





PANNON EGYETEM

VEGYÉSZMÉRNÖKI- ÉS ANYAGTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

**Megmunkált természetes gránitok ásványi alkotóinak felületminőséget befolyásoló hatása**

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE:

Kelemen-Cserta Eszter  
okleveles gépészmérnök

DOI:10.18136/PE.2024.905

TÉMAVEZETŐ:

dr. Gyurika István Gábor  
egyetemi docens

Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő  
Központ Gépészmérnöki Intézeti Tanszék

2024.

Megmunkált természetes gránitok ásványi alkotóinak felületminőséget befolyásoló hatása

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Pannon Egyetem  
Vegyésszmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

Anyagtudományok és Technológiák tudományágban

Írta: Kelemen-Cserta Eszter

Témavezető: Dr. Gyurika István Gábor

Elfogadásra javaslom (igen / nem) .....  
(témavezető)

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: .....igen /nem  
.....  
(bíráló)

Bíráló neve: .....igen /nem  
.....  
(bíráló)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém, .....  
(a Bíráló Bizottság elnöke)

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....  
Veszprém, .....  
(az EDHT elnöke)

## TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS .....	10
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS .....	12
3. KUTATÁSI CÉLOK.....	29
3.1 A KÖZETMEGMUNKÁLÁS NEHÉZSÉGEI .....	29
3.2 A KÖZETFELÜLET KIALAKÍTÁS NEHÉZSÉGEINEK LEHETSÉGES MEGOLDÁSA.....	29
4. AZ ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK, BERENDEZÉSEK.....	30
4.1 A MINTADARABOK FELÜLETALAKÍTÁSA MARÁSSAL .....	30
4.2 AZ ÁSVÁNYOK ALAKJÁNAK ÉS SZÍNÉNEK VIZSGÁLATA .....	31
4.3 ÁSVÁNYOK ÖSSZETÉTELÉNEK VIZSGÁLATA.....	33
4.4 GRÁNITALKOTÓ KOMPONENSEK VIZSGÁLATA .....	34
4.5 TERÜLET ALAPÚ FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSE .....	35
4.6 ELŐKÉSZÍTŐ ELJÁRÁS A KEMÉNYSÉG MÉRÉSÉHEZ.....	37
4.7 GRÁNIT FELÜLETÉNEK MIKROKEMÉNYSÉG MÉRÉSE .....	38
5. A MINTÁK KIVÁLASZTÁSÁNAK FOLYAMATA.....	40
6. AZ ÁSVÁNYOK FELÜLETI ÉRDESSÉGET ALAKÍTÓ HATÁSA KÜLÖNBÖZŐ ANYAGLEVÁLASZTÁSI SEBESSÉGEK ESETÉBEN .....	43
6.1 AZ ÁSVÁNYOK FÉNY – ÉS ELEKTRONMIKROSKÓPOS, VALAMINT RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLAT .....	44
6.2 A KONFOKÁLIS MIKROSKÓPPAL VÉGZETT VIZSGÁLAT .....	51
6.3 AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE .....	53
7. GRÁNITALKOTÓ ÁSVÁNYI SORREND A FELÜLETMINŐSÉGET BEFOLYÁSOLÓ HATÁSUK ALAPJÁN.....	58
7.1 FÉNYMIKROSKÓPOS, ELEKTRONMIKROSKÓPOS ÉS RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLAT .....	58
7.2 FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSE.....	63
7.3 EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE .....	64

8.	AZ ÁSVÁNYOK ÖSSZETÉTELÉNEK BEFOLYÁSOLÓ HATÁSA A MIKROKEMÉNYSÉGRE .....	68
8.1	A MEGMUNKÁLT MINTADARABOK JELLEMZŐI .....	69
8.2	KEMÉNYSÉGMÉRÉS.....	69
8.3	SEM VIZSGÁLAT .....	72
8.4	EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE .....	72
8.5	KÖVETKEZTETÉS.....	74
9.	A <b>Fe</b> és <b>Si</b> –TARTALOM EGYÜTTES HATÁSA A FELÜLETI ÉRDESSÉGRE .....	76
9.1	A KUTATÁS FOLYAMATA .....	76
9.2	FELÜLETEK ÉS MINTADARABOK KIALAKÍTÁSA.....	76
9.3	A PORÍTOTT MINTÁK RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATA.....	77
9.4	A FELÜLETEK FÉNYMIKROSKÓPOS ÉS ELEKTRONMIKROSKÓPOS MÉRÉSE .....	78
9.5	MÉRÉS AZ ALICONA INFINITEFOCUS IFM G4 BERENDEZÉSSEL .....	81
9.6	EREDMÉNYEK.....	82
9.7	KÖVETKEZTETÉSEK.....	86
10.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	88
11.	SZAKIRODALOM.....	91
12.	TÉZISPONTOK.....	102
13.	THESIS STATEMENT .....	104
14.	A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ KÖZLEMÉNYEK .....	106

## KIVONAT

Dolgozatomban a természetes kőzetek, azon belül pedig a gránitok felületi érdességével és a kőzeteket felépítő természetes ásványok felületi tulajdonságokat befolyásoló hatásával foglalkoztam. A különböző lelőhelyekről beszerzett természetes kőzetek felületén eltérő paraméterű marással sávok lettek kialakítva, amelyeken a vizsgálatokat végeztem.

Ezeket a természetes gránitokat precíziós megmunkálás után mérőgépek asztalaként, megmunkálógépek ágyazataként lehet hasznosítani, ami rezgés csillapító hatása miatt közkedvelt anyaga ezen berendezéseknek. Az ipartól kissé távolodva is számos helyen, konyhapultok, ebédlőasztalok alapanyagaként lehet hasznosítani, ahol a heterogén összetételéből származó egyedi mintázat teszi kelendővé. Emellett a sírkövek gyakran választott alapanyaga, amiért a változó időjárással szemben is jó ellenállóképességgel bír.

A korábban már CNC vezérelt marógéppel kialakított kőzetdarabokból 5x5 cm-es mintadarabokat alakítottam ki, amelyeken a vizsgálatokat elvégeztem. Először fénymikroszkóppal beazonosítottam az adott mintadarabokat felépítő ásványokat, majd ezeket elektronmikroszkópban is megvizsgáltam. Ekkor már az ásványok egyedi (atomszázalékos) összetételén volt a hangsúly. Ezen eredmények pontosítása végett röntgendiffraktométer által is meghatároztam a mintadarabok elemi összetételét. Ezt követően az egyedi ásványok terület alapú felületi érdességét vizsgáltam 3D-s mérőrendszerrel. Az eredmények ismeretében fény derült arra, hogy melyik kőzet milyen mértékben befolyásolta a felületi érdesség értékének változását.

További vizsgálatokat végeztem, ahol a felületeken polírozás után Vickers-keménységet mértem. A korábban már vizsgált elemi összetétel és a Vickers-keménység közötti kapcsolatot kerestem, és arra a következtetésre jutottam, hogy bizonyos elemek együttes jelenléte befolyásolja a kőzetek mind felületi érdességét, mind pedig a keménységét.

Ezen eredmények tudatában már könnyebben el lehet érni megfelelő felületi érdességet, valamint a megmunkálási paraméterek is pontosan meghatározhatóvá válnak.

## ABSTRACT

In my dissertation, I dealt with the surface roughness of natural rocks, including granites, and the influence of the natural minerals that make up the rocks on their surface properties. Strips with different parameters were created on the surface of the natural rocks obtained from different deposits, on which I performed the tests.

I made 5x5 cm sample pieces from the previously formed rock pieces with a CNC-controlled milling machine, on which I performed the tests. First, I identified the minerals that make up the given samples with a light microscope, and then examined them with an electron microscope. At that time, the focus was already on the unique (atomic percentage) composition of minerals. In order to clarify these results, I also determined the elemental composition of the samples using an X-ray diffractometer. After that, I examined the area-based surface roughness of individual minerals with a 3D measuring system. Knowing the results, it became clear to what extent which rock influenced the change in the surface roughness value.

I carried out further tests where I measured the Vickers hardness after polishing the surfaces. I looked for the relationship between the previously investigated elemental composition and Vickers hardness, and I came to the conclusion that the combined presence of certain elements affects both the surface roughness and the hardness of the rocks.

Knowing these results, it is easier to achieve a suitable surface roughness, as well as to prepare in advance the hardness of the workpiece to be machined, thus its machinability.

## ZUSAMMENFASSUNG

In meiner Dissertation beschäftigte ich mich mit der Oberflächenrauheit natürlicher Gesteine, darunter Granite, und dem Einfluss der natürlichen Mineralien, aus denen die Gesteine bestehen, auf deren Oberflächeneigenschaften. Auf der Oberfläche der natürlichen Gesteine aus verschiedenen Lagerstätten, an denen ich die Tests durchgeführt habe, wurden Streifen mit unterschiedlichen Parametern erzeugt.

Aus den zuvor geformten Gesteinsstücken habe ich mit einer CNC-gesteuerten Fräsmaschine 5x5 cm große Probestücke hergestellt, auf denen ich die Tests durchgeführt habe. Zuerst habe ich die Mineralien, aus denen die Proben bestehen, mit einem Lichtmikroskop identifiziert und sie dann mit einem Elektronenmikroskop untersucht. Schon damals stand die einzigartige (atomarprozentige) Zusammensetzung von Mineralien im Fokus. Um diese Ergebnisse zu verdeutlichen, habe ich zusätzlich die Elementzusammensetzung der Proben mit einem Röntgendiffraktometer bestimmt. Anschließend untersuchte ich die flächenbezogene Oberflächenrauheit einzelner Mineralien mit einem 3D-Messsystem. Mit Kenntnis der Ergebnisse wurde deutlich, in welchem Ausmaß welches Gestein die Veränderung des Oberflächenrauheitswertes beeinflusste.

Ich habe weitere Tests durchgeführt, bei denen ich die Vickers-Härte nach dem Polieren der Oberflächen gemessen habe. Ich suchte nach dem Zusammenhang zwischen der zuvor untersuchten Elementzusammensetzung und der Vickers-Härte und kam zu dem Schluss, dass das kombinierte Vorhandensein bestimmter Elemente sowohl die Oberflächenrauheit als auch die Härte der Gesteine beeinflusst.

Wenn man diese Ergebnisse kennt, ist es einfacher, eine geeignete Oberflächenrauheit zu erreichen und die Härte des zu bearbeitenden Werkstücks und damit seine Bearbeitbarkeit im Voraus festzulegen.



## ALKALMAZOTT RÖVIDÍTÉSEK

NFAL:	novel fixed abrasive lapping (tool)	fix abrazív anyagleválasztó (eszköz)
GPR:	ground penetration radar	földbehatoló radar
SSD:	subsurface damage	felszín alatti károsodás
DEM:	discrete element method	diszkrétteleemes módszer
FP:	fine particle	finom részecske
UFP:	ultrafine particle	ultrafinom részecske
SCHPC:	self-compacting high performance concrete	öntömörödő nagy teljesítményű beton
FC:	foamed concrete	habbeton
GW:	granite waste	gránit hulladék
FCGW:	foamed concrete with granite waste	habbeton gránit hulladékkal
FCS:	foamed concrete with sand	homokot tartalmazó betonhab
GPC:	geopolymer concrete	geopolimer beton
SCC:	self-compacting concrete	öntömörödő beton

## 1. BEVEZETÉS

A kőzetek már régóta az emberiség szolgálatában állnak. Ezek közül is kiemelkedik a gránit, amely már „szerves” része életünknek. A gránit egy mélységi magmás kőzet, amelynek három fő ásványalkotója a kvarc, a papioklász (albit) és a káliföldpát (ortoklász, mikroclin). Szerkezete durvakristályos, szemcseméretét tekintve lehet finom, közepes és durva szemcsés. Emellett színes elegyrészként többnyire csillámot (biotit) tartalmaz. Régebben többnyire az építészetben használták, de akkor is inkább csak díszítő elemek alapanyagaként. Manapság azonban egyedi megjelenésének köszönhetően, már meghatározó anyaggá nőtte ki magát. Nem csak az építészetben, hanem a konyhapultok burkolólapjaként, vagy sírkövek alapanyagaként van jelen.

A nagymértékű felhasználás mellett egyre fontosabb a megfelelő minőség biztosítása. Jelentős probléma, hogy a gránitot alkotó ásványok felületi érdességre gyakorolt hatása jelenleg nem ismert. A gránit időtlen népszerűségnek örvendő kőzetünk. Egyre gyakrabban jelennek meg a képzőművészetben, mint szobrok, vázák anyaga, valamint a mindennapokban is kezd elterjedni. Mindezek mellett van egy másik terület, ahol jelentős mennyiségben használják fel a gránitot, ez pedig az ipar, ahol CNC koordináta mérőgépek munkaasztalaként vagy precíziós megmunkálógépek ágyazataként alkalmazzák magas kopásállósága és nagy tömegéből adódó rezgéscsillapító hatása miatt.

Ahogy látható, a gránit nagyon elterjedt kőzet a mindennapokban. Fontos tehát, hogy megfelelő felületi minőséget lehessen kialakítani a kőzet felületén, hogy az megfelelően felhasználhatóvá váljon, biztonságtechnikailag is kielégítse az előírásokat és követelményeket, valamint hosszabb élettartammal rendelkezzen ezáltal. Amennyiben kültéri járólapnak szeretnénk használni, fontos a megfelelő felületi érdesség kialakítása, hogy ezzel tapadóréteget alakítsunk ki, hogy könnyen járható és biztonságos legyen. Azonban amikor egy berendezés asztalaként alkalmazzuk, akkor pedig fontos a sima felület, hogy a mérésből adódó esetleges pontatlanságokat kiküszöböljük. Sima felület kialakítását követeli meg egy konyhapult elkészítése is, hiszen a sima felületbe nem tudnak beleragadni a konyhai alapanyagok.

Kutatásokat végeztem a különböző ásványokból felépülő gránitok felületén. Vizsgáltam az ásványok kémiai összetételét, az anyagleválasztás következtében kialakult új felületi minőséget, a felületi érdességet befolyásoló paramétereket. Számos mérést készítettem a fizikai és kémiai tulajdonságok meghatározásához. Elemeztem a felület minőségét pásztázó

elektron mikroszkóppal, keménységmérővel és 3D felületmérő rendszerrel. Porítottam a mintadarabokat és röntgendiffrakciós vizsgálatnak is alávettem.

A disszertáció ezeknek a mérési adatoknak az eredményeit és az ezekből következtetett téziseket mutatja be.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A gránit felhasználási területe egyre nagyobb teret ölt, azonban kevés kutatás foglalkozik magának a kőzetösszetételnek a kőzet megmunkálására és a felületi tulajdonságaira gyakorolt hatásával.

Azonban számos szakirodalom foglalkozott a kőzetek, azon belül is a gránitok megmunkálásával. H. Schunnesson [1] a kőzetek fúrásával foglalkozott, ahol a fúrás nyers adatait vizsgálta. Ipari felhasználás során a nyers fúrési adatokat fokozatosan normalizálták, csak a kőzetfüggő paramétereket hagyták meg, így a kőzet tulajdonságai elméleti vagy heurisztikus összefüggésekkel váltak előrejelezhetővé. Ez az elemzés elősegítette a kőzettömbök osztályozását geológiai vagy mechanikai tulajdonságai (szilárdság, repedezettség) alapján.

Murat Yurdakul [2] a vágási mód, a vágási mélység és az előtolás hatását vizsgálta a forgácsoláshoz felhasznált energia függvényében. A kísérlet során többkéses blokkvágót használt. Az előtolás mértéke 10, 13, 15 és 17 [m/min] voltak, 3,6 [mm] és 9 [mm] vágási mélységek mellett, miközben a kerületi sebesség állandó (35 [m/s]) maradt. A forgácsolási folyamatoknál fontos megtalálni az arany középutat a költségek és a megtérülés között. Az eredmények kiértékeléséből kiderült, hogy a gránit megmunkálása során felhasznált energiafogyasztás mértéke közel azonos a hasonló tulajdonságokkal rendelkező kőzetek megmunkálásához szükséges energia igénnyel.

A természetes kőzetek megmunkálása során a kőzet felülete nagy befolyásoló hatással bírt. Mind felhasználhatósága, mind pedig annak értékének szempontjából. Ezért Marcello Toncelli kifejlesztett egy olyan eljárást, amely lehetővé teszi a természetes kőzetek automatikus és félautomatikus polírozását, miközben javítja annak simaságát és egyenletességét [3]. A megmunkált kőzettömb felületi érdessége fontos tényező, így a felület érdességi együtthatójának meghatározását tűzték ki célul.

H. Huang és társai [4] a köszörűben lévő gyémántszemcsék méretét csökkentették, ezzel eljutva a rideg alakítástól a képlékeny alakításig. A kialakított felület felületi morfológiáját pásztázó elektronmikroszkóppal, a felület érdességét pedig hordozható érdességmérő, valamint fényességmérő műszerrel elemezték. Kimutatták, hogy a gránit köszörülésének jellemző típusai a rideg anyagleválasztástól a képlékeny megmunkálásig a gyémántszemcseméret csökkenésével változnak. A gránit fényes felülete egy alacsony érdességű felület, amelyet a képlékeny megmunkálás tartományába eső gyémántcsiszolással

alakítottak ki. A gránit felületi érdessége nőtt, miközben a képlékenyalakítás mértéke csökkent.

A képlékeny alakítás számos területen kiemelkedő eredményeket biztosított. Bin és munkatársai [5] ebben a tanulmányban bemutattak egy új fix abrazív anyagleválasztó (NFAL) eszközt, amely egyesíti a számítógéppel vezérelt optikai felületkezelést és a hagyományos csiszolási eljárást, hogy hatékonyan tudja kialakítani a felületeket, miközben a felület állapota szabályozott és a felszín alatti károsodás (SSD - subsurface damage) elkerülhető. Az anyageltávolítási térfogat lineárisan változik a megmunkálási idővel a képlékeny megmunkálás során. A mért és szimulált felületi adatok felületi érdesség  $R_a$  és  $R_z$  értékei az előtolás növekedésével csökkennek.

Timo Saksala [6] egy numerikus tanulmányt mutat be a gránit kőzet repedéséről a kvarc ásvány piezoelektromos tulajdonságainak felhasználásával. A szimulációs eredmények azt sugallják, hogy a kvarctartalmú kőzetek piezoelektromos gerjesztése potenciális előkezelési technika lehet az aprítás során. Tehát a felület kémiai összetételének, szerkezetének és határfelületének ismerete fontos az anyagok tulajdonságainak megértéséhez [7].

A megmunkálás sikerességéhez szükséges ismerni a megmunkáló berendezésben létrejövő változásokat. A megmunkáló szerszám és a kőzet felület közötti érintkezési nyomást is vizsgálták Zhang és társai [8]. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a maximális érintkezési nyomás csak a kőzet tulajdonságaitól függ, és csak kis mértékben befolyásolják egyéb paraméterek, mint például a vágósebesség vagy a vágásmélység. A szerszám viselkedése fontos műszaki és gazdasági paraméter a megmunkálás során. Rajpurohit és társai [9] ennek érdekében a gránitok Cerchar keménységét (friss törésű kőzeten történő fém gombostű kopása) vizsgálták. Vizsgálták a nagy átmérőjű tárcsa és a Cerchar keménységi index közötti összefüggést, hogy megértsék a kőzet keménysége és a gyémántszerszám kopása közötti statisztikai összefüggést. A gyémánt kopása kiemelten fontos tényező. A kőzet vágásának optimalizálása azt mutatta, hogy a teljesítmény 100-200%-kal növelhető olyan szerszámok esetén, amelyek gyémánt szemcséi akár 30 tonnányi anyagot is eltávolítanak [10].

Nem csak Muraték [2] foglalkoztak a gránitok megmunkálásával. Xipeng Xu és társai [11] szintén ebben a témakörben kutattak, azonban ők, a megmunkológép oldaláról közelítették meg a kísérletet, kiemelt figyelmet fordítva a fűrészlap kopására. A megmunkálás során fellépő erőviszonyokat tanulmányozták. Arra a következtetésre jutottak, egy hosszú fűrészelési folyamat során mind a tangenciális, mind a normál erő komponensek értéke

növekedett a fűrészlap fokozatos kopása mellett. Azt is megállapították, hogy a nagy fűrészelési különbségek ellenére a különböző gránitoknál fellépő erőösszetevők és azok arányai csak kis mértékben térnek el egymástól. Látható, hogy ez a kutatási eredmény Muraték korábban ismertetett eredményeivel összhangban áll.

A forgácsolóerő és az energia felhasználható a kőmegmunkálás ellenőrzésére, valamint a gyémántszerszám kopásával is összefüggésben állnak. Turchetta [12] a forgácsképződési és -eltávolítási folyamatot számszerűsítette azzal a szándékkal, hogy mind a szerszámkészítőt, mind a kőmegmunkálót segítsék a szerszámösszetétel és a forgácsolási folyamat paramétereinek optimalizálásában. A gránit kőzetek megmunkálása összetett feladat, számos problémával kell szembenézni. Eyuboglu és kutatótársai [13] a tárcsa kopását vizsgálták mikroszkóp segítségével. Kutatásuk során arra a megállapításra jutottak, hogy a kőzet fizikai-mechanikai tulajdonságai és a tárcsa szegmenseinek kopása jó összefüggést mutat, miszerint minél keményebb a megmunkálandó felület, annál nagyobb a szerszám kopása. Luo [14] a gránit fűrészeléséhez használt körfűrészek gyémánt szegmenseinek kopott felületeit vizsgálta. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy egy kemény gránit fűrészeléskor a szegmens felületén előforduló részecskék kopás során eltörnek vagy kifordulnak a mátrixból, így a fűrészlap vágása kevésbé hatékony. Konstanty [15] a gyémánt impregnált szerszámokkal végzett természetes kőfűrészelés elméleti modelljét kutatta. A forgács készítési és eltávolítási folyamatot számszerűsítették azzal a szándékkal, hogy mind a szerszámkészítőt, mind a kőfaragót segítsék a szerszám összetételének, illetve a fűrészelési folyamat paramétereinek optimalizálásában.

Mivel a szerszámkopás a forgácsolási folyamat során igen összetett, többdimenziós probléma, ezért a szakirodalomban az empirikus tesztelésen és az eredmények interpolációján alapuló induktív módszer a legelterjedtebb Ilio és Togna [16] szerint. A gyémánt körfűrész kopását számos tényező befolyásolja. Mindazonáltal a főbb tényezők, amelyeket figyelembe kell venni a kopási sebesség előrejelzésénél, a gyémántfűrész típusa, a fűrész működési paraméterei és a vágott kőzet jellemzői. Egyetlen kőzettulajdonsági index nem elegendő alap a kopási teljesítmény előrejelzéséhez. Ersoy [17] és társai a kőzetek szerkezeti, mechanikai és az ép felülethez tartozó tulajdonságok széles skáláját meghatározták. X. P. Xu és társai [18] az imént ismertetett kísérletet folytatták és az erőkomponenseket vizsgálták a felhasznált teljesítmény függvényében. Majd a gyémánt és gránit érintkezési felületen kialakult hőmérsékleti zónákat mérték és a fűrészelési

teljesítménnyel együtt a későbbiekben a gránit energiaeloszlásának becslésére használták hőmérséklet-illesztési technikával. Az energiamegoszlási értékek alapján analitikus modell segítségével megbecsülték a csúcshőmérsékleteket az egyes vágási pontokon és megállapították, hogy a gyémánt szemcsék kopása szorosan kapcsolódik a vágási pontokban fellépő magas hőmérsékletekhez, valamint nagymértékben függ a megmunkálás paramétereitől és azok kombinációjától. Ezen felül a geometria és a gyémánt struktúrája egy másik fontos kritérium. A gyémántszemcsék szilárdsági különbsége és a szemcsék véletlenszerű kiemelkedése a kötési mátrixból jelentős tényezők lehetnek a gyémántszemcsék kopásának szempontjából, emellett a gyémántok kipattanását a kötési mátrixból a szegmenseket érő hőnek tulajdonították.

Y. Li és társai [19] folytatva a korábbi gondolatmenetet a gránit anyagok gyémánt impregnált szerszámokkal történő költséghatékony megmunkálásának megvalósítását tűzték ki célul. Ehhez alacsony szerszámkopást, alacsony energiafogyasztást és nagy forgácsolási hatásfokot kell megvalósítani, miközben a munkadarab felületeinek pontosságát megfelelő szinten kell tartani. Nyilvánvaló, hogy a megmunkálási folyamat során a szerszámkopást, az energiát és a hatékonyságot befolyásoló fő tényezők a gyémántszerszám felülete és a munkadarab közötti határfelületen fellépő tribológiai kölcsönhatásokhoz kapcsolódnak. Ezen megfontolás alapján a szerzők új megmunkálási módszert javasolnak a gránit anyagok megmunkálására a jobb költséghatékonyság elérése érdekében. A javasolt módszerben a tribológiai kölcsönhatásokat minimalizálják. Hétrétegű több késes berendezést használnak, hogy nagy mértékben csökkentsék a súrlódást és ennek köszönhetően a keletkező hőmennyiséget is.

