ábra: A HGI és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti kapcsolat

A közetfizikai tulajdonságok – így az aprózódással szembeni ellenállás (147. ábra és a kopásállóság (148. ábra) – esetében az adatok az illesztett exponenciális modell jó illeszkedést mutatnak. A vizsgált közettani jellemzők együttes hatása jól érvényesült, a kialakított pontozásos értékelési rendszer pedig alkalmasnak bizonyult a termékminőség várható alakulásának előrejelzésére, megfelelő számú megerősítő mérést követően.

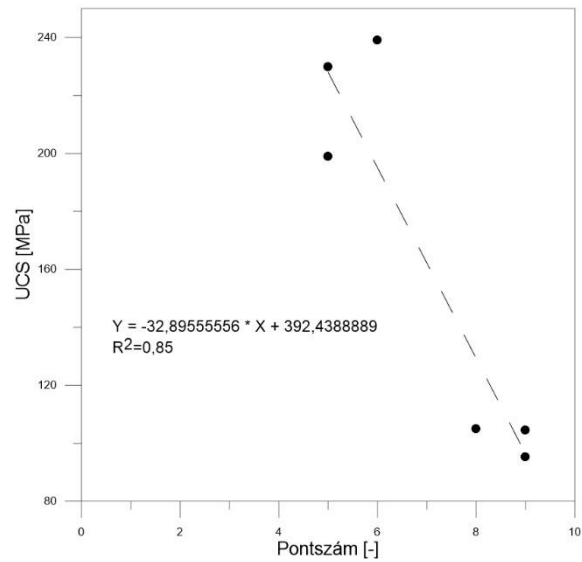


147. ábra: A L.A. mutató és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti kapcsolat



148. ábra: Az mDE mutató és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti kapcsolat

Az egytengelyű nyomószilárdság értékei esetében a monoton csökkenő lineáris modell biztosította a legjobb illeszkedést (149. ábra). Noha a minták tönkremenetele jellemzően a repedések mentén következett be, a kőzet szilárdságát befolyásoló tényezők – elsősorban a porozitás és a mállottság – együttes hatása így is egyértelműen kimutatható volt.



149. ábra: Az egytengelyű nyomószilárdság és a mintákhoz rendelt pontszámok közötti kapcsolat

7. Összefoglaló

Az ásványi nyersanyagok aprítási folyamatainak optimalizálása iránti egyre növekvő igény eredményeként számos tanulmány született a tématerületen a nemzetközi szakirodalomban. A közettani tulajdonságok hatásának felismerése és kutatása, az érces ásványi nyersanyagokon túl, egyre fontosabb szerepet kap a nem érces ásványi nyersanyagok területén is, beleértve a zúzottkő előállítás folyamatait is, kiegészülve a termékminőségre gyakorolt hatásuk vizsgálatával. A tématerület kutatottsága ellenére, hiányoznak egyrészt azok az átfogó szisztematikus tanulmányok, amelyek egy közettípuson vizsgálják szisztematikusan a kőzet geológiai tulajdonságainak hatását úgy az aprítási folyamatokra, mint a termék tulajdonságokra, másrészt azok a tanulmányok, amelyek az andezitekre koncentrálnak, annak ellenére, hogy Európa egyes területein nagy volumenben ez képezi a zúzottkő előállítás alapanyagát.

A disszertáció tárgya, részben hiánypótló tanulmányként, a Magyarországon nagy volumenben bányászott és zúzottkő alapanyagát képező andezit közettani-földtani tulajdonságait és apríthatósága közötti kapcsolatok szisztematikus vizsgálata. Az ehhez szükséges mintavételi helyeket úgy jelöltem ki, hogy mindegyik bánya egy vulkáni esemény során keletkezett andezittestet termel, amely alapján feltételezhető, hogy hasonló ásványtani és szövetszerkezeti jellemzőkkel rendelkezik, de ennek ellenére mutat némi eltérést. Ugyanakkor a két kiválasztott mintavételi hely, Tállya és Recsk, a földrajzi távolságból adódóan más-más geokémiai jellegű vulkanizmusra és utóvulkáni tevékenységre enged következtetni. Ezen túl, a mintavételi pontokat úgy választottam ki az egyes bányákon belül, hogy az anyagminőségben is eltérés legyen a jó minőségű kőzettől a rossz minőségűig.

A minták közettani tulajdonságainak átfogó jellemzését és ezen jellemzők számszerűsítését számos módszer kombinációjával végeztem. Az ásványos összetétel azonosítását röntgenpordiffrakciós módszerrel végeztem, a kémiai összetétel meghatározását pedig röntgenfluoreszcens spektrometriával, amelynek az eredményeit a mállás számszerűsítéshez használtam fel. A szöveti megfigyeléseket és méréseket optikai mikroszkópos módszerekkel végeztem, amelyet pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelésekkel és mikro-CT mérésekkel egészítettem ki. A kutatás során kapott eredmények és tapasztalatok alapján kijelenthető, hogy a szakirodalomban található, a kőzet szövetét számszerűsíteni hivatott mutatók az andezitekre nehezen alkalmazhatók. Az andezitek szövete jellemzően inekvigranuláris, az egyes alkotók között nagyságrendbeli eltérések vannak, a mikrokristályos vagy holokristályos alapanyag optikai mikroszkópos megfigyelése és számszerűsítése kihívást jelent, ugyanakkor a nagyobb méretű ásványszemcsék méretéről, habitusáról információt szolgáltatnak. A pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelések a mikroszöveti jellemzőkről, mint a pórusok genetikája,

mérete és a póruskitöltő ásványtársulások, valamint a mállás és másodlagos ásványképződésről ad átfogó képet. A mikro-CT mérések a kőzet térbeli háromdimenziós szövetét képezik le. Az egyes alkotók elkülönítése az elnyelési együttható alapján történik, amit a maga rendjén a kémiai összetétel határoz meg, így a hasonló kémiai összetételű fázisok, mint a földpátok, elkülönítése nem volt lehetséges, ugyanakkor egyes ásványcsoportokról, valamint a pórusok és a másodlagos karbonátok térbeli helyzetéről részletes képet ad.

A porozitás meghatározását első lépésben He-piknométeres módszerrel végeztem, majd az eredményeket mikro-CT mérésekkel egészítettem ki. A mikro-CT vizsgálatok rávilágítottak arra, hogy egyes magmás kőzetek jelentős mennyiségű zárt pórust tartalmazhatnak. Mivel a He-piknométer kizárólag a nyílt pórusokat képes kimutatni, ezek a zárt pórusok a módszerrel nem detektálhatók. Következésképpen a mikro-CT a magmás kőzetek porozitásának jellemzésére pontosabb és átfogóbb képet nyújt.

Az igénybevétellel szembeni ellenállás vizsgálata széles spektrumot és ezáltal igénybevételi módot, és vizsgálati minta szemcsefrakciót ölelt fel. A törési tulajdonságokat esősúlyos egyedi szemcsetörési vizsgálattal (DWT) határoztam meg, míg az őrlhetőséget Hardgrove-eljárással értékeltem. Emellett az anyag egytengelyű nyomószilárdságát is meghatároztam. A termékminőség jellemzését a zúzottkő iparban szabványos és rutinszerűen alkalmazott kopásállóság és aprozódással szembeni ellenállás meghatározásával végeztem. Az egyszemcse törési vizsgálatok szükséges, a DWT mérési elvén működő vizsgálóberendezés fejlesztése és megépítése a doktori kutatás részét képezte, első és egyedi ilyen berendezésként Magyarországon. Alkalmazása andeziteken kevésbé elterjedt, ugyanakkor a mérések alátámasztották, hogy jól alkalmazható az andezitek törési tulajdonságainak vizsgálatára különböző szemcseméretű anyagok esetében.

A kőzettani paraméterek hatásának vizsgálata a törésre rámutatott, hogy az alkalmazott kiértékelés és értelmezési mód hatással van az eredményekre. A teljes mintára jellemző egy mutató, amely a törési hajlamot írja le és a kőzet tulajdonságok között nehezebb egyértelmű kapcsolatot kijelölni. Ezzel ellentétben a kőzetenként és szemcsefrakciók szerint elkülönítve végzett értékelés során egyértelműen kijelölhetők voltak azon kőzettani paraméterek, amelyek hatással voltak a törésre. A szemcseméret szerinti megközelítésben kijelölhető volt, hogy a durvább szemcsetartományban (45 mm-től 25 mm-ig) a meghatározó a porozitás volt, míg a kisebb szemcsetartományban (25 mm-től 12,5 mm-ig) a mállás volt a meghatározó, az ettől kisebb mérettartományban a szöveti jellemzők befolyása volt a legjelentősebb. A szemcseméret és kőzettípus szerinti megközelítés esetében a porozitásnak látszólag kisebb jelentőség tulajdonítható a durvább szemcsefrakciók esetén. A pórusok genetikáját megvizsgálva,

ugyanakkor evidenssé vált, hogy míg a mállással keletkezett porozitás gyengíti a kőzetet, addig a kőzetmegszilárdulás során keletkezett porozitás nincs ilyen hatással a kőzetre. A porozitás hatása a törési tulajdonságra egy kevésbé kutatott terület, így az eredmény nemzetközi szinten is újdonságnak számít. A szemcseméret csökkenésével a mállás és szmektit tartalom hatása hangsúlyosabbá vált, a 11,2 mm alatti mérettartományban pedig a szöveti jellemzők hatása egyértelműen kimutatható volt. Kiemelendő a mállás hatása, amelyet mállási index (CIA) számításával számszerűsítettem. A mállás hatásának vizsgálata szintén kevésbé elterjedt a szakirodalomban, ezért a CIA-mutatóval történő kvantitatív értékelése és gyakorlati alkalmazása újszerű megközelítésnek tekinthető. Az egyes ásványos alkotók hatása nem nyert bizonyítást, kivételt képezve a mállással társuló szmektit és a könnyen málló piroxén a kis szemcseméretű frakciókban, de az ásványos összetételből számolt elméleti keménység hatása sok esetben kimutatható volt. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a vizsgált andezitek esetében kijelölhető egy-egy olyan kőzettani tulajdonság, vagy kőzettani tulajdonságok együttese, amely az adott szemcseméret frakcióban az anyag törési tulajdonságát meghatározza.

Az őrlhetőségi vizsgálatok során a szakirodalomban korábban leírt hatások nem minden esetben érvényesültek a vizsgált andezit minták esetében; például az ásványos alkotók, különösen a nagy keménységű kristályos SiO_2 és a földpátok, szerepe nem mutatott egyértelmű befolyást az őrlhetőségre. A származási hely szerinti csoportosításban megvizsgálva az eredményeket, sokszor ellentmondásos eredmények figyelhetők meg, amely arra enged következtetni, hogy a kőzetet ért eltérő utólagos hatások meghatározóak voltak ezek hatásának alakulásában, amelyet az elektronmikroszkópos felvételek is alátámasztanak. A porozitás és a mállás, valamint a málláshoz köthető szmektittartalom hatása kevésbé volt meghatározó a minták őrlhetőségére. Ez a vizsgálati minta szemcseméretével és ezek részleges megszűnésével, illetve a vizsgálati minta során bekövetkezett szelektív aprozódással magyarázhatók. A mikroszvöeti jellemzők hatása egyértelműen kimutatható volt, akárcsak a számolt elméleti keménység hatása.

Az egytengelyű nyomószilárdság esetén, a mintatest méreteiből adódóan a kőzetrepedések jelenléte jelentős szerepet játszott a tönkremenetelben. A vizsgált kőzetjellemzők közül a porozitás és a mállás jelentős befolyással bírt a nyomószilárdság értékekre.

A termékminőség jellemzésére használt kopásállóság és aprozódással szembeni ellenállás vizsgálatok esetében a szakirodalmi példákkal és eredményekkel ellentétben az ásványos összetétel és a szövet hatása nem volt kimutatható a vizsgált andezit mintákon, viszont a mállás és az ehhez társuló szmektittartalom jelentős hatást gyakorolt a két mutatóra.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a vizsgált andezitek esetében a vizsgálatról függetlenül meghatározó egy kőzetjellemző, amely jelentős hatással bír. A nagyobb kb. 25 mm-es tartományig meghatározó szerepe van a porozitásnak és ezen túl a porozitás genetikának, mivel az elsődleges porozitás eltérően viselkedik, nem gyengíti azonos mértékben a kőzetet, mint a másodlagos, mállással keletkezett porozitás. A 10-12 mm-es tartományig elsősorban a mállás és az ehhez társuló szmektit és más ásvány átalakulások a meghatározók, míg a kisebb szemcseméret tartományban a szöveti jellemzők hatása azonosítható. A mállás és az ehhez társuló ásványok jelentős szerepe azonosítható volt, annak ellenére, hogy a szakirodalomban ez egy gyakran felületesen tárgyalt kőzetjellemző. A kutatási eredmények tükrében felmerül az a kérdés, hogy milyen mértékű eltérés szükséges a szöveti jellemzőkben és az ásványos összetételben, ahhoz hogy ennek hatása kimutatható legyen a törési jellemzőkre, őrlhetőségre és a kőzetfizikai tulajdonságokra. Ennek azonban a megválaszolása egy jövőbeli kutatás tárgyát képezheti.

Az alkalmazott vizsgálati módszerek eltérő igénybevételeket reprezentálnak. Az ütést alkalmazó esősúlyos vizsgálatok esetében a porozitás, valamint a mállás és a szmektit tartalom szerepe volt meghatározó. Az őrlhetőség vizsgálatánál, ahol a fő igénybevétel a dörzsölés, elsősorban az alkotók keménységéből számított átlagkeménység és a mikroszöveti jellemzők bizonyultak meghatározónak. A kopásállóság és az aprozódással szembeni ellenállás esetében, az eltérő igénybevételek ellenére, mindkét esetben a mállottság és a szmektit tartalom volt kiemelt jelentőségű; előbbi esetében főleg a dörzsölés, utóbbi esetében az ütés volt a domináns igénybevétel. Külön kiemelendő, hogy mind az esősúlyos vizsgálat, mind az aprozódással szembeni ellenállás esetén a jellemző igénybevétel az ütés, azonban a felület geometriája és az ismétlődések száma eltér. Az egyszemcse törési vizsgálatok során egyetlen igénybevétel történik, míg az aprozódással szembeni ellenállás esetén ismételt igénybevételek lépnek fel. A porozitás és ezen belül a porozitás genetikájának hatása az esősúlyos vizsgálatoknál egyértelműen kimutatható volt, akárcsak az aprozódással szembeni ellenállás esetében is. Az őrlhetőség és a kopásállóság vizsgálatánál egyaránt a dörzsölés a meghatározó igénybevétel, ugyanakkor eltérő körülmények között zajlik le: az őrlhetőség esetében száraz közegben, a gyűrűsmalomban, míg a kopásállóságnál nedves közegben, a dob forgatásával mozgatott őrlőtestek hatására. A keménység befolyásoló hatása azonban csak az őrlhetőség esetében volt kimutatható.

A kidolgozott pontozásos rendszer a porozitás, mállottság, szmektit-tartalom és keménység alapján egységesen értékeli a mintákat, és az összesített pontszám jól korrelál több kőzetfizikai mutatóval (pl. Los Angeles, mikro-Deval, $A \times b$). Megfelelő számú validáló mérés után a

módszer alkalmas lehet a közetek előzetes minősítésére és a várható termékminőség előrejelzésére.

8. Summary

The increasing demand for the optimization of comminution processes in the mineral raw materials sector has led to the appearance of a considerable number of studies in the literature. The recognition and investigation of the influence of petrographic properties, extending beyond ore-bearing raw materials, has also become increasingly important in the field of non-metallic mineral resources, including aggregate production processes, complemented by the assessment of their impact on product quality. Despite the extensive research, there is a lack of comprehensive and systematic studies focusing on a single rock type, systematically examining the influence of geological characteristics on both comminution processes and product properties. Moreover, studies specifically targeting andesite are particularly scarce, despite the fact that in several European regions this rock type represents the main raw material for aggregate production.

This dissertation therefore addresses a significant gap by systematically examining the relationships between the petrographic characteristics of Hungarian andesites—widely used in aggregate production—and their comminution behavior. Sampling sites were selected so that each quarry exploits a single magmatic body formed during distinct volcanic events. Although these deposits broadly share similar mineralogical and textural features, variations were expected. The two study sites, Tállya and Recsk, represent volcanism with differing geochemical signatures and post-volcanic alteration processes. Within each quarry, samples were collected to reflect the full range of rock quality, from high-grade, unaltered material to strongly altered varieties.

The comprehensive characterization and quantification of the geological properties of the samples were carried out using a combination of analytical techniques. Mineralogical composition was determined by X-ray powder diffraction (XRD), while chemical composition was analyzed with X-ray fluorescence (XRF), which also served as a basis for quantifying alteration. Textural features were examined by polarized light optical microscopy, complemented by scanning electron microscopy (SEM) and micro-CT. The results demonstrated that conventional texture indices proposed in the literature are difficult to calculate and apply to andesite, owing to its inequigranular texture, wide grain-size variation, and micro- to holocrystalline matrix. SEM observations provided insight into microscale features such as pores, secondary mineral inclusions, and alteration products. Micro-CT measurements enabled three-dimensional imaging of the rock fabric. The identification of individual components relied on their attenuation coefficients, which are determined by chemical composition. As a result, phases with similar compositions, such as feldspars, could not be differentiated. Nevertheless, micro-CT offered a

detailed view of specific mineral groups, along with the spatial distribution of pores and secondary carbonates.

The quantification of porosity was first carried out using the helium pycnometer method, which was subsequently complemented by micro-CT measurements. The micro-CT analyses revealed that certain igneous rocks may contain a considerable amount of closed porosity. Since the helium pycnometer is only capable of detecting open pores, these closed pores remain undetected by the method. Consequently, micro-CT provides a more accurate and comprehensive characterization of porosity in igneous rocks.

Mechanical resistance was evaluated using a comprehensive set of tests, each representing different stressing conditions and sample size fractions. Breakage behaviour was characterized by drop-weight testing (DWT), grindability by the Hardgrove grindability index (HGI), and strength by uniaxial compressive strength (UCS). Product quality was assessed using standardized testing methods: resistance to fragmentation (Los Angeles test) and resistance to wear (micro-Deval test) tests. For single-particle breakage, a DWT apparatus was developed and constructed as part of this dissertation and the first of its kind in Hungary, which proved highly effective in characterizing the breakage behaviour of andesite across various grain-size fractions.

The influence of petrographic parameters on breakage behavior was found to depend strongly on the method of evaluation and interpretation. At the whole-sample level, the use of a single index to describe breakage susceptibility showed only weak relationships with rock properties. In contrast, analyses separated by rock type and grain-size fraction revealed clear parameters that significantly influence breakage. In the coarser fractions (45–25 mm), porosity was the dominant factor; in the intermediate range (25–12.5 mm), alteration exerted the strongest influence; while in the finer fractions, textural features proved most decisive. Analyzing the origin of porosity revealed that secondary porosity related to alteration processes significantly weakened the rock, whereas primary porosity formed during solidification had no measurable effect. Since the influence of porosity on breakage is rarely addressed in the literature, this finding provides novel insight at the international level. With decreasing grain size, the role of alteration and smectite content became increasingly pronounced, and below 11.2 mm textural effects dominated. Alteration in particular emerged as a key factor, quantified through the Chemical Index of Alteration (CIA), which is applied here as a novel tool for the study of andesites. The effect of weathering has been less frequently addressed in the literature; therefore, the quantitative assessment and practical application of the CIA index represent a novel approach. The role of individual mineral components could not generally be confirmed, apart from smectite

linked to weathering and easily alterable pyroxenes in finer grain-size fractions. In contrast, hardness calculated from mineral composition was often influential. Overall, the results indicate that in the studied andesite samples, specific petrographic properties—or combinations thereof—can be identified as key factors controlling breakage behavior within particular grain-size fractions.

Grindability tests showed that effects commonly reported in the literature were not consistently evident in the studied andesites. For example, the influence of crystalline SiO_2 and feldspars on grindability could not be clearly identified. When the samples were evaluated separately by provenance, the results were at times contradictory, suggesting that site-specific variability, linked to differences in secondary alteration processes, as confirmed by electron microscopy, played a decisive role. Porosity, alteration, and smectite content related to the alteration played only a limited role, likely due to the particle size of the test sample, and selective comminution and partial pore elimination during sample preparation. By contrast, microscale features and hardness derived from mineral composition were significant.

In uniaxial compressive strength tests, pre-existing fractures and cracks acted as weakness planes that decisively influenced failure. Among the investigated rock parameters, porosity and alteration exerted the strongest influence

The results of the product-quality tests—resistance to wear and fragmentation—indicated that mineralogy and texture had only a limited influence on the studied andesites, in contrast to what is often reported in the literature. Instead, alteration and the associated smectite content exerted a pronounced effect on both parameters.

Overall, the results indicate that andesite behavior, regardless of the testing method, is primarily controlled by specific petrographic properties that vary with grain size. In coarse fractions (>25 mm), porosity is the dominant factor, with its impact depending on its origin—primary porosity does not weaken the rock in the same way as secondary, alteration-related porosity. In the 10–12 mm range, alteration and the associated smectite content exert the strongest influence, while in finer fractions, textural features become the determining factor.

Although often overlooked in the literature, alteration processes and the formation of associated secondary minerals proved to be critical factors. The results raise the question of the extent to which mineralogical composition and textural features must differ in order to significantly influence breakage behavior, grindability, and physical properties. Addressing this

question, however, falls beyond the scope of the present work and should be the subject of future research.

The applied testing methods represent different types of stressing conditions. In the drop-weight tests, where the dominant stress is impact, porosity as well as alteration and associated smectite content proved to be decisive factors. In the grindability tests, where abrasion is the main stress type, the average hardness calculated from mineral constituents and microscale textural features were the most influential. In the case of resistance to wear (micro-Deval) and resistance to fragmentation (Los Angeles), despite the differing stress conditions, alteration and smectite content were of primary importance; in the former case abrasion and grinding dominated, while in the latter impact was the controlling load. It is noteworthy that although both drop-weight testing and the Los Angeles test are impact-based, the geometry of contact surfaces and the number of impacts differ. In single-particle breakage tests, a single impact is applied to the sample, whereas in the Los Angeles test repeated impacts take place. The effect of porosity, and in particular the genesis of porosity, was clearly identifiable in both the drop-weight and Los Angeles tests. For grindability and resistance to wear testing, abrasion is the dominant stress mode, but under different conditions: grindability tests are performed in dry conditions in a ring mill, while wear resistance is measured in wet conditions as the grinding media are moved by the rotation of a drum. However, the influence of hardness was only evident in the case of grindability.

A scoring system was developed, integrating porosity, alteration (CIA), smectite content, and hardness into a composite index. This score correlated strongly with key mechanical indicators (Los Angeles, micro-Deval, $A \times b$). With sufficient validation, the approach could serve as a practical tool for preliminary rock quality assessment and prediction of aggregate performance.

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőimnek, Dr. Rácz Ádámnak és Prof. Dr. Mucsi Gábornak, a támogatásukért, valamint azért, hogy lehetőséget biztosítottak a kutatási téma kibontakoztatására. Nagyra értékelem, hogy mindezt akkor is engedték, és támogatták, amikor talán nem volt teljesen világos számukra, merre is tart a munka, vagy mi lesz annak végkimenetele. Külön köszönettel tartozom Dr. Rácz Ádámnak, aki a kutatás teljes folyamatában támogatta a munkámat: elkísért a terepi mintavételezésre, lehetővé tette az új vizsgálati módszer (DWT) bevezetését és a szükséges berendezés megépítését, valamint a közös ötletek, kiértékelések és megbeszélések során értékes javaslataival segítette a kutatás sikeres lezárását.

Köszönöm a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetnek, hogy a kollektíva része lehettem és biztosította számomra a kutatási helyet és az egyes vizsgálatokhoz szükséges eszközök és berendezések egy részét.

Köszönettel tartozom a Colas Északkő Kft.-nek, hogy biztosította számomra a mintavételezés lehetőségét. Külön köszönettel tartozom Tompa Richárdnak, a Colas Északkő Kft. minőségellenőrzési vezetőjének, aki több alkalommal is segített megszervezni a mintavételezést és minden egyes alkalommal, időt és fáradságot nem sajnálva elkísért a mintavételezni.

Szeretnék köszönetet mondani a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet munkatársainak, Bernáth Szilveszterné Melindának a mintaelőkészítés és a laboratóriumi mérések kivitelezése során nyújtott felbecsülhetetlen segítségéért. Szintén köszönettel tartozom Kövesi Vikornak, a DWT berendezés megépítésért és tökéletesítéséért, valamint a mintavételezés, mintaelőkészítés és a laboratóriumi mérések során nyújtott segítségéért. Továbbá köszönettel tartozom Kálmánczi Zoltánnak, a Bányászat és Energia Intézet munkatársának a micro-CT, He-piknométeres és egytengelyű nyomószilárdsághoz szükséges mintatestek kivágásáért és előkészítéséért.

Köszönettel tartozom a Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet munkatársainak: Bulátkó-Debus Déliának a közetvékonycsiszolatok elkészítéséért, Dr. Móricz Ferencnek az XRF-mérésekért, valamint Dr. Kristály Ferencnek az XRD-vizsgálatokért. Hálásan köszönöm a He-piknométeres porozitásmérések elvégzését Vacsiné Nagy Zsuzsának és Dr. Baracza Krisztiánnak, az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet munkatársainak. Külön kiemelt köszönettel tartozom Dr. Beresová Monikának, a Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Képalkotó Intézet Radiológiai Tanszék munkatársának, aki teljesen ismeretlen személyként történő megkeresésem ellenére készségesen vállalta a mikro-CT mérések

elvégzését. Időt és energiát nem sajnálva mélyedt el az ásványok és kőzetek világában annak érdekében, hogy számomra a lehető legmegfelelőbb mérési megoldást megtalálja. Hálás köszönettel tartozom továbbá Dr. Kántor Tamásnak, a Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet munkatársának az egytengelyű nyomószilárdsági vizsgálatok kivitelezéséért. Végül, de nem utolsósorban, köszönöm Dr. Bokányi Ljudmilla tanárnőnek a hasznos észrevételeket és javaslatokat, amelyek jelentősen hozzájárultak a dolgozat minőségének javításához.

Végül szeretném kifejezni legmélyebb hálámat a családomnak, akik mindvégig mellettem álltak, és támogattak. Külön köszönettel tartozom páromnak, Dr. Kristály Ferencnek aki nemcsak emberileg, hanem szakmai téren is folyamatos támaszt nyújtott. Értékes meglátásai, gyakorlati tanácsai és szakmai tapasztalata nagyban hozzájárultak a disszertáció elkészüléséhez. Türelméért, bátorításáért és azért, hogy mellettem állt a nehezebb pillanatokban is, különösen hálás vagyok.

10. Irodalomjegyzék

- Abdelhaffez, G. S. (2020). Studying the effect of ore texture on the bond work index at the mahd ad dahab gold mine: A case study. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(1), 111–121. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.1.9>
- Ademila, O. (2019). Engineering geological evaluation of some rocks from Akure, Southwestern Nigeria as aggregates for concrete and pavement construction. *Geology, Geophysics and Environment*, 45(1), 31. <https://doi.org/10.7494/geol.2019.45.1.31>
- Adomako, S., Engelsen, C. J., Thorstensen, R. T., & Barbieri, D. M. (2021). Review of the relationship between aggregates geology and Los Angeles and micro-Deval tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1963–1980. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02097-y/Published>
- Afolagboye, L. O., Talabi, A. O., & Akinola, O. O. (2016). Evaluation of selected basement complex rocks from Ado-Ekiti, SW Nigeria, as source of road construction aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 853–865. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0766-1>
- Ajagbe, W. O., Tijani, M. A., & Oyediran, I. A. (2015). Engineering and geological evaluation of rocks for concrete production. *LAUTECH Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 67–79.
- Åkesson, U., Lindqvist, J., Göransson, M., & Stigh, J. (2001). Relationship between texture and mechanical properties of granites, Central Sweden, by use of image-analysing techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(4), 277–284. <https://doi.org/10.1007/s100640100105>
- Akesson, U., Stigh, J., Lindqvist, J. E., & Göransson, M. (2003). The influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy. *Engineering Geology*, 68, 275–288. www.elsevier.com/locate/enggeo
- Alves, V. K., Schneider, C. L., Duque, T. B., Mazzinghy, D. B., & Peres, A. E. C. (2015). Sample requirements for HPGR testing procedure. *Minerals Engineering*, 73, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.007>
- Askaripour, M., Saeidi, A., Mercier-Langevin, P., & Rouleau, A. (2022). A Review of Relationship between Texture Characteristic and Mechanical Properties of Rock. *Geotechnics*, 2(1), 262–296. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010012>
- Ayuk, E., Pedro, A. M. A., Ekins, P., United Nations Environment Programme., & United Nations Environment Programme. International Resource Panel. (é. n.). *Mineral resource governance in the 21st century: gearing extractive industries towards sustainable development*.

- Ballantyne, G. R., Bonfils, B., & Powell, M. S. (2017). Evolution of impact breakage characterisation: Re-defining t-family relationship. *International Journal of Mineral Processing*, 168, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.001>
- Barbosa, K., Hodder, K., & Yahyaei, M. (2023). Experimental Study on Mechanical Properties of 3D-Printed Specimens of Iron Oxide, Quartz, and Bedded Composites Under Uniaxial Compression and Indirect Tensile Strength. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(6), 1224–1237. <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0247>
- Baum, W. (2014). Ore characterization, process mineralogy and lab automation a roadmap for future mining. *Minerals Engineering*, 60, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.11.008>
- Bbosa, L., Powell, M. S., & Cloete T.J. (2006). *An investigation of impact breakage of rocks using the split Hopkinson pressure bar*.
- Bearman, R. A., Barley, R. W., & Hitchcock, A. (1991). Prediction of power consumption and product size in cone crushing, *Minerals Engineering* (Köt. 4, Szám 12).
- Beke, B. (1974). Anyagok őrlhetősége és az őrlhetőség mérőszáma. *Építőanyag*, XXVI (12), 449–455.
- Bendixen, M., Iversen, L. L., Best, J., Franks, D. M., Hackney, C. R., Latrubesse, E. M., & Tusting, L. S. (2021). Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: Conflicts, synergies, and pathways forward. In *One Earth* (Köt. 4, Szám 8, o. 1095–1111). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.008>
- Berry, R. F., Walters, S., & McMahon, C. (2011). *Automated mineral identification by optical microscopy*. <https://www.researchgate.net/publication/43498222>
- Bond, F. (1946). Crushing Tests by Pressure and Impact. *Trans. AIME*, 169, 58–66.
- Bond, F. (1954). Crushing and grinding calculations. *CIM Bulletin*, 47(507), 466–472.
- Bonfils, B., Ballantyne, G. R., & Powell, M. S. (2016). Developments in incremental rock breakage testing methodologies and modelling. *International Journal of Mineral Processing*, 152, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.04.010>
- Bonnici, N. K. (2012). *The mineralogical and textural characteristics of copper-gold deposits related to mineral processing attributes*. PhD disszertáció, School of Earth Sciences, University of Tasmania, 281
- Brattli, B. (1992). The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates. *Engineering Geology*, 33, 31–44.
- Brown, G. J. (1997). Technical note: A fractal description of the progeny of double impact single particle breakage. *Minerals Engineering*, 10(2), 229–235. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(96\)00148-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(96)00148-3)

- Budai, T., Csillag, G., Kercksmár, Z., Selmeczi, I., & Sztanó, O. (2015). *Magyarország felszíni képződményeinek földtana magyarázó Magyarország földtani térképéhez (1:500 000)*. Magyar Földtani és Geofizikai Intézet.
- Bueno, M., Almeida, T., Lara, L., Powell, M., & Delboni, H. (2024). Accuracy and Precision of the Geopyörä Breakage Test. *Minerals*, 14(8), 738. <https://doi.org/10.3390/min14080738>
- Bueno, M., Torvela, J., Chandramohan, R., Chavez Matus, T., Lienes, T., & Powell, M. (2021). The double wheel breakage test. *Minerals Engineering*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106905>
- Bulled, D., & Husain, K. (2008). *The development of a small-scale test to determine work index for high pressure grinding rolls*. SGS Mineral Services Technical Paper 2008-49
- Bwalya, M. M., & Chimwani, N. (2020). Development of a more descriptive particle breakage probability model. *Minerals*, 10(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/min10080710>
- Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). Peak and residual strengths of jointed rock masses and their determination for engineering design. *Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium - Rock Mechanics Meeting Society's Challenges and Demands*, 1, 259–267. <https://doi.org/10.1201/noe0415444019-c32>
- Cleaver, J. A. S., Ghadiri, M., & Rolfe, N. (1993). Impact attrition of sodium carbonate monohydrate crystals. *Powder Technology*, 76, 15-22. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(93\)80036-A](https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)80036-A)
- Comakli, R., & Cayirli, S. (2019). A correlative study on textural properties and crushability of rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(5), 3541–3557. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1357-8>
- Czinder, B., & Török, Á. (2021). Strength and abrasive properties of andesite: relationships between strength parameters measured on cylindrical test specimens and micro-Deval values-a tool for durability assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 8871–8889. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01983-9>/Published
- Cseh, Z., Daragó, I., Encsy, G., Kozák, E., Mátyás, E., Mészáros, I., Szentmarjai, G., & Zagata, F. (1990). *A tálliai kőbánya 60 éve* (I. Lázár, Szerk.). Tokaji Nyomda.
- Csőke, B. (1975). *Bauxitok dúsítási lehetőségének vizsgálata*. Doktori értekezés. Nehézipari Műszaki Egyetem.
- Csőke, B. (1979). Bauxitdúsítás, NIMDOK (1979), 107 p
- Csőke, B., (1976) A bauxitdúsítás gazdaságossági és ásványvagyon-gazdálkodási kérdései, *Bányászati és Kohászati Lapok- Bányászat*, 105(5), 336-339
- Csőke, B., Rácz, Á., & Mucsi, G. (2013). Determination of the Bond work index of binary mixtures by different methods. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.05.004>

- Tóth, Gy, Latrán B. (2018) Colas Északkő Kft. Tálya Kopasz-hegyi piroxénandezit külszíni bánya 2017. évi fúrásos kutatásának összefoglaló földtani zárójelentése és készletszámítása, Készítette: Geokomplex Kft., Miskolc 2018 április, 61
- Dan, C., & Schubert, H. (1990). Breakage probability, progeny size distribution and energy utilization of comminution by impact. *Bruchwahrscheinlichkeit, Bruchstueckgroessenverteilung und Energieausnutzung bei der Prallzerkleinerung*, 31(5), 241–247.
- Dominy, S. C., O’connor, L., Parbhakar-Fox, A., Glass, H. J., & Purevgerel, S. (2018). Geometallurgy—A route to more resilient mine operations. *Minerals*. 8(12). 560. <https://doi.org/10.3390/min8120560>
- Donovan, J., & Karfakis, M. (2004). *A Fracture Toughness Based Model For The Prediction Of Jaw Crusher Power Consumption*. <https://www.researchgate.net/publication/241792014>
- Esmailzadeh, A., Behnam, S., Mikaeil, R., Zare Naghadehi, M., & Saei, S. (2017). Relationship between Texture and Uniaxial Compressive Strength of Rocks. *Civil Engineering Journal*, 3(7), 480–486. <https://doi.org/10.28991/cej-2017-00000106>
- Eswaraiah, C., Soni, R. K., & Mishra, B. K. (2010). *Breakage Energy Analysis in Comminution with the use of Twin Pendulum Device*. <https://www.researchgate.net/publication/235997816>
- European Committee for Standardization. (2000). *MSZ EN 932-2 Kőanyag-halmazok általános tulajdonságainak vizsgálata 2. rész: Módszerek a laboratóriumi minták csökkentésére*.
- European Committee for Standardization. (2012). *MSZ EN 933-3 Kőanyag-halmazok geometriai tulajdonságainak vizsgálata 3. rész: A szemalak meghatározása. Lemezességi szám*.
- Faitli, J., Mucsi, G., Gombkötő, I., Nagy, S., & Antal, G. (2017). *Mechanikai eljárás-technikai praktikum*. Miskolci Egyetemi Kiadó.
- Apaydin, F. Ö., & Yilmaz, M. (2021). Correlation of petrographic and chemical characteristics with strength and durability of basalts as railway aggregates determined by ballast fouling. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 80, 4197–4205. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01654-4/Published>
- Fedo, C. M., Wayne Nesbitt, H., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), 921. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:uteopm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:uteopm>2.3.co;2)
- Gálos, M., & Kárpáti, L. (2007). A recski kőzetváltozások értékelése. *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár*. 4, 267–272.
- Gan, D., Gao, F., Zhang, Y., Zhang, J., Niu, F., & Gan, Z. (2019). Effects of the shape and size of irregular particles on specific breakage energy under drop weight impact. *Shock and Vibration*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2318571>

- Genç, Ö., Ergün, L., & Benzer, H. (2004). Single particle impact breakage chracterization of materials by drop weight testing. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 38, 241-255,
- Goodall, W. R., Scales, P. J., & Butcher, A. R. (2005). The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores. *Minerals Engineering*, 18(8), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.018>
- Hafeez, G. S. A. (2012). Correlation between Bond work index and mechanical properties of some Saudi ores. *Journal of Engineering Sciences*, 40(1). 271-280
- Harnois, L. (1988). The CIW index: A new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3–4), 319–322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., & Lashkaripour, G. R. (2020). The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Engineering Geology*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2019.105467>
- Hilden, M. M., & Powell, M. S. (2017). A geometrical texture model for multi-mineral liberation prediction. *Minerals Engineering*, 111, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.04.020>
- Hosseinzadeh, H., & Ergün, L. (2012). Determination of Breakage Distribution Function of fine chromite ores with Bed Breakage Method. *Conference: XIII International Mineral Processing Symposium*. <https://www.researchgate.net/publication/235879723>
- Howarth, D. F., & Rowlands, J. C. (1987). Quantitative Assessment of Rock Texture and Correlation with Drillability and Strength Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, 57–85.
- Hower, J. E. (1998). Interrelationship of coal grinding properties and coal petrology. *Minerals & Metallurgical Processing*, 15(3), 1–16.
- Jeswiet, J., & Szekeres, A. (2016). Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP*, 48, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>
- Johnson, R. C., Scott, G. W., & Lukey, H. M. (2007, augusztus). Implications of Mineralogy, Grain Size and Texture on Liberation and Pellet Quality of Great Lakes Iron Ore. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*.
- Jorjani, E., Hower, J. C., Chehreh Chelgani, S., Shirazi, M. A., & Mesroghli, S. (2008). Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals. *Fuel*, 87(6), 707–713. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.044>
- Kahraman, S., & Toraman, O. Y. (2008). Predicting Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from crushability index. *Bulletine of Material Sciences*, 31(2). <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0030-4>

- Kahraman, S., Toraman, O. Y., & Cayirli, S. (2018). Predicting the strength and brittleness of rocks from a crushability index. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1639–1645. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1012-9>
- Kameneva, E. E., Aminov, V. N., Shegelman, I. R., Vasilev, A. S., & Shchukin, P. O. (2016). Specifics of studying crushability of construction rocks. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(46). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i46/107540>
- Kekec, B., Unal, M., & Sensogut, C. (2006). Effect of the textural properties of rocks on their crushing and grinding features. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng Ed)*, 13(5), 385–392. [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60079-0](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60079-0)
- Kim, K. H., & Cho, H. C. (2010). Breakage of waste concrete by free fall. *Powder Technology*, 200(3), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.008>
- King, R. P. (1994). Comminution and liberation of minerals. *Minerals Engineering*, 7(3), 129–134. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90059-0)
- King, R. P., & Schneider, C. L. (1998). Mineral liberation and the batch comminution equation. *Minerals Engineering*, 11(12), 1143–1160. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00102-2)
- Klichowicz, M., Stoyan, D., & Lieberwirth, H. (2022). Towards realistic modeling of mineral microstructures. *Minerals Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107634>
- Kojovic, T. (2016). HIT-A Portable Field Device for Rapid Testing at Site. *13th AUSIMM Mill Operator's Conference*, 9–16.
- Kolay, E., & Baser, T. (2017). The effect of the textural characteristics on the engineering properties of the basalts from Yozgat region, Turkey. *Journal of the Geological Society of India*, 90(1), 102–110. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0669-9>
- Krogh, S. R. (1980). Print& in the Netherlands. In *Powder Technology* (Köt. 27).
- Kubovics, I. (2000). *Kőzetmikroszkópia I.* Tankönyvkiadó.
- Lamberg, P. (2011). Particles – The bridge between geology and metallurgy. *Conference in Mineral Engineering*, 1–16.
- Lane, G. R., Martin, C., & Pirard, E. (2008). Techniques and applications for predictive metallurgy and ore characterization using optical image analysis. *Minerals Engineering*, 21(7), 568–577. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.11.009>
- Lindqvist, J. E., Åkesson, U., & Malaga, K. (2007). Microstructure and functional properties of rock materials. *Materials Characterization*, 58(11-12 SPEC. ISS.), 1183–1188. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.04.012>

- Lishchuk, V., Koch, P. H., Ghorbani, Y., & Butcher, A. R. (2020). Towards integrated geometallurgical approach: Critical review of current practices and future trends. In *Minerals Engineering* (Köt. 145). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106072>
- Little, L., Mainza, A. N., Becker, M., & Wiese, J. G. (2016). Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture. *Powder Technology*, 301, 794–804. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.052>
- Liu, G., Cai, M., & Huang, M. (2018). Mechanical properties of brittle rock governed by micro-geometric heterogeneity. *Computers and Geotechnics*, 104, 358–372. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.11.013>
- Liu, H., Kou, S., Lindqvist, P.-A., Lindqvist, J. E., & Åkesson, U. (2005). *Microscope Rock Texture Characterization and Simulation of Rock Aggregate Properties*.
- Lois-Morales, P., Evans, C., & Weatherley, D. (2022). Analysis of the size-dependency of relevant mineralogical and textural characteristics to particles strength. *Minerals Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107572>
- López-Benito, A., Catalina, J. C., Alarcón, D., Grunwald, Ú., Romero, P., & Castroviejo, R. (2020). Automated ore microscopy based on multispectral measurements of specular reflectance. I – A comparative study of some supervised classification techniques. *Minerals Engineering*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106136>
- Ma, S., Li, H., Yang, X., Xu, W., Deng, X., & Yang, J. (2023). Study on Impact Crushing Characteristics of Minerals Based on Drop Weight Tests. *Minerals*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/min13050632>
- Mackenzie, Wm. S., Donaldson, C. H., & Guilford, C. (1983). Atlas of igneous rocks and their textures. *Mineralogical Magazine*, 47, 569. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129746733>
- Mariano, R. A., Evans, C. L., & Manlapig, E. (2016). Definition of random and non-random breakage in mineral liberation - A review. In *Minerals Engineering*. 94, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.005>
- Menegaki, M. E., & Kaliampakos, D. C. (2010). European aggregates production: Drivers, correlations and trends. *Resources Policy*, 35(3), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2010.01.003>
- METSO. (2011). *Crushing and Screening Handbook*. Metso's Mining and Construction Technology, Tampere
- METSO. (2018). *Basics in Minerals Processing* (Edition 11). METSO, Tampere, 333
- Miskovsky, K., Taborda Duarte, M., Kou, S. Q., & Lindqvist, P. A. (2004). Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13(2), 144–150. <https://doi.org/10.1361/10599490418334>

- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis* (4th kiad.). John Wiley & Sons.
- Mörsky, P., Klemetti, M., Knuutinen, T., Kalapudas, R., & Koivistoinen, P. (1996). The development of laboratory testing for autogenous grinding. *International Journal of Mineral Processing*, 44-45, 261-271, [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(95\)00030-5](https://doi.org/10.1016/0301-7516(95)00030-5)
- Mucsi, G. (2007). Finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségi vizsgálata. *Építőanyag*, 59(2), 41–45.
- Mucsi, G. (2008). Fast test method for the determination of the grindability of fine materials. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(4), 395–400. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2007.10.015>
- Mucsi, G. (2009). *Vizsgálati eljárások fejlesztése finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségének, valamint különleges körülmények mellett történő őrlés energiaszükségletének meghatározására- Doktori (PhD) értekezés*. Miskolci Egyetem.
- Mucsi, G., Rácz, Mag, G., Antal, G., & Csőke, B. (2019). Volume based closed-cycle hardgrove grindability method. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 34(4), 9–17. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.4.2>
- Mwaga, A., Rosenkranz, J., & Lamberg, P. (2015). Testing of Ore Comminution Behavior in the Geometallurgical Context-A Review. *Minerals*, 5, 276–297. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.4640>
- Nagy, B. (1965). A Csákánykői kőfejtő andezitjének üregkitöltő ásványai. In *Magyar Állami Földtani Intézet évi jelentése az 1965. évről*, 31–34
- Nålsund, R. (2010). Effect of grading on degradation of crushed-rock railway ballast and on permanent axial deformation. *Transportation Research Record*, 2154(1), 149–155. <https://doi.org/10.3141/2154-15>
- Napier-Munn, T. (2015). Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Minerals Engineering*, 73, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.009>
- Napier-Munn, T., Drinkwater, D., & Ballantyne, G. (2012). *The CEEC Roadmap for Eco-Efficient Comminution*. CEEC/JKTech workshop on eco-efficient comminution Noosa, Queensland, Australia, 12-13 June 2012
- Napier-Munn, T. J., Morell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1999). *Mineral comminution circuits_Their operation and optimisation* (First edition). Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Narayanan, S., & Whiten, W. J. (1983). Breakage characteristics for ores for ball mill modelling. *Australas Inst. Min. Metall. Bull. Proc*, 286, 31–39. <https://www.researchgate.net/publication/284704439>
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717.