Nagyon fontos a gránit megfelelő fűrészelése, amelyhez a megfelelő szerszámok kiválasztása meghatározó a szerszám élettartam és a megfelelő gyártási sebesség elérése szempontjából. X. Wei és társai [20] az ásványi összetétel, a mechanikai tulajdonságok és a gránit fűrészelhetősége közötti bonyolult összefüggés miatt új, matematikai módszert dolgoztak ki a kvarctartalom, a kvarc szemcseméret, a keménység, valamint a nyomószilárdság közötti összefüggés megállapítására. Ezzel a módszerrel többféle gránit fűrészelhetőségét értékelték és osztályozták. A kialakított eljárás elősegítette, hogy a megfelelő fűrészlapot és a megfelelő fűrészelési paramétereket válasszák ki az adott gránittípushoz csupán a petrográfiai elemzés és a mechanikai tulajdonságok vizsgálatának segítségével. Nem a keménységet, hanem a kvarc tartalmat vették alapul, így eredményül azt

kapták, hogy a fűrészselhetőség függ a kvarc tartalomtól, a kvarc szemcse méretétől, a szakítószilárdságtól, és a gránit koptató hatásától.

Lang és társai [21] hasonló eredményre jutottak. Ők a Verdalskalk külszíni kőfejtőből származó márványt vizsgálták. Két eltérő szemcsemérettel rendelkező mintát hasonlítottak össze. Eredményül azt kapták, hogy a magasabb kvarc tartalommal rendelkező mintának nagyobb a felületi keménysége.

Tovább elemezve a gránit kőzetek vágását, fontos megállapítanunk, hogy a fűrészlap kopása és az energiafogyasztás a két fő költség paraméter. I. S. Buyuksagis [22] a különböző vágási módokat elemezte a fűrészelési teljesítmény függvényében. A kísérlet során a fűrészselhetőség irányát vizsgálta, és azt tapasztalta, hogy a gránit felfelé vágása közben a fajlagos kopás sebessége és a fajlagos energiaértékek alacsonyabbak, mint a lefelé vágás esetén. Emellett többszörös regressziós analízist is végeztek annak érdekében, hogy megkapják melyik a legmeghatározóbb fizikai-mechanikai paraméter és melyik ásványcsoport befolyásolja leginkább a fajlagos kopás sebességét és a fajlagos energiát. A statisztikai elemzés a hajlító szilárdságot jelölte meg, mint mechanikai paramétert és a plagioklászokat, mint meghatározó kőzetcsoporthoz. Ez a megállapítás szemben áll X. Wei és társai [20] korábban már ismerttetett cikkének eredményeivel. Ők ugyanis a kvarc ásványt tették felelőssé a szerszám kopása miatt.

Nem csak a gránit vágását, hanem a csiszolását is vizsgálták. A csiszolószerszám gyártónak gyakran kell szembenéznie azzal a kihívással, hogy a különböző gránitok felületének megmunkálásához nehéz kiválasztani a megfelelő csiszolóanyagot. J. Xie és társa [23] azt vizsgálta, hogyan hat a gránit mikrokeménység-eloszlása a fűrészelés hatékonyságára és a szerszám élettartalmára. A kísérlet során 10 db különböző grániton végeztek méréseket, hogy megvizsgálják a mikrokeménységi paraméterek hatását a csiszolóanyag megmunkálási hatékonyságára. Megállapították, hogy a csiszoló megmunkálási hatékonyság növekszik, ha csökken a tömegérték és a gránit mikrokeménységének értéke. Emellett a gránit mikrokeménysége jól korrelál a csiszolási megmunkálás hatékonyságával. Ezen felül arra a következtetésre jutottak még, hogy a polírozott felületi fényesség nem korrelál a mikrokeménységi paraméterekkel csak az optikai tulajdonságokkal.

López és társai [24] két különböző textúrájú grániton vizsgálták a négy elterjedt felületkezelési módszer (polírozás, csiszolás, tárcsás vágás és perselykalapálás) hatását annak tulajdonságaira. Vizsgálták az egyes felületkezeléseknek alávetett felületek érdességét, színét



és reflexiós képességét, és meghatározták a paraméterek közötti összefüggéseket. Az eredmények azt mutatták, hogy a tárcsás vágás és polírozás által generált érdesség magasabb a Vilachánból származó gránit esetében, mint a Rosa Porriñóban talált esetén, ami azt mutatja, hogy minél finomabb a szemcseméret, annál nagyobb az érdesség. Szerintük a fényességi paraméter szintén a felület érdességétől függ, azonban a többi színnek a paraméterét nem befolyásolja. Ezen állítást cáfolja az a kutatás, melyben azt publikálták, hogy nem csak a felület érdességének növekedése által romlik a kőzet fényessége, hanem az alkotó ásványok színe is nagyban befolyásolja azt [25]. Alacsony érdességérték esetén elmondható, hogy a fényesség és az érdesség fordítottan arányos egymással. Emellett a visszaverődési képesség közvetlenül összefügg az érdességgel, minél érdesebb a felület annál nagyobb a reflexiós intenzitás. A két érdességfüggő paraméter, a fényesség és a visszaverődési képesség egymással is összefüggést mutat.

Fontos befolyásoló körülmény a nedves és a száraz közeg. Ez is nagyban meghatározza a kopás mértékét, így hatással van a felületi érdesség kialakítására [26]. Li és kutatótársai [27] az őrlés és a felületi érdesség között igyekeztek párhuzamot vonni. A vizsgálatok során megállapították, hogy az őrlőközeg befolyásolhatja az ásványok felületi érdességét, ezáltal befolyásolja felületük nedvesíthetőségét, és ennek következtében a flotációs teljesítményt. Azonban bárhol is jelennek meg, elhanyagolhatatlan a megjelenésük, felületi minőségük. A felületi érdesség ismerete nem csak a felhasználás szempontjából fontos paraméter, hanem a megmunkálás szempontjából is. Amikor a megmunkálás után a felület polírozására kerül sor, fontos információ, hogy mennyi anyag eltávolításával lehet megfelelő simaságú felületet elérni. Rogerio Pinto Ribeiro és társa [28] ezzel a problémával foglalkozott. Szerintük az érdességet elsősorban a kőzet, a fűrészelési sebesség és az üzemi körülmények befolyásolják. Kutatásukban arra világítottak rá, hogy az ásványi összetétel és a kőzet textúrája az elsődleges szempont a táblák felületi érdességének mértékében.

Számos kutató foglalkozott kőzetek felületi érdességével. Zhili Li és társai a malachit ásványt vizsgálták részletesebben [29]. A kőzettömegek mechanikai viselkedése összetett, részben a bennük lévő folytonossági zavarok miatt. A folytonossági zavarok geometriai paraméterei közül köztudottan jelentős szerepe van a felületi érdességnek, amely a kőzetfelület domborzati jellemzőit foglalja magában [30].

Lai és társai [31] a cikkükben az érdesség három különböző mértékét vizsgálták meg a felületek görbületeként ismert geometriai tulajdonsága alapján. Az összes javasolt érdesség

mértékét szinkódolt kijelzők segítségével jelenítették meg, amelyek lehetővé teszik az intuitív értelmezést. Más kutatók, mint Ghafouri és csapata [32] azért foglalkoztak a kőzetek felületi érdességével, hogy a radar jelének visszaszórása által vizsgálják a különböző geológiai morfológiákat. A kőzetkötésnél a felület érdessége kiemelkedően fontos mechanikai és hidraulikus tulajdonságai szempontjából. Korábban már többen is foglalkoztak ezzel a kérdéssel, de az általuk modellezett módszerek 2D modellek voltak. Jiang és társai [33] ezt 3D-ben modellezték le, amelyek új megközelítést adtak a felületi érdesség és a kőzetek közötti kötés mechanikai viselkedésében.

A kőzetek építészeti felhasználása során fontos szerepet játszik a festékek és a különböző vékony fólia rétegek felvitele. Li és társai [34] arra a megállapításra jutottak, hogy mind a kőzetek szilárdsága, mind pedig azok felületi érdessége nagy szerepet játszik a vékony fóliák tapadási szilárdságában. A kőzet szilárdságának növekedésével a tapadási szilárdság is jelentősen növekszik, azonban a felületi érdesség növekedése mellett a tapadási szilárdság csak enyhén növekszik.

A jó felületi minőség fenntartása általában többlet gyártási költséggel vagy a termelékenység csökkenésével jár. Julie Z. Zhang és társai [35] a Taguchi tervezést alkalmazták. A kísérlet során az előtolási sebességet, az orsó fordulatszámát és a fogásmélységet szabályozták, valamint az üzemi kamra hőmérsékletét és a különböző szerszámbetéteket, amelyek befolyásolták a szerszám állapotát és a méretváltozásait. A felület minőségének szempontjából az optimalizálás sikeres volt. A felületi érdesség a kőzetről készülő felvétel szempontjából is meghatározó. Ezzel foglalkoztak Osterloo és munkatársai [36], akik vizsgálták a felületi érdesség hatását a kontrasztra. Eredményeik azt mutatták, hogy a spektrális kontraszt az érdességgel változik. Melvin Diaz és kutatótársai [37] az ásványi illesztések felületi érdességét vizsgálták a 4,2 [km] mélységben található kőzetek esetén. Azt tapasztalták, hogy a kőzetek minimális és maximális érdesség értéke 1,16 és 1,54 között változott, és jelentős anizotrópiát mutatott. A felületi érdesség a termék meghatározó minősége és nagyban befolyásolja a gyártás költségeit. A felületek érdességének alakulásában fontos szerepet játszik az anizotrópia. Anizotróp anyagok esetében nagy befolyásoló hatással bír a megmunkálás iránya, míg izotróp anyagokra csak kis mértékben hat [38]. Gokhan Aydin és társai cikkükben [39] egy kísérleti tanulmányt mutattak be a gyémánt fűrészlapokkal megmunkált gránitok felületi érdességéről. Modelleket dolgoztak ki mind az üzemi paraméter változók, mind pedig a kőzettelajdonságok függvényében. Az eredmények azt mutatták, hogy

a felületi érdesség a kerületi sebesség, az előtolási sebesség és a vágási mélység növekedésével nő, míg a hűtőfolyadék áramlási sebességének növekedésével csökken. Emellett megállapították, hogy a kőzet mechanikai tulajdonságai helyett az ásványtani tulajdonságok határozzák meg a felületi érdesség értékét, amely szerint a kőzet átlagos szemcsemérete az elsődleges szempont a felület érdességének alakulásában.

Fontos információkat kaphatunk, ha nem csak a természetes kőzetek felületi megmunkálását vizsgáljuk, hanem a megmunkálás során alkalmazott eszközöket is. Például a felület kialakításában nagy szerepe van a csiszoló anyag típusának és méretének egyaránt. Az első szakaszban nagyobb, majd később kisebb  $Al_2O_3$  szemcséket használnak, ezzel csökkentve a felületi érdességet. Ezen módszer alkalmazásával hoztak létre egy többlépcsős polírozási módszert, amely optikai alkatrészek felületi érdességének csökkentésére szolgál [40]. K. G. Anbarasu és társai [41] is felületi érdességgel foglalkoztak, ők azonban az üveg felületképződését vizsgálták. A csiszoló szuszpenziós polírozási eljárás nem tartozik a hagyományos polírozási eljárások közé. A polírozási eljárás során a felületi érdesség telítettségét többek között a polírozási idő változtatásakor figyelték meg. A telítettségi határ elérése után a felületi érdesség további csökkentését úgy tudják elérni, hogy a feldolgozási feltételeket és a csiszolószemcsék méretét módosították. Sima felületet állítottak elő iszap polírozással. A megfelelő simaságú felület eléréséhez többlépcsős polírozást alkalmaztak. A vizsgálat során a polírozás szögét, a fúvóka mozgási sebességét, a csiszolószemcsé méretét és típusát megváltoztatták a polírozás első szakasza után. Így először nagyméretű  $Al_2O_3$  szemcséket használtak, majd csökkentették a szemcsék méretét és kisméretű  $Al_2O_3$  szemcsékkel végezték a felületi érdesség további csökkentését. Wang és társai is az üveggel foglalkoztak. Az üvegek csiszolása során  $GO$  (graphene oxid) és  $SiO_2$  (silica) hibrid csiszolóanyagot használtak. Az eredmények azt mutatták, hogy kevesebb anyagot kellett eltávolítani és simább felületet lehetett kialakítani, mint amikor az alkotó anyagokat külön-külön alkalmazták [42].

M. S. Bobji és társai [43] a keménységmérés során egy ismert geometriát nyomtak a kőzet felületébe. Az eredményt a felületi érdességből és az ásványok eltérő összetételéből adódó szórás terhelte. Az érdes felület miatti szórás nagyobb benyomódási terhelés esetén csökkent. Ennek ellenére a kutatók a numerikus szimuláció eredményeként azt kapták, hogy ha a felületi érdességből adódó szórást az előírt határon belül akarják tartani, akkor keményebb kőzetek esetén nagyobb terhelést kell alkalmazni. Nem csak Bobji, hanem N. Sánchez Delgado és

társai [44] is foglalkoztak a kőzet keménységével. Ők a Pink Porrino gránitot vizsgálták, és megállapították, hogy a megmunkálást, jelen esetben a fűrészelést, elsősorban nem a kvarc tartalom, hanem a gránit keménysége befolyásolja, mivel a keménység a teljes mintára jellemző tulajdonság, amit felhasználva pontosabb eredményt kaphatnak. Tehát az anyag keménységének enyhe növekedése a fűrészelési sebesség jelentős növekedését eredményezte. A keménységet azonban befolyásolta a szemcseméret és a repedések jelenléte.

Wen-Ling Tian és társai [45] szintén fontosnak tartották a repedések hatását, így azok megindulásának és egyesülésének viselkedését elemezték. Két nem egymásba eső repedést vizsgáltak. Arra a következtetésre jutottak, hogy a kötőszög és a szemcseméret befolyásolhatja az előrepesztett gránit feszültség-torzulás görbáját.  $60^\circ$  és  $150^\circ$  közötti kötőszög esetén a szilárdság és a deformáció is növekszik. Eltérő szögekben indulnak meg a szárnyrepedések durva, illetve finomszemcsés gránitok esetében. Finomszemcsés esetben könnyen összeér, míg durvaszemcsés esetben nem jellemző. Megállapították továbbá, hogyha a kötőszög változatlan marad, ezzel szemben a főfeszültség szöge és a repedés nő, akkor a szemcseméret csökken. Valamint további kutatási eredményük, hogy a durvaszemcsés gránitban a repedések nehezebben indulnak meg, mint a finomszemcsés esetben. Li és kutató társai [46] megállapították, hogy az ütközés irányában megjelenő repedések felelősek a törés kialakulásáért. Zhao és munkatársai [47] a repedés és a törés közötti kapcsolatot vizsgálták. Ennek eredményeként azt találták, hogy a repedésképződés feszültségi küszöbe a tönkremeneteli feszültség 53%-a.

A repedések megindulását Dashnor Hoxha és társai [48] is kutatták. Azonos mintákat azonos nyomáson és hőmérsékleten, de eltérő stresszszinteken teszteltek. A vékony mintákat optikai mikroszkóppal vizsgálták és képként rögzítették, hogy tanulmányozni tudják a repedéshálózat fejlődését. Eredményeikből kitűnt, hogy a repedés megjelenése általában új repedésmagnak tulajdonítható és nem a régiek növekedésének, szélesedésének, valamint az új repedések gyakran összefutnak. Li és kutatótársai [49] a szemcsealapú véges-diszkrét elemes módszerrel vizsgálták a repedési folyamatokat, a repedések terjedését, a keletkezését és bezáródását befolyásoló tényezőket. Eredményeik alapján arra következtettek, hogy a repedések keletkezését befolyásolja a kőzet magasság-szélesség arány változása. A terhelés sebességének növelése során a mikrorepedések száma is növekszik. Ezen kívül Yan-Hua Huang és társai is [50] kutatták a repedések megjelenését. A kőzettömb üregeinek geometriája és

orientációja jelentősen befolyásolja a tönkremeneteli mechanizmust és a repedések terjedését. Kísérleti vizsgálatot végeztek ovális üreget tartalmazó homokkő mintákon. Az érzékeny paraméterek közé tartozik a rövid tengely (b) és a hosszú tengely (a) aránya. Ők a kőzetekben lévő üregek geometriáját a rövid (b) és hosszú oldal (a) arányát (b:a) vizsgálták. A b:a aránya 1/4-től 1/1-ig változott, így a keresztmetszeti üreg alakja ovális alakból teljesen kör alakú nyílássá változott. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy az üreget tartalmazó minták feszültség-nyúlás görbéi többszörös feszültségcsökkenést mutattak a csúcshárdság előtt. A b:a arány növekedésével az egytengelyű nyomószilárdság, a repedést kiváltó feszültség és az üregminták csúcsterhelése mind lineárisan csökkent. Ezáltal nem csak az üreges kőzet mechanikai tönkremenetelét ismerhettük meg, hanem a földalatti alagút vagy útstabilitáshoz is információval szolgált. A repedések feltárása fontos szempont az utak és egyéb közlekedési vonalak kialakításában. A repedések feltárása során az esetleges földcsuszamlásokról is előrejelzést kaphatunk. Yoshihara és társai [51] ennek feltárásához elektromos ellenállást alkalmaztak, míg da Silva és kutatócsapata [52] GPR-t (Ground Penetration Radar – földbehatoló radar) használtak.

A repedések keletkezését más perspektívából vizsgálták Wang és társai [53]. Csak nagyon kevés tanulmány foglalkozik a kőzetek termomechanikai tulajdonságaival. A kutatók a nagy sebességű melegítésre összpontosítottak, majd a gránit mintákat lassan lehűtötték. 400 [°C] és 800 [°C] hőmérsékletre való felfűtést 200 [°C/min], illetve 300 [°C/min] fűtési sebességgel érték el. Az eredmények azt mutatták, hogy a magas hőmérséklet által keletkezett repedések a hűtés során fokozatosan bezáródnak a termikus anyagzsugorodás miatt. Emellett a 800 [°C]-ról gyorsan lehűtött mintadaraboknak nagyobb volt az egytengelyű nyomószilárdsága, mint a lassan hűtött társaiké. Ez azt jelezte, hogy a kontrakciós hatás intenzívebben játszódik gyors hűtés esetén, és ez befolyással bír a kőzet mechanikai tulajdonságaira. Yuanfeng Jiang és kutatótársai [54] a gránit mechanikai tulajdonságait és fizikai paramétereit vizsgálta magas hőmérséklet terhelés mellett. Eredményei azt mutatták, hogy a magas hőmérséklet nagy hatással van a gránit alkotó ásványainak változására, a biotit nagy mértékben redukálódik, a gránit törési szilárdsága csökken. Az építészetben mind kültéri, mind beltéri elemek alapanyagaként is felhasználják. Ezért fontos a kőzetek tulajdonságainak vizsgálata eltérő nyomáson és hőmérsékleteken [55]. A külső hatás következtében repedések indulnak meg; a régiek csak kis mértékben növekednek, míg a felületen teljesen új repedések indulnak meg. Sun és Hu [56] szerint is a gránit tulajdonságai jelentősen megváltoznak a hőmérséklet

hatására, a felületi érdesség és a repedések jelentős növekedést mutatnak 400 [°C] és 600 [°C] között. A nagy hőmérsékletváltozások a kőzet fizikai és mechanikai tulajdonságainak romlását is okozhatják. Zhang és társai [57] a gránit mintákat 25 [°C] és 900 [°C] közötti értékre melegítették, majd kétféle módon hűtötték. Az egyik esetben gyorsan hűtötték hidegvizes módszerrel, a másik esetben pedig lassan lépcsőről lépésre. Az kísérletek eredményeként megállapították, hogy a hőkezelés a porozitás növekedését, a rugalmassági modulus és a nyomószilárdság változását okozhatta, de a mechanikai tulajdonságok változását egyértelműen befolyásolta a hőkezelési eljárás.

A másik kutatás a hősokknak kitett gránit fizikai és mechanikai tulajdonságait vizsgálta. Pai és társainak [58] kutatási eredményei azt mutatták, hogy az első hősokk után radikálisan romlanak a gránit fizikai és mechanikai tulajdonságai. Amikor a gránit a tizedik hősokkon is túl van, a romlási folyamat lelassul és a gránit hővezető képessége csökken. Emellett a szilárdsági értékek romlottak, de a rugalmassági jellemzők javultak.

Az aprítási folyamatok szimulálása az egyik legösszetettebb feladat az ásványt feldolgozó kutatásokban. Ehhez a diszkrét elemes módszer ígéretes megközelítésnek tűnt. Ennek a folyamatnak a szimulálásán dolgoztak Michael Klichowicz és társai [59]. Egy új kísérletben vésővel feszítették szét, fokozatosan növekvő nyomóterhelés mellett a hornyolt gránit mintákat, miközben folyamatosan mérték az erő-elmozdulás értékét. A spontán repedésterjedés minden pillanatát nagy sebességű kamera figyelte. Ezt követően értékelték a repedés tényleges útvonalát, terjedési viselkedését és az energia bevitelt, hogy egy pontosabb szemcseméret-szintű diszkrételemes (DEM) szimulációt hozzanak létre. Eredményeik azt mutatták, hogy az új töréstezt alkalmas az ásványi törésfolyamatok kétdimenziós DEM szimulációjának validálására. Azonban azt is bebizonyították, hogy az összetett folyamatok egyszerű modellekkel is szimulálhatók.

Han és társai [60] a törések környezetében lévő károsodási zónákat vizsgálták. A gránit mintákat ciklikus húzófeszültségnek tették ki, egészen a repedések megjelenéséig. Azt a következtetést tudták levonni, hogy a húzó alakváltozás hatására az ásványok közötti kötés nem lineáris mechanikai viselkedést mutat. A Young-modulus fokozatos csökkenése volt látható a húzófeszültség növekedésével. Minden terhelési ciklus után a kőzet mintában maradt némi helyrehozhatatlan károsodás.

Hartlieb és társai [61] a mikrohullám besugárzás hatását vizsgálták a különböző kőzettípusokra. A vizsgálat során kis teljesítményű (3,2 [kW]) mikrohullámmal sugározták be a

felületeket. A kutatás célja az volt, hogy megfigyelje, mely kőzetek reagálnak jól a módszerre, kőzetdarabolás és aprítás céljából. Az eredmények azt mutatták, hogy a mikrohullámú besugárzásra adott reakció nagyban függ a kőzet kémiai összetételétől és víztartalmától. Az alacsony mikrohullám abszorpciójú kőzetek (pl. gránit és homokkő) lassan melegszenek fel, és nem mutatnak erős fizikai változásokat, míg a magas mikrohullám abszorpciójú kőzetek (bazalt) gyorsan felmelegszenek, ami jelentős fizikai változásokhoz vezet. A víz jelenléte akár a kőzet porózus térfogatában, akár az ásványi szerkezetben (pl. agyagásványok) a keletkező gőznyomás miatt fokozza az aprózódó hatást. Hasonló kutatást végeztek Qiang Li és társai [62]. A mikrohullámú sütőben való melegítés hatására könnyebben lehetett a kemény kőzeteket összetörni, kevesebb energiát igényelt, valamint kisebb felületi benyomódás hatására indult meg a darabolódás. Guogand Bai és csapatának [63] eredményei azt mutatták, hogy a mikrohullámú sütő hatására 35%-kal csökkent a törési szívósság és lerövidült a törési tönkremenetelhez szükséges idő is. Megmérték egyes ásványok törési szívósságát és felületi energiáit is [64]. M. H. B. Nasser és társai [65] 5 gránit minta esetén vizsgálták a törési szívósságot. Vizsgálataik megerősítették azt az elképzelést, miszerint a törés sűrűsége és azok hossza hozzájárul a szívósság értékének változásához. Eredményeik jó összefüggést mutattak a mikrotörések sűrűsége és hossza, valamint a szilárdság között. A nagy mikrotörések sűrűségének és hosszúságának kombinációja az egyetlen paraméter a törési szívósság értékének csökkentésében.

Aliakbar Golshani és társai [66] egy mikromechanikán alapuló folytonos károsodási modellt dolgoztak ki a kőzetek rideg tönkremenetelére, hogy számszerűsíteni tudják a nyomás hatására létrejövő makroléptékű mechanikai reakciókat (pl. szilárdság, rugalmatlan deformáció). Triaxiális nyomás tesztet végeztek, és arra a következtetésre jutottak, hogy a 10 [MPa] alatti nyomás esetén csak akkor fordul elő hiba, ha a mikrorepedések sűrűsége elég nagy.

R. Prikryl [67] elsősorban nem a keménységgel, hanem a kőzetek szilárdságával foglalkozott. A kőzetszilárdság kísérleti vizsgálata figyelemre méltó mechanikai eltéréseket tárt fel. A vizsgálat során a száraz kőzetpróbatesteket állandó feszültségi értékkel terhelte. A mikrostruktúrákat vékony metszetekben képanalízissel elemezte, ezzel lehetővé téve az egyes szemcsék méretének, alakjának, orientációjának és modális összetételének meghatározását. Megállapította, hogy a meghatározó szemcseméret a fő mikroszerkezeti tényező, amely szabályozza a szilárdság változását. Tehát a magmás kőzetek esetében (gránit) a

nyomószilárdság változása nagy mértékben függ a szemcse méretétől. A szilárdság növekszik, ha a szemcseméret csökken. Ugyanerre az eredményre jutott Tao Zhang és csapata [68], akik a szemcsearány növekedését vizsgálták és megállapították, hogy a növekedés következtében a transzgranulárisan érintkező szemcsék száma nő, ami a gránit nagyobb törési szilárdságát eredményezi.