- Norazirah, A., Fuad, S. H. S., & Hazizan, M. H. M. (2016). The Effect of Size and Shape on Breakage Characteristic of Mineral. *Procedia Chemistry*, 19, 702–708. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.073>
- Okogbue, C. O., & Aghamelu, O. P. (2013). Performance of pyroclastic rocks from Abakaliki Metropolis (southeastern Nigeria) in road construction projects. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3–4), 433–446. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0489-0>
- Oyarzún M, & Arévalo A. (2011). Rock Texture and BWi Relationships, El Teniente Ore Deposit, Chile. *The First Ausim International Geometallurgy Conference, 5-7 September 2011 Brisbane, Australia*, 181–186.
- Ozturk, C. A., Nasuf, E., & Kahraman, S. (2014). Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(6), 471–480.
- Ozturk, C.A., Nasuf, E., & Bilgin, N. (2004). The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 397–402.
- Öfner, W., & Zaunrith, G. (2016). The Drop Weight Test Revisited: Characterization of the Crushability of Hot Sinter and Validation of the Approach with Natural Rocks. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 161(6), 277–282. <https://doi.org/10.1007/s00501-016-F>
- Parian, M., Mwanga, A., Lamberg, P., & Rosenkranz, J. (2018). Ore texture breakage characterization and fragmentation into multiphase particles. *Powder Technology*, 327, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.043>
- Pauw, G., & Maré, M. S. (1988). The Determination of Optimum Impact-Breakage Routes for an Ore. *Powder Technology*, 54, 3–13.
- Pécskay, Z., Balogh, K., Székyné Fux, V. (1987) A Tokaji-hegység miocén vulkánosságának K/Ar geokronológiája, *Földtani közlöny*, 117(3), 237-253
- Pérez-Barnuevo, L., Pirard, E., & Castroviejo, R. (2013). Automated characterisation of intergrowth textures in mineral particles. A case study. *Minerals Engineering*, 52, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.001>
- Pethő, S., & Csőke, B. (1983). Hazai kőzetek Bond-munkaindexének meghatározása. *Építőanyag*, XXXV(11), 401–407.
- Petrounias, P., Giannakopoulou, P. P., Rogkala, A., Lampropoulou, P., Koutsopoulou, E., Pappoulis, D., Tsikouras, B., & Hatzipanagiotou, K. (2018). The impact of secondary phyllosilicate minerals on the engineering properties of various igneous aggregates from greece. *Minerals*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/min8080329>
- Petruk, W. (2000). *Applied Mineralogy in the Mining Industry*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50077-9.X5000-7>

- Pirard, E., Lebichot, S., & Krier, W. (2007). Particle texture analysis using polarized light imaging and grey level intercepts. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1–4), 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.03.004>
- Pomonis, P., Rigopoulos, I., Tsikouras, B., & Hatzipanagiotou, K. (2007). Relationship between petrographic and physicommechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos Ophiolitic Complex, NW Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 40(2), 947, <http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.16778>
- Popov, O., Talovina, I., Lieberwirth, H., & Duriagina, A. (2020). Quantitative Microstructural Analysis and X-ray Computed Tomography of Ores and Rocks—Comparison of Results. *Minerals*, 10(2), 129. <https://doi.org/10.3390/min10020129>
- Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202(3–4), 397–416, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.11.001>.
- Přikryl, R. (2021). Geomaterials as construction aggregates: a state-of-the-art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(12), 8831–8845. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02488-9>
- Räsänen, M. (2004). Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-litti complex, southeastern Finland. *Engineering Geology*, 74(3–4), 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.009>
- Saeidi, F. (2016). *New Approach for Characterising a Breakage Event as a Multi-stage Process*. University of Queensland .
- Saeidi, F., Tavares, L. M., Yahyaei, M., & Powell, M. (2016a). A phenomenological model of single particle breakage as a multi-stage process. *Minerals Engineering*, 98, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.07.006>
- Saeidi, F., Tavares, L. M., Yahyaei, M., & Powell, M. (2016b). A phenomenological model of single particle breakage as a multi-stage process. *Minerals Engineering*, 98, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.07.006>
- Saeidi, F., Yahyaei, M., Powell, M., & Tavares, L. M. (2017). Investigating the effect of applied strain rate in a single breakage event. *Minerals Engineering*, 100, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.010>
- Salman, A., Ghadiri, M., & Hounslow, M. J. (2007). *Handbook of Powder Technology* (A. D. Salman, M. Ghadiri, & M. J. Hounslow, Szerk.; Köt. 12). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12003-0](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12003-0)
- Semsari Parapari, P., Parian, M., Forsberg, F., & Rosenkranz, J. (2020). Characterization of ore texture crack formation and liberation by quantitative analyses of spatial deformation. *Minerals Engineering*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106577>

- Semsari Parapari, P., Parian, M., & Rosenkranz, J. (2020). Breakage process of mineral processing comminution machines – An approach to liberation. *Advanced Powder Technology*, 31(9), 3669–3685. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.08.005>
- Sergeev, N. (2023). Quantifying weathering intensity using chemical proxies: a weathering index AFB. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(2), 260–284. <https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2137585>
- Shi, F., & Kojovic, T. (2007). Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. *International Journal of Mineral Processing*, 82(3), 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.006>
- Shi, F., Kojovic, T., Larbi-Bram, S., & Manlapig, E. (2009). Development of a rapid particle breakage characterisation device - The JKRB. *Minerals Engineering*, 22(7–8), 602–612. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.05.001>
- Somani, A., Nandi, T. K., Pal, S. K., & Majumder, A. K. (2017). Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2), 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.013>
- Strzałkowski, P., Duchnowska, M., Kaźmierczak, U., Bakalarz, A., Wolny, M., Karwowski, P., & Stępień, T. (2021). Evaluation of the structure and geometric properties of crushed igneous rock aggregates. *Materials*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/ma14237202>
- Strzałkowski, P., & Kaźmierczak, U. (2021). Wear and fragmentation resistance of mineral aggregates— a review of micro-deval and los angeles tests. *Materials*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/ma14185456>
- Sun, W., Wang, L., & Wang, Y. (2017). Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(3), 322–328. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0387-9>
- Tarján, G. (1978). *Ásványelőkészítés I.* Akadémiai Kiadó.
- Tavares, L. M., & das Neves, P. B. (2008). Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing. *International Journal of Mineral Processing*, 87(1–2), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.01.007>
- Tavares, L. M., & King, R. P. (1998). Single-particle fracture under impact loading. *International Journal of Mineral Processing*, 54(1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(98\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(98)00005-2)
- Tavares, L. M., & King, R. P. (2002). Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics. *Powder Technology*, 123(2–3), 138–146. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00438-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00438-7)

- Tøgersen, M. K., Kleiv, R. A., Ellefmo, S., & Aasly, K. (2018). Mineralogy and texture of the Storforshei iron formation, and their effect on grindability. *Minerals Engineering*, 125, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.009>
- Török, Á., & Czinder, B. (2017). Relationship between density, compressive strength, tensile strength and aggregate properties of andesites from Hungary. *Environmental Earth Sciences*, 76(18), 639, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6977-y>
- Trimble, A. S., & Hower, J. C. (2003). Studies of the relationship between coal petrology and grinding properties. *International Journal of Coal Geology*, 54(3–4), 253–260. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00039-9)
- Tugrul, A., & Zarif, I. H. (1999). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(51), 303–317.
- Umucu, Y., Deniz, V., & Unal, N. (2013). An evaluation of a modified product size distribution model based on t-family curves for three different crushers. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(2), 473–480. <https://doi.org/10.5277/ppmp130209>
- Unland, G., & Al-Khasawneh, Y. (2009). The influence of particle shape on parameters of impact crushing. *Minerals Engineering*, 22(3), 220–228, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.08.008>
- Ural, S., & Akiylidz, M. (2004). Studies of the relationship between mineral matter and grinding properties for low-rank coals. *International Journal of Coal Geology*, 60(1), 81–84. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2004.07.001>
- Urueña, C., Möller, C., Andersson, J., Lindqvist, J. E., & Göransson, M. (2022). The effect of metamorphism on the aggregate properties of gabbroic rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(5), 213, <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02718-8>
- Wang, Y. (2015). Numerical modelling of heterogeneous rock breakage behaviour based on texture images. *Minerals Engineering*, 74, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.030>
- Warlo, M., Wanhainen, C., Bark, G., Butcher, A. R., McElroy, I., Brising, D., & Rollinson, G. K. (2019). Automated quantitative mineralogy optimized for simultaneous detection of (precious/critical) rare metals and base metals in a production-focused environment. *Minerals*, 9(7), 440, <https://doi.org/10.3390/min9070440>
- Wills, B. A., & Napier-Munn, Tim. (2006). *Wills' mineral processing technology : an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier Science & Technology Books.
- Winter, J. (2023). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. Pearson, Essex, 744

- Wu, H., & Pollard, D. D. (1993). Effect of Strain Rate on a Set of Fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7), 869-872, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90038-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90038-F)
- Yahyaee, M., Saeidi, F., & Powell, M. S. (2014). New Insights into Comparison of Breakage Testing Techniques SEE PROFILE New insights into comparison of breakage testing techniques. *XXVII International Mineral Processing Congress*. <https://www.researchgate.net/publication/267694885>
- Yildirim, B. G. (2016). *Development of a correlation between mineralogy, rock strength measures, and breakage of Copper Porphyries Sustainable Minerals Institute*. University of Queensland.
- Yuce, A. E. (2017). Grinding size estimation and beneficiation studies based on simple properties of ore components. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1), 541–552. <https://doi.org/10.5277/ppmp170142>

A jelölt tudományos közleményei a témában:

Tudományos folyóirat cikk:

- Márkus, I. R;** Rácz, Á. (2024) Andezitek törési- és anyagtulajdonságai közötti összefüggések vizsgálata egyszemcse törési módszerrel, *Az aszfalt: A Magyar Aszfaltipari Egyesület (HAPA) hivatalos szakmai lapja*, 31(1), pp. 47-51, 5 p.
- Márkus, I. R;** Rácz, Á. (2024) Investigation of the petrological properties of andesites from Tállya quarry, Hungary and their influence on the resistance to wear and fragmentation, *Geoscience and Engineering*, 10(15), pp. 125-137., 13 p. <https://doi.org/10.33030/geosciences.2022.15.125>
- Márkus, I. R;** Rácz, Á. (2022) Assessing Single Particle Breakage Characteristics of Andesites from Tállya, Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2022, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar. pp. 344-350., 7 p
- Márkus, I. R;** Rácz, Á., Mucsi, G. (2021) A nyersanyagelőkészítés területén alkalmazott egyszemcse törési vizsgálatok kritikai áttekintése, *Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat*, 154(3) pp. 12-18, 7 p.
- Márkus, I.R.** (2021) The interrelation of petrographical properties of rocks and their crushing and grinding features: a literature review, *Multidiszciplináris tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye*, 11(2), pp. 17-24, 8 p
- Márkus, I.R.** (2020) A szövet-szerkezet és az apríthatóság, őrlhetőség közötti összefüggések kutatása során alkalmazott vizsgálati módszerek áttekintése, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 89(2), pp. 42-49, 8 p

Márkus, I. R.; Rácz, Á., Mucsi, G. (2020) Pofástörők fejlesztési irányainak áttekintése, Műszaki Földtudományi Közlemények, 89(1), pp. 424-433, 10 p.

Konferencia kiadványokban megjelent publikációk:

Márkus, I. R.; Bediako, J. Rácz, Á. (2024) Effect of the andesite geological properties on the breakage behaviour, Book of Extended Abstracts of the 18th European Symposium on Comminution & Classification: ESCC 2024. ISBN:9786156018250, pp. 46-49, 4 p,

Márkus, I. R.; Rácz, Á. (2023) Esősúlyos törési vizsgálatok alkalmazása kőbányászati anyagokon, XXIV. Nemzetközi Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia 2023, ISSN 2784 093X, pp. 42-47, 6 p.

Márkus, I. R.; Rácz, Á. (2022) The influence of geological properties of andesites on the mechanical properties and breakage characteristics, XXII Conference of PhD Students and Young Scientists: Interdisciplinary topics in mining and geology: Book of Abstracts, pp. 72-73., 2 p.

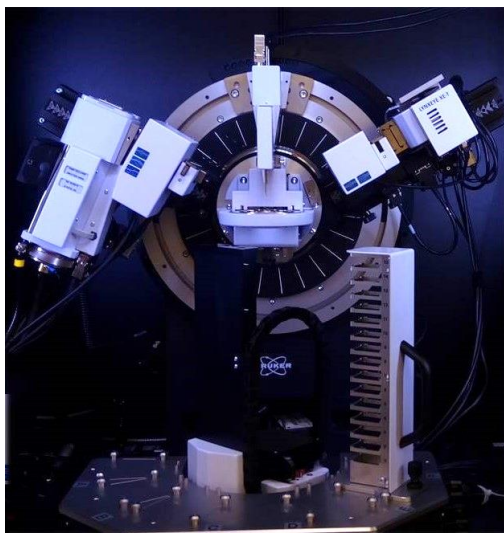
11. Melléklet

11.1. Anyag és vizsgálati módszerek részletes leírása, kiegészítő adatok

11.1.1. Mennyiségi ásványos összetétel

A mennyiségi ásványos és kémiai összetétel meghatározáshoz $<63\mu\text{m}$ -es porminta szükséges. A vizsgálatokhoz szükséges szemcseméretű anyag előállításához 2,5 kg anyag szemcseméret csökkentése történt először pofástörőn, majd ezt követően kalapácsos törőn 10 mm és 2 mm résméretű szitabetéttel. Ezt követően 60 g minta laboratóriumi golyósmalomban lett tovább őrölve, mintakisebbitést követően megközelítőleg 20 g minta először porcelán, majd achát mozsárban lett tovább porítva a kívánt szemcseméret eléréséig.

Az ásványos összetétel meghatározása röntgenpordiffrakciós (XRD) módszerrel történt a Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet Röntgenpordiffrakciós laboratóriumában. A mérések egy Bruker D8 Advanced készüléken történtek (150. ábra), Cu K-alfa sugárzással, 40 kV és 40mA generátor beállítással, Bragg-Brentano geometriában. A mintákat $2-70^\circ$ (2θ) tartományban rögzítettük, $0,007^\circ$ (2θ) lépésekkel, 42 másodperc gyűjtési idővel, Lynx-Eye XE-T energia diszperzív detektorral (2° ablaknyitás). A fázisazonosítást a Search/Match (többszörös iteráció) segítségével készítettük az ICDD PDF4-en (2021) adatbázisban a Bruker DiffracPlus EVA softverben. A kvantitatív értékelést Rietveld-finomítással végeztük a TOPAS4 szoftverben, FPM-alapú instrumentális konvolúcióval (SRM 640d Si felhasználásával), kristályszerkezeti adatokat az AMCSD adatbázisból véve.



150. ábra: Bruker D8 Advanced diffraktométer (Kép forrása: <http://3dlabtest.uni-miskolc.hu/>)

11.1.2. Kémiai összetétel

A mérésekhez szükséges $<63\mu\text{m}$ -es porminta előállításának lépései az előző, a röntgenpordiffrakciós méréseket bemutató fejezetben található meg. A méréshez szükséges $\varnothing 32$ mm-es porpelletek $63\mu\text{m}$ szemcseméretű 24 órán át 105°C fokon szárított anyagból lett előállítva,

4:1-es arányban CereOX kötőanyag hozzáadásával Fluxana Vaneox típusú hidraulikus présben.

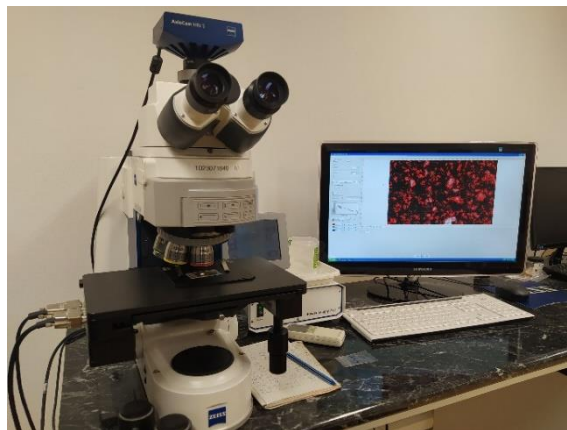
A kémiai összetételét meghatározása röntgenfluoreszcens spektrometriával (XRF) történt a Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet Röntgenfluoreszcencia spektrometria laboratóriumában (XRF), Rigaku Supermini 200 készüléken, 200 W-os Pd röntgencsővel, 4 mA áramerősség és 50 kV gyorsító feszültséggel, LiF200 / PET / XR25 analizátor kristályokat használva.

11.1.3. Szöveti megfigyelések

A szöveti megfigyelések optikai mikroszkópos, pásztázó elektronmikroszkópos és μ -CT módszerekkel történtek. A polarizációs optikai mikroszkópos megfigyelésekhez mintánként megközelítőleg egy 500 g-os darab lett kiválasztva a kőzetvékonycsiszolatok készítéséhez. A vékonycsiszolatok a Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet laboratóriumában készültek. Az 500 g-os mintából egy kb. 0,5-1 cm-es szelet került kivágásra. A kőzetszelet egyik oldalát SiC csiszolóporral nedves csiszolással, majd tisztítást és szárítást követően csiszolópapíron megfelelő minőségűre lett csiszolva. A csiszolást követően a minta felragasztásra került műgyantával egy 4,7x2,8 cm-es üveglapra. A műgyanta 72 órás száradását követően a kőzetszelet szabad felületének csiszolása történt SiC csiszolópor alkalmazásával nedves csiszolással, majd csiszolópapír és végül a kellő minőségű felület eléréséhez gyémántpaszta alkalmazásával a kellő vékonyságú és felületi minőséggel rendelkező minta eléréséig.

Az optikai mikroszkópos megfigyelések első lépésben a Miskolci Egyetem Nyersanyagkutató Földtudományi Intézet optikai mikroszkópos laboratóriumában történtek egy Zeiss AxioImager A2m típusú AxioCam MRc 5 digitális kamerával felszerelt optikai mikroszkóppal történtek, polarizált áteső fényben. A módszer az egyes ásványfajok azonosítását és habitusának megfigyelését tette lehetővé. Második lépésben a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet laboratóriumában található Zeiss AXIO Imager.M2m típusú AxioCam MRc 5 digitális kamerával felszerelt optikai mikroszkóppal (151. ábra) visszaszórt polarizált fényben (DIC) a csiszolatokról mozaik fényképek készültek, amelyen a szöveti tulajdonságok számszerűsítése történt. A mozaik kép készítése azért volt indokolt, mert az egyes holokristályok mérete a legkisebb (5x objektív) nagyításnál is nagyobb volt a látómezőnél. Mivel az andezitek szövete jellemzően inekvigranuláris, az az egyaránt tartalmaz több száz mikronméteres és alig pár mikronméteres szemcséket is, ezért két nagyítással készültek a mozaik képek, 5x és 10x objektívvel. A szemcse elemzés a Zeiss AxioVision szoftverbe beépített Particle size analysis funkcióval történt. A szoftver a szemcsék azonosítását a megjelölt színtartomány alapján végzi, így a szemcsék jobb elkülönítése érdekében célszerű volt a szürkeárnyaltos fényképek

készítése. A szemcsék paramétereinek meghatározása, mint a legkisebb és legnagyobb-Feret átmérő, terület, kerület, szemcsék irányítottsága a mozaik képeken történt. Ehhez azon szürkeárnyalat tartomány lett kijelölve, amely a szemcsék jelentős részét lefedi, majd ennek alapján a szoftver elkülönítette és lemérte az egyes szemcsék paramétereit. Ezt követően az egyes mintákhoz tartozó szemcse galériában, ahol szükséges volt, ott manuálisan korrigálva lettek a szemcse határok, és ismételten meghatározva a paraméterek. Az optikai mikroszkóp, a szoftver és a minta típusából adódóan a gyakorlati tapasztalatok rámutattak, hogy a megfigyelés alsó határa 10-15 μm , így az ennél kisebb szemcsék eliminálva lettek a számításokból.



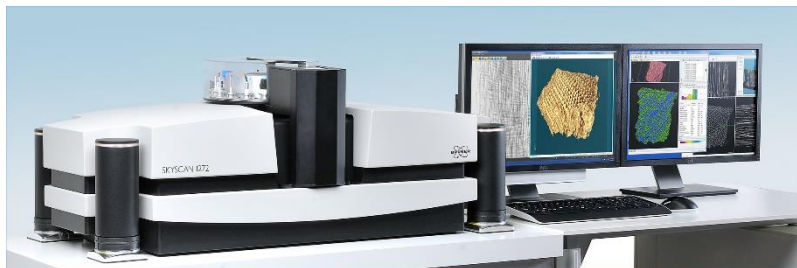
151. ábra: Zeiss AXIO Imager.M2m típusú AxioCam MRc 5 digitális kamerával felszerelt optikai mikroszkóp (Szerző saját felvétele)

A pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelések és a μ -CT mérések ugyanazon a megközelítőleg 1x1x1 cm-es élhosszúságú kocka alakú mintatesten történt. A μ -CT mérések megelőzték az elektronmikroszkópos megfigyeléseket. A pásztázó elektron mikroszkópos mérésekhez a mintatest a megfelelő minőségű mérési felület kialakítása csiszolással történt 500, 800, 1200 és 2000 μm -es SiC csiszolópapíron. A mérést megelőzően a csiszolt felület pár nm-es szén begőzölést kapott a minta töltődésének elkerülése végett. A pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelések a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet Innovatív finomörlési-szemcsetervezési technológiák laboratóriumában található Phenom Prox típusú asztali elektronmikroszkóppal történtek. Az elektronmikroszkóp visszaszórt elektron (BSE) detektorral és energia diszperzív (EDS) detektorral (silicone drift detektor, Si_3N_4 ablakkal) szerelt, kétféle vákuumopcióval, alacsony 1 Pa és csökkentett 60 Pa. A szöveti megfigyelések visszaszórt elektron képen történtek (BSE) 10-15 keV gyorsítófeszültség mellett a mintától függően, az kémiai összetétel azonosítása pontméréssel és elemtérkép készítésével történt 15 keV gerjesztési feszültség mellett. A gyakorlattól eltérően, a megfigyelések azért nem az optikai mikroszkópos megfigyeléshez használt vékonycsiszolaton történtek, mert az üveglemez méretéből adódóan ezek behelyezése a Phenom ProX típusú elektronmikroszkóp mintatartójába nem volt kivitelezhető.



152. ábra. Phenom ProX pásztázó elektronmikroszkóp (Kép forrása: <https://processing.uni-miskolc.hu/laboratoriumok>)

A μ -CT mérések 1x1x1 cm-es élű kocka mintatesteken készültek a Debreceni Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Képző Intézet, Radiológiai Tanszékén készültek egy Bruker SkyScan típusú μ -CT berendezéssel. Az eljárás a röntgensugárzás azon tulajdonságát használja ki, hogy valamely tárgyon való áthaladás során a sugárzás intenzitása csökken az anyagra jellemző elnyelési együttható (attenuation coefficient) függvényében. A mintát vízszintes tengelye mentén 180°-ban elforgatva lépésenként leképezik, a sugárforrással ellentétes oldalon elhelyezett detektor érzékeli, hogy egy adott pontban mennyi röntgen sugárzást nyelt el a minta és ezt grafikus fájl formájában eltárolja. A mérések a Debreceni Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Képző Intézet, Radiológiai Tanszékén készültek Bruker SkyScan 1272 CMOS nagy felbontású mikro-CT berendezéssel készültek. A mérések a pásztázó elektronmikroszkópos megfigyelésekhez előkészített kb. 1 cm-es élhosszúságú kocka mintatesteken történtek. A SkyScan 1272 lehetővé teszi a minta belső szerkezetének részletes vizsgálatát, maximális 0,35 mikron voxelméret felbontással, 40–100 kV tartományban állítható röntgen feszültség, röntgenső áramerősség: 0–250 μ A tartományban állítható (legkisebb nyálbátmérő <4 μ m), a detektálás nagy felbontású aktív pixel CMOS flat-panel, 3 MP (1944 x 1536) felbontású detektorral történik. Beépített automatikus rekonstrukciós szoftverrel és 3D elemzési lehetőségekkel (CTWOx, CTAN).



153. ábra: Bruker SkyScan 1272 CMOS nagy felbontású mikro-CT (Kép forrása: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/preclinical-imaging/micro-ct/skyscan-1275.html>)

11.1.4. Porozitás

A porozitás meghatározása többféle, egymást kiegészítő módszerrel történt. A vizsgálati minták porozitásának meghatározása a Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutató

Intézetében He-piknométeres módszerrel, a pórusméret eloszlás pedig Hg porozitás módszerrel történt. A He piknométeres méréshez 42 mm átmérőjű és 50-65 mm magassággal rendelkező hengeres mintatestek lettek kifűrva. A minták mérést megelőzően 24 h át 105 °C-on lettek kiszárítva szárítószekrényben. A mérőberendezés egy kamrás gázpiknométer, ezért első lépését a mérőberendezés kalibrálása történt, a referencia térfogat meghatározása. A mérés során egy mintatest, amelynek látszólagos térfogatát (V_L) előzőleg meghatározták, az ismert térfogatú mérőkamrába helyeznek. A mérőkamrát He gázzal töltik fel, egy adott nyomás mellett (0.50 to 24 psi között, minta típustól függően), a He behatol a nyitott pórusokba, minek következtében a nyomás a mérőkamrában csökken, a kiindulási nyomástól alacsonyabb értéken stabilizálódik. Ismerve a kiindulási és a végső nyomást, valamint a mérőkamra térfogatát, a mintatest valódi térfogata (V_V) meghatározható. A látszólagos és valódi térfogathoz számolható a porozitás (Φ):

$$\Phi = \frac{V_L - V_V}{V_L} * 100 [\%]$$

A minta tömegének függvényében, pedig a minta sűrűsége is számolható.