Saidi és munkatársai [69] célja a gránit száraz polírozása során keletkező felületminőség, valamint a porszemcsék kibocsátásának optimalizálása volt. Az eredmények azt mutatják, hogy az orsó fordulatszáma és a polírozó szerszám előtolási sebessége jelentős hatással van a felület minőségére és a porszemcsék kibocsátására a száraz polírozási folyamat során. Körülbelül 1500 [ford./perc] orsó fordulatszám és 17 [mm/s] átlagos előtolás kiválasztása jó kompromisszum volt a gránit száraz polírozásához, ami minimálisra csökkentette a porrészecskék kibocsátását, miközben jó felületi minőséget eredményezett. Ez a vizsgálat azért volt nagyon fontos, mert a gránit száraz polírozása során kibocsátott porszemcsék 2,5  $\mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű részecskék, amelyek belélegzés után könnyen elérik a tüdő alveoláris régióját, és súlyos sérüléseket okoznak. Egy másik tanulmányban Saidi és kutatótársai [70] kísérleti polírozási tesztek végeztek egy függőleges CNC megmunkáló központtal és adaptálható szerszámtartóval, amely szabályozta az érintkezési nyomást a vizsgálatok során. Különböző szemcseméretű gyémánt polírozó szerszámokat használtak. A vizsgált munkadarab két gránit volt, az egyik magas szilícium-dioxid tartalmú (fehér gránit), a másik alacsony szilícium-dioxid tartalmú (fekete gránit). A vizsgált kimeneti válaszok magukban foglalták a felületkezelést, az erőket, valamint a finom részecske kibocsátást és a diszperziót. A kísérleti eredmények egyrészt a felületi minőség, a porszemcsék kibocsátás és a vágóerők, másrészt a csiszolóanyag méretei és polírozás körülményei közötti összefüggés megállapításához vezettek. Megállapítást nyert, hogy a polírozó szerszám szemcsemérete nemcsak a gránit felületi minőségét szabályozza, hanem a finom részecskék kibocsátást és a forgácseltávolító mechanizmust is. Saidiék [71] tovább boncolgatva a témát rávilágítottak a szilícium-dioxid porok való kitétségek komoly kihívásaira. Az egészségügyi előírások egyre szigorúbbak a kvarc por terheléssel szemben. Polírozás során nem csak finom részecskék (FP-fine particle), hanem ultrafinom részecskék (UFP-ultrafine particle) is keletkeznek, ezek emisszióját és diszperzióját vizsgálták. Megállapították, hogy a dolgozók magas koncentrációjú FP-nak és UFP-nak vannak kitéve. Továbbá azt is megállapították, hogy a keletkező porszemcsék egyenesen szennyezik a munkaterületet.



A gránit kőzet sokak érdeklődését felkeltette. Voltak, akik a megmunkálhatóság és építészeti alkalmazása helyett a kőzet természetes megjelenésének stabilitását vizsgálták. A gránitok látványos felületalkotó kőzetek, azonban számos veszélyt rejthetnek magukban esetleges instabilitásuk miatt. I. Pérez-Rey és társai [72] a Galíciában található gránit sziklák stabilitását vizsgálták. A sziklákat jelen körülmények között megfelelőnek találták, azonban annyira nem stabilnak, hogy egy esetleges földrengés ki ne mozdítaná azokat stabil helyzetükből. Ezek a mérési eredmények azért fontosak, mert pl. alagút vagy útépités során számolni kell a gránit kőzetek megmunkálhatóságával. A megmunkálás során megjelenő repedések komoly problémát okozhatnak a kivitelezések során. A természetben található kőzetek más környezeti hatásoknak is ki vannak téve. Egyik leggyakoribb hatás a csapadék okozta erózió, amelynek következtében a felület természetes érdekeséget kap. A kutatások [73] azt mutatták, hogy minél meredekebb lejtőn helyezkedik el a kőzet, annál érdekesebb lesz a felülete.

A kutatások nem csak a kőzetek megmunkálására, hanem az alkotók felhasználására is irányultak. A gránit kőzetben is megtalálható földpát értékes nyersanyag, az iparban számos helyen felhasználják. A földkéregben a legnagyobb mennyiségben előforduló ásvány, de leggyakrabban más alkotókkal együtt található. A tiszta földpát kinyerése bonyolult feladat, valamint a folyssavval (HF - hidrogén-fluorid) történő flotációja súlyos környezeti és egészségügyi károkat okozhat. A földpátos ásványok átfogó alkalmazása kulcsfontosságúvá vált, valamint ezek újrahasznosítása, mivel a földpátos ásványok mennyisége csökkenő tendenciát mutat Ye Zhang és társai szerint [74].

Gránit mintákban gyakran előforduló ásvány a hematit. Zhang és kutatótársai [75] a hematit ( $Fe_2O_3$ ) és a sziderit ( $FeCO_3$ ) őrlési viselkedését vizsgálták. A kísérleti eredmények fényében arra a következtetésre jutottak, hogy a sziderit könnyebben reped, mint a hematit ugyanazon a stressz szinten. Az őrlésre nézve ez azt jelenti, hogy a hematit könnyen őrlhető, míg a sziderit elkenődik és rontja az őrlési eljárás határfokát. Ez a kutatás is jól rávilágított arra, hogy a gránit felületen elhelyezkedő hematitok megmunkálása megfelelő berendezést igényel.

A környezet szennyezés egyre nagyobb probléma jelenleg Földünkön. Ehhez hozzájárul a gránit hulladékok több millió tonnányi mennyisége, amelyet jelenleg még nem használnak fel. Erre a problémára kerestek megoldást Ostrowski és kutatótársai [76], akik a gránit hulladékot betonhoz keverték adalékanyagként. A durva adalékanyag morfológiája a friss betonkeverék

viselkedésére, valamint a megszilárdult beton alakváltozására és nyomószilárdságára jótékony hatással van, segít az öntömörödő nagy teljesítményű beton (SCHPC) hatékonyságának megteremtésében.

Jain és társai [77] szintén a betonhoz keverték a gránitport, azonban ők még üvegport is tettek bele. Eredményeik azt mutatták, hogy a 15% üvegport és 30% gránitport tartalmazó beton tartóssági tulajdonságai előnyösen változtak, a vízáteresztő képesség és a vízfelvétel javult, savhatás elleni reakciója sokkal jobb volt, mint az üveg és a gránitpor nélküli kontroll betonkeveréknek. Gupta és társai [78] szintén a gránit vágásából keletkező hulladék felhasználását tűzték ki célul. Ők cementhabarcsba keverték, ahol az adalékanyag 30-40%-át helyettesítették gránitporral. Az összes habarcskeverék megmunkálhatóságát, nyomószilárdságát, szakítószilárdságát, tapadási szilárdságát, vízfelvételét, száradási zsugorodást és ultrahangos impulzussebességet, valamint dinamikus rugalmassági modulusát tanulmányozták. A nyomószilárdság, a szakítószilárdság és a tapadószilárdság egyaránt nőtt a kontrollhabarcséhoz képest. A kevert habarcsok száradási zsugorodása hasonló volt a kontroll habarcséhoz, azonban a térfogata növekedett. Mérések igazolták, hogy a gránit porral kevert habarcsok jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek, mint a hagyományosak, ezért biztonságosan felhasználhatók.

Más kutatók a cement gránit porral történő részleges helyettesítését vizsgálták. Ghorbaniék [79] eredményei azt mutatták, hogy 20%-os cementpótlóként már jelentősen befolyásolja a betonkeverék mechanikai tulajdonságait. Chajec és társai [80] a kutatásukban a gránitpornak a környezetbarát cementkötésű fedőrétegek tapadási tulajdonságaira gyakorolt hatására összpontosítottak. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy gránitpor hozzáadása a fedőrétegekhez lehetővé teszi a részecskék elrendezésének optimalizálását a keverékben. Ennek eredményeként tartósabb, ellenállóbb és fenntarthatóbb cementkötésű fedőrétegek állíthatók elő.

A gránitbányászat során keletkező hulladékok környezeti és egészségügyi veszélyt is jelentenek. Ezt a nagy mennyiségű hulladékot cementekben használják fel, amelyeknek vizsgálták a fizikai-mechanikai tulajdonságait. Az eredmények azt mutatták, hogy a gránitiszappal készült cementek felhasználhatók az építőiparban [81].

A gránit hulladékok, amelyek a gránitok formára vágása közben keletkeznek, komoly egészségügyi kockázatot jelentenek, valamint a hulladék lerakók élettartamát rövidítik meg. Emellett a homok ára az egekbe szökött, így elsősorban olyan területen használják Indiában,

ahol finom homokra lenne szükség [82]. Ahmadi [83] és munkatársai a természetes kőfeldolgozó gyárak által termelt gránithulladék-habbeton gyártásban való újrahasznosításának megvalósíthatóságát vizsgálták. Az egyik mintához finom homokot, a másikhoz pedig gránit port adagoltak. Az eredmények azt mutatták, hogy a gránithulladékot (FCGW) használó habbeton nyomó- és hajlítószilárdsága 8%-kal, illetve 10%-kal volt magasabb, mint a finom homokot (FCS) tartalmazó habbetoné. Továbbá az eredmények azt mutatták, hogy a gránithulladék bevitelére nem befolyásolta a próbatestek hővezető képességét.

A beton mellett geopolimer beton (GPC) gyártását kezdték el, ahol szintén felhasználták a gránitpor hulladékot. Vizsgálták a geopolimer szilárdsági tulajdonságait, és arra az eredményre jutottak, hogy a gránit hulladékkal adalékolt geopolimer betonok nagyobb szilárdsággal rendelkeznek [84].

A gránitpor betonban történő felhasználása során a beton nyomószilárdsága nem változott, azonban a szakító szilárdságában komoly csökkenést okozott Sawekchai Tangaramvong és társai szerint [85]. Ezzel szemben Nayak és társai azt az eredményt publikálták, hogy a gránit, valamint a márványpor tartalmú beton fizikai-mechanikai tulajdonságai bizonyos mennyiségű gránitpor és márványpor használata mellett javultak. Másik pozitív hatása a hulladék porok felhasználásának, hogy csökkentik az építőanyagok költségeit [86]. Lilesh Gautam és kutatótársai szintén a gránitpor betonban történő felhasználását, újrahasznosítását vizsgálták. Ez a tanulmány a beton tulajdonságaira összpontosított, mint például a megmunkálhatóság, nyomószilárdság, hajlítószilárdság, szakítószilárdság, száradási zsugorodás. Megállapították, hogy csak a gránithulladék optimális százaléka mellett lehet megfelelő minőségű betont előállítani [87].

Az építőanyagok magas költsége az egyik fő probléma, a másik pedig a fogyatkozó alapanyag. Ennek kiküszöbölésére már téglák készítésénél is kísérleteztek gránitpor hozzáadásával [88], valamint szigetelő anyagok esetén is kísérletek folynak [89].

Az öntömörödő beton (SCC) gránithulladékkal történő adalékolását vizsgálták Lilesh Gautam és társai, és arra az eredményre jutottak, hogy 30%-ig javítja a beton minőségét [90]. Abhishek Jain és kutatótársai ugyanezt az értéket 40%-ban állapították meg [91]. T.Balasubramaniam és Stefie J.Stephen szintén a gránit és a hamu 0-40%-ig terjedő adalékolását vizsgálták. Eredményeik azt mutatták, hogy az adalékanyagok külön-külön

negatívan befolyásolják a szilárdsági paramétereket, de együttesen nem befolyásolják az öntömörödő beton tulajdonságait [92].

A gránitpor másik felhasználási területe a festékekbe történő belekeverés, amely javítja a festék tulajdonságait. Salgado és társai [93] a kísérleti eredmények alapján megállapították, hogy a festékek jobb fedőképességet mutattak a gránithulladék hozzáadásával. Ez az eredmény a gránithulladék azon tulajdonságaival magyarázható, amelyek elősegítették a keverékek szilárdanyag-tartalmának fokozatos növekedését.

A gránit magas ára miatt nem terjedt el a hétköznapi életben, azonban erre is találtak a kutatók megoldást. Olyan anyagot fejlesztettek ki, amely megjelenésében és tapintásában megegyezik a gránitéval, emellett önthető és edzhető is [94].

Az irodalomkutatás alapján elmondhatom, hogy a korábbiakban számos kutatást végeztek a gránit ásványi összetételének, keménységének, szemcse méretének, nagyságának és orientációjának területén, vizsgálták a repedések megjelenését és terjedését, a felületi érdességet a megmunkálási hőmérséklet függvényében, de ezek egyike sem terjed ki a felületi érdességgel kapcsolatos kutatásokra. Számos kutatás foglalkozik a gránit, illetve egyéb természetes kőzetek vágásával, és a vágási paraméterek változtatásával, de a vágószerszám kopását vizsgálták, a kialakult felület minőségét nem. Az irodalmi elemzések alapján kitűnik, hogy a kutatási területemhez tartozó szűk szegmens még feltáratlan.

Az általam megvizsgált felületek és kísérletek következtében kapott adatok és eredmények további kutatásra felhasználhatók, pl. egy előrebecslő rendszer alapját képezhetik, amely segíti a különböző összetételű gránitok megfelelő minőségének kialakítását vagy egy arányskála felállításához is információval szolgálhatnak.

### **3. KUTATÁSI CÉLOK**

Jelenleg nem találkozunk a szakirodalomban olyan kutatással, ahol a természetes kőzetek marása során kialakuló felületi érdességgel foglalkoznának. Néhány kutató az élkitöredezést vizsgálta már, azonban ők a felület minőségével és az azt befolyásoló tényezőkkel nem foglalkoztak. Ezek a tényezők a megmunkálás szempontjából számos érdekes kérdést vetnek fel, és hozzájárulnak a különböző felületek magas minőségű kialakításához.

#### **3.1 A KŐZETMEGMUNKÁLÁS NEHÉZSÉGEI**

A természetes kőzetek megmunkálására jelenleg nem találunk szabályszerű eljárásokat. Ugyan a megmunkáló szerszámokat gyártó cégek adnak javaslatokat, ajánlásokat, de ezek mellett az adatok mellett elengedhetetlen a megmunkáló berendezés mellett már régebb óta dolgozó, nagy tapasztalattal rendelkező munkatárs. Mivel a kőzetek nagy heterogenitást mutatnak, ezért jellemző, hogy más-más felület megmunkálása esetén más-más gépi beállítás szükséges, így az eljárás nem automatizálható, a megmunkálás kapacitása nem, vagy csak kis mértékben növelhető. További hátránya az élő munkaigénynek, hogy a megfelelő paraméter kikísérletezéséhez értékes felületeket használnak el, amelyek gyakran a későbbiekben újra már nem megmunkálhatók.

#### **3.2 A KŐZETFELÜLET KIALAKÍTÁS NEHÉZSÉGEINEK LEHETSÉGES MEGOLDÁSA**

A megmunkálás során, a felületen, heterogén módon megjelenő ásványok mennyiségével és minőségével nem foglalkoztak. Céлом olyan paraméterek vizsgálata volt, amelyek befolyással lehetnek a felület érdességére, hatással vannak a megmunkálás minőségére. A kutatás során megvizsgáltam a különböző ásványok színét, keménységét, tömegszázalékos összetételét és a felületi érdességüket.

A fent leírt gyártási problémákra megoldás lehet, ha a megmunkálni kívánt gránit felületének egy kis mintadarabján különböző méréseket végzünk, amelyek jó közelítéssel adnak képet a teljes darabról. A minta eredményei alapján könnyebben lehet jó felületi minőséget kialakítani, könnyebben megállapíthatók a megmunkálási paraméterek, amelyek gazdaságosabbá és gyorsabbá teszik a gyártást.

## 4. AZ ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK, BERENDEZÉSEK

A különböző vizsgálatok során számos eszközt és berendezést használtam, amelyek mérési eredményeit kiértékeltem, elemeztem.

### 4.1 A MINTADARABOK FELÜLETALKÍTÁSA MARÁSSAL

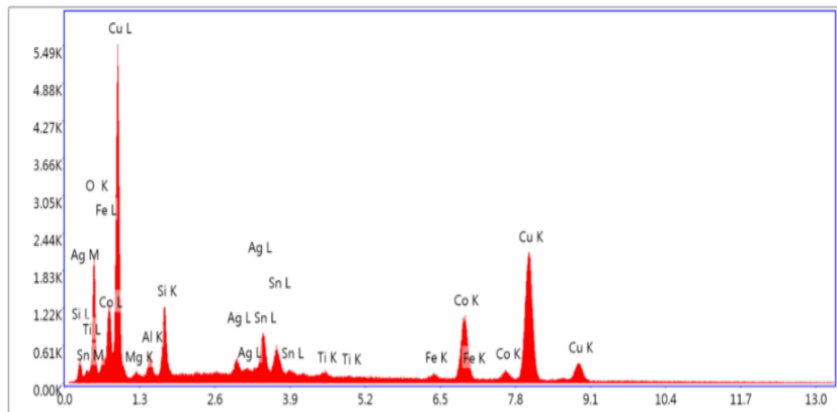
A kőzetek felületének kialakításában az első és egyik legfontosabb berendezés a CNC maró volt.

Az alkalmazott berendezés a Prussiani cég Golden Plus berendezése. Paramétereit tekintve össztömege 4850 [kg], 5750 [mm] hosszú, 3050 [mm] széles és 2250 [mm] magas [95] (1. ábra).



1. ábra Prussiani Golden Plus CNC megmunkáló központ [95]

A berendezés mozgástartománya X-irányban 3300 [mm], Y-irányban 1600 [mm], Z-irányban pedig 250 [mm]. Ezen tengelyek mentén a sebesség 40, 40 és 15 [m/min]. Az orsó fordulatszáma 0-10 000 [ford./min] között változtatható.



2. ábra 8 szegmensből álló gyémántmaró és annak összetétele

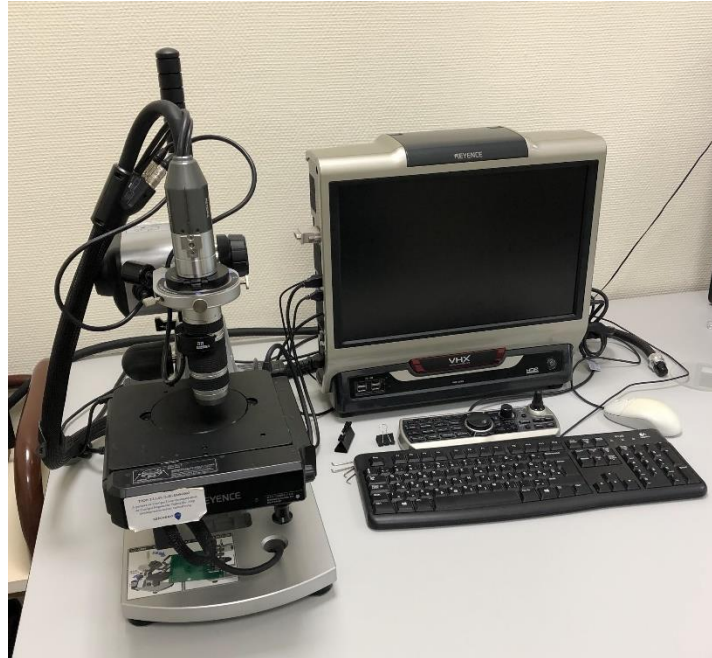
A mintadarabok felületét ugyanazzal a marófejjel munkálták meg (2. ábra (bal)). A marófej 8 szegmensből álló, gyémánt vágó, 23 [mm] átmérőjű és 40 [mm] hosszúságú szerszám, amely lehetővé teszi a gránit megfelelő gyorsaságú és minőségű vágását, marását. [96]. A marófej összetétele ipari titoknak számít, azonban a SEM (scanning electron microscope) mérések azt mutatták, hogy a fémmátrix, amelyben a gyémánt szemcsék ülnek olyan ötvözet, amely a réz mellett nagyobb mennyiségben tartalmaz kobaltot, ónt és ezüstöt. Emellett kisebb hányadban titán és vas is található benne (2. ábra (jobb)).

A gránit kőzetek megmunkálása komoly gépet igényel. Ezt a WOLDEM Kft. biztosította, ahol Gyurós István segítségével készültek el a munkadarabok. Az anyagleválasztási sebesség alsó és felső határait gazdaságossági szempontokat szem előtt tartva rögzítették, és ezen a tartományon belül határozták meg a további négy sebességet egyenlően elosztva. A megmunkálás során 0,8 [mm/fordulat] előtolási sebességet alkalmaztak 1 mm-es fogásmélység mellett és 6 különböző marási sebességet: 37,7 [m/min]; 75,4 [m/min]; 113,1 [m/min]; 150,8 [m/min]; 188,5 [m/min]; 226,2 [m/min]. A berendezés folyamatos vízűtéssel dolgozott a túlmelegedés és az egészségügyi előírásoknak (pl. szálló por okozta megbetegedés) való megfelelés miatt.

#### 4.2 AZ ÁSVÁNYOK ALAKJÁNAK ÉS SZÍNÉNEK VIZSGÁLATA

A minták morfológiájának vizsgálatához egy KEYENCE VHX 2000 típusú fénymikroszkópot használtam, amelynek felbontása 54 [MP] és 3CCD kamera rendszerrel van felszerelve. Nagy

előnye, hogy 2D és 3D képet is lehet készíteni, így a felület érdessége is mérhető. Hátrányt jelent, hogy az általa mért felületi érdesség vonal alapú, amely kevésbé pontos eredményt ad, mint a terület alapú (3. ábra).



3. ábra KEYENCE VHX 2000 típusú fénymikroszkóp



4. ábra KEYENCE VHX 2000 mikroszkópi felvétel



A vizsgálatok során az ultrafelbontású, extrém mélységélességű, háromdimenziós berendezésnek köszönhetően, hogy az ásványok felülete és színe, amint azt a 4. ábra is jól mutatja, pontosan meghatározható volt. A mérések sikerességét támogatta az is, hogy a berendezés munkaasztala finom mozgatót tett lehetővé.

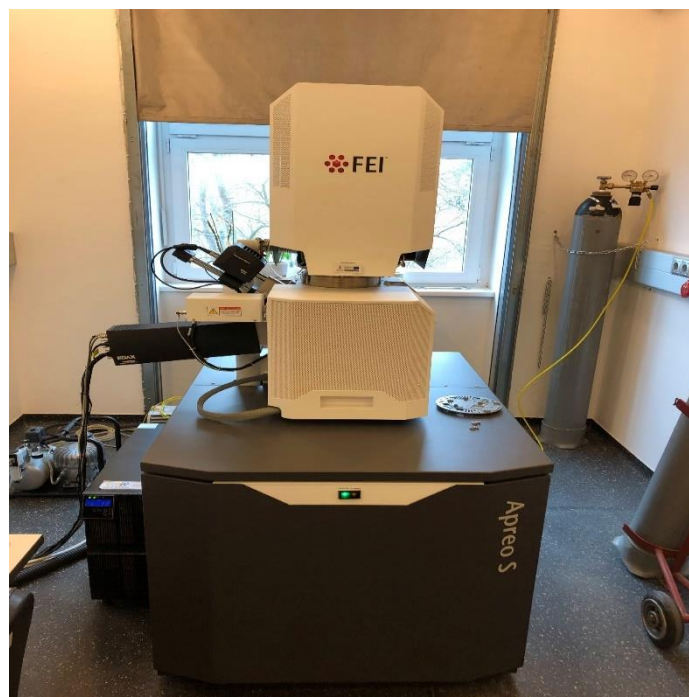
A mikroszkóppal megvizsgált felületekről fotók készültek, amelyek alapján a különböző ásványokat be lehetett azonosítani egyedi színük alapján.

### 4.3 ÁSVÁNYOK ÖSSZETÉTELÉNEK VIZSGÁLATA

Az ásványok összetételének meghatározása egy Fei/Thermofischer Apreo S pásztázó elektronmikroszkóppal (5. ábra) valósult meg.

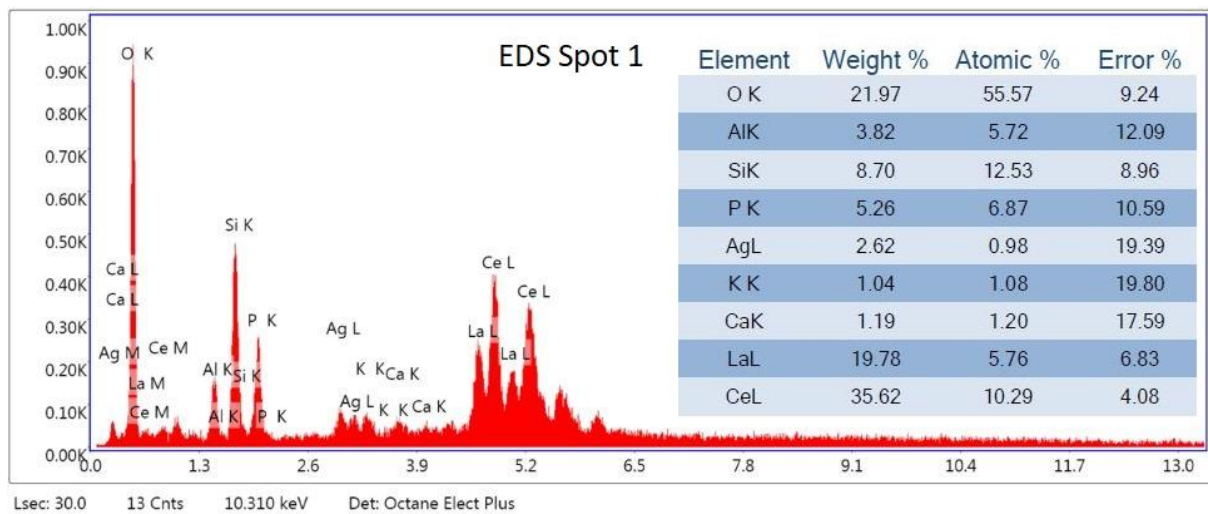
Nagy előnye, hogy a vizsgálat során a minta előkészítése egyszerű, többnyire felületkezelési eljárásokat nem igényel. Emellett a mérés során a felületről és annak összetételéről egyaránt információt nyújt.

A pásztázó elektronmikroszkóp elektronagyúja W-katóddal felszerelt, a méréseket pedig kis vákuumban ( $10^{-2}$  [Pa]) és nagy vákuumban ( $10^{-6}$  [Pa]) egyaránt képes elvégezni. [97].



5. ábra Fei/Thermofischer Apreo S pásztázó elektronmikroszkóp

Mivel a minták felülete már korábban megvizsgálásra került fénymikroszkóp segítségével, ezért jelen esetben a minták elemi összetételét határoztam meg kis vákuum mellett.



6. ábra A szoftver által kiértékelt grafikon és táblázat

Ahogy az a 6. ábra is jól mutatja, a kiértékelést követően a szoftver táblázatban foglalja össze az adott felületen megjelenő elemeket, amelyek ismeretében visszafejthetők - esetemben - az adott ásványok.

#### 4.4 GRÁNITALKOTÓ KOMPONENSEK VIZSGÁLATA

A minták ásványi összetételét egy Philips PW 3710 típusú röntgendiffraktométerrel vizsgáltam (7. ábra). A minta egyik végéről levágtam egy 5 cm széles darabot, amelyet achát mozsár segítségével 10 [µm] alatti szemcseméretűre porítottam. Bár a szakirodalmak a 25 [µm] alatti szemcseméretet javasolják, így az ennél kisebb szemcseméret feltehetően pontosabb eredményeket szolgáltat. Az elkészült port összekevertem, hogy megfelelően homogén legyen és az üveg mintatartót megtöltöttem vele.



7. ábra Philips PW 3710 röntgendiffraktométer

A felvételek  $\text{CuK}\alpha$  (50 [kV], 40 [mA]) sugárzás,  $0,02^\circ \cdot 2$  [ $\theta$ /s] sebesség ( $2\theta$  10–70° tartományban) és grafit monokromátor alkalmazása mellett valósultak meg. Az adatok gyűjtését és az eredmények kiértékelését az X'Pert Data Collector program végezte el. Az eredményekből fény derült arra, hogy a mintadarabok milyen ásványokat tartalmaznak.

#### 4.5 TERÜLET ALAPÚ FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSE

Korábban már a KEYENCE fénymikroszkóp esetében előkerült a felületi érdesség mérése. Ahhoz, hogy kellően pontos eredményeket kaphassak és azokból a megfelelő következtetéseket vonhassam le, egy olyan berendezést alkalmaztam, amely terület alapú felületi érdesség értéket ad. A mérés során a 8. ábrán látható, az Alicona által fejlesztett InfiniteFocus IFM G4 berendezést használtam. A berendezés a mintadarab felületén található felületi csúcsok és völgyek nagyságát határozza meg, és ebből értékeli ki a terület alapú érdességet.

A berendezés 6 különböző nagyítással rendelkező lencserendszerrel volt felszerelve. Nagyítási lehetőségek: 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x és 100x-os. Az általam alkalmazott lencse 5x nagyítású volt. A minimális mérhető érdesség értéke  $0,15 \mu\text{m}$ , a maximális mérhető terület

pedig 10 000 [mm<sup>2</sup>] volt. A felületet 17,5 [mm] távolságból vizsgáltam, miközben az X és Z tengelyek mentén finom mozgásokat biztosított a berendezés mozgatórendszere. A berendezés képes a vonal alapú felületi érdesség mérésére is, ilyenkor a mérési pontosság 0,3 [μm], míg a terület alapú érdességmérés esetén 0,15 [μm] ez az érték. Természetesen, mint ahogy a legtöbb berendezésnél, itt is, ahogy növekszik a mérések pontossága, úgy lesz egyre hosszabb a mérés ideje is.



*8. ábra InfiniteFocus IFM G4*

A mérési eredményeket a berendezés [μm]-ben adta meg. A gránit felületeken az egymás mellett elhelyezkedő ásványok mérését a megfelelő nagyításnak köszönhetően lehetett kivitelezni. A mikroszkópokkal ellátott műszerekkel a kinagyított felületen tudtam az általam kijelölt terület érdességét meghatározni. Ennek köszönhető, hogy kizárólag egy ásványról tudtam méréseket végezni.

#### 4.6 ELŐKÉSZÍTŐ ELJÁRÁS A KEMÉNYSÉG MÉRÉSÉHEZ

Ahogy azt az irodalomkutatási részben is látni lehetett, a felületi keménység mérésekor a felületi érdesség nagy mértékben befolyásolta az eredmény pontosságát. Ahhoz, hogy keménységmérés esetén minél kisebb legyen az eredmények szórása, annál simább felületet kell kialakítani. A pontos eredmények elérésnek érdekében a mintákat a mikrokeménység mérése előtt felpolíroztam Struers DP-U2 félautomata csiszológéppel (9. ábra), hogy a mérés minél kevesebb hibával terhelt legyen.



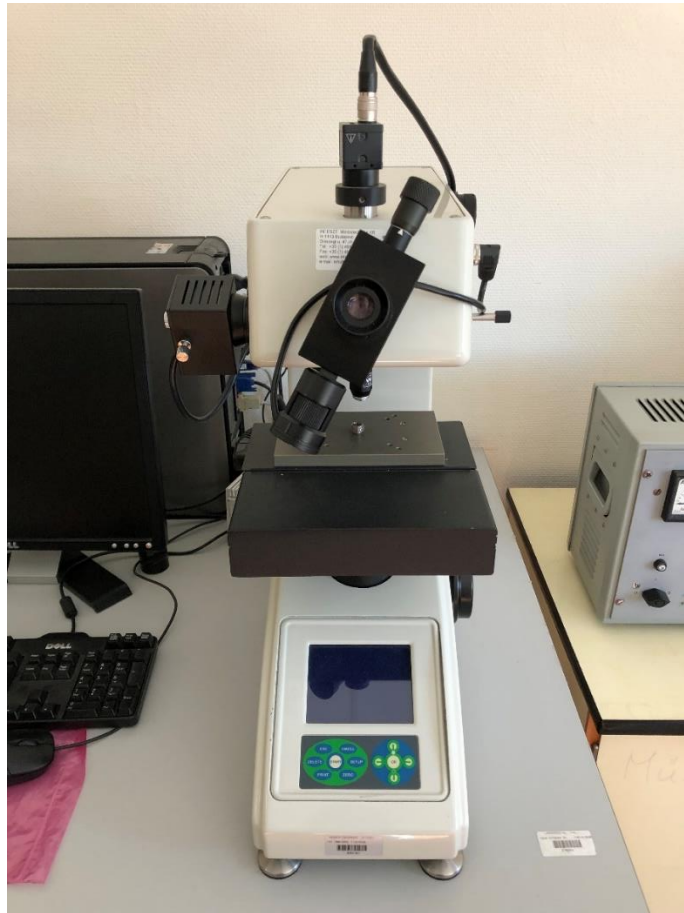
9. ábra Struers DP-U2 félautomata csiszológép

A vizsgálathoz szükséges mintadarab végső kialakításához polírozás során polírozóvásznot alkalmaztam, amelynek a felülete egy 1 [μm] szemcsenagyságú monokristályos gyémánt szuszpenzióval volt bevonva. A mintákat a csiszolás során folyamatosan forgattam, hogy egyenletes felületet érjek el.

#### **4.7 GRÁNIT FELÜLETÉNEK MIKROKEMÉNYSÉG MÉRÉSE**

A mintákon Vickers-féle mikrokeménység mérést végeztem egy 136°-os lapszögű négyzetes gyémánt gúlával a mérési előírásoknak megfelelően. A méréseket a 10. ábrán is látható WOLPERT W Group 402MVD típusú keménységmérő berendezésen végeztem. A Brinell-keménységmérés hibáját kiküszöböli, így pontosabb eredményt ad. A gyémánt gúlának köszönhetően a legkeményebb anyagokon is lehetőség nyílik mérések elvégzésére. Emellett bevett keménység vizsgálati módszer kerámiák esetében, így természetes kőzetek esetén is alkalmazható. A berendezés 50 [kp] terhelő erővel nyomta a felületbe a gúlát és a korábban már ismertett polírozási eljárásnak köszönhetően a mért felület max. 1 [μm] érdességű volt. A mérések szobahőmérsékleten, azaz 20 [°C]-on készültek.





10. ábra WOLPERT W Group 402MVD típusú keménységmérő berendezés

A vizsgálati eredményeket a gép automatikusan kiértékelte, amelyet a kijelzőről manuálisan le lehetett jegyezni. A mérési eredmények a berendezés [MPa]-ban adta meg.

A berendezés paraméterei az alábbi 1. számú táblázatban láthatók.

1. táblázat A Wolpert W Group keménységmérő berendezés paraméterei

Szemlencse nagyítás	10x
Felbontás	0.1 [ $\mu\text{m}$ ]
Objektívek	10x, 20x, 40x, 50x, 60x
Teljes nagyítás	400x (méréshez) 100x (megfigyeléshez)
Mérési tartomány	200 [ $\mu\text{m}$ ]
Keménységi érték	5 digit
Maximális minta magasság	85 [mm]
Üzemi hőmérséklet	10 – 38 [ $^{\circ}\text{C}$ ] (50 – 100 [F])

## 5. A MINTÁK KIVÁLASZTÁSÁNAK FOLYAMATA

A kísérletekhez felhasznált gránitok mind színben (rózsaszín, sárgás, narancs, szürkés fekete-fehér), szemcseméretében (finom, közepes és durva), mind összetételben eltértek egymástól. A 4 mintadarab mindegyike Brazíliából származott (11.ábra).

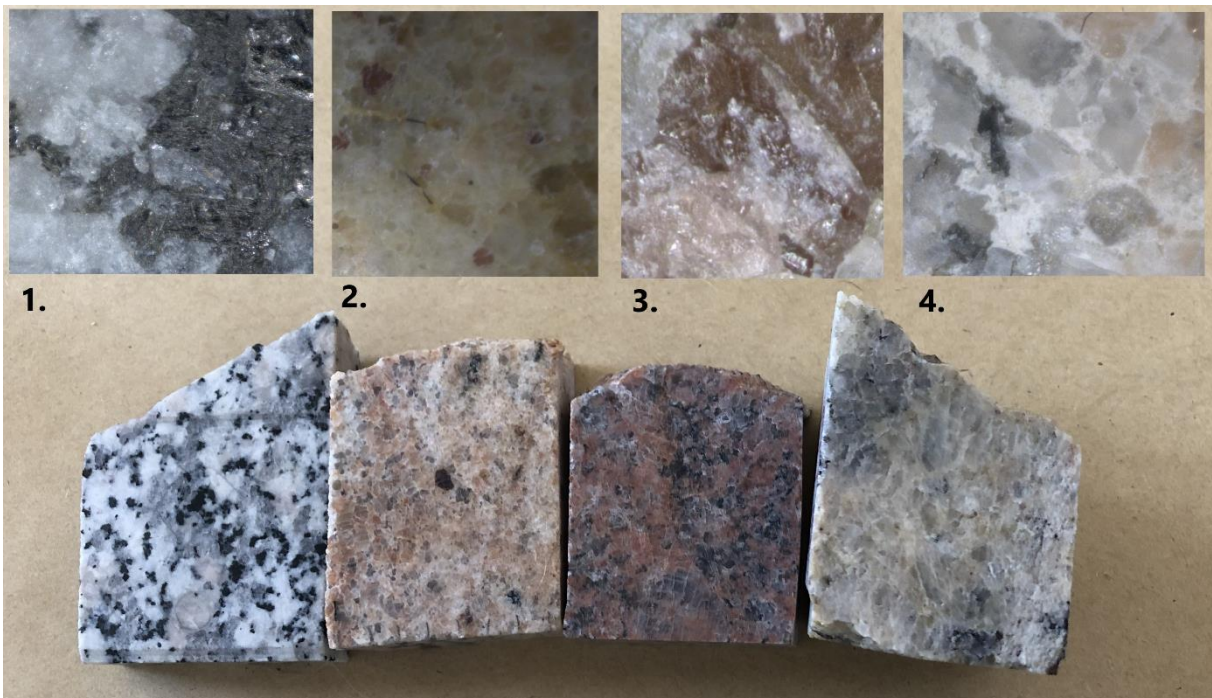
A minták szemcseméret szerinti besorolásához az MSZ 18281-79 számú Építési kőanyagok kőzettani megnevezése és osztályozása elnevezésű szabvány ad útmutatást (2. táblázat) [98]. Ezen adatok alapján a 11. ábrán lévő 1. számú ásvány közepes szemcseméretű, a 2. és 3. számú aprószemcsés, a 4. ásvány pedig durvaszemcsés besorolásba tartozik [99].

2. táblázat A kőzetlakotó ásványok méret szerinti besorolása [98]

Kőzetalkotók átlagos mérete	Megnevezés
$5 \text{ [mm]} < d < 10 \text{ [mm]}$	durvaszemű
$1 \text{ [mm]} < d < 5 \text{ [mm]}$	középszemű
$d < 1 \text{ [mm]}$	aprószemű

A szabvány a kőzetalkotó szemcsék átlagos mérete alapján rangsorol.

Fontos kritérium volt, hogy a kiválasztott mintákban a lehető legnagyobb számban forduljanak elő a különböző fajtájú ásványok.



11. ábra A brazíliai gránit minták



Ezen kritériumok alapján 4 kőzettömböt elemeztem fénymikroszkóppal, pásztázó elektronmikroszkóppal és röntgendiffraktométerrel, majd kiválasztottam 3 mintát, amelyek lefedik az átlagos szemcseméretük alapján történő osztályozás (aprószemcsés, közepes és durvaszemcsés) összes típusát, így a nemzetközi szabványok valamennyi csoportját lefedtem ezzel a 3 gránittípussal úgy, hogy a lehető legtöbb eltérő ásványt tartalmazták a minták.



12. ábra A lépcsősen megmunkált munkadarab

A 12. ábrán jól látható, hogy a gránit felületén lépcsősen, 6 különböző anyagleválasztási sebességgel megmunkált sáv lett kialakítva. A megmunkálás során csak ez az egy paraméter változott.

Az anyagleválasztási sebességek az alábbiak szerint alakultak:

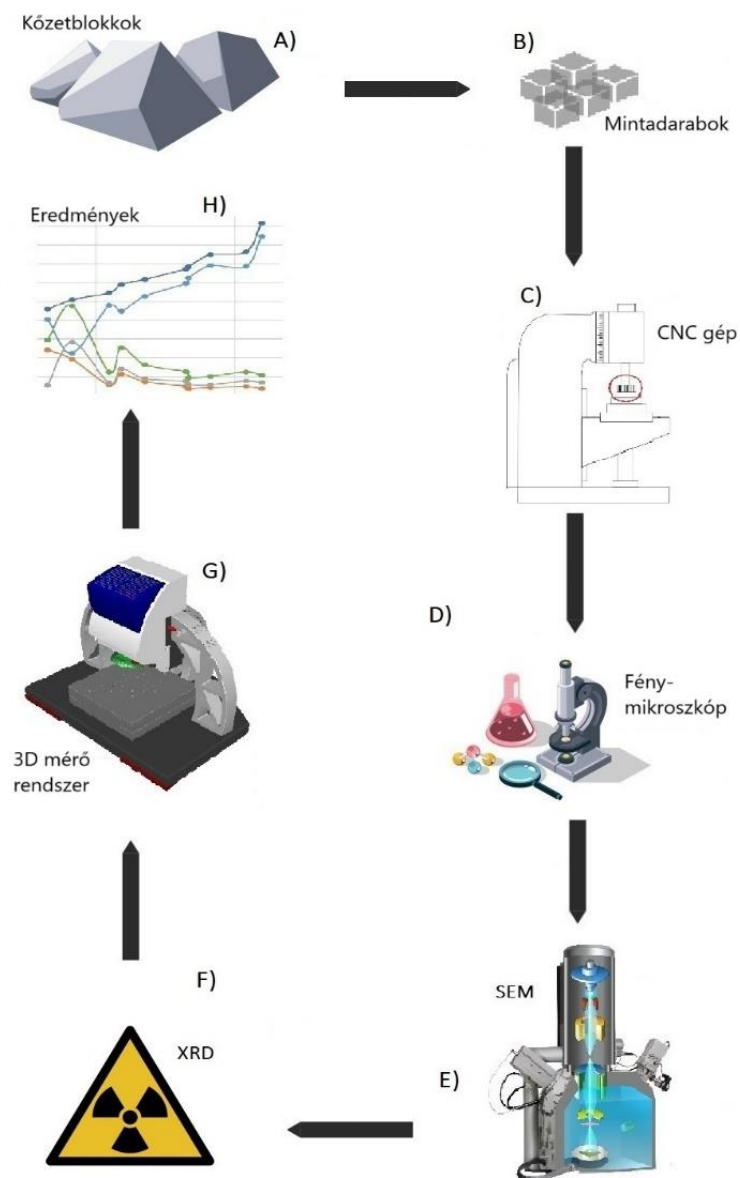
1. sáv: 37,7 [m/min]
2. sáv: 75,4 [m/min]
3. sáv: 113,1 [m/min]
4. sáv: 150,8 [m/min]
5. sáv: 188,5 [m/min]
6. sáv: 226,2 [m/min].

A megmunkálási paramétereket vizsgálva az anyagleválasztás sebessége változott minden lépcső esetében, a többi megmunkálási paraméter változatlan maradt. Tehát a vizsgálat során nem csak a szemcseösszetétel hatását elemeztem, hanem az anyagleválasztási sebesség

változásának befolyásoló szerepét is górcső alá vettem. A mérésekhez a mintadarabból kb. 5x5x2 cm-es kismintákat vágtam le, hogy azok a különböző berendezések tárgyasztalára könnyen felhelyezhetőek legyenek.

## 6. AZ ÁSVÁNYOK FELÜLETI ÉRDESSÉGET ALAKÍTÓ HATÁSA KÜLÖNBÖZŐ ANYAGLEVÁLASZTÁSI SEBESSÉGEK ESETÉBEN

A természetes kőzetek megmunkálása után a mérések azt mutatták, hogy a felület más-más területén végzett mérések nem adnak azonos mérési eredményeket. Ahhoz, hogy megfelelő minőségű felületet lehessen kialakítani, fontos az egyes ásványok befolyásoló hatásának vizsgálata. A kutatás során arra kerestem a választ, hogy az ásványok felületi érdekessége hogyan változik, miközben növekszik az anyagleválasztás sebessége.



13. ábra A kutatási folyamat részben egymásra épülő elemei

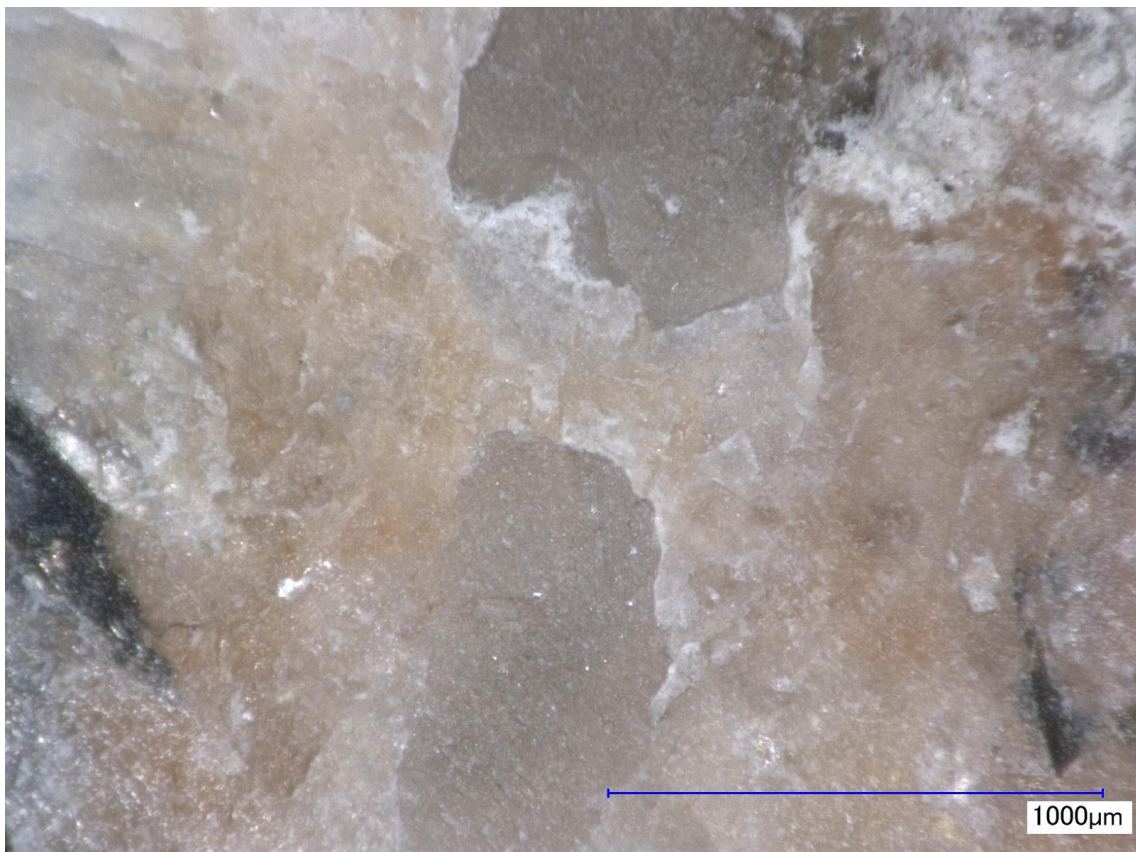
A kísérletek során a korábban már ismertetett megmunkált mintadarabokat használtam, és ezeken a testeken végeztem el a többnyire egymásra épülő vizsgálatokat (13. ábra).

## 6.1 AZ ÁSVÁNYOK FÉNY – ÉS ELEKTRONMIKROSKÓPOS, VALAMINT RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLAT

A címben szereplő mérések egymást kiegészítik, pontosítják az eredményeket. Az elektronmikroszkópos vizsgálat azért elhagyhatatlan, mert a berendezés sokkal árnyaltabb képet ad a felületről, így az ásványok határai jobban elkülönülnek. Ez azért nagyon fontos, mert nagyban hozzájárul ahhoz, hogy a vizsgálatok során valóban csak egy ásványról készüljenek mérések, akár az összetételét vizsgáljuk, akár a felületi tulajdonságait.

Minden általam vizsgált ásványcsoport eltérő színnel rendelkezett, amelyek alapján megkülönböztethető volt a többtől. Az elemzett gránit mintákban fekete, szürke, fehér, világos rózsaszín és sárgás színű ásványok mutatkoztak.