A porozitás, és egyben a szöveti tulajdonságok meghatározásának egy viszonylag új módszere a nagy felbontású μ CT. A CT alkalmas a közet porozitás, repedezettség és üregek leképezésére alkalmas módszer. A mérések a Debreceni Egyetem, Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Képző Intézet, Radiológiai Tanszékén készültek egy Bruker SkyScan típusú μ -CT berendezéssel készültek. A berendezés és módszer részletes leírása az előző fejezetben került ismertetésre.

11.1.5. Egyszemcse törési vizsgálat

32. táblázat: Az egyes minták frakcióihoz tartozó fajlagos törési energia (a római számok az egyes energiaszinteket jelölik, I. a legkisebb, III. a legnagyobb)

	40-45 mm			25-31,5 mm			20-22,5 mm			12,5-16 mm			8-11,2 mm		
Törési energia	I.	II.	III.	I.	II.	III.	I.	II.	III.	I.	II.	III.	I.	II.	III.
Tállya_1	0,41	0,67	1,04	0,45	1,20	1,80	1,31	2,98	4,45	3,81	6,87	10,30	11,91	15,20	22,53
Tállya_2	0,46	0,75	1,17	0,55	1,46	2,20	1,45	3,29	4,90	4,24	7,65	11,47	13,34	17,03	25,23
Tállya_3	0,44	0,73	1,14	0,54	1,44	2,17	1,51	3,45	5,13	4,15	7,48	11,22	14,14	18,05	26,75
Recsk_1	0,44	0,72	0,12	0,49	1,28	1,91	1,21	2,75	4,10	3,86	6,96	10,43	11,05	14,10	20,89
Recsk_3	0,41	0,67	1,05	0,49	1,26	1,89	1,22	2,77	4,13	3,59	6,48	9,71	11,72	14,96	22,17
Recsk_4	0,46	0,76	1,17	0,46	1,19	1,77	1,35	3,08	4,59	3,86	6,96	10,44	13,16	16,80	24,89

11.1.6. Kopással szembeni ellenállás

A kopásállóság vizsgálata az MSZ EN 1097-1 Kőanyagalmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata 1. rész: A kopásállóság vizsgálata (mikro-Deval) szabvány szerint történt. A minta előállításához a bányából beérkezett anyagot első lépcsőben pofástörőn lett letörve. Mivel a pofástörő töretének szemalakja lemezes és a szemalak hatása a közetfizikai paraméterekre ismert (Strzałkowski és Kaźmierczak, 2021), ezért második lépésben az anyag tovább aprítása röpítő törővel történt, amelynek töretének szemalakja kevésbé lemezes.

A vizsgálatokhoz szükséges laboratóriumi mintát olyan mintahalmazból kell előállítani, aminek 10 és 14 mm közötti frakciójának tömege legalább 2 kg. A laboratóriumi mintát át kell szitálni 14 mm, 11,2 mm vagy 12,5 mm és 10 mm-es szitákon, 110 (±5) °C-on kiszárítani, majd ebből olyan 500 (±2) g tömegű mintát előállítani, amely a következő feltételek közül az egyiket teljesíti: 60-70% essen át a 12,5 mm-es szitán vagy 30-40 % a 11,2 mm-es szitán. A mikro-Deval vizsgálatot egy olyan forgódobban kell elvégezni (154. ábra), amelynek egyik vége zárt, másik vége nyitott, amelyre egy 8 mm vastag víz- és pórszigetelő tömítéssel ellátott fedél helyezhető, belső átmérője 200 (±1) mm és belső hossza a 154 (±1) mm. A vizsgálat kivitelezéséhez szükséges golyótöltet 5000 (±5) g 10 (±0,5) mm átmérőjű acélgolyót, 2,5 (±0,05) l vízzel és a mintával a forgódobban helyezést és annak lezárását követően két vízszintes forgó hengerre kerül elhelyezésre. A dobnak 100 (±5) min⁻¹ állandó sebességgel 12000 (±10) fordulatot kell megtennie. Az igénybevett mintát ezután el kell távolítani a dobból a golyótöltettel együtt. A visszanyert agyag és golyó keveréket 1,6 mm-es vizsgálószitán át kell mosni, az acélgolyókat óvatosan el kell távolítani az anyagból, majd az 1,6 mm-es szitán fennmaradt anyag tömegét meg kell határozni 110 (±5) °C-on történő kiszáritást követően. A mikro-Deval együtthatót a következő képlettel kell számítani:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{5}$$

Ahol M_{DE} a mikro-Deval koefficiens, m a szitamaradék az 1,6 mm-es szitán grammban.



154. ábra: MSZ EN 1097-1 szabvány szerinti mikro-Deval berendezés (Szerző saját felvétele)

11.1.7. Aprózódással szembeni ellenállás

Az aprózódással szembeni ellenállás meghatározása a MSZ EN 1097-2 Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata 2. rész: Az aprózódással szembeni ellenállás vizsgálata szabvány szerint történt

A vizsgálatokhoz szükséges laboratóriumi mintát olyan mintahalmazból kell előállítani, aminek 10 és 14 mm közötti frakciójának tömege legalább 15 kg. A minta előállítása a 11.1.6 fejezetben leírt többlépcsős töréssel történt a bányanyers anyagból. A laboratóriumi mintát át kell szitálni 14 mm, 11,2 mm vagy 12,5 mm és 10 mm-es szitákon, 110 (±5) °C-on kiszárítani, majd ebből olyan 5000 (±5) g tömegű mintát előállítani, amely a következő feltételek közül az egyiket teljesíti: 60-70% essen át a 12,5 mm-es szitán vagy 30-40 % a 11,2 mm-es szitán.



155. ábra: MSZ EN 1097-2 szabvány szerinti Los-Angeles vizsgálóberendezés (Szerző saját felvétele)

A Los Angeles vizsgálatot egy olyan nagy méretű forgódobban kell elvégezni (155. ábra), amelynek mindkét vége zárt, belső átmérője 711 (±5) mm, belső hossza 508 (±5) mm. A dob két vízszintes tengelyen fekszik, végeinél van rögzítve, a vízszintes tengely körül forog. A minta és az őrlőtestek behelyezésére egy 105 (±3) mm-es hermetikusan lezárható leszedhető fedél biztosít lehetőséget. A golyótöltet 11 acélgolyóból áll, melyek mindegyike 45 és 49 mm közötti átmérőjű, minden golyó tömege 400 és 445 g közötti legyen, a teljes készlet tömege pedig 4690 és 4860 g közé essen. Először a golyókat kell a dobba helyezni, ezt követően a mintát és a fedőt le kell zárni. A dobban 31 min⁻¹ és 33 min⁻¹ közötti állandó sebességgel 500 fordulatot kell megtennie. Az igénybevett mintát ezután el kell távolítani a doból, a visszanyert agyagot 1,6 mm-es vizsgálószitán át kell mosni és szitálni, majd a fennmaradt anyag tömegét meg kell határozni 110 (±5) °C-on történő kiszárítást követően. A Los Angeles együtthatót a következő képlettel kell számítani:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

ahol m a szitamaradék az 1,6 mm-es szitán grammokban. Mintánként két párhuzamos mérést kell elvégezni, a két mérés LA együtthatójának átlagát adjuk meg, mint az anyagra jellemző Los Angeles mutató.

11.1.8. Őrlhetőségi vizsgálat

A Hardgrove őrlhetőségi vizsgálat kivitelezése egy ASTM D409 típusú golyós-csapágymalomban történik. A vizsgálatához 50 g 590-1190 μm közé eső szemcseméretre előkészített minta szükséges. A minta előállítása többlépcsős töréssel történt, félüzemi méretű PE-02 típusú Jászberényi Aprítógépgyár által gyártott pofástörő, második lépcsőben Krupp Nr. 4659 laboratóriumi pofástörővel, utolsó lépcsőben hengeres törővel, a töretből száraz szitálással lett kiszitálva a vizsgálat által előírt szemcseméretű anyag. A mintát egyenletesen elosztatva a malom őrlőtégelyébe kell helyezni, amelyre 8 db 25,4 mm átmérőjű golyó kerül elhelyezésre, 290 N terhelés mellett 20 min^{-1} fordulaton 60 fordulatig kell őrlni a mintát. Az őrleményt 75 μm lyukbőségű szitán átszitálva megkapjuk a 75 μm -nál kisebb szemcsék g-ban mért tömegét az őrleményben. Mintánként két párhuzamos mérése szükséges, amely eredményének relatív eltérése nem lehet nagyobb 2-3 %-nál.



156. ábra: ASTM D409 típusú golyós-csapágymalom (Szerző saját felvétele)

11.1.9. Kőzetmechanikai vizsgálatok

A vizsgálatához mintánként 2-3 db $\Phi=42 \text{ mm}$ átmérőjű, $h=1,5-2 \times \Phi$ hengeres mintatest lett kifúrva. Az egytengelyű nyomószilárdság a Bányászat és Energia Intézet Kőzetmechanikai vizsgálólaboratóriumában található Controls gyártmányú 3000 kN-os névleges terhelhetőségű nyomógépen történt. A berendezés számítógép vezérelt, elmozdulásmérő szenzorral ellátott. Az egytengelyű nyomószilárdság esetében a felterhelés lineáris 500 N lépcsőkben történt, .



157. ábra: Controls gyártmányú 3000 kN-os nyomógép (jobb oldalt) (Kép forrása: <https://bei.uni-miskolc.hu/labo-rok>)

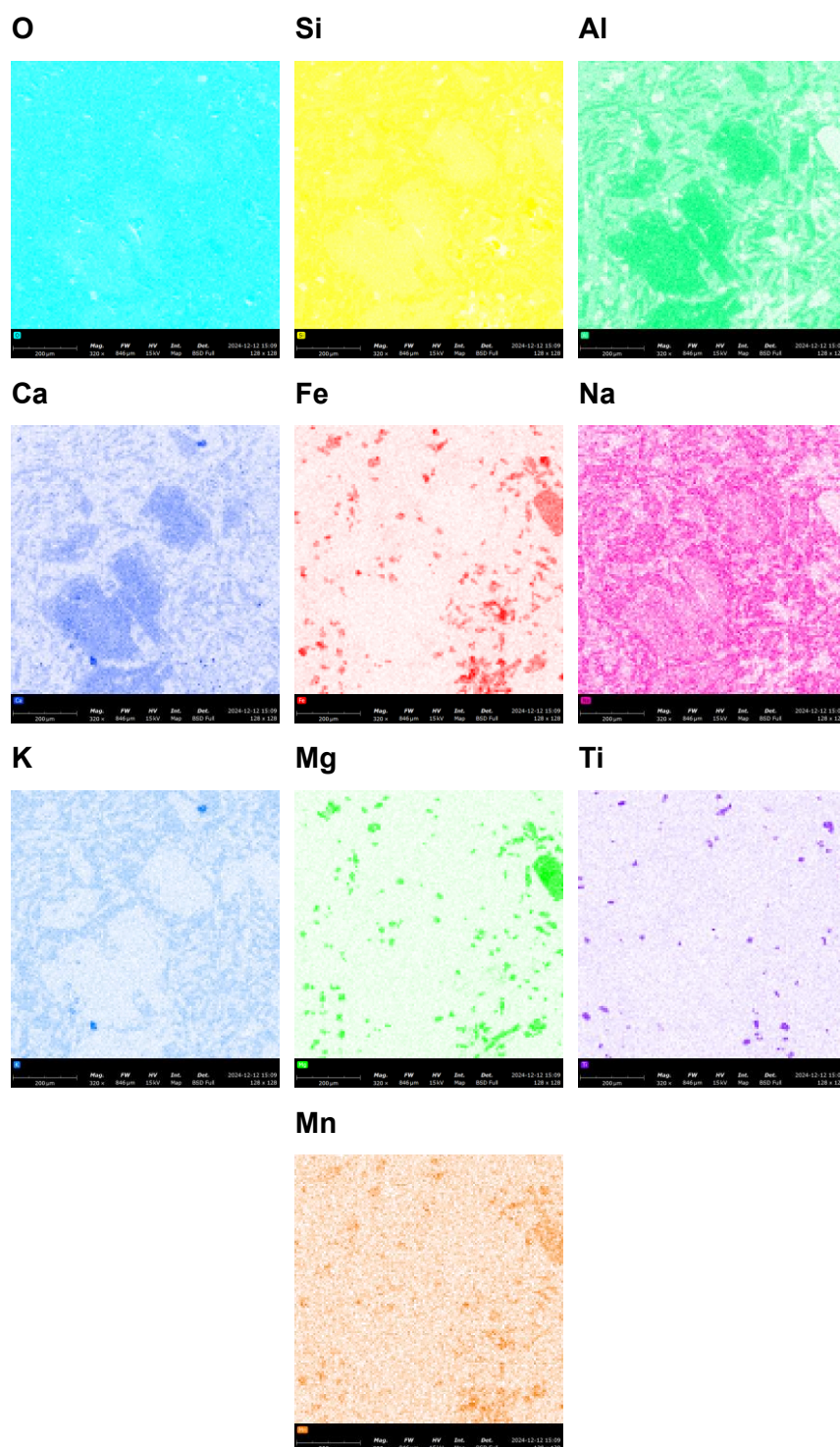
11.2. Eredmények

11.2.1. Minták kémiai összetétele

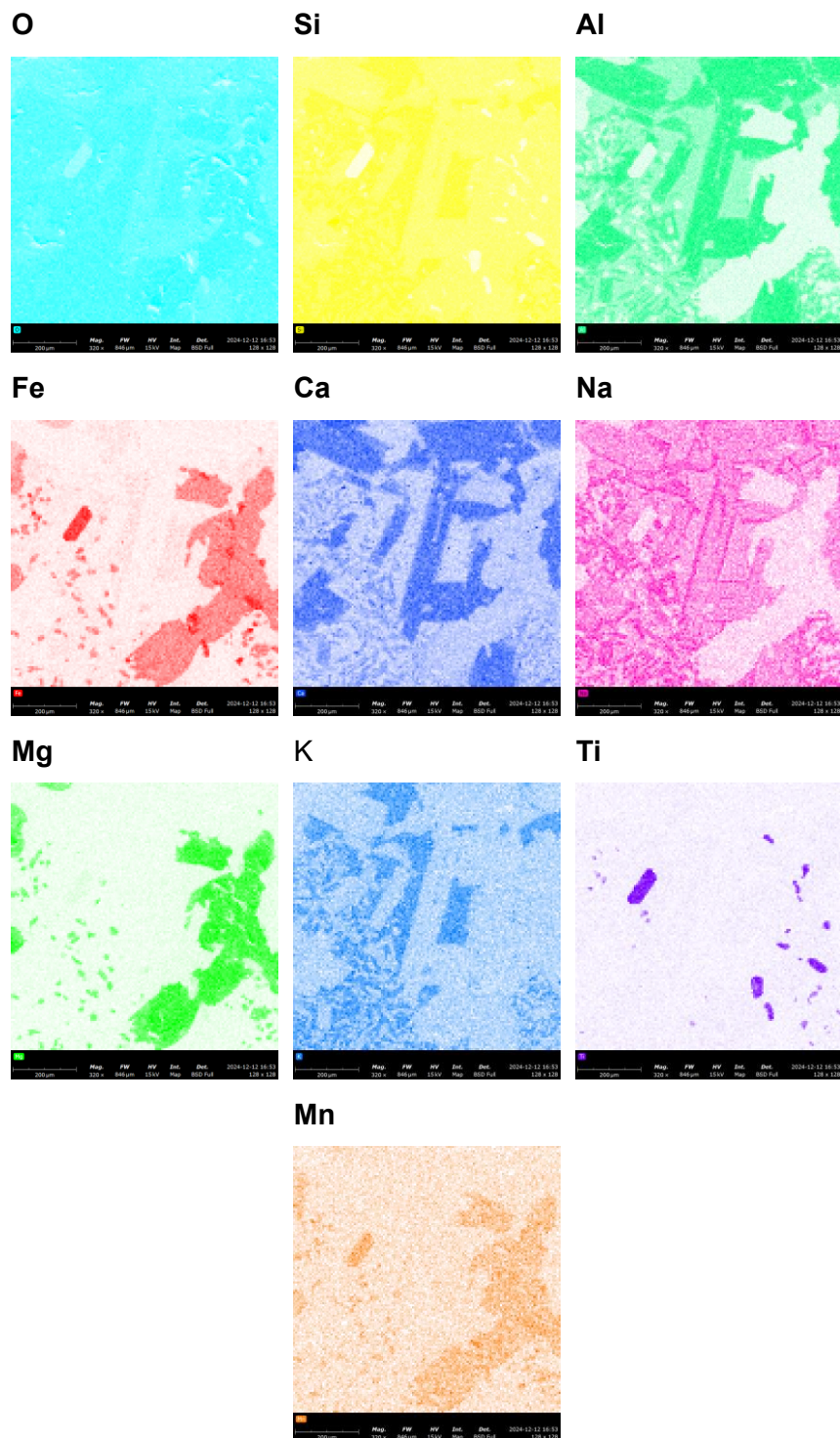
33. táblázat: Minták kémiai összetétele tömegszázalékban (m/m%) kifejezve, a hiányzó mennyiség az illóanyag tartalom a karbonátokból, a hidroxil és víztartalmú ásványokból

Minta	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	Σ
Kimutatási határ	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005	-
T_1	58,0	16,0	1,63	6,15	3,13	2,05	6,86	0,149	1,13	0,282	0,18	95,5
T_2	57,3	15,9	1,33	6,08	2,95	2,10	7,09	0,177	1,16	0,291	0,13	94,5
T_3	59,1	17,2	0,96	5,23	2,24	2,35	5,79	0,069	1,26	0,284	0,01	94,5
R_1	53,9	16,8	2,51	8,09	2,04	1,81	7,69	0,153	0,817	0,162	0,02	94,0
R_3	55,0	17,7	1,98	8,05	2,09	1,80	7,83	0,141	0,876	0,170	0,01	95,6
R_4	55,9	20,5	0,99	3,34	1,39	1,82	7,72	0,157	0,993	0,179	0,01	93,0

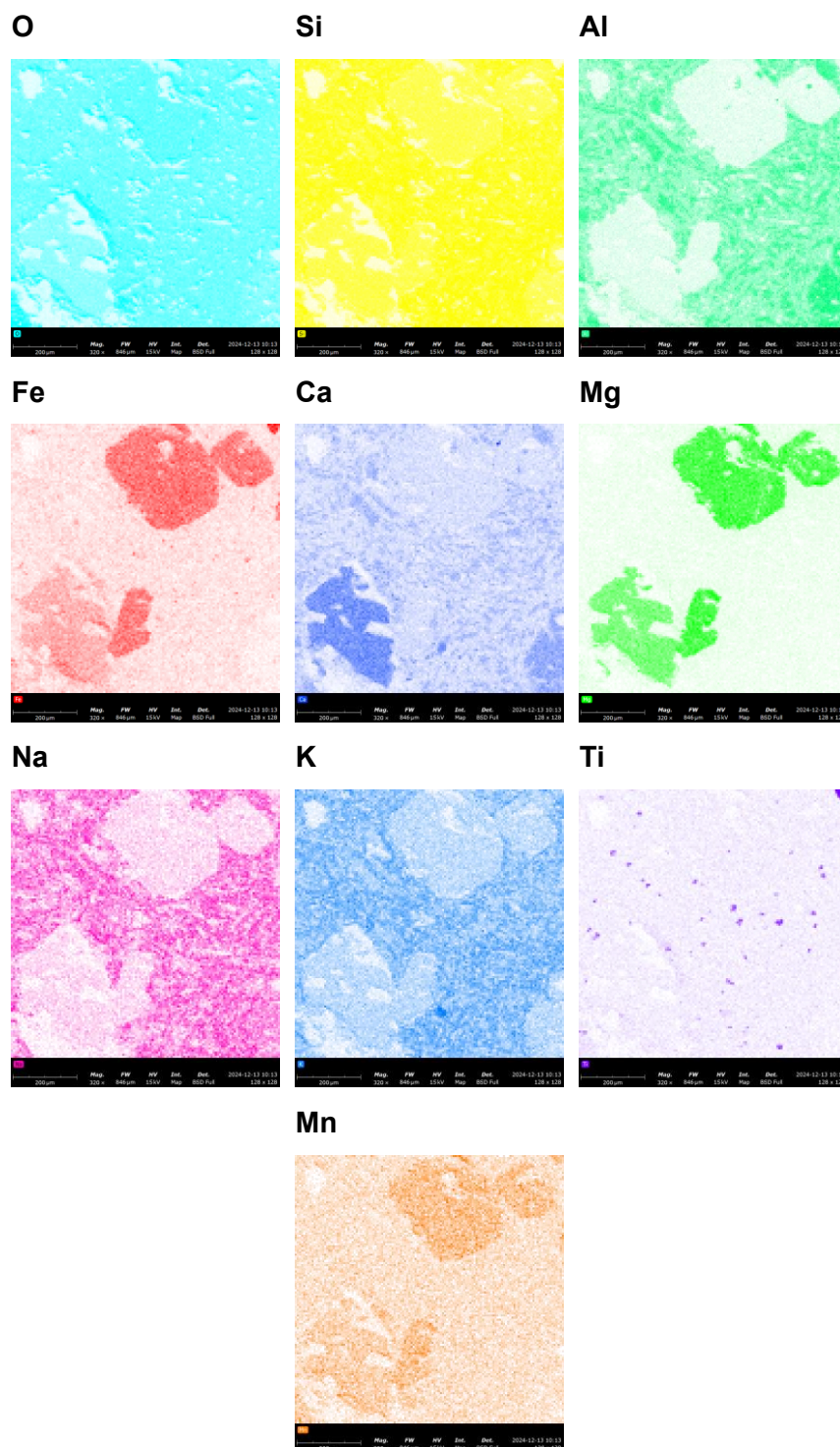
11.2.2. Szöveti megfigyelések-pásztázó elektronmikroszkópos elemtérképek



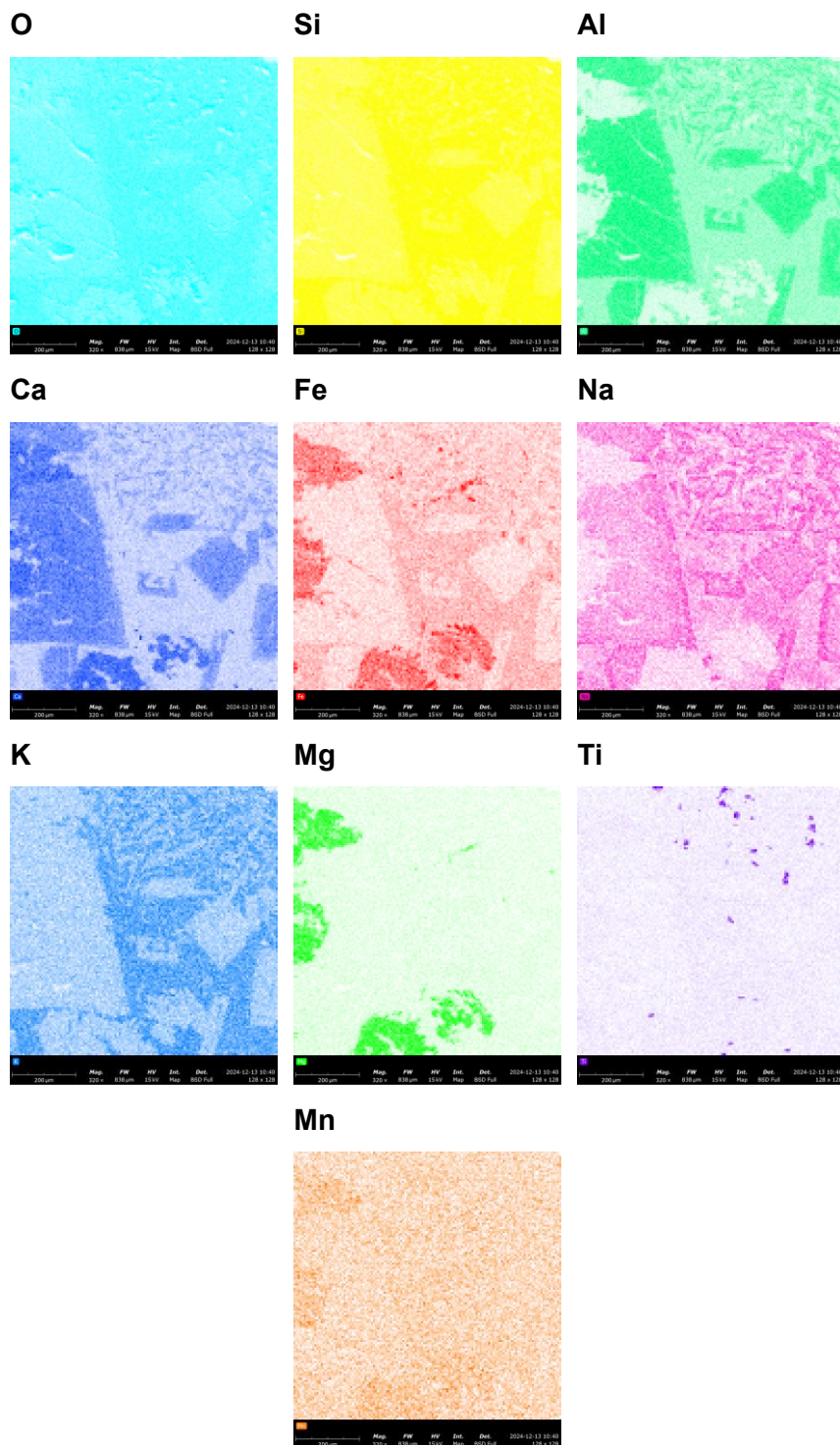
158. ábra: A 28. ábrához tartozó elemtérképek



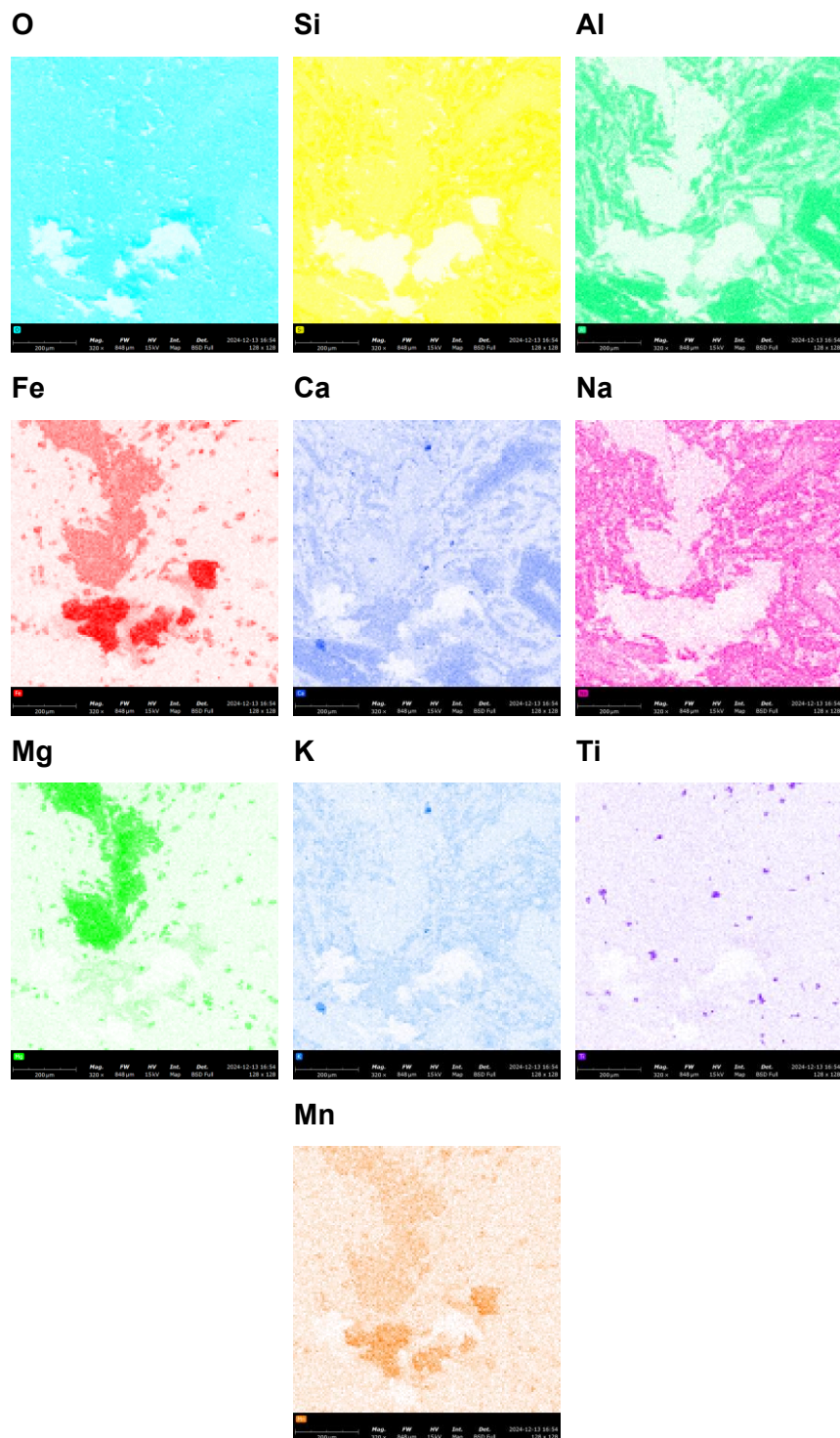
159. ábra: A 29. ábrához tartozó elem térképek



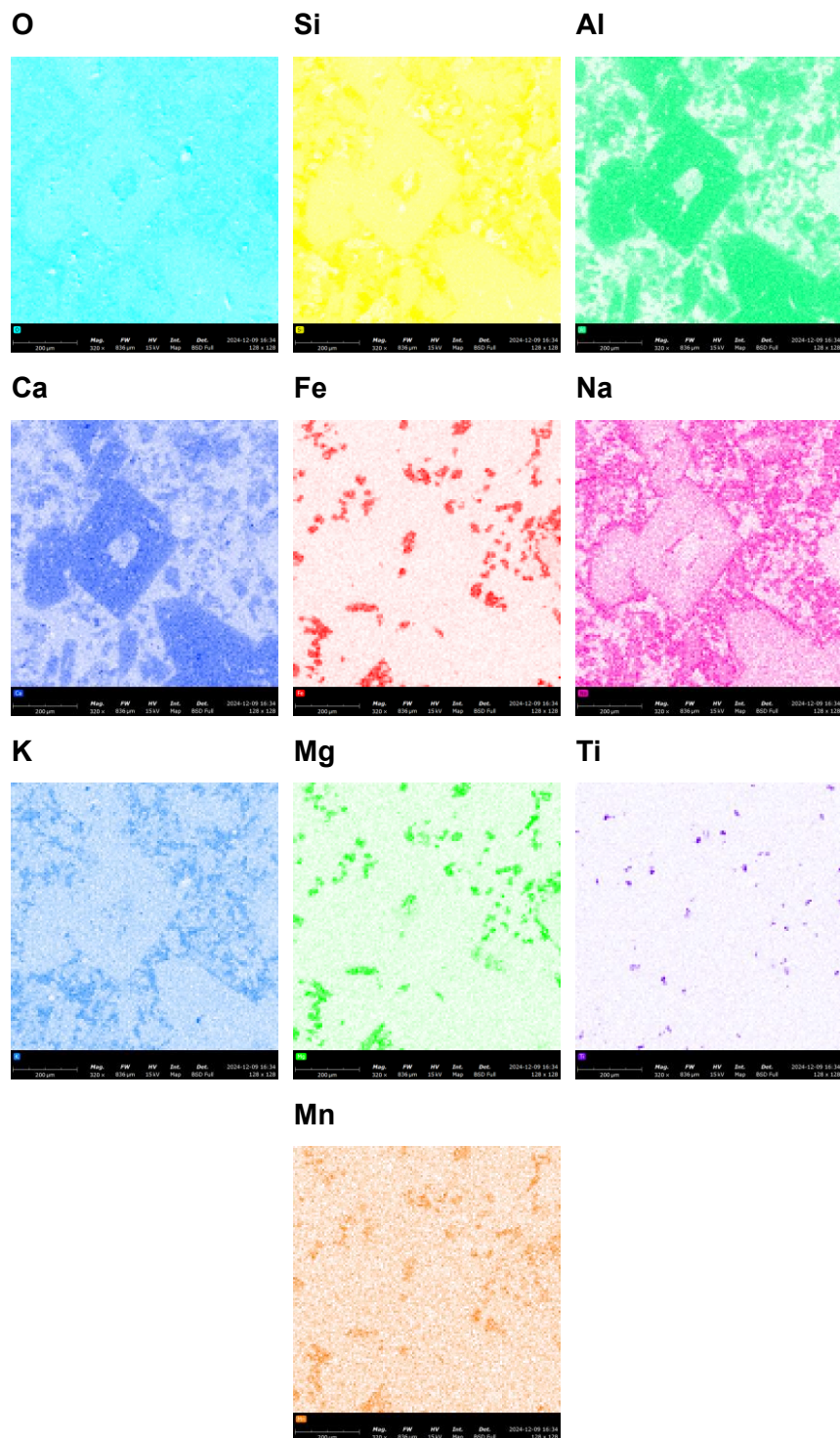
160. ábra: A 31. ábrához tartozó elem térképek



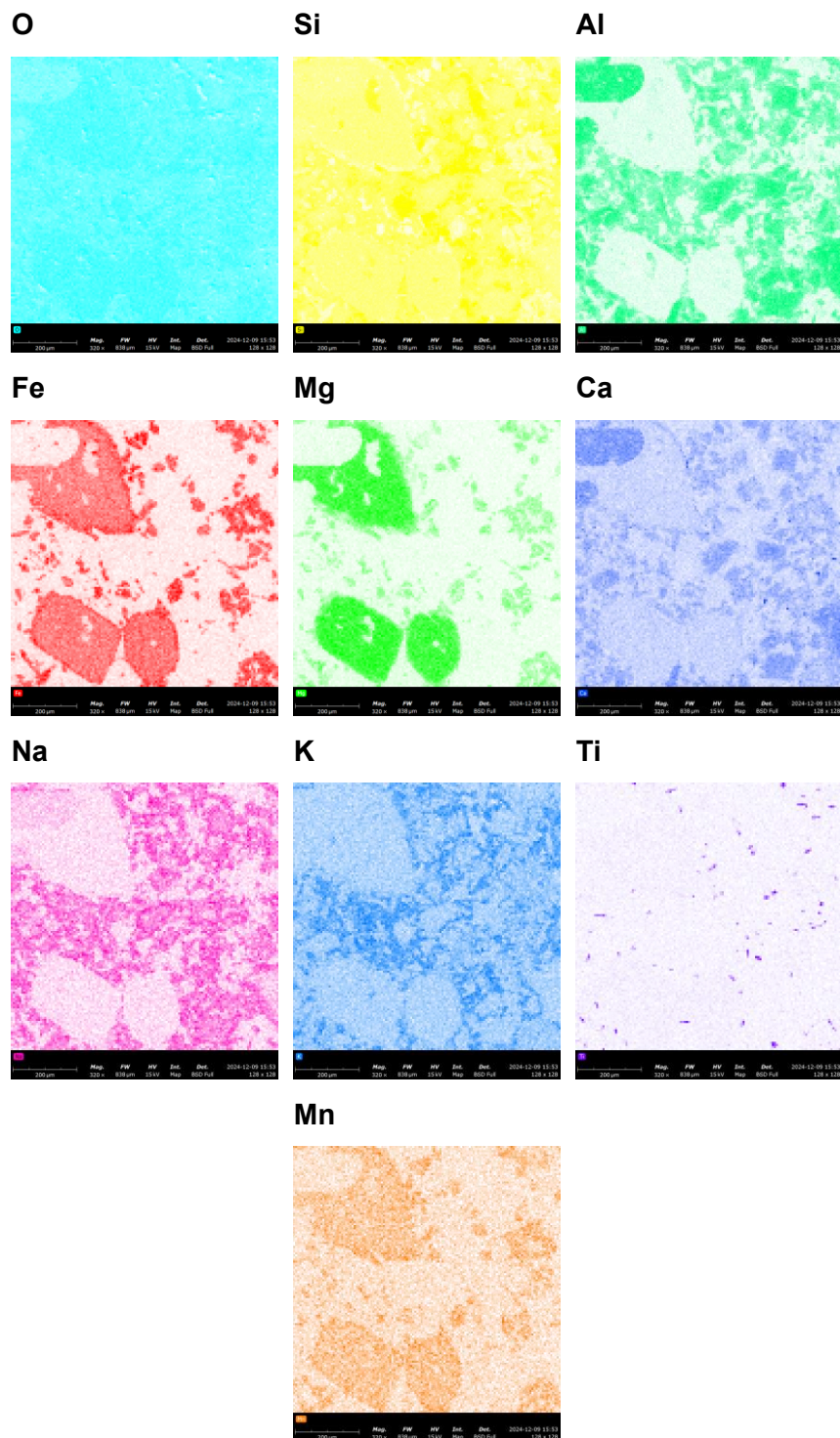
161. ábra: 32. ábrához tartozó elemtérképek



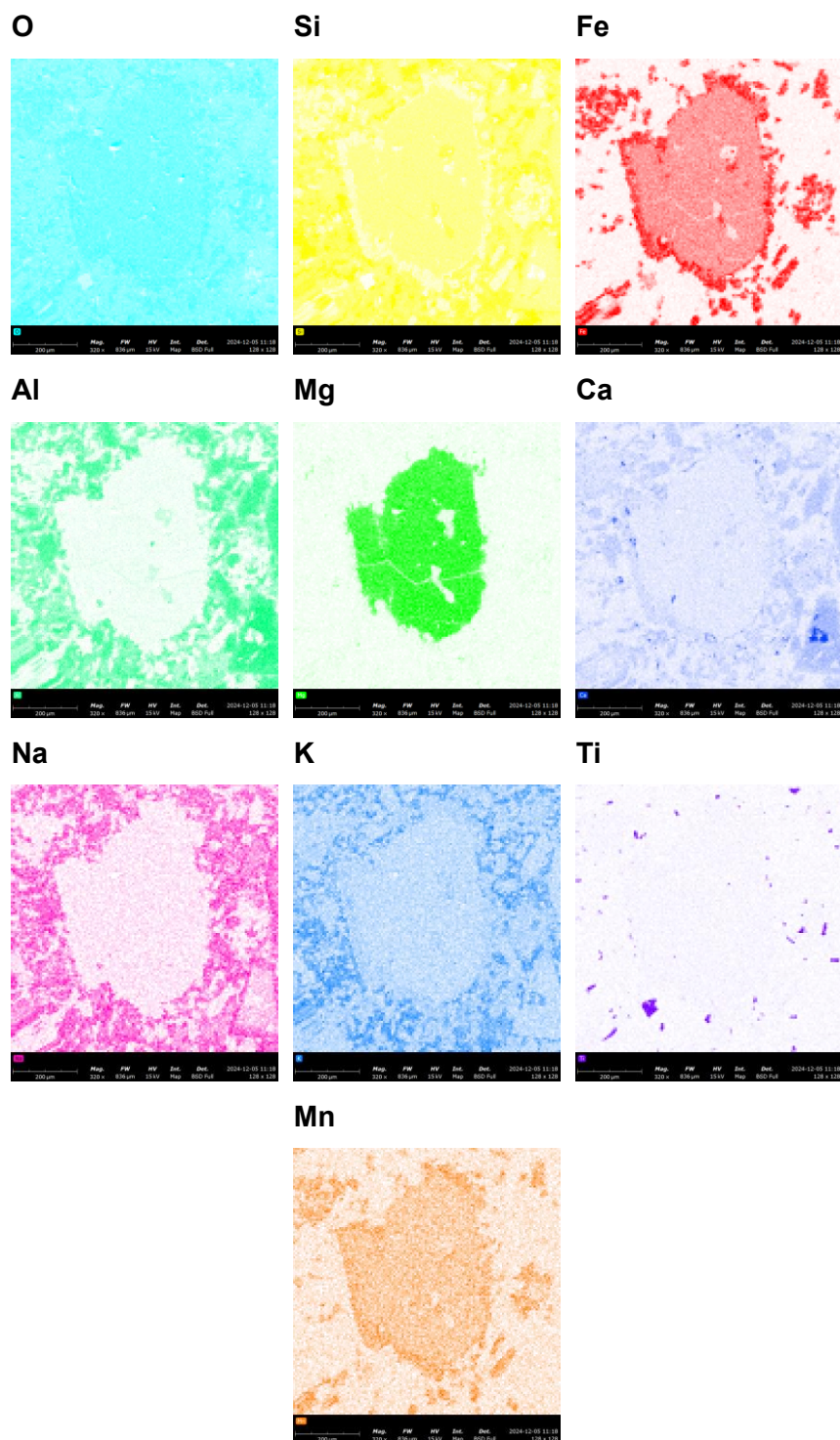
162. ábra: A 36. ábrához tartozó elem térkép



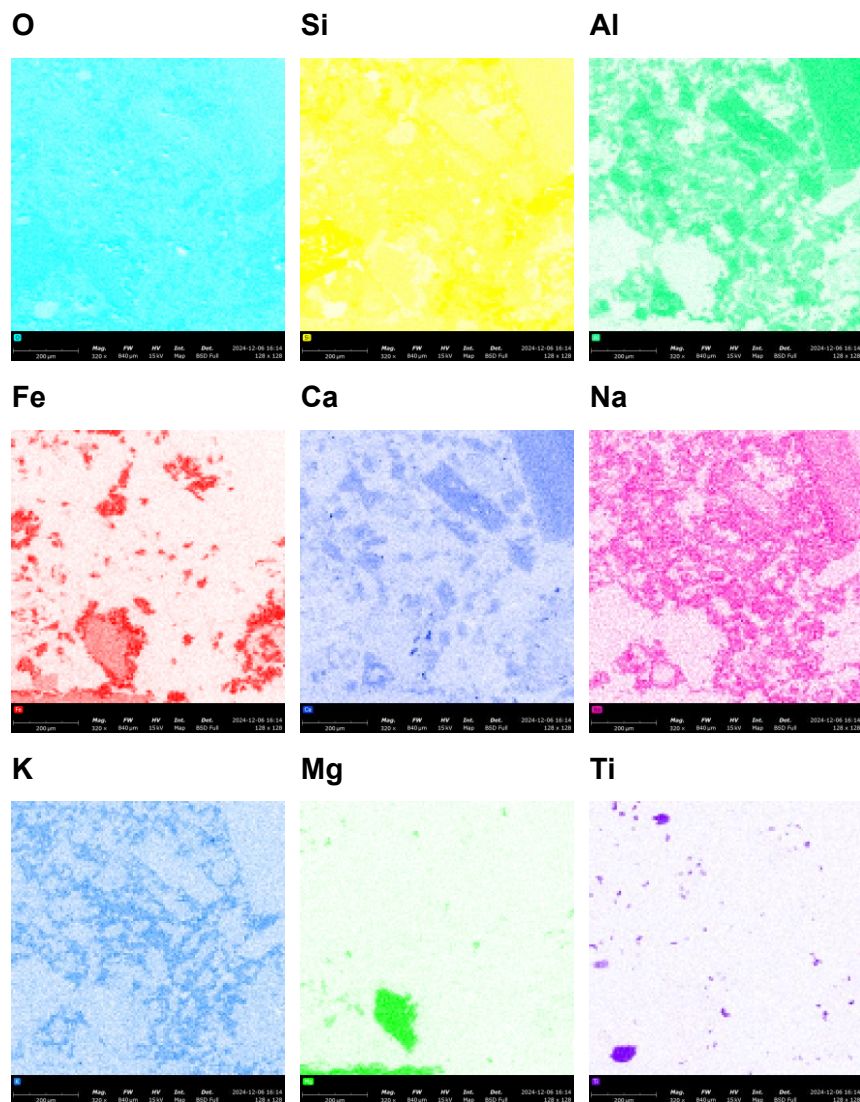
163. ábra: A 39. ábrához tartozó elem térképek



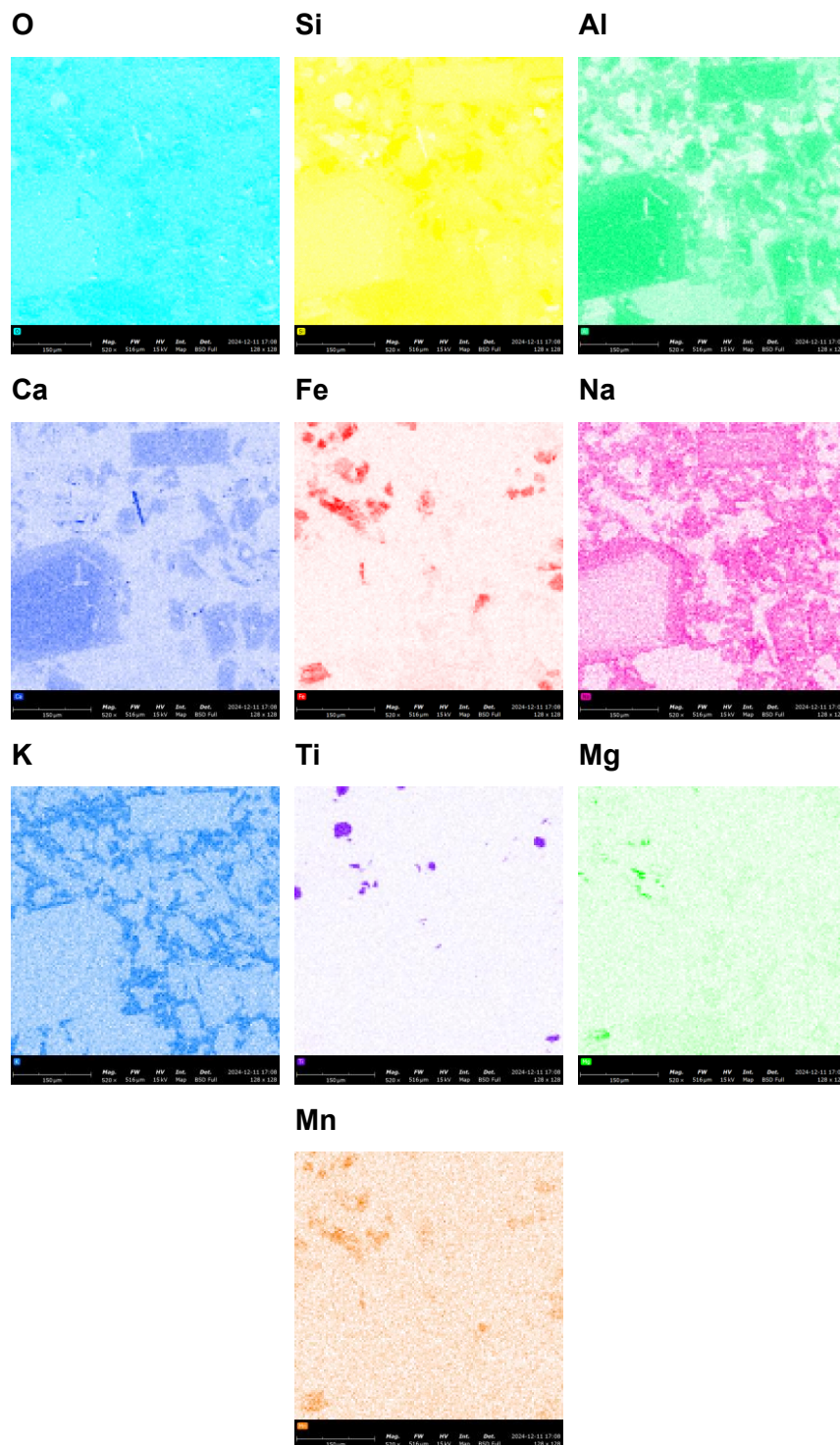
164. ábra: A 40. ábrához tartozó elem térképek