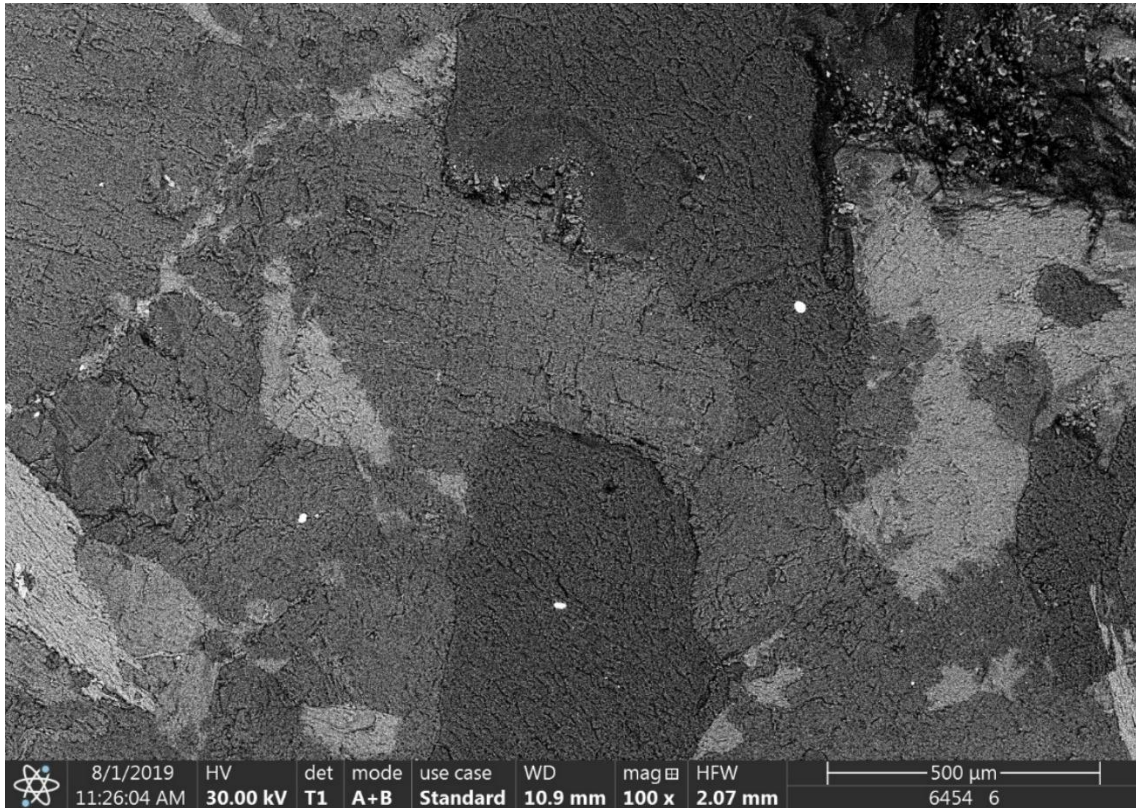
A vizsgálat során 3 különböző természetes gránitot elemeztem. Az első gránittömb szemrevételezés során 4 eltérő színű ásványt mutatott.



14. ábra Fénymikroszkóppal megvizsgált gránit felülete (11./4. ábra)

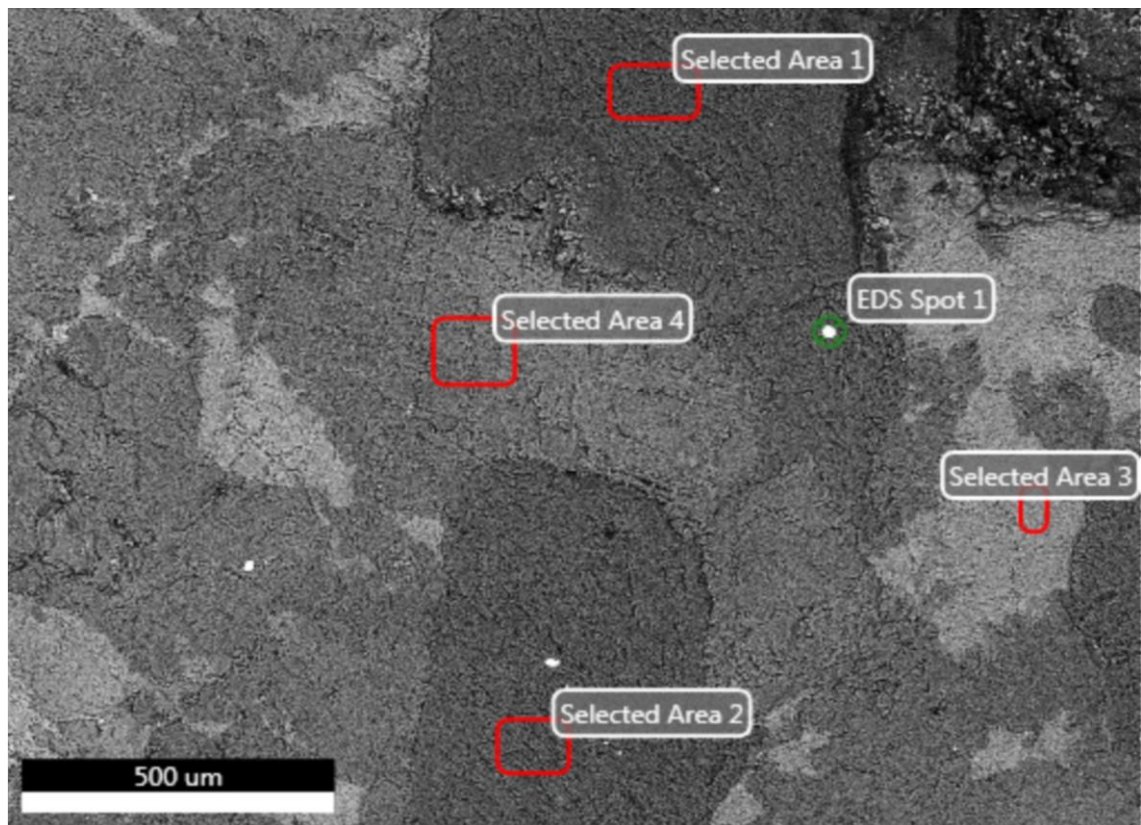


Ezek a fekete, a rózsaszín, a fehér és a szürke színű ásványok voltak, ahogy azt a 14. ábra is mutatja. A megmunkált gránittömbből levágtam egy kis darabot, amelyet először fénymikroszkópban (13./D ábra), majd pásztázó elektronmikroszkópban (13./E ábra) vizsgáltam. A SEM által vizsgált területen az ásványok határai sokkal jobban elkülönülnek, tagoltabbak, ezáltal könnyebben lehet beazonosítani az ásványok között húzódó határokat is. A 15. ábra a 14. ábrán látható fénymikroszkópos felvétel elektronmikroszkópos változata.



15. ábra Pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvétel a gránit minta felületéről (11./4.)

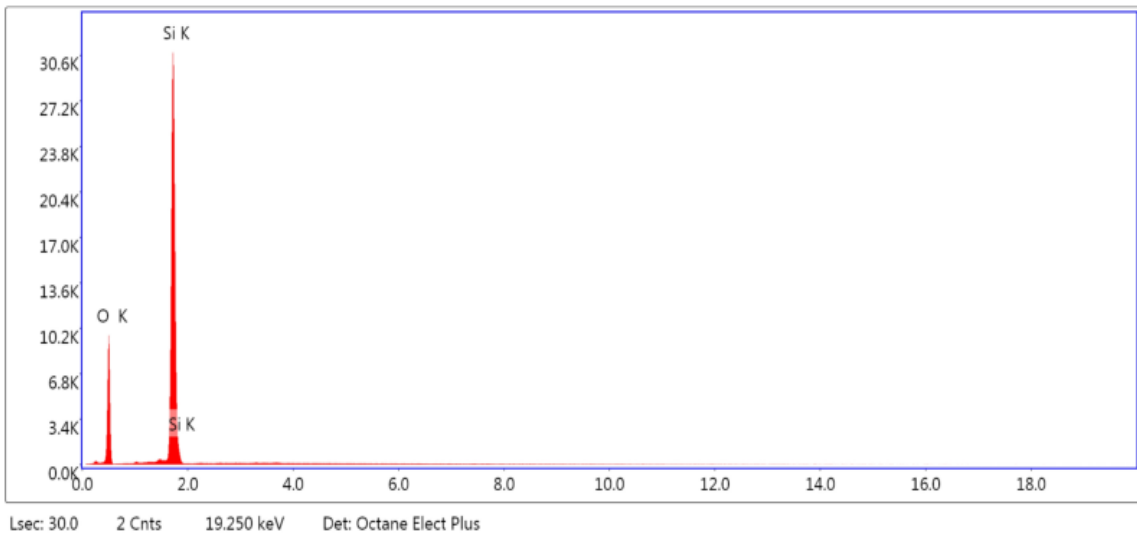
Az EDAX által kapott elemi összetétel táblázat nem mondható 100%-os pontosságúnak. A pontosítás érdekében a mintát porítottam achát mozsár segítségével 10 [μm] alatti szemcseméretűre, és röntgendiffraktométerrel is elemeztem (13./F ábra).



16. ábra A kijelölt területek elemi összetétel vizsgálata (11./4. ábra)

A 16. ábrán látható pirossal kijelölt területek elemi összetételét a berendezés szoftvere automatikusan értékelte, és mind diagram, mind pedig táblázatos adatok formájában megadta. A különböző anyagokat egy segédlet foglalta össze, amely tartalmazta azok elemi összetételét, így a kapott adatokból vissza lehetett fejtetni, hogy melyik ásvány került megvizsgálásra.

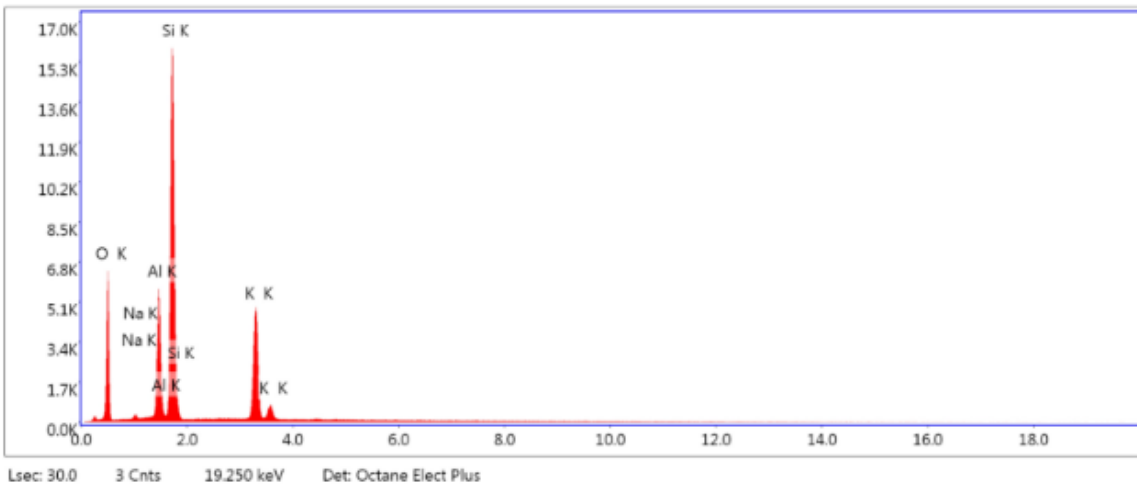
Kis mértékű eltérés mutatkozott az elemi összetétel során azonos ásványok esetében is. Ez abból adódik, hogy a kialakulás során szennyező és egyéb adalékanyagok tudtak beépülni az ásványokba. Mivel nem laboratóriumi körülmények között jöttek létre, így a kialakulásuk során a környezeti hatások kis mértékben ugyan, de módosították az összetételt.



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	53.70	67.06	8.24
SiK	46.30	32.94	3.72

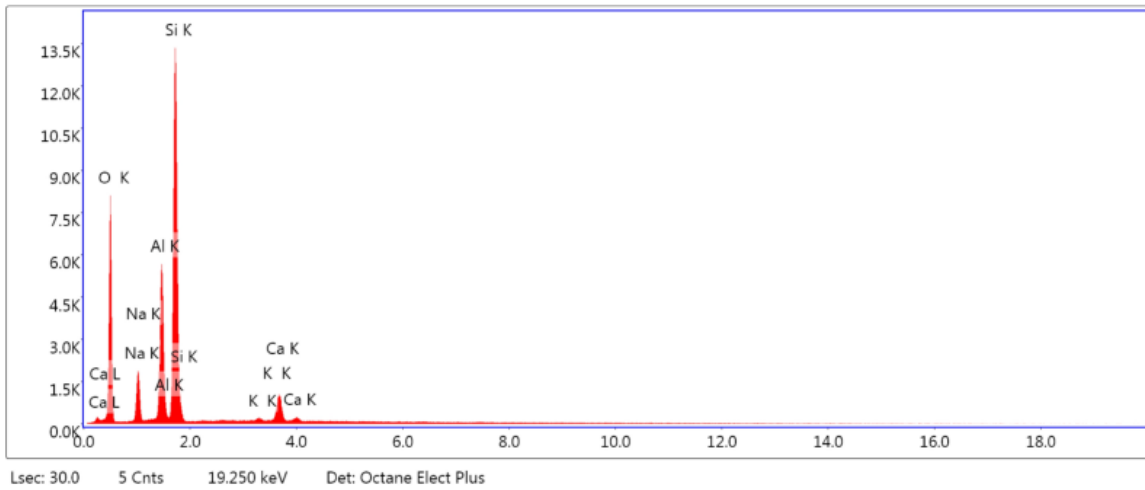
17. ábra. Selected Area 1,2 – KVARC



**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	47.79	62.81	9.16
NaK	1.04	0.95	15.02
AlK	10.42	8.12	5.93
SiK	29.38	22.00	5.49
KK	11.38	6.12	3.27

18. ábra Selected Area 3 – ORTOKLÁSZ

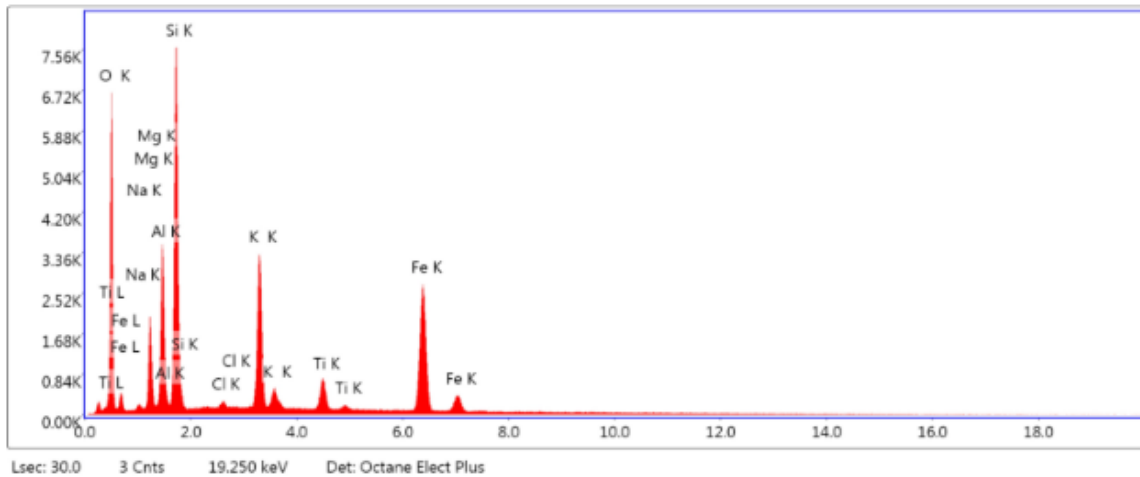


**eZAF Smart Quant Results**

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	47.17	60.33	8.45
NaK	8.80	7.84	9.10
AlK	12.41	9.41	6.40
SiK	28.74	20.94	6.09
KK	0.25	0.13	19.31
CaK	2.63	1.34	4.08

19. ábra Selected Area 4 – ALBIT





#### eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	43.80	61.09	8.92
NaK	0.87	0.85	19.95
MgK	6.49	5.96	8.64
AlK	9.37	7.75	7.60
SiK	17.78	14.12	6.75
ClK	0.44	0.28	14.13
KK	7.86	4.48	3.33
TiK	1.95	0.91	4.50
FeK	11.43	4.57	1.81

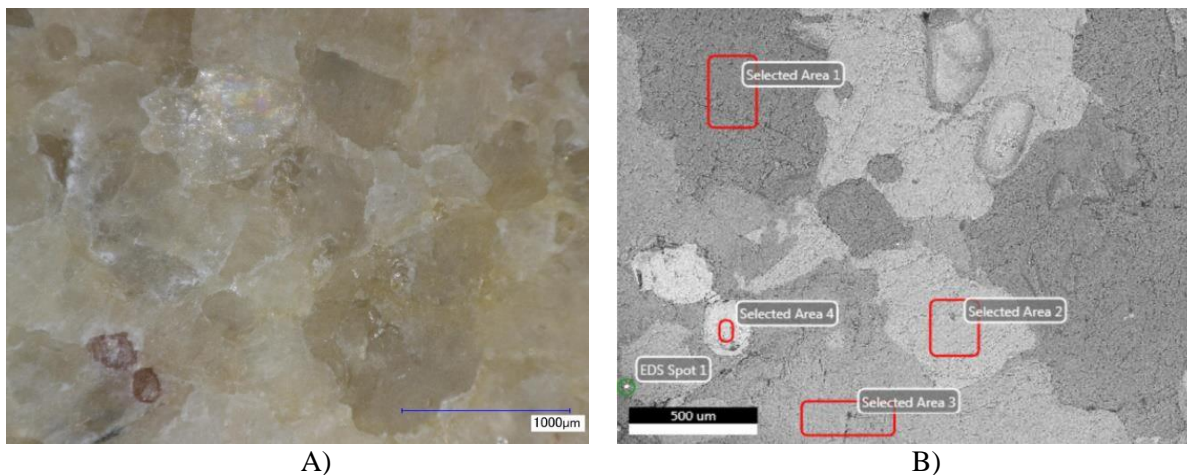
20. ábra EDS Spot 1 - BIOTIT

A kristályos anyagrendszerek fázisösszetételének eredményei alátámasztották a korábban kapott SEM eredményeket (17., 18., 19., 20. ábra).

A kapott eredmények (13./H ábra):

- fekete: biotit (EDS Spot 1 – 16., 20. ábra)
- rózsaszín: ortoklász (Selected Area 3 – 16., 18. ábra)
- fehér: albit (Selected Area 4 – 16., 19. ábra)
- szürke: kvarc (Selected Area 1,2 – 16., 17. ábra).

A másik két természetes kőzetminta vizsgálatának eredményeit ugyanezen mérési folyamat során kaptam meg, így a továbbiakban azt részletesen már nem taglalom, csak az eredményeket ismertetem.



21. ábra A 11. ábra 2. mintájának fény- és elektronmikroszkópos felvétele

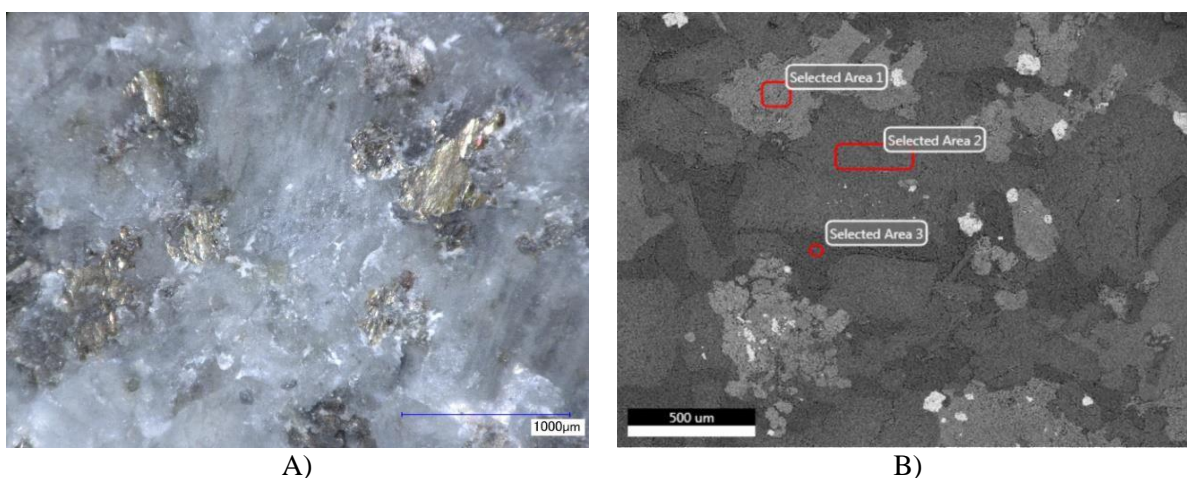
A fénymikroszkóp segítségével a következő gránit mintában is 4 eltérő színű ásványt lehetett megkülönböztetni (21./A ábra). Feketét, sárgát, törtfehéret és szürkét.

A SEM által kapott eredmények (21./B ábra) szerint a mintában kvarc, mikroklin, plagioklász és biotit található. A röntgendiffraktométeres vizsgálat után kiderült, hogy a plagioklászt jelölő terület albit volt.

Ennek függvényében az eredmények az alábbiak szerint alakultak (13./H ábra):

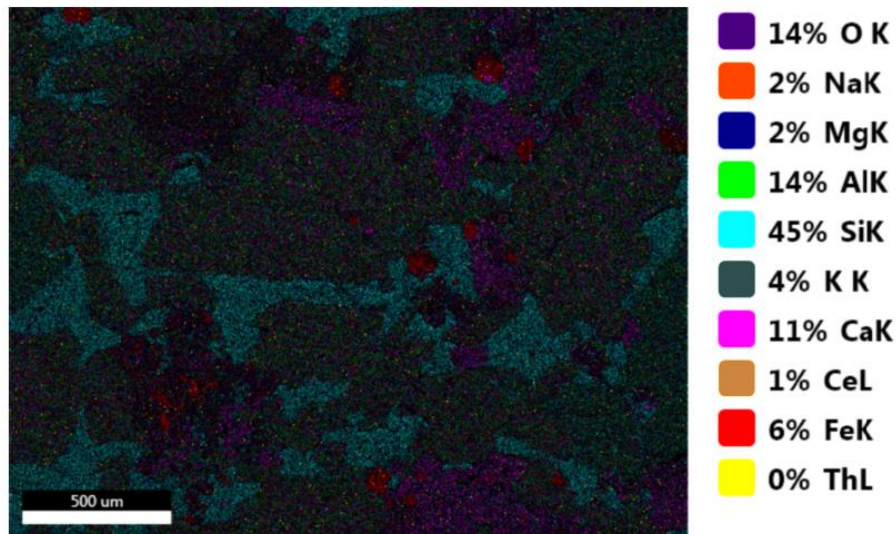
- fekete: biotit (*Selected Area 4*)
- fehér: albit (*Selected Area 3*)
- sárgás: mikroklin (*Selected Area 2*)
- szürke: kvarc (*Selected Area 1*).

A legutoljára vizsgált gránit mintában első ránézésre nem 4 csak 3 ásvány különült el (22./A ábra), de ezt a SEM felvétel is alátámasztotta (22./B ábra).



22. ábra A 11. ábra 1. mintájának felülete fény- és elektronmikroszkópos felvételen

Érdekesképpen bemutatom a 23. ábrán a teljes felület elemi összetételét. Jól látható, hogy az adott ásványok/területek mentén melyik alkotó elem a dominánsabb.



23. ábra Elemi összetétel szintérképe

Az eredményeket összegezve az alábbiak szerint alakultak az ásványok beazonosítása:

- fekete/arany: biotit (Selected Area 1)
- fehér/csontszín: albit (Selected Area 2)
- szürke: kvarc (Selected Area 3).

A minták ásványi összetételének ismeretében elmondható, hogy a 3 gránit mintában 5 eltérő ásvány volt látható, amelyeknek a felületi érdekességét tudtam vizsgálni és elemezni.

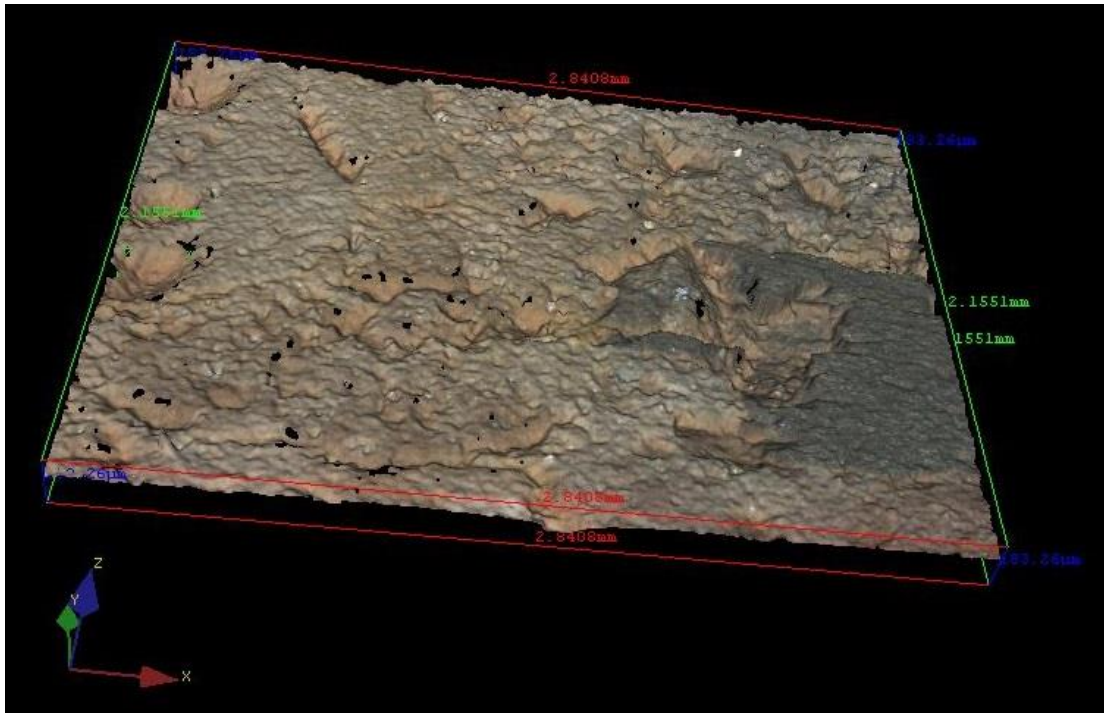
## 6.2 A KONFOKÁLIS MIKROSKÓPPAL VÉGZETT VIZSGÁLAT

A korábban ismertetett 3 különböző gránit mintadarab felületén marással kialakított 6-6 sávot elemeztem.