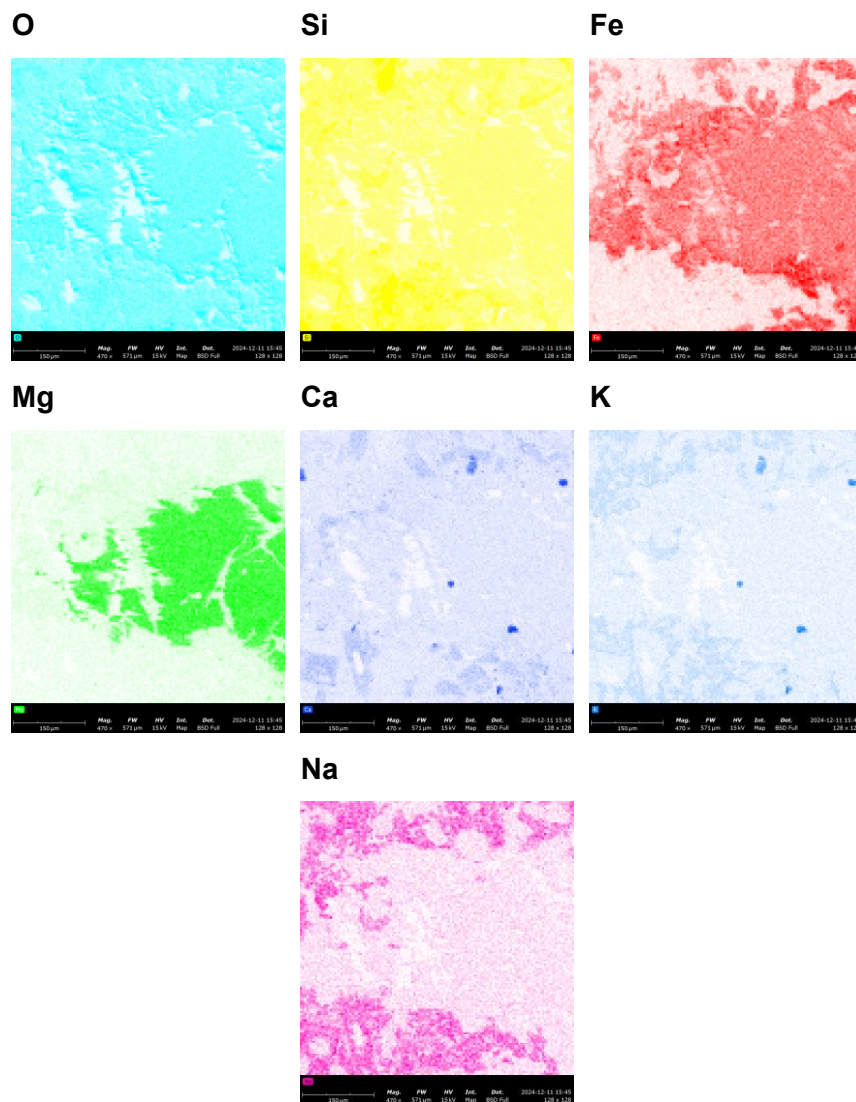
165. ábra: A 43. ábrához tartozó elemtérképek



166. ábra: A 44. ábrához tartozó elemtérképek

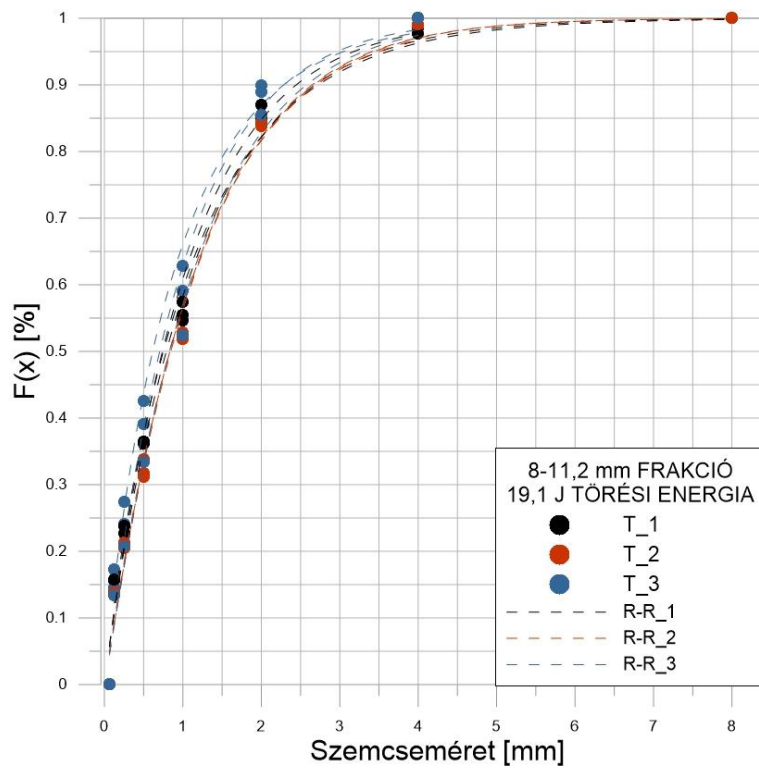


167. ábra: A 46. ábrához tartozó elem térképek

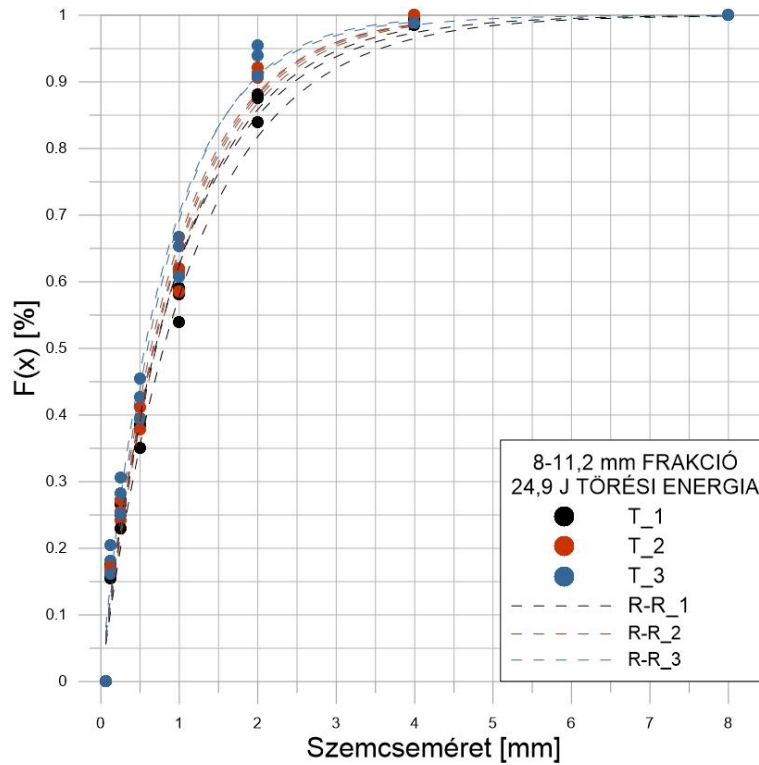


168. ábra: A 47. ábrához tartozó elemtérképek

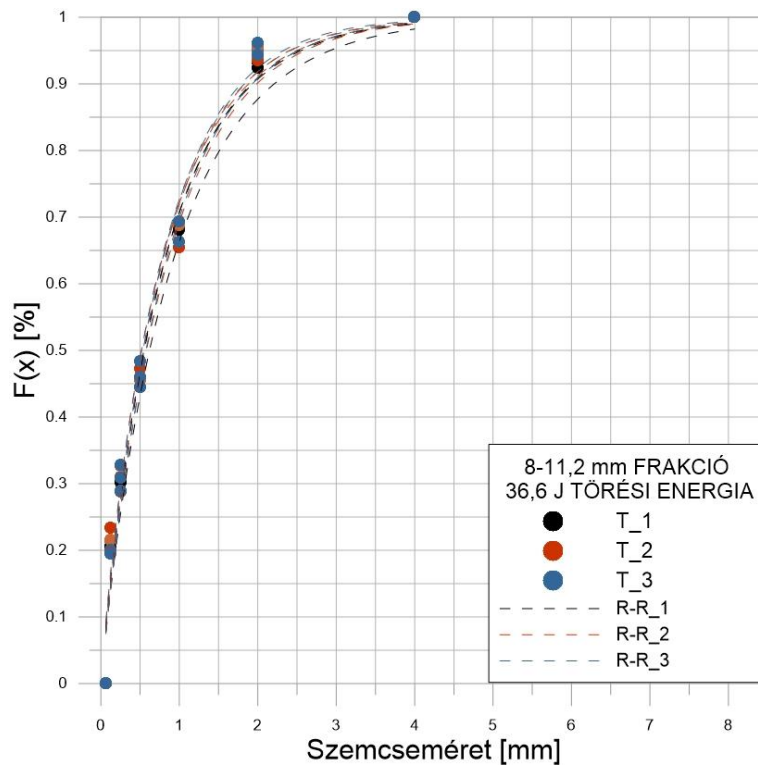
11.2.3. Egyszemcse törési vizsgálatok



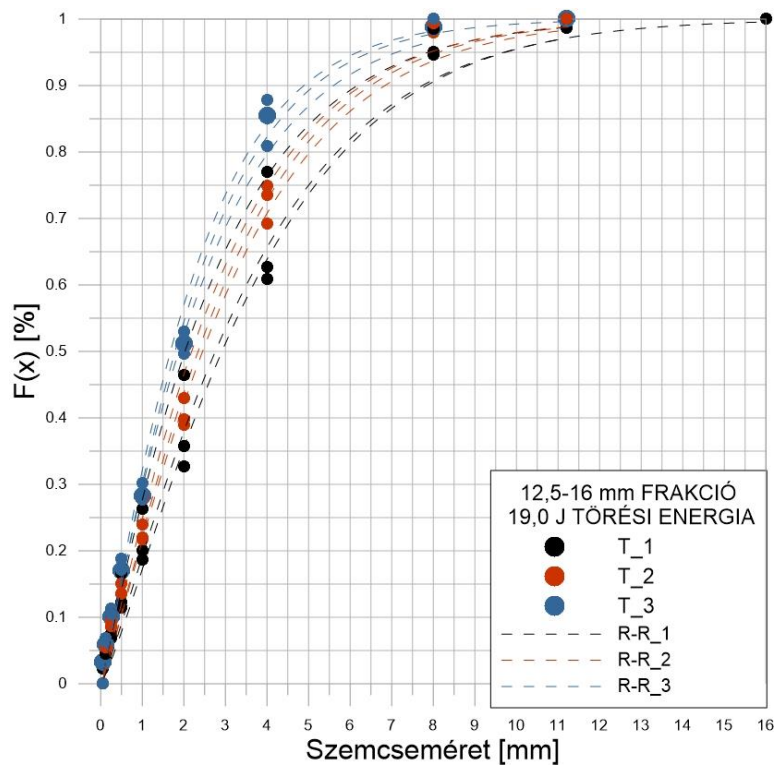
169. ábra: Tállyai minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 19,1 J



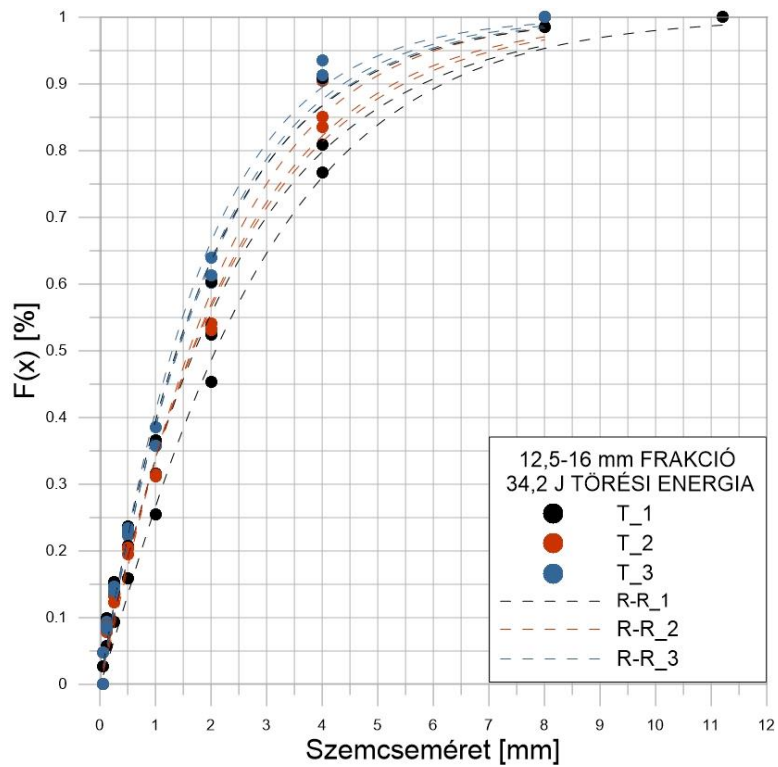
170. ábra: Tállyai minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 24,9 J



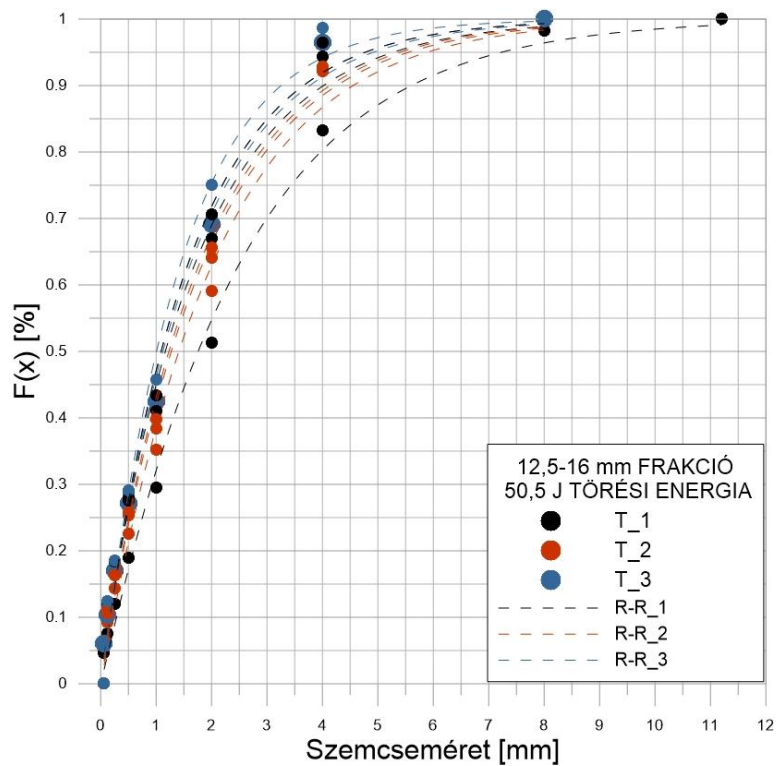
171. ábra: Tállyai minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 36,6 J



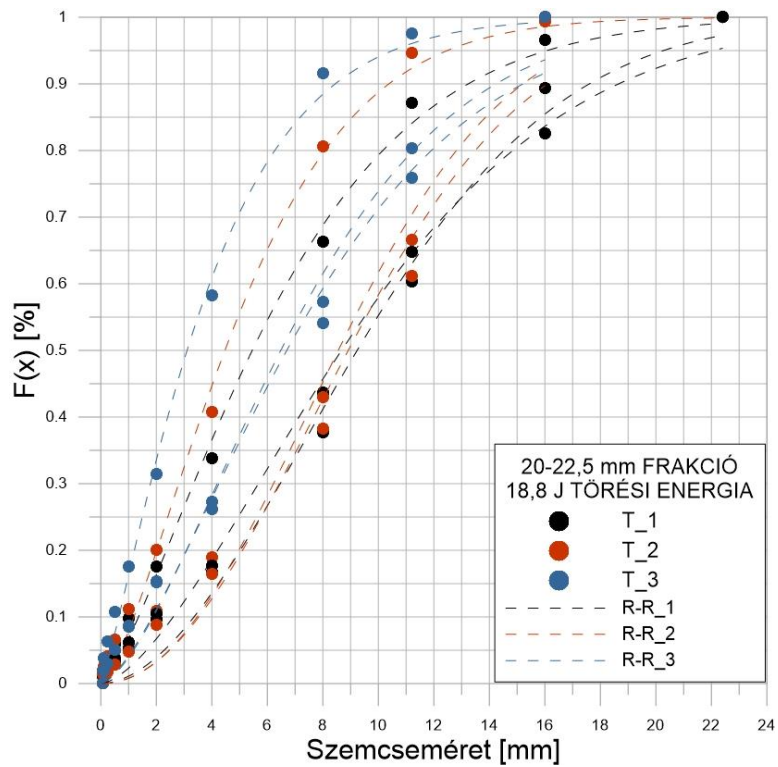
172. ábra: Tállyai minták 10-12,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 19,0 J



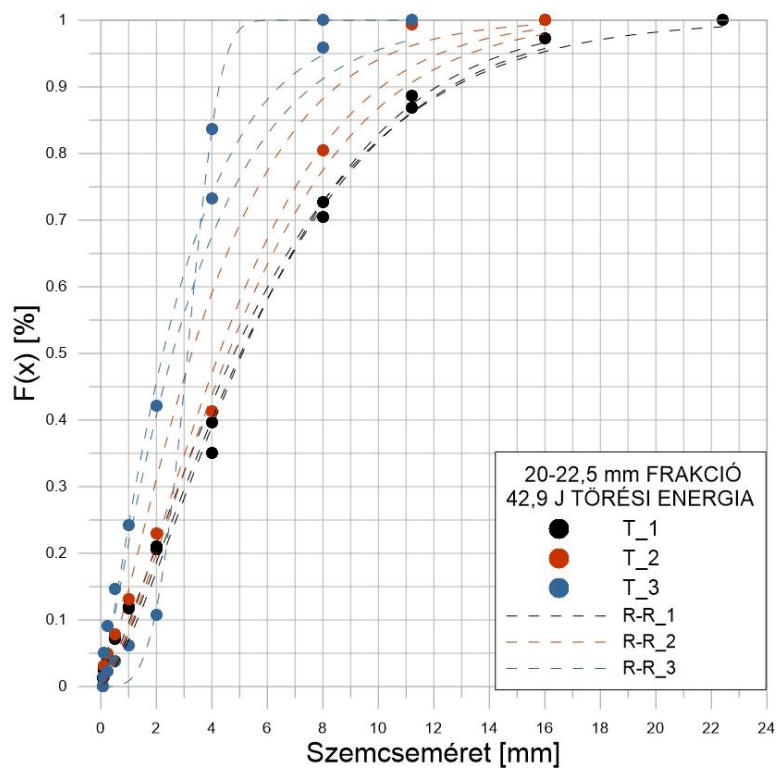
173. ábra: Tályai minták 12,5-16 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 34,2J



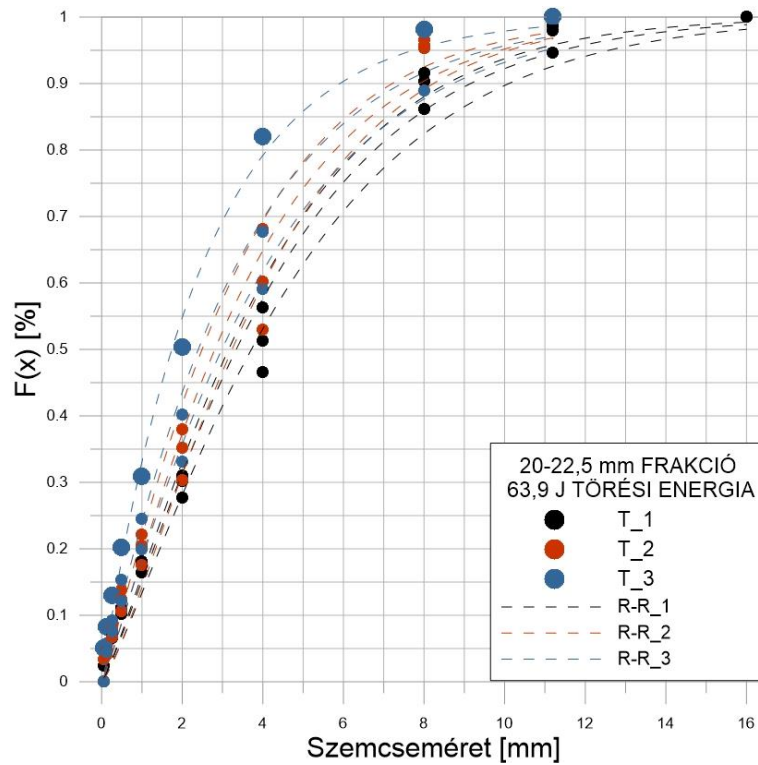
174. ábra: Tályai minták 12,5-16 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 50,5 J



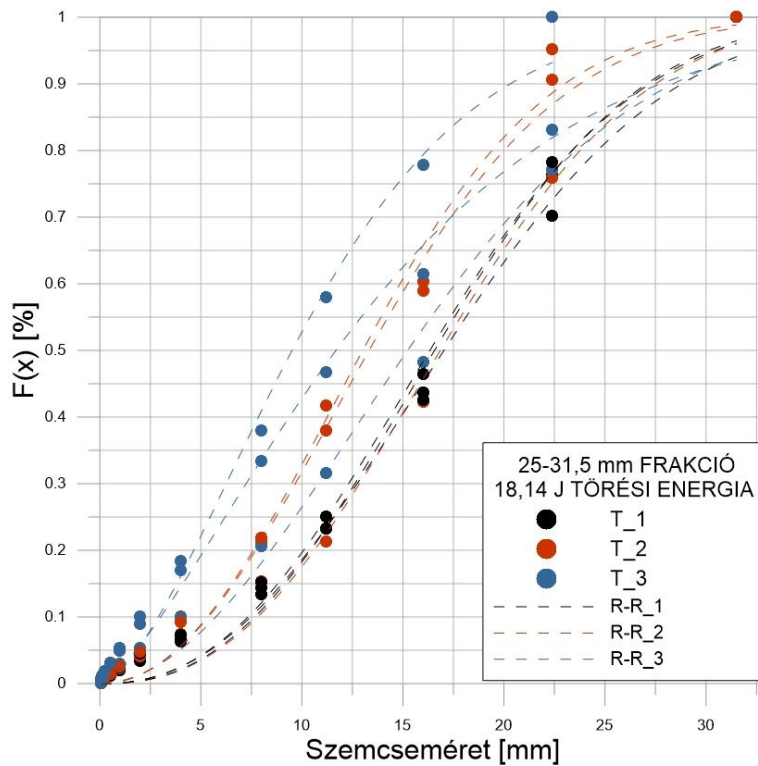
175. ábra: Tállyai minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 18,8 J