A vizsgálat során a gránitban található ásványok terület alapú átlagos felületi érdekességét mértem. Ezek az alkotó ásványok a kvarc, a csillám és a földpátok voltak. Minden mintadarabban állandó alkotó volt a kvarc, az albit, valamint a csillám biotit formájában. Az első két mintadarabban azonban az albit mellett ortoklász és mikroclin is megjelent. A pontos felületi érdekesség érték érdekében a sáv elején, közepén és végén is végeztem méréseket (13./G ábra).

A nagynyomású levegővel megtisztított felületű munkadarabot az Alicona InfiniteFocus IFM G4 felületi érdességet meghatározó konfokális mikroszkóp alá helyeztem.

A mérés során mind a vizsgálandó terület színéről, mind pedig annak felületi érdességéről információt kaptam (24. ábra). A vizsgálat során úgy fókuszáltam, hogy a tartomány magában foglalja az érdességi csúcsokat és az érdességi völgyeket.



24. ábra A 3D mérőrendszer által a minta felületéről elkészített domborzat

Nem megfelelő fókuszálás esetén, a berendezés nem tudta kiértékelni a felület érdességét, a kialakított kép fekete lyukakkal terhelt lett. Ez a 24. ábrán látható is, hogy bizonyos területek fekete foltot mutatnak. Ez adódhatott abból, hogy a mérési tartományon kívül esnek a pontok, de előfordulhat, hogy a mérés során fellépő rezgések okozta hibával terhelt a kép. A megfelelő pontosságú mérést segítette az InfiniteFocus IFM G4 tárgylemezőnek precíz mozgathatósága is.

A kiválasztott alkotó ásványok felületi érdességét a fókuszvariációs mikroszkóp részét képező kiértékelő szoftver számolta ki.

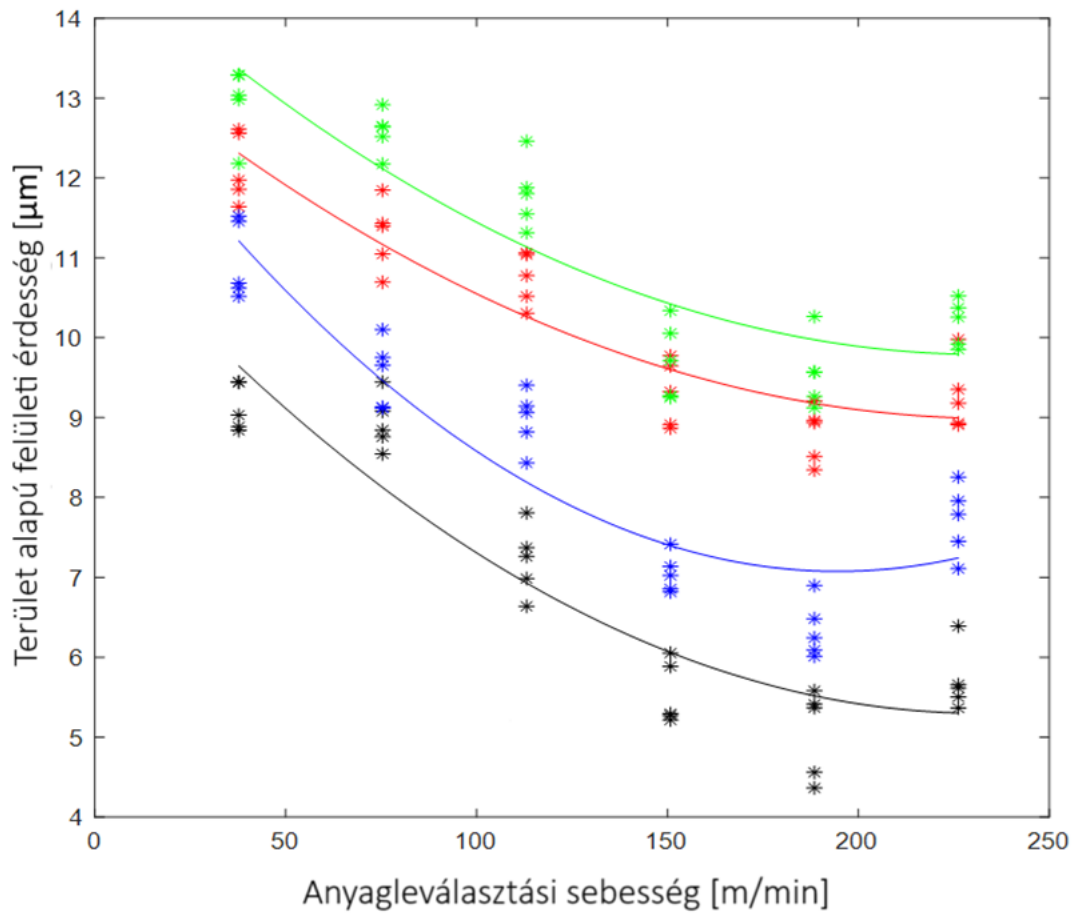
A vizsgálat során terület alapú érdességet mértem a vonal alapúval szemben, a pontosabb eredmények elérhetősége végett.

A gránit mintákat úgy választottam ki, hogy azokban minél több eltérő ásvány felületi érdekessége vizsgálható legyen. Így a kvarcon és a biotiten kívül mértem az ortoklász, a mikroklin és az albit ásványok felületi érdekességét is.

### **6.3 AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE**

A mérések elvégzése után az eredmények MATLAB R2019b programmal lettek kiértékelve, majd statisztikai elemzéseket végeztem a különböző ásványokhoz tartozó felületi érdekességek eredményeivel, hogy aztán varianciaanalízissel megállapíthassam a másodfokú regressziós görbe szignifikanciáját.

Mind a 3 mintadarab mélységi magmás gránit kőzet volt, azonban ezek eredményeit külön kellett kezelni, mivel a keletkezésük során fennálló körülményeket nem ismertük pontosan. Ennek következtében eltérő százalékos összetétellel, mikrokeménységgel és így más-más fizikai-kémiai tulajdonságokkal rendelkeztek, amelyek befolyásolták a különböző mintaalkotó ásványok felületi érdekességét.

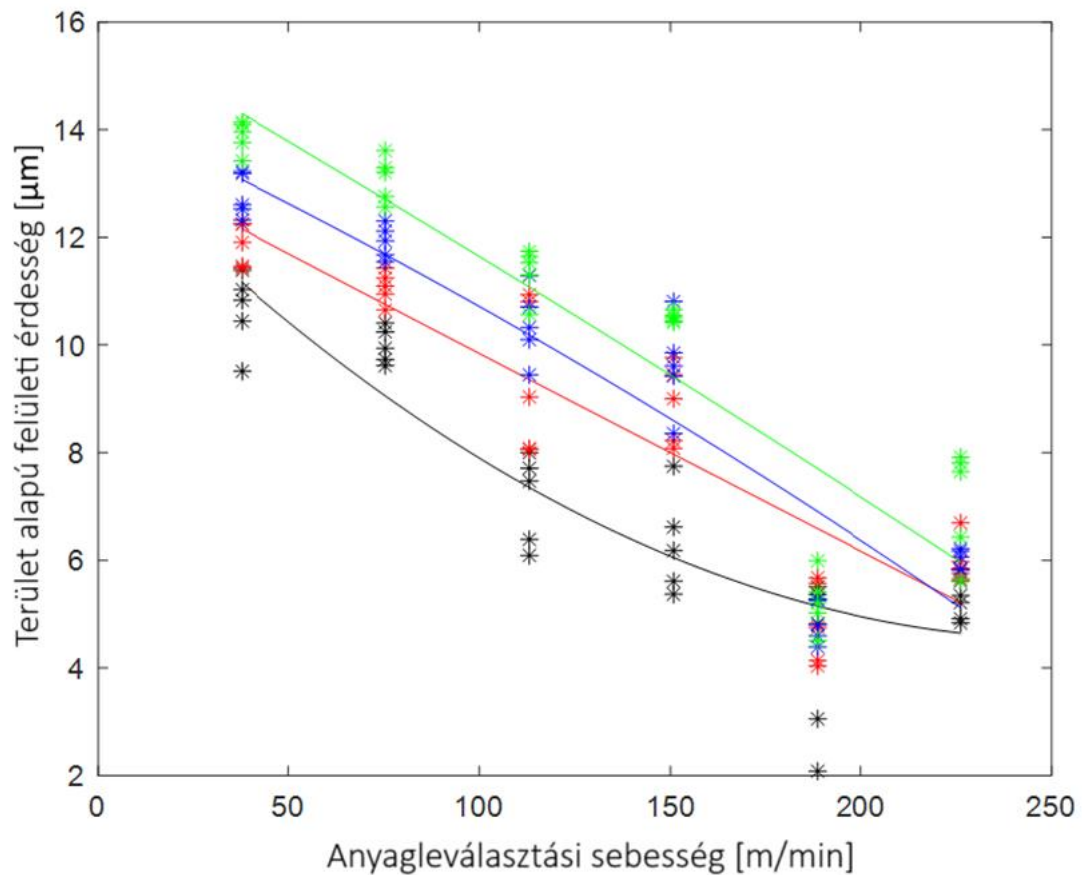


25. ábra A 11./4 minta eredményei  
(világos zöld: kvarc, piros: ortoklász, kék:albit, fekete: biotit)

A 25. ábrán a 11. ábra 4. mintájának MATLAB R2019b program által készített diagramján látható, hogy a mintát alkotó ásványok területalapú felületi érdességének értéke csökkenő tendenciát mutatott az anyagleválasztási sebesség növekedése mellett egészen a 226,2 [m/min] anyagleválasztási sebességig. Itt mindegyik ásvány esetében kis fokú érdességérték növekedés tapasztalható. Ez a növekedés adódhatott abból, hogy a vizsgálatra kiválasztott ásványok eltérő orientációval rendelkeztek a vágás során. Amennyiben az ásvány a megfelelő orientációban kerül munkálásra, akkor sokkal kisebb felületi érdességet mutat. Elképzelhető, hogy ezek az ásványok a hasadási síkjukra merőlegesen lettek megmunkálva, és ez okozta a nagy mértékű értéknövekedést. Az eredményeken a program statisztikai analízist végzett, amely rámutatott arra, hogy az eredmények erősen korrelálnak a másodfokú görbéhez mind a 4 mintát alkotó ásvány esetén:  $r_{biotit} = 0,852$ ,  $r_{albit} = 0,851$ ,  $r_{ortoklász} = 0,858$ , és a  $r_{kvarc} = 0,799$ .



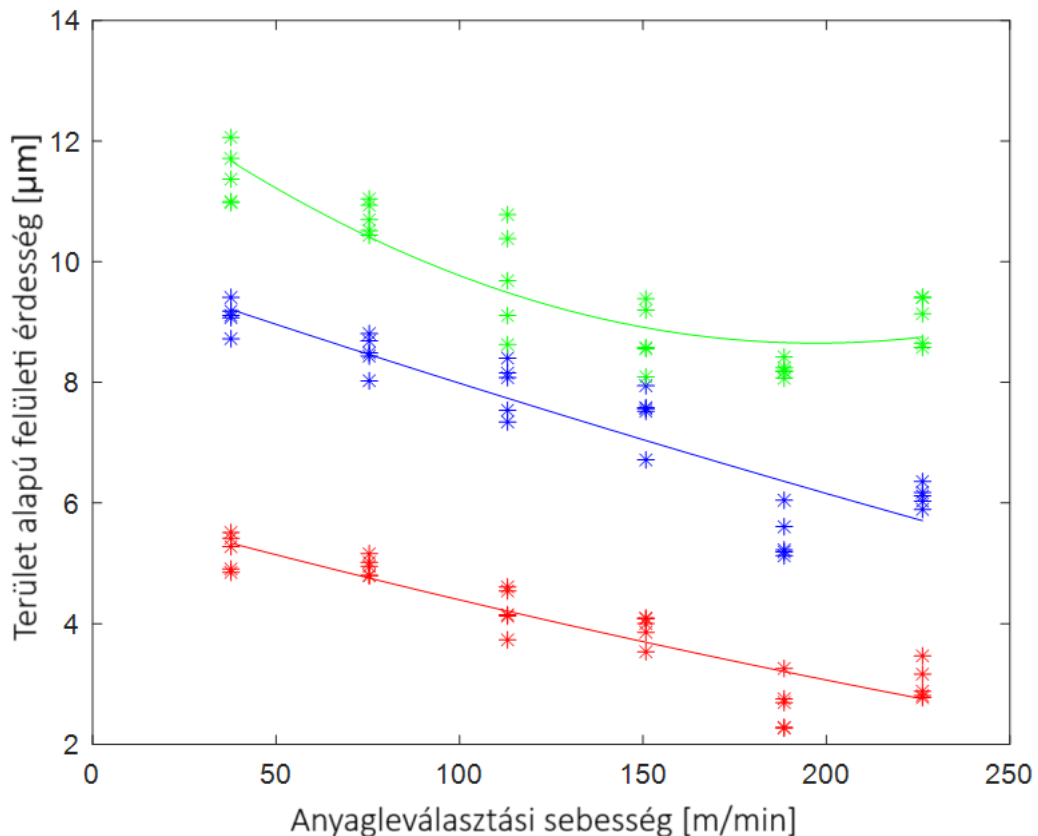
Emellett az ásványok szignifikancia együtthatója is alacsony volt:  $p_{biotit} = 0,003$ ,  $p_{albit} = 0,000$ ,  $p_{ortoklász} = 0,003$ , és a  $p_{kvarc} = 0,011$ . Ez esetben a kvarc adta a legrosszabb eredményt, amely azt mutatja, hogy 1,1% esélye volt annak, hogy az alkalmazott regressziós görbe nem szignifikáns az ásványok felületi érdességével. Ezen minta esetében kijelenthetem, hogy a vágósebesség hatása az ásványok felületi érdességére hatékonyan közelíthető másodfokú regressziós görbével.



26. ábra A 11./2. számú minta eredményei  
(világoszöld: kvarc, kék: mikroclin, piros: albit, fekete: biotit)

A 26. ábrán a 2. számú minta eredményei láthatók. Ezek arra engednek következtetni, hogy a mintát alkotó ásványok felületi érdesség értékei az anyagleválasztási sebesség növekedésével szemben fordított tendenciát mutatnak, a tendencia egyértelműen csökkenő, azonban az ásványok közötti eltérő meredekséget a korábban már felvázolt kőzetkeletkezések feltételei befolyásolták. A statisztikai kiértékelést is figyelembe véve elmondható, hogy a

11./4. mintához hasonlóan erősen korreláltak az adatok a másodfokú görbéhez:  $r_{biotit} = 0,834$ ,  $r_{albit} = 0,816$ ,  $r_{mikroklín} = 0,855$ , és a  $r_{kvarc} = 0,879$ . Az ásványok szignifikancia együtthatója az alábbiak szerint alakult:  $p_{biotit} = 0,007$ ,  $p_{albit} = 0,018$ ,  $p_{mikroklín} = 0,09$ , és a  $p_{kvarc} = 0,015$ .



27. ábra A 11./1. minta eredményei  
(világoszöld: kvarc, kék: albit, piros: biotit)

A 11./1. számú minta esetében is látható a 27. ábrán, hogy a trendvonalak vegyesen jelentek meg. A biotit fokozatos csökkenő tendenciát mutatott a 150,8 [m/min] nagyságú anyagleválasztási sebességig, ezt követően bizonytalanságot lehetett felfedezni, ami stagnálás formájában mutatkozott meg. A statisztikai elemzést figyelembe véve a biotit  $r_{biotit} = 0,835$  és az albit  $r_{albit} = 0,702$  korrelációs együtthatója erősnek mondható. Azonban a kvarc értéke  $r_{kvarc} = 0,351$  gyenge tendenciát mutatott. Ez adódhat a vizsgált ásványok eltérő orientációjából. A szignifikancia együtthatókat figyelembe véve is elmondható, hogy kiugró eltérés mutatkozik a kvarc esetében:  $p_{biotit} = 0,007$ ,  $p_{albit} = 0,007$ , és a  $p_{kvarc} = 0,126$ .



Az eredményeket áttekintve nagy biztonsággal állítható, hogy az anyagleválasztási sebesség fokozatos növekedése mellett az ásványok felületi érdessége csökkent. Ezt a csökkenő tendenciát nem befolyásolta az eltérő összetétel, azonban az ásványok elhelyezkedése, orientációja kis mértékű módosító hatást gyakorolhatott az eredményekre.

## 7. GRÁNITALKOTÓ ÁSVÁNYI SORREND A FELÜLETMINŐSÉGET BEFOLYÁSOLÓ HATÁSUK ALAPJÁN

A vevői igények által meghatározott felületi minőség eléréséhez szükséges vizsgálni a gránitot alkotó szemcsék érdességre gyakorolt hatását. A felhasználás módjától függően változnak a vevői igények. A padlólapok esetében pl. a sima felület és az érdes egyaránt igényként léphet fel. A vizsgálat során a gránitban található ásványok marási folyamatok eredményeképpen kialakult felületi károsodásait elemeztem. A kutatás során a vizsgált ásványokat a Mohs-féle keménységi skálához hasonlóan rangsoroltam aszerint, hogy az adott ásvány mennyire eredményez érdes felületet. A teljes mérési folyamatot a 11. ábra 2. mintadarabján mutatom be.

### 7.1 FÉNYMIKROSKÓPOS, ELEKTRONMIKROSKÓPOS ÉS RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLAT

Elsőként fénymikroszkópos vizsgálatot végeztem. A mérés során a KEYENCE VHX 2000 ultraprecíziós fénymikroszkópot használtam. Segítségével a különböző gránitminták felületén található ásványok színe lett meghatározva (28. ábra).



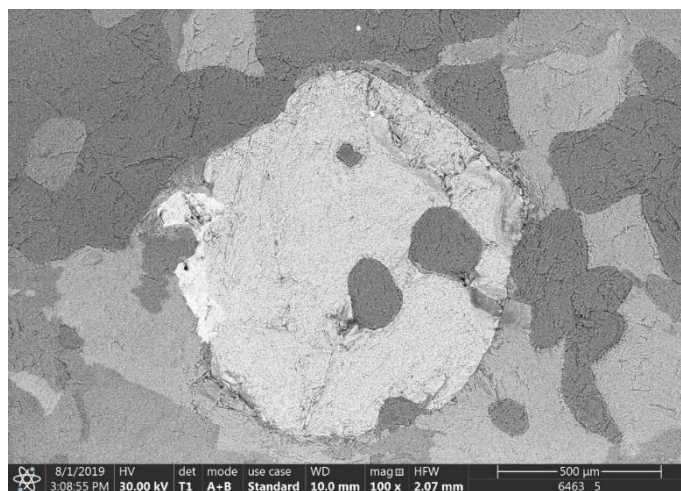
28. ábra A 11. ábra 2. számú minta fénymikroszkópos felvétele

Ez a lépés azért volt fontos, mert a későbbi vizsgálatok során, például a felületi érdesség mérésénél az ásványokat az adott mintadarabokon az egyedi színük és formájuk alapján lehetett beazonosítani.

A vizsgálat során a gránit mintákon (11. ábra) az alábbi színű ásványokat különböztettem meg:

- o fekete
- o fehér
- o sötét szürke
- o rózsaszín
- o világos szürke
- o sárgás.

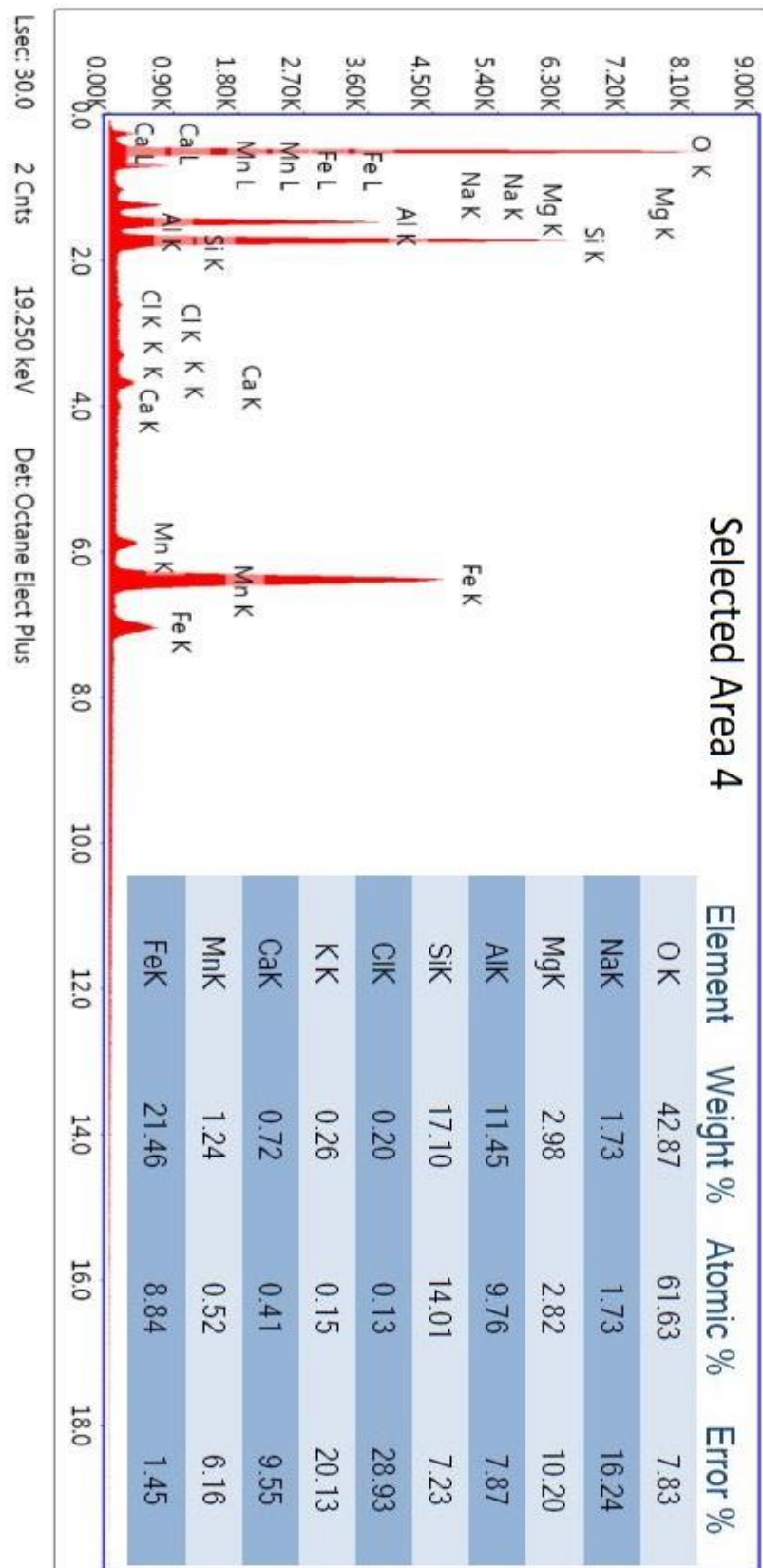
A színek megállapítása után következett az elemi összetételvizsgálat, amelynek során a fénymikroszkóp alatt megvizsgált minták átkerültek a FEI/Thermofisher Apreo S, Philips XL 30 ESEM típusú pásztázó elektronmikroszkópba. A fénymikroszkópban megvizsgált ásványok jelölve lettek, és a már megjelölt ásványok elemi összetétele lett meghatározva. A minták felülete sűrített levegővel lett megtisztítva, hogy a felületre került szennyeződések ne befolyásolják a mérési eredményeket. A vizsgálat során azoknak az ásványoknak az elemi összetételét vizsgáltam, amelyeknek a színét korábban a fénymikroszkóp segítségével már beazonosítottam.



29. ábra A 11. ábra 2. számú minta SEM képe

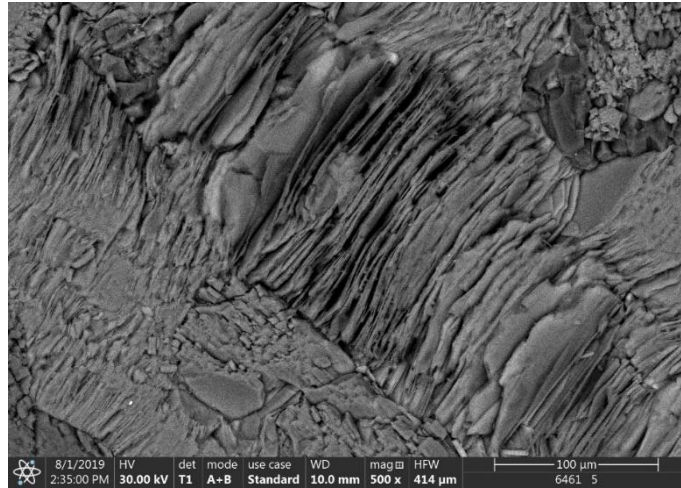
Az alábbi folyamat látható a 29. és 30. ábrán, ahol a fénymikroszkópban megvizsgált barna színű ásvány, illetve a környezetében található különböző árnyalatú sárgás ásványok atom%-os összetételét határozta meg a pásztázó elektronmikroszkóp. Így a megállapított színekhez elemi összetételt tudtam kapcsolni, amit a későbbiekben még XRD-vel is elemeztem. Az XRD

mérési eredményei lényegében ellenőrzésként szolgáltak, mivel a természetes kőzetek esetében az ásványok összetétele kis mértékben, de eltérhet a szakirodalmi értéktől. Ez a természetes kőzetek kialakulásakor bekerülő szennyeződéseknek, adalékanyagoknak tulajdonítható.



30. ábra A SEM szoftvere által készített diagram és elemi összetétel táblázat (biotit) a vizsgált felület egy kijelölt területéről

A 29. ábra SEM felvételén jól láthatók a különböző ásványok határai. Ezek könnyebben azonosíthatók a SEM által készített képen, mint a fénymikroszkópos képen. A SEM szoftver segítségével a tetszőlegesen kijelölt területek elemi összetétele meghatározható, így a fekete-fehér kép bármelyik árnyalatát mérhetjük. A berendezés ezen kívül a felület érdességét is vizualizálni tudja, azonban releváns értéket nem társít hozzá.



31. ábra A felület érdességét bemutató SEM felvétel

A 31. ábrán jól kivehető, hogy az eltérő ásványoknak eltérő felületi érdessége van. Már itt látható, pontos számadatok hiányában is, hogy az eltérő ásványok eltérő módon befolyásolják a felület érdességét. Megfigyelhető, hogy vannak olyan felületek, ahol hasadás játszódott le a megmunkálás során, így az ott kialakult felület simább lett. Másik területeken azonban ahol nem játszódott le hasadás, ott a megmunkált felület magasabb érdességi értéket mutatott.

A pásztázó elektronmikroszkóppal kapott eredmények leellenőrzése és az elemi összetétel pontossága érdekében a mintákat röntgendiffraktométer segítségével is megvizsgáltam. Ehhez a mintákat porítottam 10 [µm]-es szemcseméret alá. A porokon elvégeztem a mérést, majd a SEM eredményekkel összevetve meghatároztam a különböző színű ásványok típusát. A kapott eredmények függvényében választottam ki a különböző kőzet tömböket úgy, hogy a mintákban minél több eltérő ásvány vizsgálható legyen. Ezek a 11. ábra 1., 2. és 4. mintái voltak.

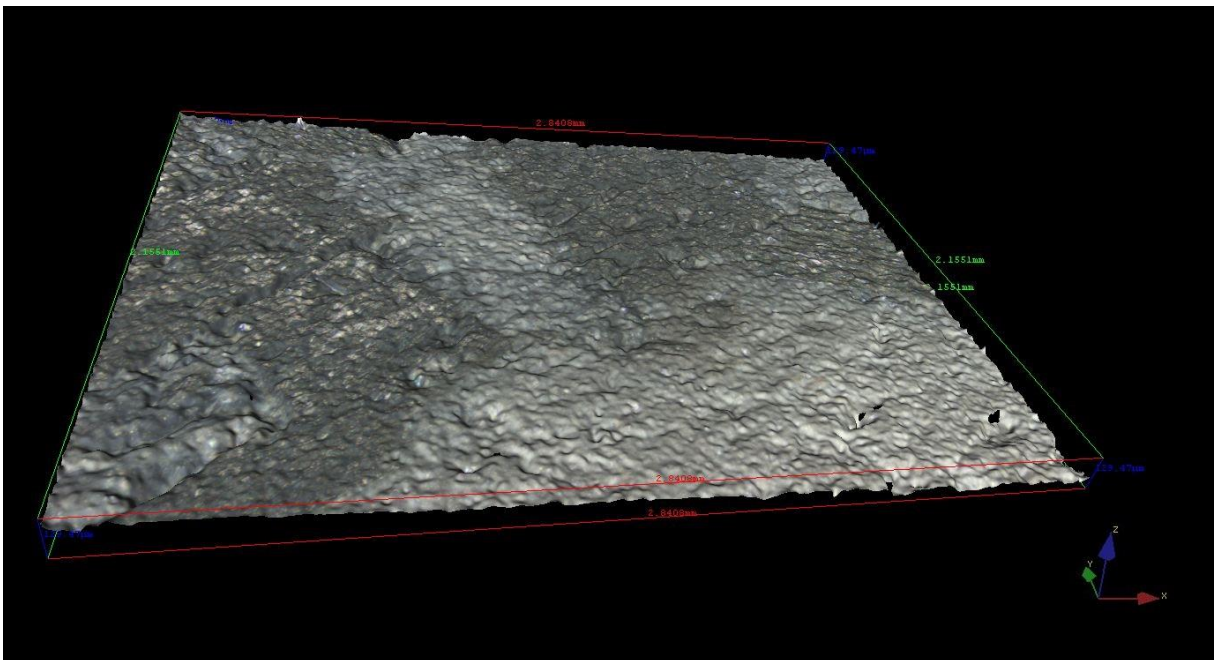
A vizsgált ásványok beazonosítását az 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat Az ásványok beazonosítása egyedi színük alapján

1.	fekete	biotit
2.	csontszínű/fehér	albit
3.	szürke	kvarc
4.	rózsaszín	ortoklász
5.	színtelen/szürkésfehér	labradorit
6.	sárgás	mikroclin

## 7.2 FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉSE

A kiválasztott mintadarabok felületét alkotó ásványok meghatározását az ásványok felületi érdességének vizsgálata követte. A méréseket a Alicona InfiniteFocus IFM G4 3D képalkotó berendezéssel végeztem el, 100 [nm]-es felbontás mellett.



32. ábra A felületi érdesség mérése során látható felületi csúcsok és völgyek

A mintadarabok felületén lévő ásványokat az egyedi színük alapján lehetett megkülönböztetni, ennek megfelelően végeztem el az adott ásványok felületi érdességének mérését. Ezen a fókuszvariációs mikroszkóppal mérő berendezés által készített 3D-s képen

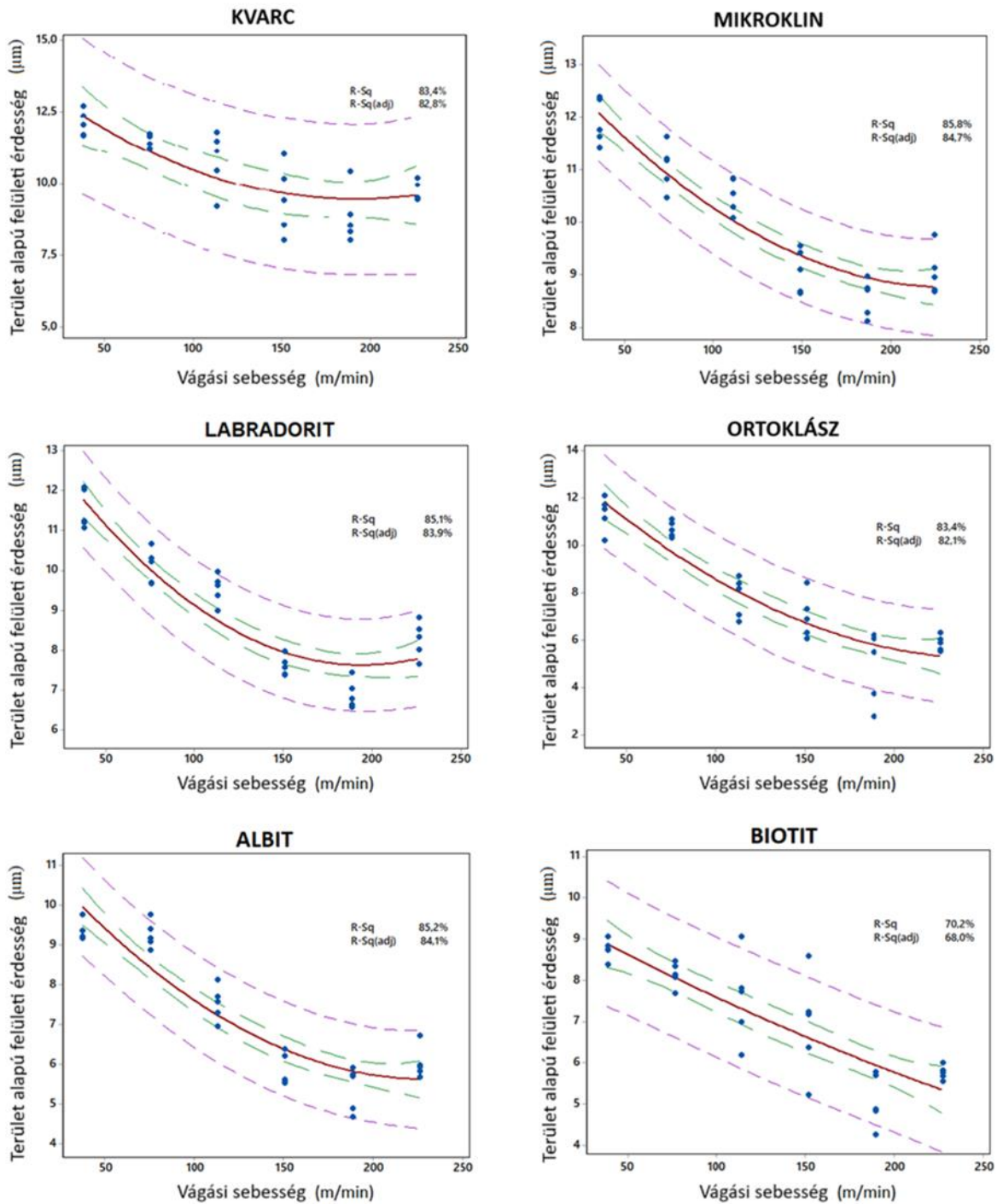
(32. ábra) már szabad szemmel is kivehető, hogy a különböző árnyalatú területeken más jellegű érdességek mutatkoznak.

Az eredményeket a gép önmaga értékelte ki. A terület alapú felületi érdesség érték mellett számos más adatot is kaptam, mint a vonal alapú felületi érdességet vagy a kijelölt területen található legmagasabb és legalacsonyabb csúcsok értékét.

### **7.3 EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE**

Minden eltérő anyagleválasztási sebességgel kialakított sávban mértem a különböző ásványok felületi érdességét. A mérések esetében azt is figyelembe vettem, hogy a sávok elején, közepén és végén a megmunkálásból adódó eltérések előfordulhatnak. Ezen probléma kiküszöbölése végett a méréseket a teljes felületen végeztem, nem csak a sáv egy kisebb szegmensén. Minden egyes sávban 40-50 db mérést végeztem, majd a sávot 5 egyenlő részre osztottam fel és az egyes részekbe jutó ásványok érdesség értékét átlagoltam. Azoknál az ásványoknál, amelyek több mintában is megtalálhatóak voltak, azokat minden mintában megmértem, és a négy mintából adódó eredmények kerültek átlagolásra. Az eredményeket a 34. ábra szemlélteti.





33. ábra A különböző mintadarabokban lévő ásványok hatása a felületi érdességre

A fentiekben bemutatott módon kapott átlagos értékekre másodfokú görbét illesztettem (folytonos bordó vonal). A Minitab program kiértékelte és kirajzolta az eredményeket. A zöld szaggatott vonal a konfidencia intervallumot jelöli, míg a bordó szaggatott vonal a predikciós intervallumot szemlélteti.

Az eredmények erősen korreláltak a parabolához minden ásvány esetében ( $R^2 = 0,70 - 0,85$ ), és a szignifikancia együttható is alacsony volt ( $P = 0,003 - 0,018$ ).

A statisztikai kiértékelés után az ásványokat rangsoroltam a felületi érdességet befolyásoló hatásuk szerint. A rangsorolás fő lényege az volt, hogy felállítsak egy Mohs-féle keménységi skálához hasonló skálát, amely nem az egymás karcolhatóságán, hanem a felületen eredményezett érdességük alapján rangsorolja az ásványokat. Pontos értékkel nem látva el az ásványokat, hanem az egymáshoz viszonyított felületi érdesség értékük alapján rangsorolva.

A diagramokon látható eredmények arra engedtek következtetni, hogy a legérdesebb felületet a kvarc ásvány eredményezte, majd ezt az értéket követik a földpátok. A földpátok értékei viszonylag közel helyezkednek el egymáshoz, azonban jól elkülöníthető halmazokat alkotnak a különböző ásványtípusok. A felület minőségének szempontjából a biotit felülete mutatta a legkisebb érdességet.

Az eredményeket kiértékelve a következő sorrendet határoztam meg (a legérdesebbtől-a legsimább felületet eredményező ásvány felé), amelyben az ásványok sorrendje az egymáshoz való viszonyukat mutatja be:

1. kvarc
2. mikroklin
3. labradorit
4. ortoklász
5. albit
6. biotit.

A felállított sorrend, amely az ásványok hatását mutatja a felület érdességére, minden anyagleválasztási sebesség mellett fennáll, kivéve egy esetet. 75,4 [m/min] anyagleválasztási sebesség esetén a labradorit és az ortoklász nem követi a felállított sorrendet, mivel az ortoklász megelőzi azokat. Az értékek csak kis mértékben tértek el egymástól, de ennek az eltérésnek oka lehet, hogy az ebben a sávban megvizsgált labradorit ásványok megfelelő orientációban helyezkedtek el a marás során.

Az ásványok orientációja nagyban meghatározza azok mechanikai tulajdonságát. Két egyforma ásvány eltérő orientáció esetén eltérő válaszreakciót ad ugyanarra a mechanikai behatásra. Pl. anyagleválasztás során egyik esetben érdes, másik esetben jóval simább felületet eredményez a művelet, mivel az első esetben a szerszámnak végig kell a felületet

munkálni, míg a második esetben az ásvány felületén hasadás játszódik le, így egyértelműen sima felületet hagy maga után.

A teljes képet nézve ez az egyetlen eltérés mutatkozott, így nagy biztonsággal jelenthető ki, hogy a felállított ásvány sorrend fennáll különböző anyagleválasztási sebességek mellett is.

Tehát a mérési eredmények kiértékelésének következtében elmondható, hogy a legérdesebb felületet a kvarc eredményezte, a legsimábbat pedig a biotit ásvány felületei adták. A két felületi érdesség érték között helyezkedtek el a földpátok; legérdesebb felülettel a mikroklin rendelkezett, ezt követte a labradorit, majd az ortoklász, a legsimább földpát felületet az albit adta.

## 8. AZ ÁSVÁNYOK ÖSSZETÉTELÉNEK BEFOLYÁSOLÓ HATÁSA A MIKROKEMÉNYSÉGRE

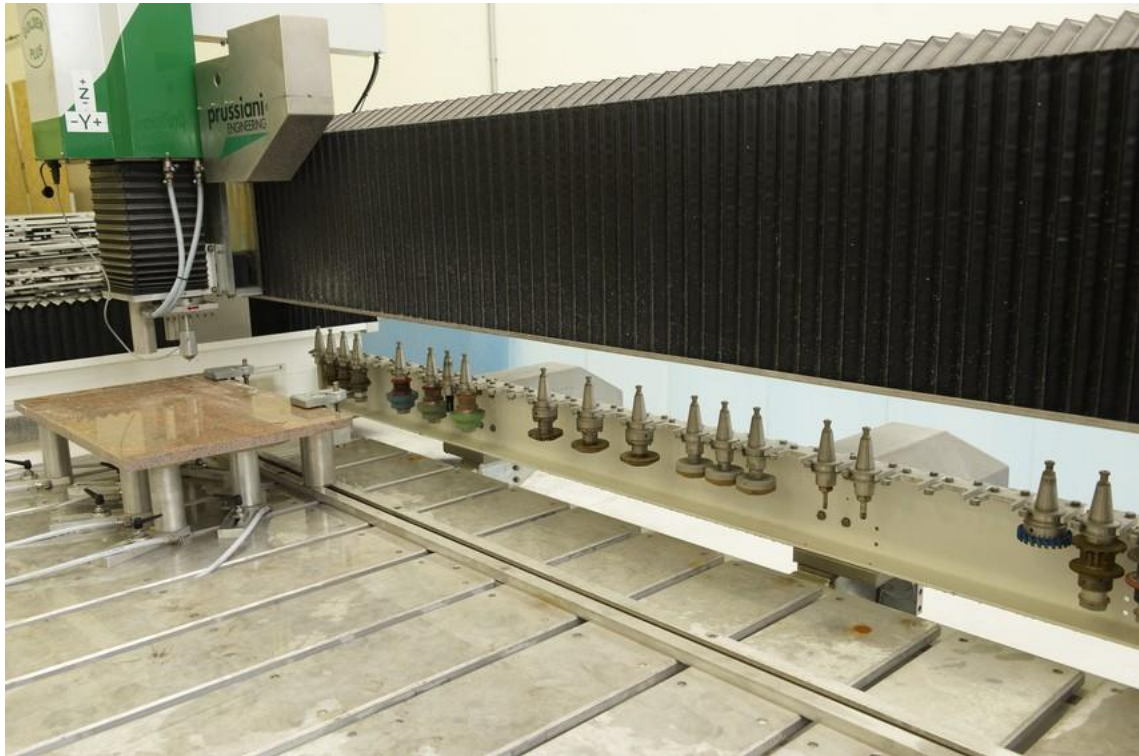
A természetes kőzetek egyre nagyobb teret hódítanak. Ezek egyik legelterjedtebb képviselője a gránit. Elterjedésükhöz hozzájárul szép megjelenésük és az, hogy számos színváltozatban fellelhetők. Megjelenésüket az teszi különlegessé, hogy a gránitban található alkotó ásványok szemcséi szépen körvonalazódnak, szabad szemmel is jól láthatóak. Ennek köszönheti, hogy az építészetben is előszeretettel alkalmazzák.

Ami a megjelenésének szempontjából előnynek számít, az a megmunkálhatóság szempontjából hátrány. A megmunkálhatóság úgy definiálható, mint az anyag megmunkálási könnyedsége fajlagos energia vagy nyírófeszültség tekintetében. Az anyagok megmunkálhatóságának fontos gazdasági mérőszáma a relatív forgácsolási sebesség egy adott szerszámélettartalmára vonatkozóan, ami valamilyen anyagot vág, összehasonlítva egy azonos szerszámanyaggal, amelyik standard anyagot vág. Az acélipar a B1112 acélt hozta létre, mint standard anyag. A forgácsolás szempontjából is meghatározható a megmunkálhatóság, ebben az esetben a fordulatszám a központi elem, hogy mekkora fordulatszám mellett tud a szerszám adott körülmények között kielégítő teljesítményt nyújtani. Egyéb tényezőket is használnak a megmunkálhatóság jellemzésére, ide tartozik pl. a szerszámkopási sebesség, az elérhető felületi minőség, az elérhető tűrés, a vágási hőmérséklet vagy az anyag mechanikai tulajdonságai, pl. keménysége [100]. Disszertációmban a megmunkálhatóság jellemzésére a felületi minőséget vettem alapul.

A szemcséket eltérő ásványok alkotják, a különböző ásványok pedig különböző elemekből épülnek fel. Ezért fontos az ásványok elemi összetételének vizsgálata, hiszen tudjuk, hogy az elemeknek igen nagy befolyásoló szerepük van. Ezek mellett mivel természetes kőzetekről beszélünk, minden egyes ásvány összetételét meg kellett vizsgálni külön-külön, mert a kialakulásuk körülményeinek köszönhetően az atom%-os összetételben eltérések mutatkozhatnak és mutatkoznak is. Ezen nehézségek mellé még a szemcsék alakította felület heterogén szerkezetet mutat. A megmunkálást ez a heterogén tulajdonság nehezíti meg a leginkább.

## 8.1 A MEGMUNKÁLT MINTADARABOK JELLEMZŐI

A kísérlet során egy kísérleti folyamatot alakítottam ki, amely során a kőzet összetételét, kialakítását és keménységét vizsgáltam. Elmondható, hogy minden gránitminta tartalmazott kvarc, földpát és biotit ásványokat, eltérés a földpát ásványok típusában volt.



34. ábra A minták felületén lévő sávot kialakító CNC berendezés és a hozzá tartozó különböző szerszámok

A természetes kőzet táblák felületei a korábban már bemutatott Italian Prussiani Golden Plus (CNC) géppel (34. ábra) lettek kialakítva. A megmunkálás vágási mélysége 1 [mm], a vágás szélessége 40 [mm], az előtolás 0,8 [mm/ford.]. A megmunkálás során használt anyagleválasztási sebesség pedig 37,7 [m/min] volt.

## 8.2 KEMÉNYSÉGMÉRÉS

A megmunkált kőzet lapokból kb. 5x5 [cm] méretű minták kerültek levágásra (35. ábra), hogy azokat könnyen a különböző mérőberendezések asztalára lehessen helyezni.



35. ábra A közettömbökből levágott mintadarabok

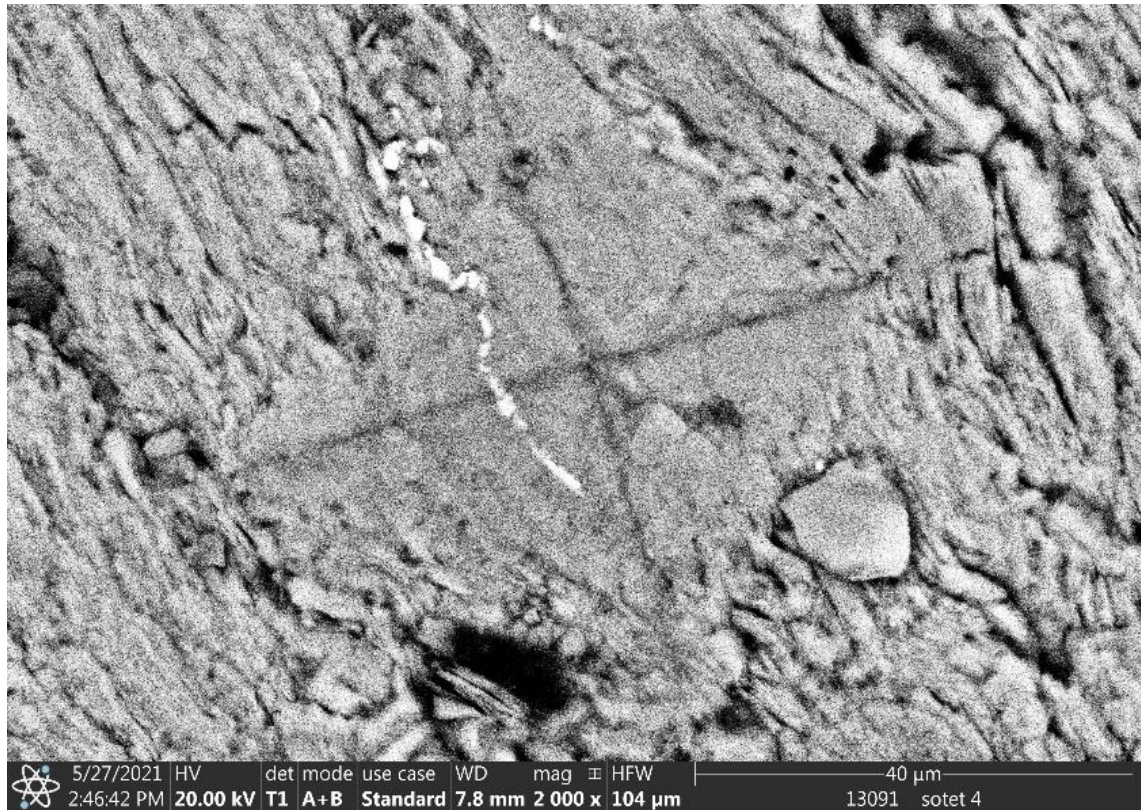
A vizsgálat során azonos típusú ásványok lettek kiválasztva. Először a biotit ásványokat vizsgáltam meg, amelyeket jellegzetes sötét/fekete színük alapján tudtam beazonosítani. Ezt követően a földpát és kvarc ásványok kerültek megvizsgálásra. Az utóbbi kettő esetében már nehezebben lehetett őket megkülönböztetni egymástól, de a későbbi anyagösszetétel vizsgálat során pontosan meghatározhatóvá vált az ásványok típusa.

Az ásványok keménységét elsősorban a Mohs-skála szerint szokták megadni. Ahogy azt már korábban is említettem, ez pontos, egzakt értéket nem ad, csak a különböző ásványok egymáshoz viszonyított keménységét tükrözi.