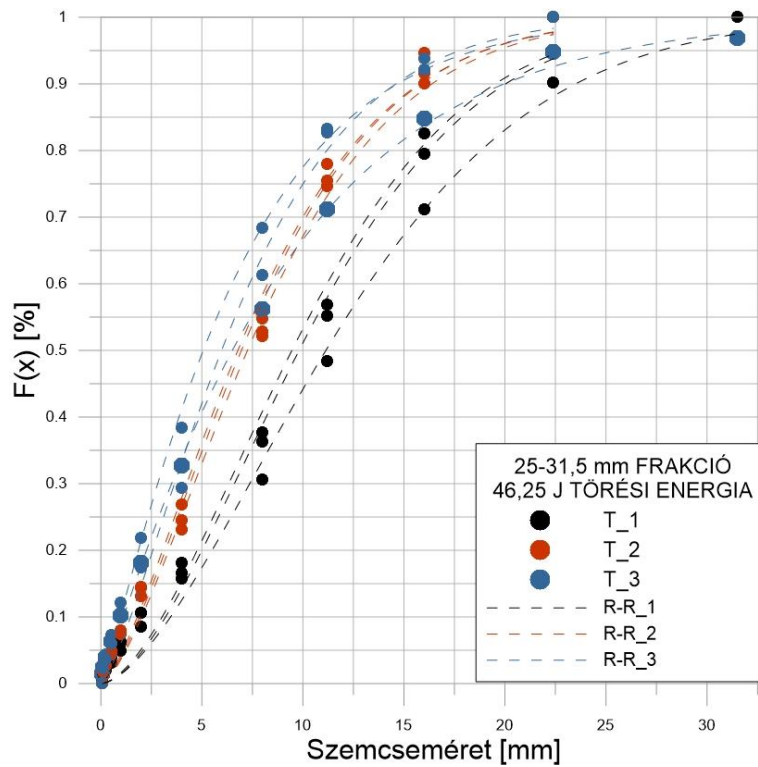
176. ábra: Tállyai minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 42,9 J



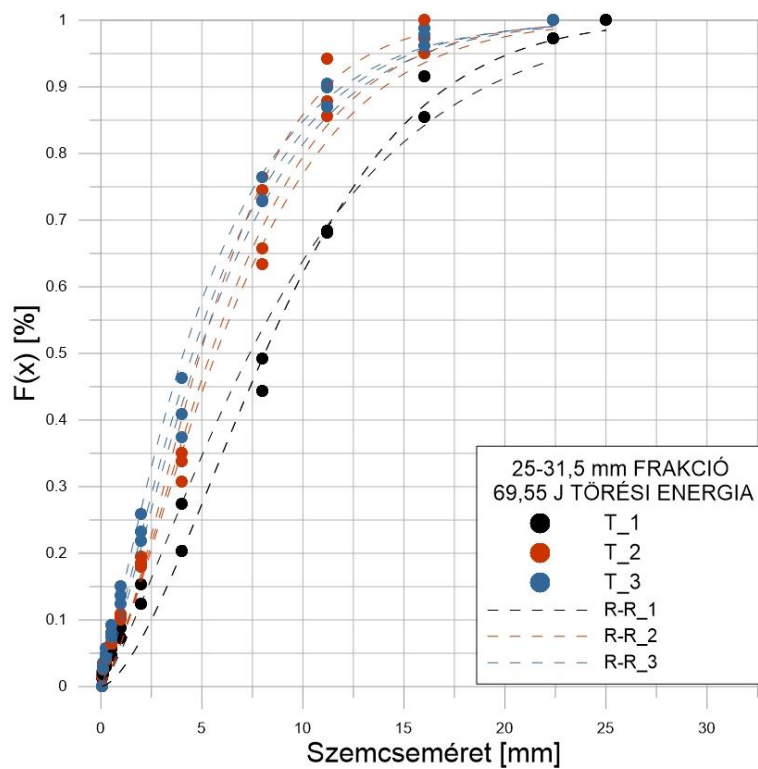
177. ábra: Tállyai minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 63,9 J



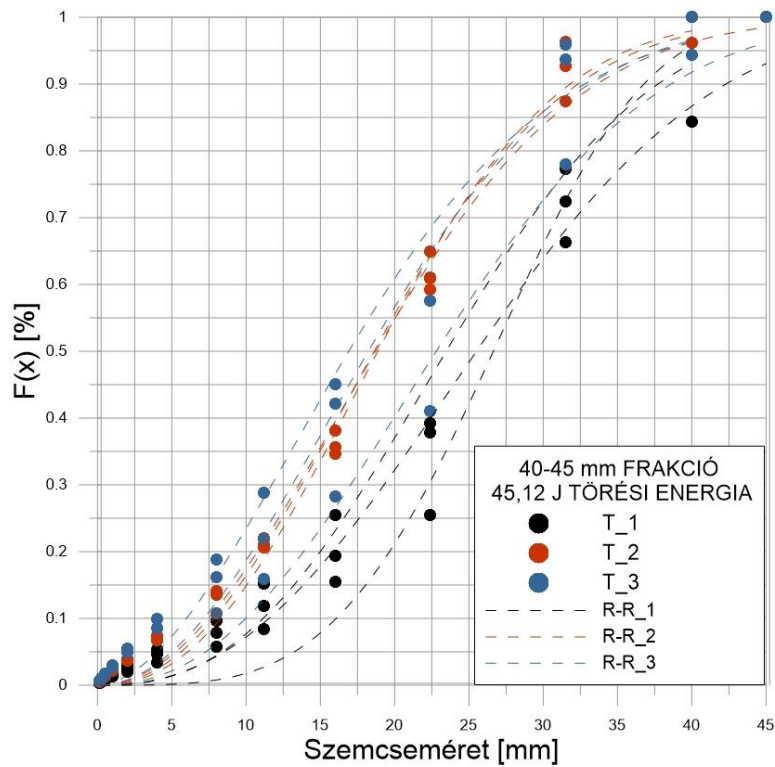
178. ábra: Tállyai minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 18,14 J



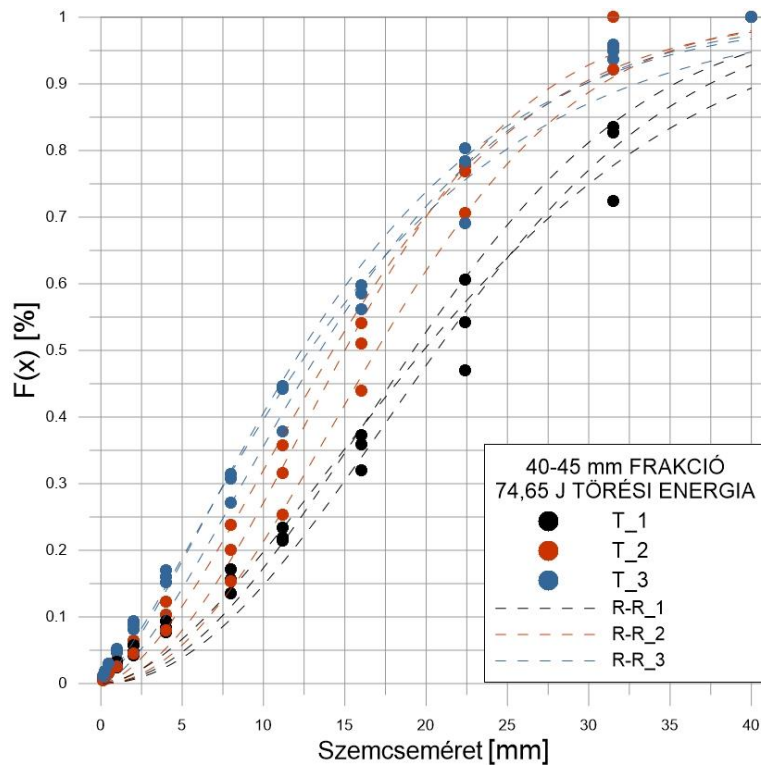
179. ábra: Tállyai minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 46,25 J



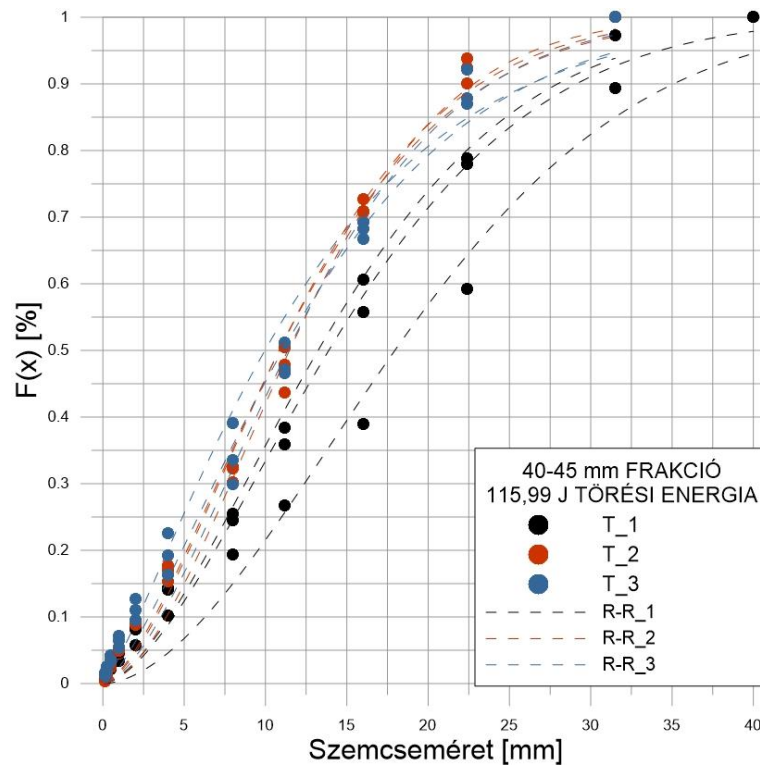
180. ábra: Tállyai minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 69,55 J



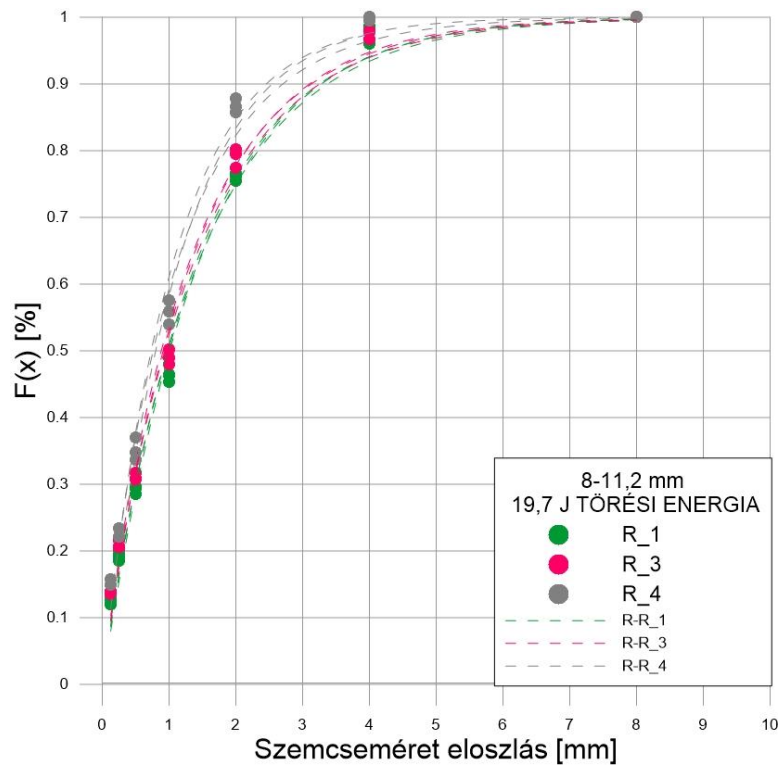
181. ábra: Tállyai minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 45,12 J



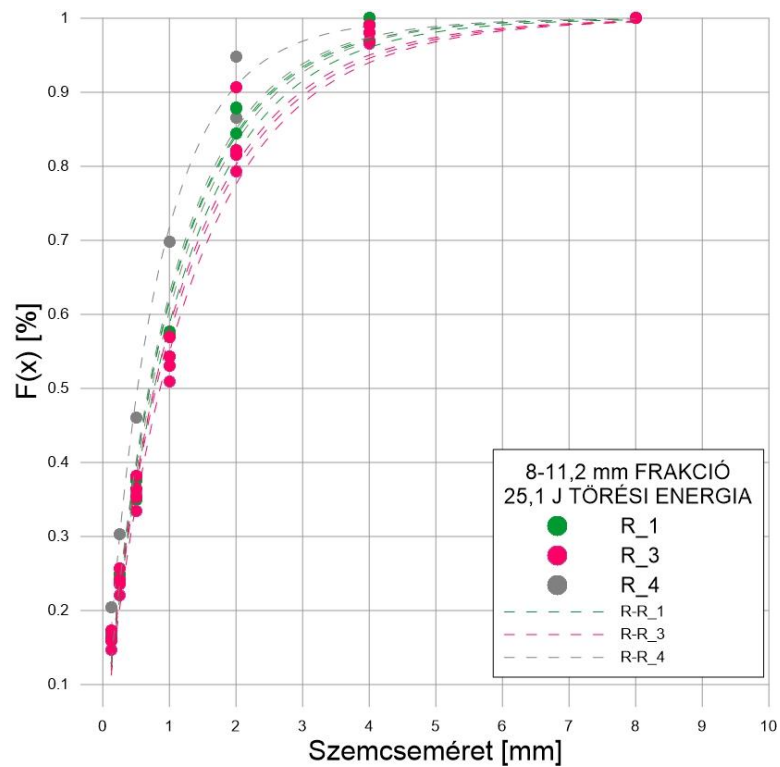
182. ábra: Tállyai minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 74,65 J



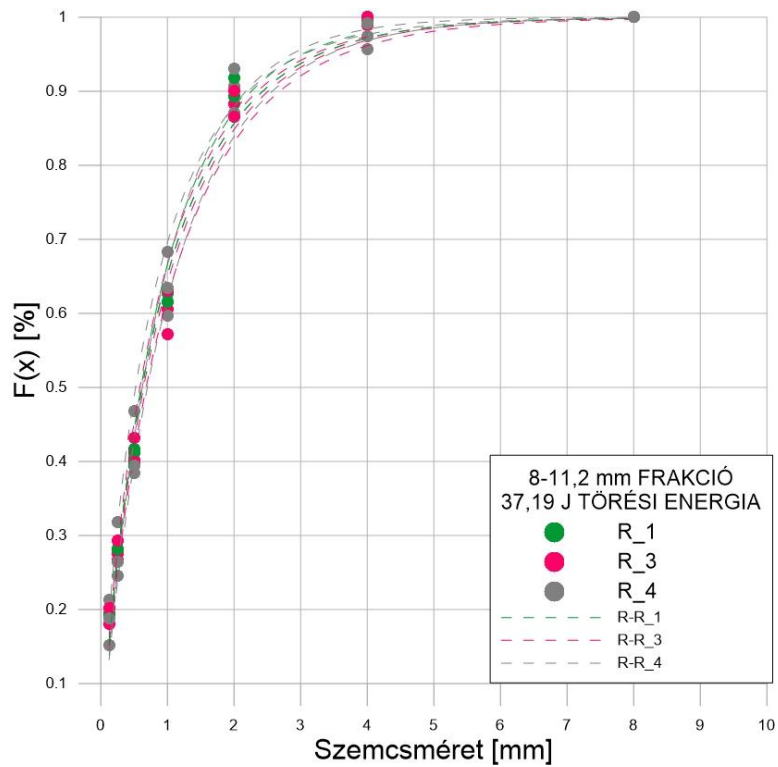
183. ábra: Tállyai minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 115,99 J



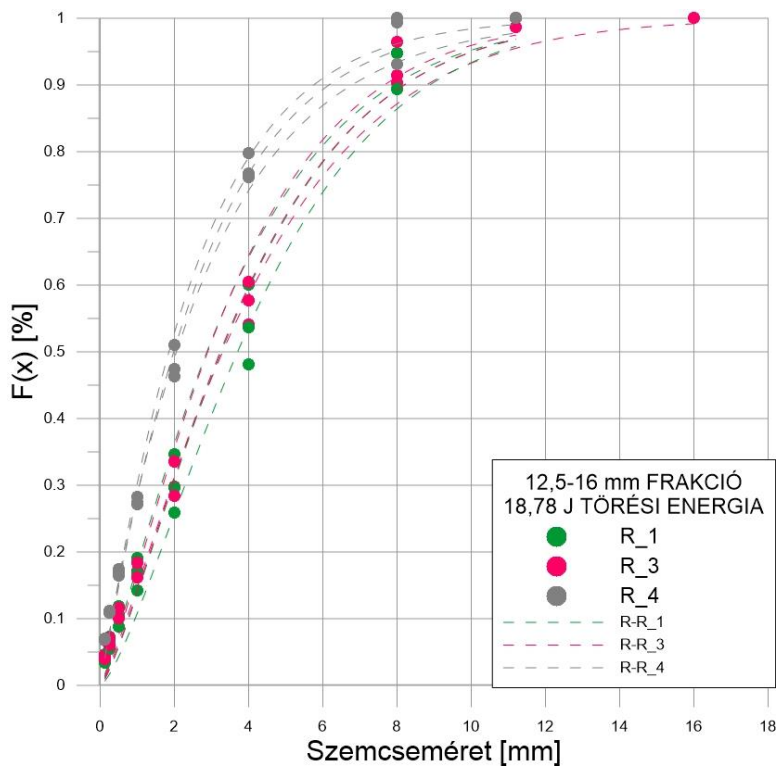
184. ábra: Recski minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 18,7 J



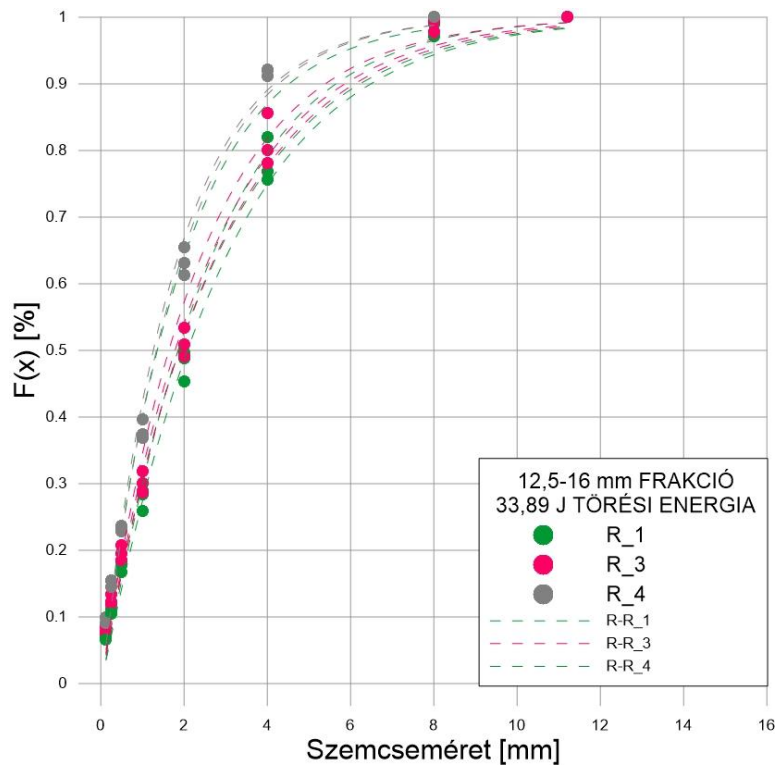
185. ábra: Recski minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 25,1 J



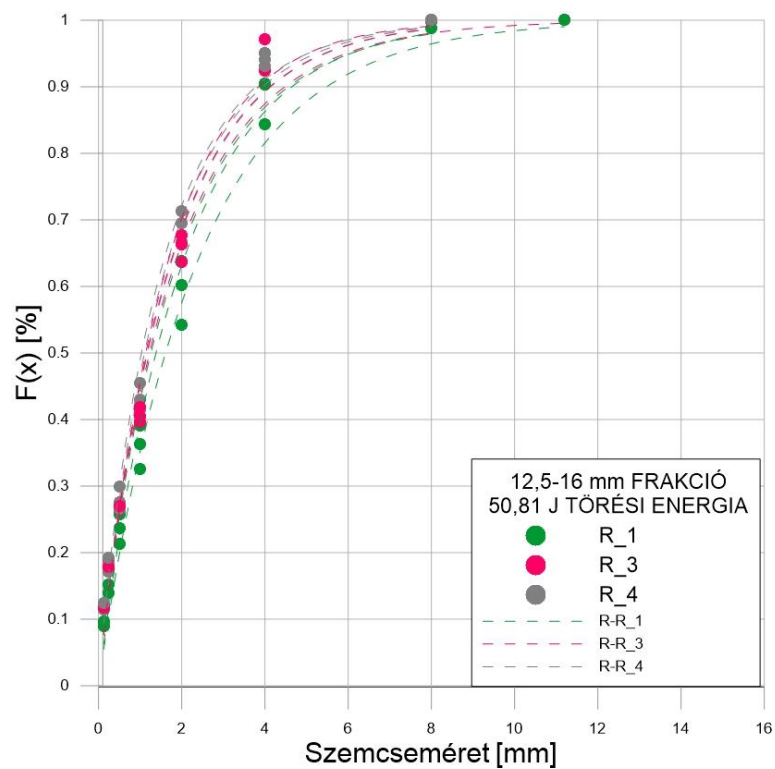
186. ábra: Recski minták 8-11,2 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 37,19 J



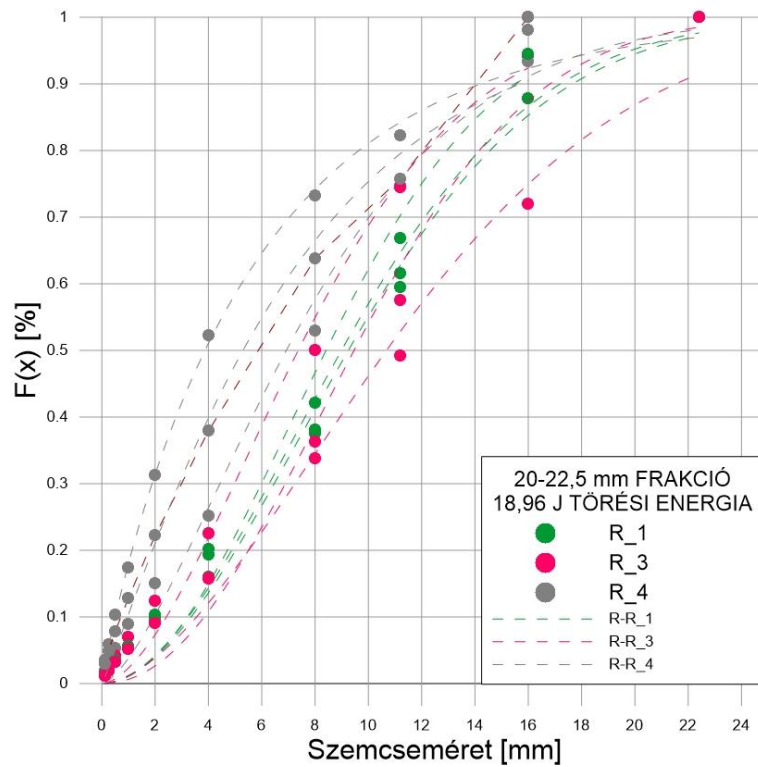
187. ábra: Recski minták 12,5-16 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 18,78 J



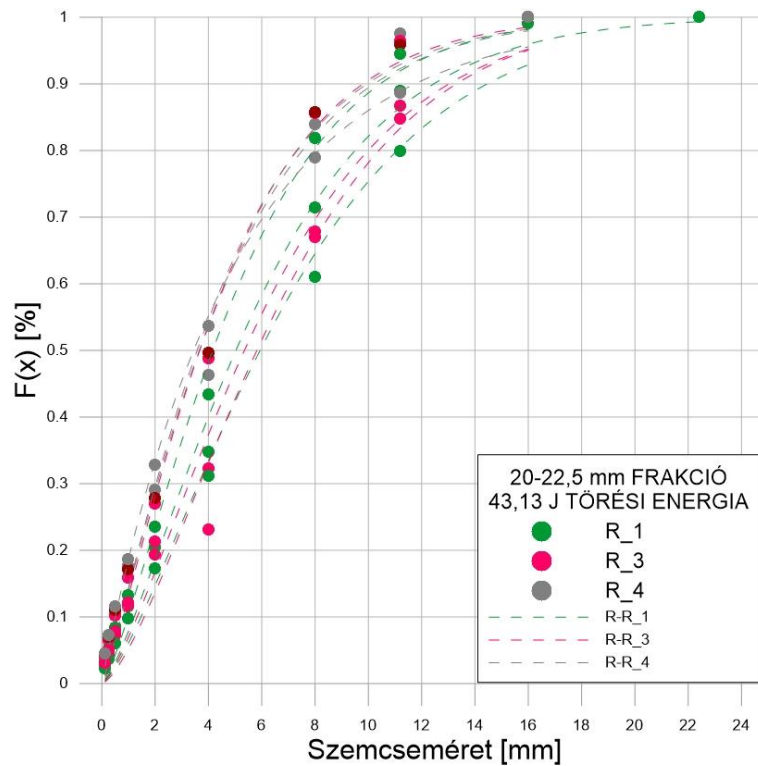
188. ábra: Recski minták 12,5-16 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 33,89 J



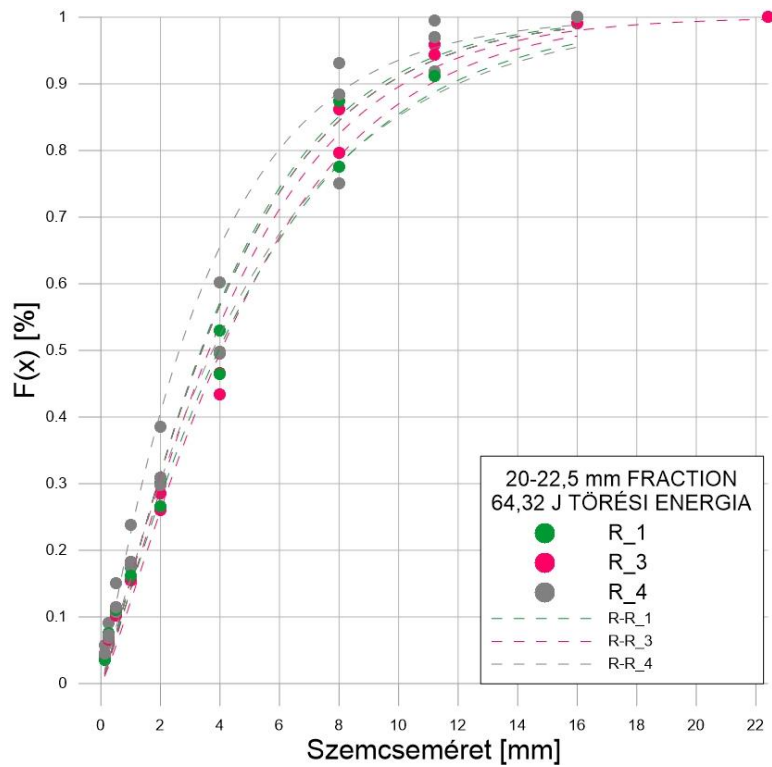
189. ábra: : Recski minták 12,5-16 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 50,81 J



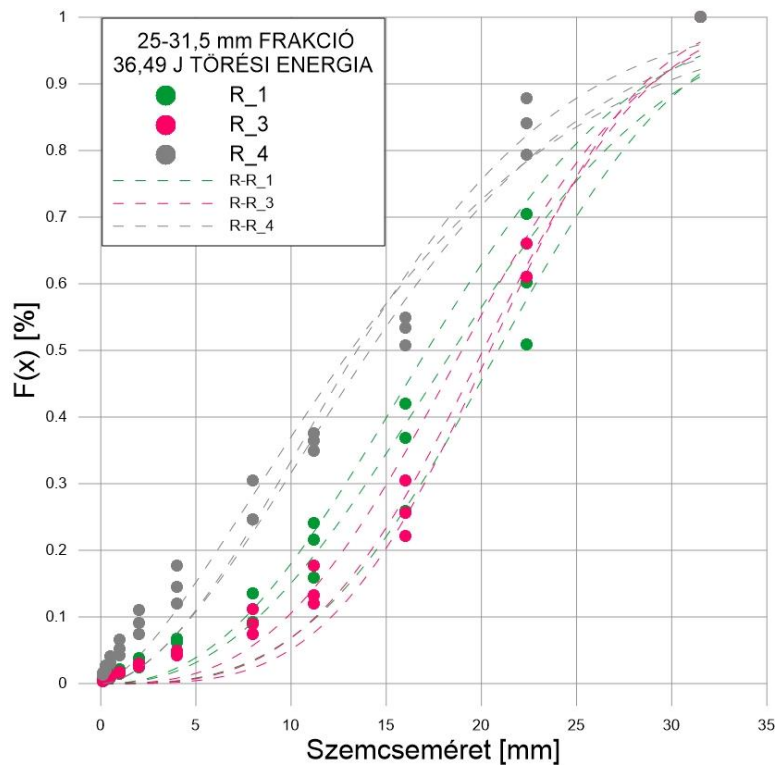
190. ábra: Recski minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 18,96 J



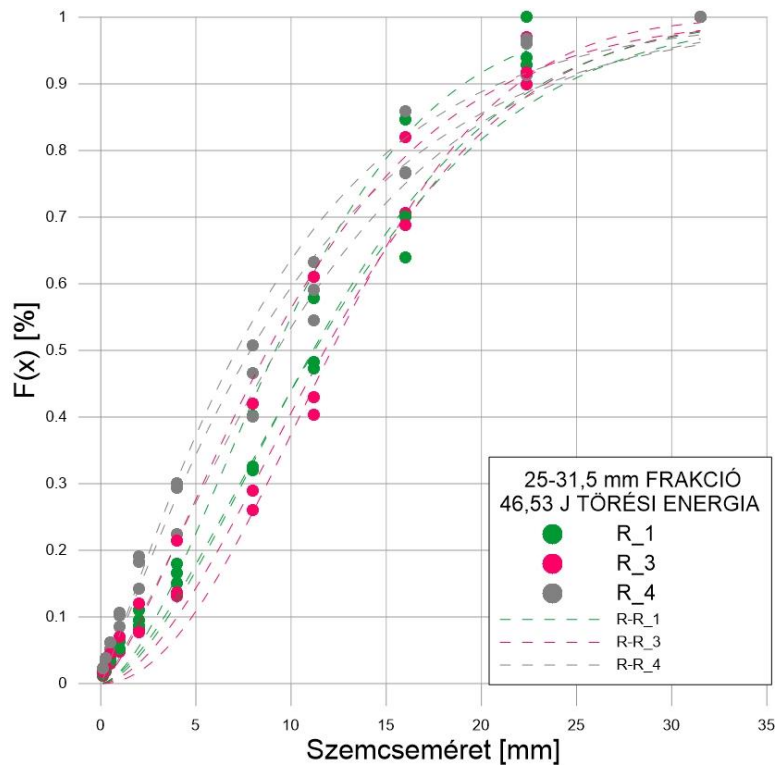
191. ábra: Recski minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 43,13 J



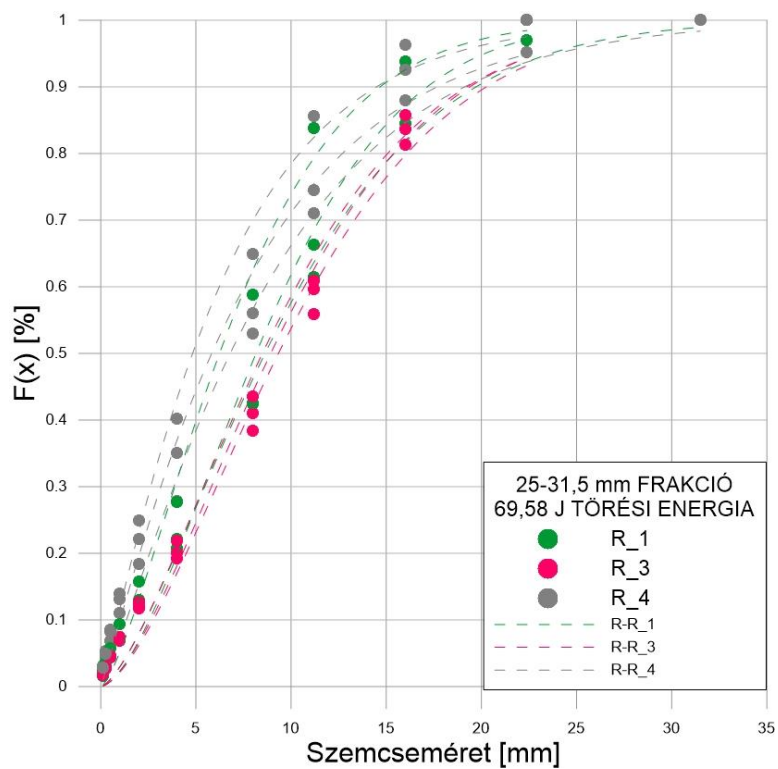
192. ábra: Recski minták 20-22,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 64,32 J



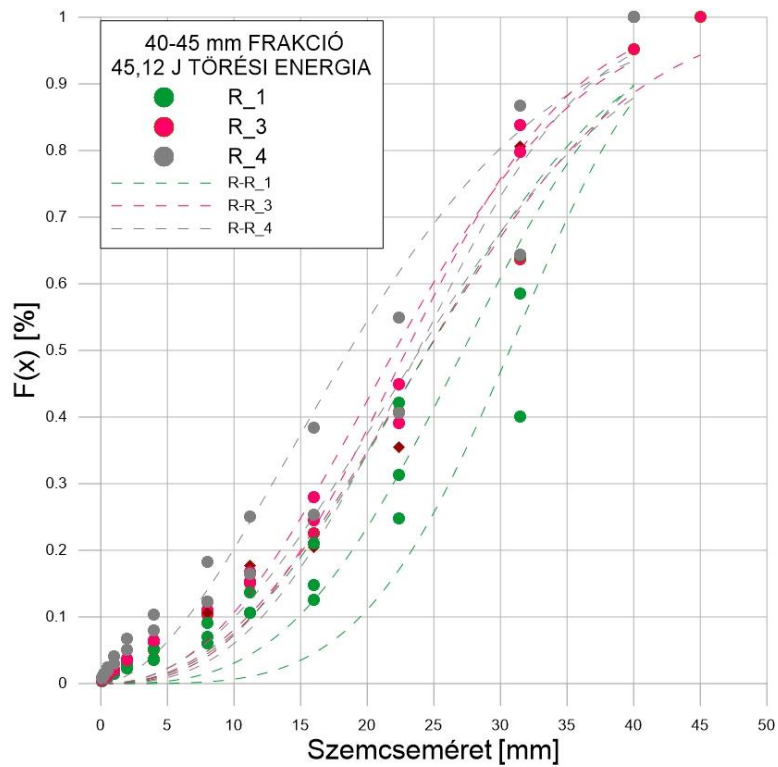
193. ábra: Recski minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 36,49 J



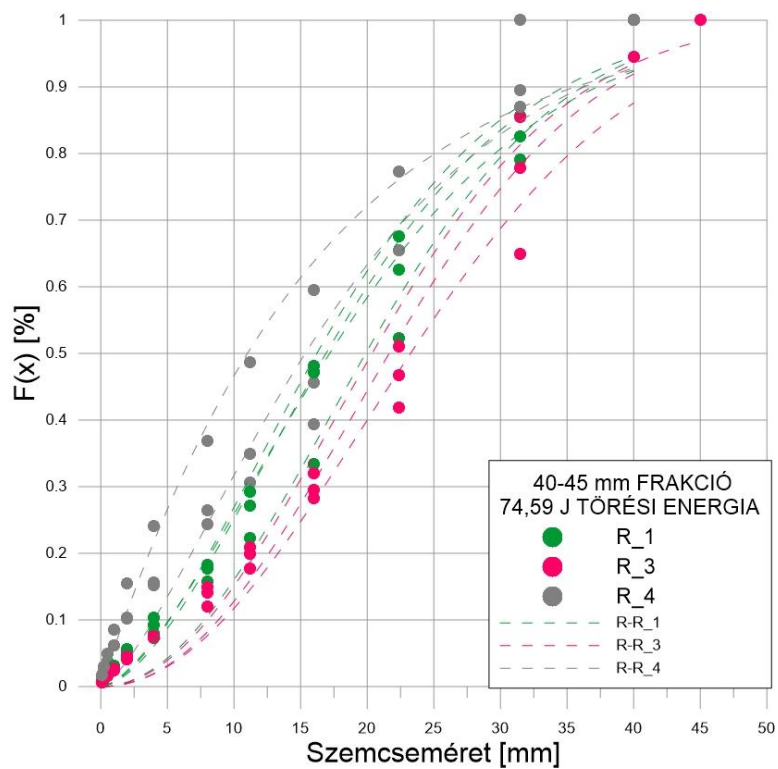
194. ábra: Recski minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 46,53 J



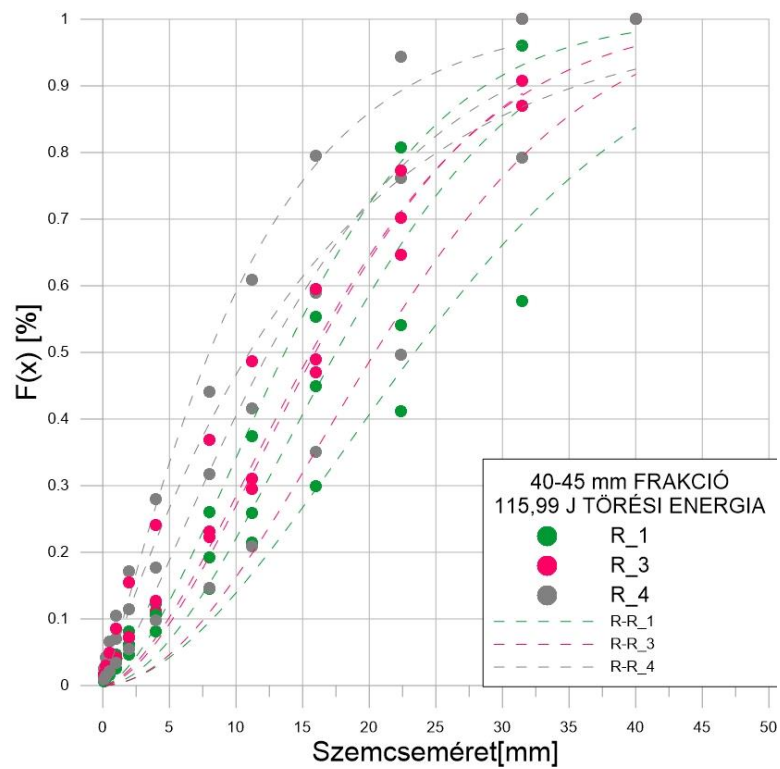
195. ábra: Recski minták 25-31,5 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 69,58 J



196. ábra: Recski minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 45,12 J



197. ábra: Recski minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 74,59 J



198. ábra: Recski minták 40-45 mm-es frakció töretének szemcseméret eloszlása, törési energia 115,99 J

34. táblázat: A 8-11,2 mm-es frakció t_{10} mutató értékei

Frakció	E_i [J]	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}
8-11,2 mm	19,7	11,57	T_1	I.	0,55	11,05	R_1	I.	0,45
				II.	0,54			II.	0,46
				III.	0,53			III.	0,50
		12,96	T_2	I.	0,50	11,72	R_3	I.	0,52
				II.	0,51			II.	0,49
				III.	0,51			III.	0,49
		13,74	T_3	I.	0,52	13,16	R_4	I.	0,55
				II.	0,58			II.	0,53
				III.	0,63			III.	0,56
	25,1	15,11	T_1	I.	0,53	14,1	R_1	I.	0,54
				II.	0,58			II.	0,58
				III.	0,58			III.	0,58
		16,92	T_2	I.	0,60	14,96	R_3	I.	0,50
				II.	0,57			II.	0,53
				III.	0,61			III.	0,54
		17,94	T_3	I.	0,60	16,8	R_4	I.	0,57
				II.	0,65			II.	0,70
				III.	0,65			III.	0,57
	37,2	22,19	T_1	I.	0,62	20,89	R_1	I.	0,60
				II.	0,67			II.	0,60
				III.	0,67			III.	0,62
		24,85	T_2	I.	0,65	22,17	R_3	I.	0,59
				II.	0,68			II.	0,57
				III.	0,68			III.	0,62
		26,35	T_3	I.	0,65	24,89	R_4	I.	0,58
				II.	0,67			II.	0,67
				III.	0,68			III.	0,62

35. táblázat: A 12,5-16 mm-es frakció t_{10} mutató értékei

Frakció	E_i [J]	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}
12,6-16 mm	18,8	3,85	T_1	I.	0,35	3,86	R_1	I.	0,26
				II.	0,27			II.	0,22
				III.	0,25			III.	0,19
		4,28	T_2	I.	0,32	3,59	R_3	I.	0,23
				II.	0,29			II.	0,25
				III.	0,30			III.	0,21
		4,19	T_3	I.	0,30	3,86	R_4	I.	0,36
				II.	0,40			II.	0,38
				III.	0,38			III.	0,35
	33,9	6,94	T_1	I.	0,41	6,96	R_1	I.	0,38
				II.	0,47			II.	0,36
				III.	0,35			III.	0,34
		7,72	T_2	I.	0,41	6,48	R_3	I.	0,39
				II.	0,42			II.	0,37
				III.	0,42			III.	0,42
		7,56	T_3	I.	0,48	6,96	R_4	I.	0,48
				II.	0,50			II.	0,51
				III.	0,47			III.	0,48
	50,8	10,25	T_1	I.	0,55	10,43	R_1	I.	0,50
				II.	0,52			II.	0,47
				III.	0,39			III.	0,42
		11,41	T_2	I.	0,53	9,71	R_3	I.	0,50
				II.	0,50			II.	0,51
				III.	0,46			III.	0,53
		11,16	T_3	I.	0,58	10,44	R_4	I.	0,52
				II.	0,56			II.	0,55
				III.	0,55			III.	0,57

36. táblázat: A 20-22,5 mm-es frakció t_{10} mutató értékei

Frakció	E_i [J]	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}
20-22,5 mm	19	1,3	T_1	I.	0,11	1,21	R_1	I.	0,10
				II.	0,10			II.	0,11
				III.	0,19			III.	0,11
		1,43	T_2	I.	0,09	1,22	R_3	I.	0,10
				II.	0,12			II.	0,13
				III.	0,22			III.	0,10
		1,5	T_3	I.	0,16	1,35	R_4	I.	0,16
				II.	0,16			II.	0,33
				III.	0,33			III.	0,23
	43,1	2,97	T_1	I.	0,21	2,75	R_1	I.	0,21
				II.	0,22			II.	0,19
				III.	0,22			III.	0,26
		3,27	T_2	I.	0,23	2,77	R_3	I.	0,20
				II.	0,24			II.	0,28
				III.	0,31			III.	0,21
		3,43	T_3	I.	0,16	3,08	R_4	I.	0,30
				II.	0,45			II.	0,29
				III.	0,40			III.	0,34
	64,3	4,42	T_1	I.	0,32	4,1	R_1	I.	0,32
				II.	0,32			II.	0,31
				III.	0,29			III.	0,28
		4,87	T_2	I.	0,32	4,13	R_3	I.	0,30
				II.	0,37			II.	0,27
				III.	0,40			III.	0,32
		5,1	T_3	I.	0,35	4,59	R_4	I.	0,40
				II.	0,42			II.	0,31
				III.	0,53			III.	0,32

37. táblázat: A 25-31,5 mm-es frakció t_{10} mutató értékei

Frakció	E_i [J]	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}
25-31,5 mm	17,9	0,48	T_1	I.	0,06	0,49	R_1	I.	0,05
				II.	0,05			II.	0,04
				III.	0,05			III.	0,05
		0,58	T_2	I.	0,07	0,49	R_3	I.	0,04
				II.	0,06			II.	0,03
				III.	0,07			III.	0,04
		0,57	T_3	I.	0,14	0,46	R_4	I.	0,09
				II.	0,07			II.	0,14
				III.	0,13			III.	0,11
	46,5	1,22	T_1	I.	0,14	1,28	R_1	I.	0,14
				II.	0,13			II.	0,11
				III.	0,12			III.	0,13
		1,49	T_2	I.	0,17	1,26	R_3	I.	0,10
				II.	0,18			II.	0,10
				III.	0,20			III.	0,16
		1,46	T_3	I.	0,23	1,19	R_4	I.	0,18
				II.	0,29			II.	0,23
				III.	0,24			III.	0,24
	69,6	1,83	T_1	I.	0,16	1,91	R_1	I.	0,16
				II.	0,16			II.	0,17
				III.	0,21			III.	0,21
		2,24	T_2	I.	0,24	1,89	R_3	I.	0,15
				II.	0,26			II.	0,16
				III.	0,25			III.	0,17
		2,2	T_3	I.	0,29	1,77	R_4	I.	0,23
				II.	0,31			II.	0,32
				III.	0,35			III.	0,28

38. táblázat: A 40-45 mm-es frakció t_{10} mutató értékei

Frakció	E_i [J]	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}	E_s [kWh/t]	Minta	Ismétlés	t_{10}
40-45 mm	45,1	0,42	T_1	I.	0,04	0,44	R_1	I.	0,04
				II.	0,05			II.	0,04
				III.	0,06			III.	0,06
		0,47	T_2	I.	0,07	0,41	R_3	I.	0,05
				II.	0,08			II.	0,07
				III.	0,08			III.	0,07
		0,46	T_3	I.	0,09	0,46	R_4	I.	0,11
				II.	0,07			II.	0,07
				III.	0,11			III.	0,08
	74,6	0,68	T_1	I.	0,10	0,72	R_1	I.	0,08
				II.	0,08			II.	0,10
				III.	0,09			III.	0,11
		0,76	T_2	I.	0,09	0,67	R_3	I.	0,08
				II.	0,13			II.	0,08
				III.	0,11			III.	0,08
		0,74	T_3	I.	0,18	0,76	R_4	I.	0,16
				II.	0,16			II.	0,16
				III.	0,17			III.	0,25
	116	1,15	T_1	I.	0,15	1,12	R_1	I.	0,13
				II.	0,15			II.	0,11
				III.	0,11			III.	0,08
		1,29	T_2	I.	0,17	1,05	R_3	I.	0,12
				II.	0,19			II.	0,13
				III.	0,19			III.	0,10
		1,25	T_3	I.	0,18	1,17	R_4	I.	0,19
				II.	0,20			II.	0,29
				III.	0,24			III.	0,25