Másodsorban a fémeknél alkalmazott keménységmérési módszereket lehet megemlíteni. Ebben az esetben a mérési eredmények pontos értéket adnak, de nagy mértékben befolyásolja értéküket az ásványok különböző összetétele és felületi érdessége.

A természetes kőzetek, bár semmi közük egymáshoz, mégis az elemi összetételüket figyelembe véve átfedést mutatnak a szilikát kerámiákkal. A kerámiák esetében bevett mérési eljárás a Vickers-féle mikrokeménység mérés, amelyet előszeretettel alkalmaznak is. Nagy hátránya, hogy roncsolja a vizsgálandó felületet, és az eredményeket nagyban befolyásolja a felületek egyenetlensége is.





36. ábra A Vickers-keménységmérést végző négyzet alapú gúla lenyomata

A mintadarabok felületét keménységmérés előtt felpolíroztam a Struers DP-U2 félautomata csiszológéppel. A csiszolás során 1 [μm] szemcse nagyságú monokristályos gyémánt szuszpenziót használtam, hogy a felületi egyenetlenség okozta mérési pontatlanságot elkerüljem. Ezután kerültek át a minták a keménységmérő berendezésbe.

A méréseket a berendezések fejezetben ismertetett WOLPERT W Group Vickers-keménységmérő 402MVD típusú berendezésen végeztem.

A mérés során a mintadarabot ráhelyeztem a mérőasztalra, majd a szoftver segítségével a megfelelő ásvány fölé helyeztem a Vicker-keménység mérésére szolgáló 136°-os négyzet alapú gyémánt gúlát. A mérés elindítása után a kúp belenyomódott az ásvány felületébe, ahol lenyomatot hagyott (36. ábra), amelynek a csúcsait a berendezésbe beépített mikroszkóp segítségével megjelöltem. A gép kiértékelte az eredményt, amely annak kijelzőjén jelent meg.

### 8.3 SEM VIZSGÁLAT

A pásztázó elektron mikroszkóppal (SEM) a kémiai összetételt lehetett meghatározni. A FEI/Thermofischer Apreo S; Philips XL 30 ESEM berendezés a mintadarab felületének elemi összetételét vizsgálta. A vizsgálatok kis vákuumban és 20 [Å]-ös felbontásban készültek. A kiértékelés során a berendezés felvételt készített a felületről, majd a kijelölt területek összetételét kiértékelte. Az eredményeket %-os összetételben adta meg, amelynek ismeretében következtetni lehetett az alkotó ásványok típusára.

### 8.4 EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

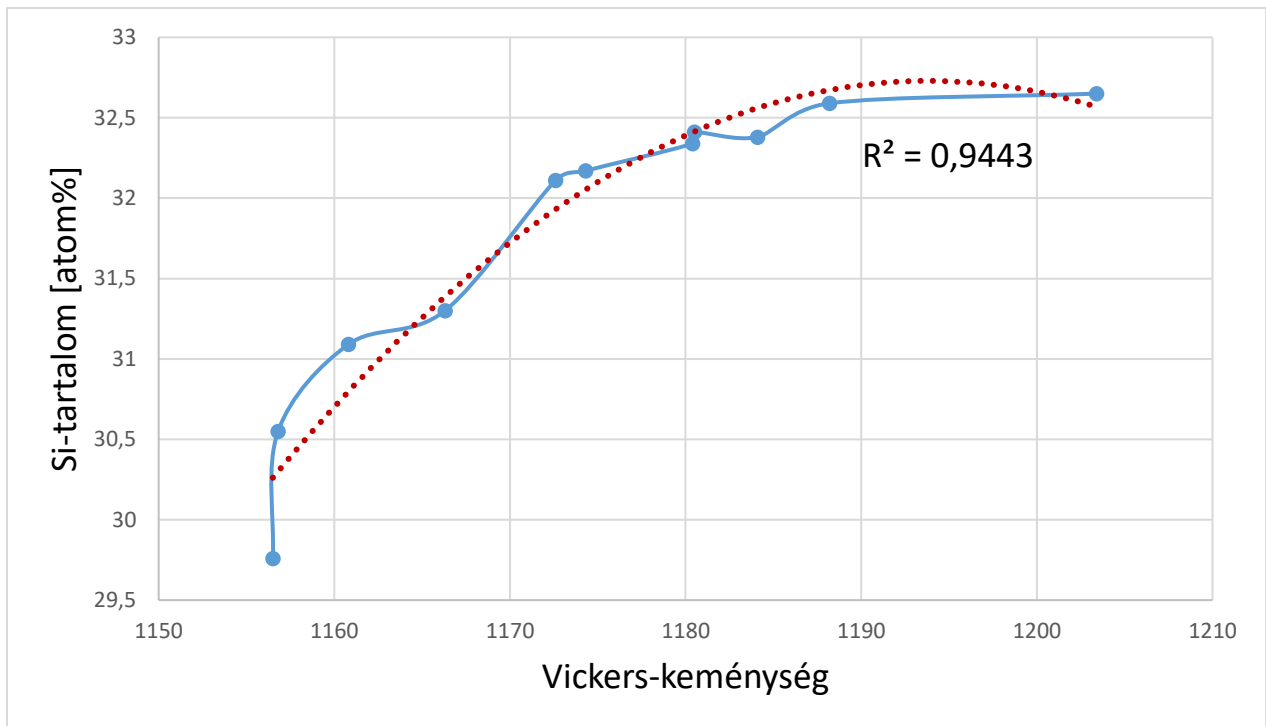
A vizsgálatok során 4 különböző mintadarab felületén vizsgáltam a biotit, földpát és kvarc ásványokat.

Először a biotit ásványok kerültek a keménységmérő berendezés gyémánt gúlája alá. Az már korábban is ismert volt, hogy a  $SiO_2$  tartalom és a szemcsék nagysága nagyban befolyásolja a mintadarabok keménységét, ezzel a megmunkálhatóságát is. Azt azonban még nem kutatták, hogy a szemcsék atom%-os összetétele befolyásolja-e és ha igen, akkor hogyan befolyásolja a keménység változását. A mérési eredmények nem mutattak összefüggést az értékek között a biotit ásvány esetében, nem találtunk összefüggést a  $Si$ -tartalom és a Vickers-keménység között.

További mérési eredmények is azt mutatták, hogy a biotit ásványok atom%-os összetétele nem mutatott összefüggést a Vickers-keménységgel. A kiértékelés során külön-külön is megvizsgáltam az alkotó elemeket ( $Mg, Al, K$ ), de egyik esetben sem volt elmondható, hogy az alkotók változása hatással lenne a keménység változására.

A gránitok keménységét több kutatás is a kvarc tartalommal hozta összefüggésbe, ezért megvizsgáltam, hogy a keménység változik-e a  $Si$ -tartalom függvényében. A kvarc ásványok esetében a 37. ábrán is jól látható, hogy erős összefüggést mutatnak az eredmények. A kis mértékű eltérések adódhatnak a szennyezők hatásaként, pl.  $Al$  vagy  $Na$ -tartalom csökkenti a Vickers-féle mikrokeménységet. Ezek az értékbeli eltérések a kvarc kristályosodása során kialakult szerkezethez vezethetők vissza.





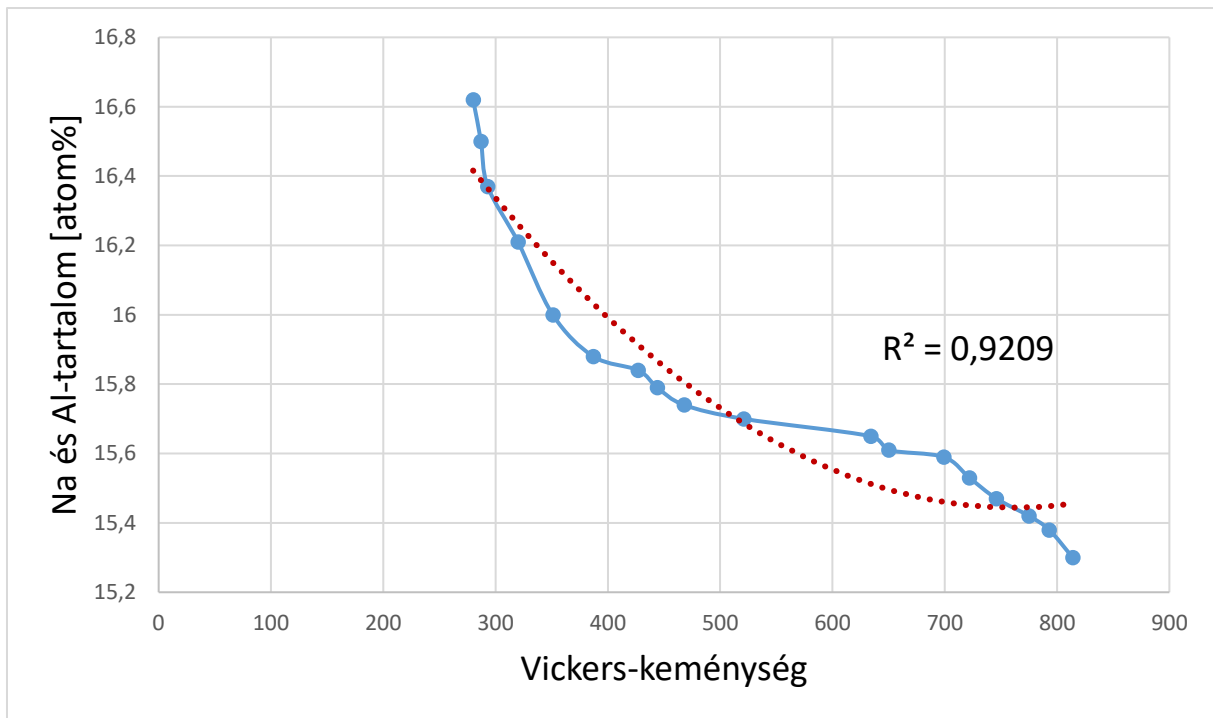
37. ábra A kvarc Si-tartalmának változása a Vickers-keménység függvényében

Tehát elmondható, hogy a *Si*-tartalom növekedése a kvarc ásványok esetében növeli a Vickers-keménység értékét. Ezt alátámasztják azok a szakirodalmi elemzések, amelyek a kvarc tartalmat teszik felelőssé az egyes természetes gránitok keménységének változásáért.

A következő vizsgált ásványcsoport a földpátok voltak. Itt a mikroklin, labradorit, ortoklász és albit eredményeit egyben értékeltem ki, nem bontottam szét őket ásványok szerint. A mérési eredmények kiértékelése után több összefüggést is kaptam. A *Si*-tartalom növekedése mellett a *Na* és *Al* együttes értéke csökkent.

A földpátok esetében általában az *Al* szokott beépülni a *Si* helyére, a *Na* pedig a töltés kiegyenlítődsé kapcsán kerül az ásványba. Ezek az események eredményezik azt, hogy a *Na* + *Al*-tartalom növekedése mellett a *Si*-tartalom csökken, valamint ahhoz is hozzájárulnak, hogy eltérés mutatkozik az atom%-os összetételben.

Méréseim eredményeit az alábbi diagramon (38. ábra) szemléltetem. A *Na* + *Al*-tartalom növekedésével fordítottan tendenciát mutat a Vickers-keménység értékének változása. Amennyiben csökkent a *Na* + *Al*-tartalom az ásványban, akkor a Vickers-keménység értéke nőtt. Tehát a *Na* + *Al* a Vickers-féle mikrokeménységet befolyásoló ásványalkotó együttes.



38. ábra A Vickers-keménység és a földpátok Na+Al-tartalma közötti kapcsolatot szemléltető diagram

Az illesztett másodfokú görbéhez erős korrelációt mutatnak az értékek ( $R^2 = 0,9209$ ).

## 8.5 KÖVETKEZTETÉS

A természetes kőzetek megmunkálásakor fontos szempont az azokat alkotó ásványok keménysége, mivel a felület keménysége nagyban befolyásolja a megmunkálás lehetőségeit. Előzetes mérések alapján megvizsgáltam a megmunkálandó felületen lévő földpátok összetételét, amelynek ismeretében előrebecsülhető az ásványok keménysége. Ennek ismeretében a megmunkáló berendezés paramétereit annak megfelelően lehet beállítani, hogy az adott felületen milyen összetételű ásványok a jellemzőek. A kvarc ásványok vizsgálata nem hozott meglepő fordulatot, alátámasztotta az eddigi ismereteinket, miszerint a kvarc tartalom növekedése hozzájárul a keménység növekedéséhez.

A biotit ásványok esetében nem lehet egyértelmű értékekkel szolgálni a megmunkálás szempontjából. A növekvő *Si*-tartalom a biotit ásványban nincs hatással a Vickers-keménység változására. A *Na + Al* összetételt vizsgálva ezeknél az ásványoknál elmondható, hogy ez sem mutat tendenciát sem a keménységgel, sem a *Si*-tartalom változásával. A földpátok esetében ezzel ellentétben kijelenthető, hogy a *Na + Al*-tartalom csökkenésével a keménység

növekedett, valamint emellett a  $Na + Al$ -tartalom csökkenés mellett a  $Si$ -tartalom növekedése is megfigyelhető. A  $Si$ -tartalom csökkenése oda vezethető vissza, hogy a szilikát tetraédereiben elhelyezkedő 4 vegyértékű  $Si$  helyére 3 vegyértékű  $Al$  épül be, és töltéskiegyenlítőként  $Na$  lép be a rendszerbe. Ez a változás természetesen az ásvány mechanikai tulajdonságait is befolyásolja, kisebb keménységű anyagot eredményez, amely könnyebben és jobban megmunkálható.

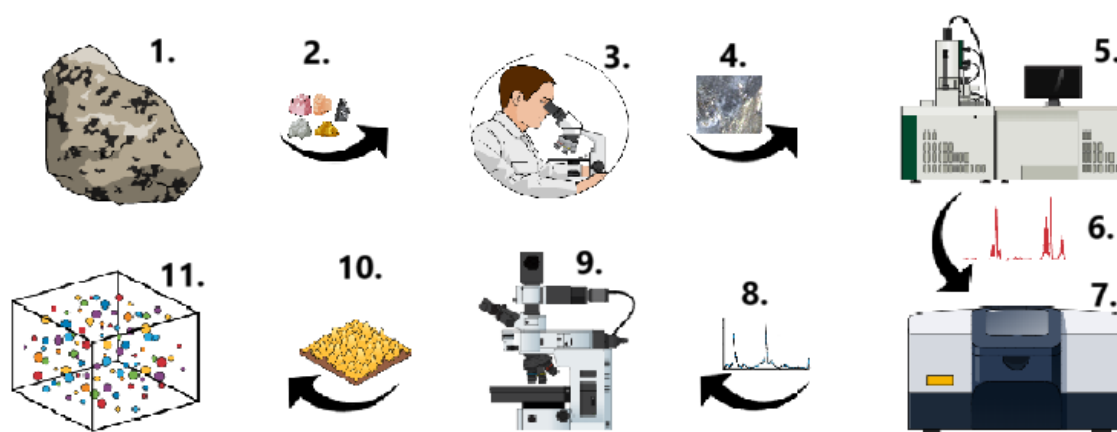
Mivel a gránitban többféle földpát is megjelent, ezért ez a kutatási eredmény nagy előrelépés volt egy előrebecslő rendszer kialakításának szempontjából.

## 9. A *Fe* és *Si* –TARTALOM EGYÜTTES HATÁSA A FELÜLETI ÉRDESSÉGRE

A keménység esetén vizsgált elemi összetétel nem mutatott minden ásvány esetében összefüggést, de kíváncsivá tett arra, hogy ezen az úton induljak el. A vizsgált ásványok elemi összetételét kezdtem el megvizsgálni, és esetleges összefüggéseket kerestem a változásukban. Különböző kombinációkat alakítottam ki (*Mg + Al*, *Na + Al + Mg*, *stb.*), csoportosítottam az alkotó elemeket és elemeztem a változásokat.

### 9.1 A KUTATÁS FOLYAMATA

A kutatás során fizikai paraméterek és elemösszetétel került megvizsgálásra. Ezeket egy berendezésen nem lehetett elkészíteni, ezért egy egymásra épülő mérési sort alakítottam ki, amelyet a 40. ábra részletesen mutat be.



39. ábra A vizsgálatokhoz szükséges mérési folyamat

Nem minden esetben, de a legtöbbször a mérések egymásra épültek, logikai sorrendet kialakítva maguk között. A megmárt felületen lévő ásványokat először fénymikroszkóppal (39./3. ábra) azonosítottam be, majd a kiválasztott ásványokat vizsgáltam csak a továbbiakban.

### 9.2 FELÜLETEK ÉS MINTADARABOK KIALAKÍTÁSA

A vizsgálat legfontosabb eleme a különböző ásványoknak az elemi összetétel meghatározása volt (39./5.-8. ábra). A vizsgált felületek (39./2. ábra) egyforma megmunkálási

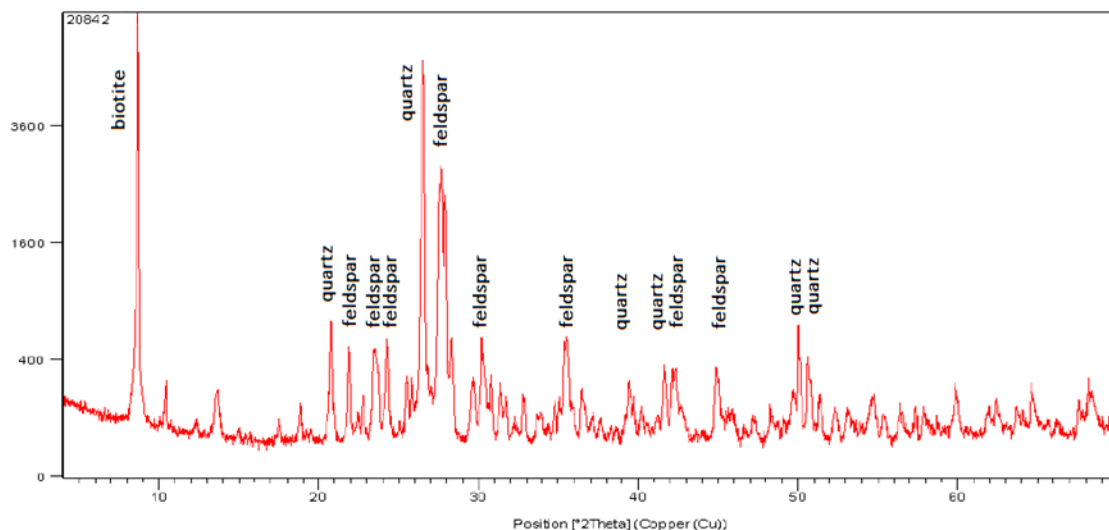
paraméterekkel lettek kialakítva, mint anyagleválasztás mélysége: 1 [mm], anyagleválasztás szélessége: 40 [mm], előtolás: 0,8 [mm/ford.], anyagleválasztási sebesség: [37,7 m/min].

A méréseket 4 különböző gránitmintán végeztem. Ezt azért tartottam fontosnak, mert így az alkotó ásványok különböző arányban jelentek meg a felületen és ezek az eltérések számításaim szerint más-más értéket eredményeztek. Ezeket a mérési eredményeket a 11./2. számú (11. ábra, 2. mintadarabja) minta segítségével mutatom be részletesen.

A megmunkált kőzetekből kb. 50 x 50 x 20 [mm] vastag szeletek lettek levágva, amelyeknek a felületét sűrített oxigénnel portalaníttam. Ezek a kisméretű mintadarabok könnyen szállíthatók és a különböző mérőberendezések tálcájára is problémamentesen felhelyezhetőek voltak. A mintadarabok számos vizsgálaton átesetek.

### 9.3 A PORÍTOTT MINTÁK RÖNTGENDIFFRAKCIÓS VIZSGÁLATA

A különböző minták anyagösszetételének meghatározásakor Philips PW 3710 X-ray diffraktométer (XRD) berendezést használtam. A mintákat 10 [µm] alá porítottam achát mozsárral, mert így tudtam biztosítani, hogy szennyező ne kerülhessen az anyagba, majd üveg mintatartóba helyeztem. A 11./2. minta eredményei azt mutatták (40. ábra), hogy a porított minta kvarcot, csillámot és földpátokat tartalmazott.

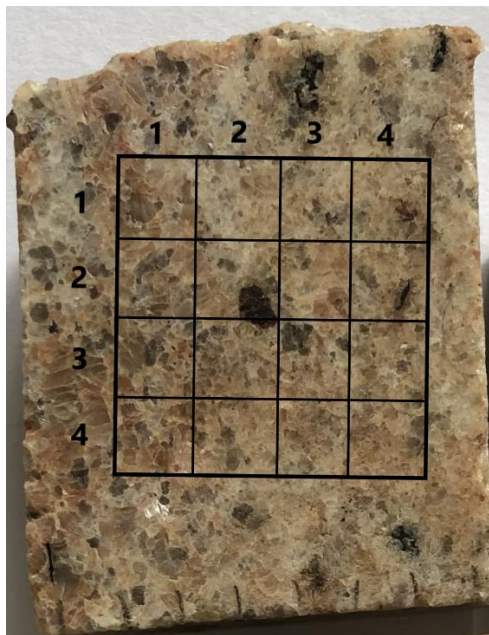


40. ábra A 11./2. minta röntgendiffraktométer által kapott eredmények

Ezek az eredmények nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy a későbbiekben az egyedi ásványokat be tudjam azonosítani. A pontos eredmény elérésének érdekében elektronmikroszkópban is megvizsgálásra kerültek a minták.

#### 9.4 A FELÜLETEK FÉNYMIKROSKÓPOS ÉS ELEKTRONMIKROSKÓPOS MÉRÉSE

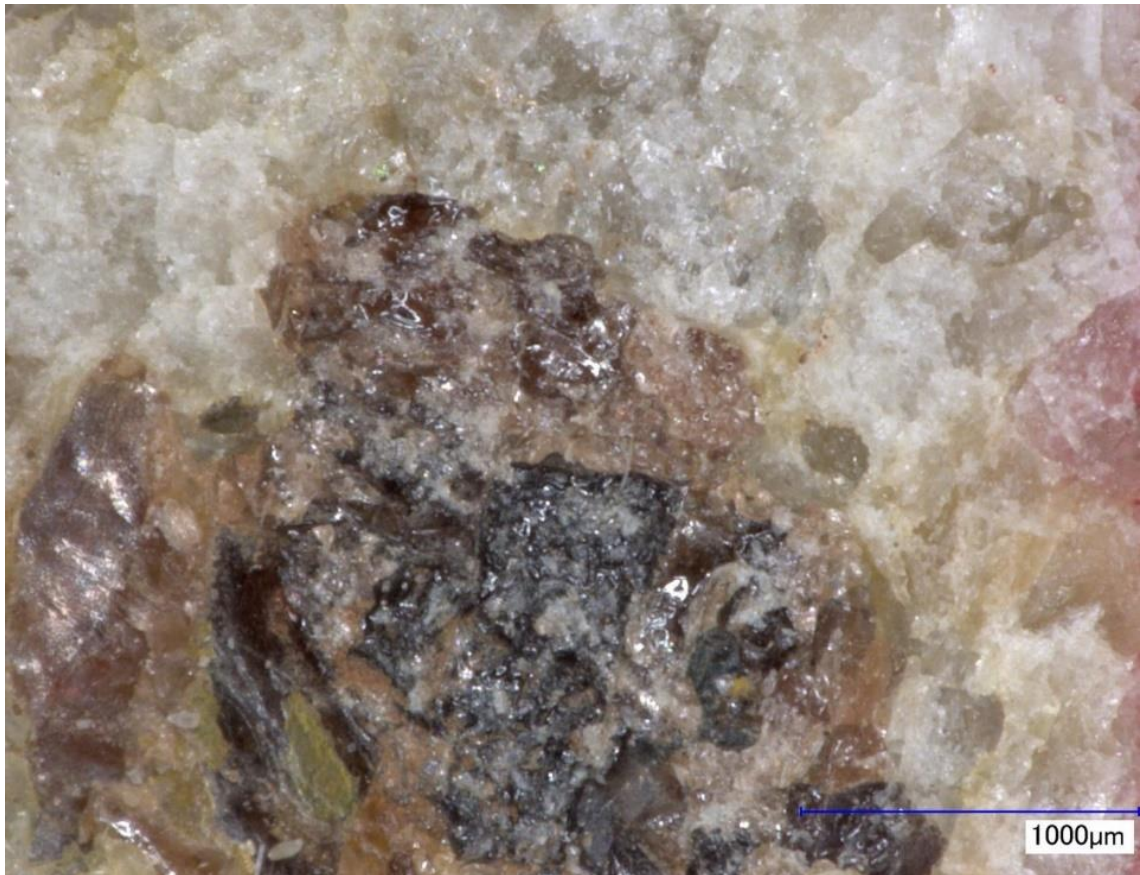
Az előkészített mintadarabok felületére egy 40x40 [mm]-es négyzetet rajzoltam, amelyet 10 [mm]-ként felosztottam, így létrejött egy 4x4-es háló (41. ábra).



41. ábra A 11./2. számú mintadarab felületére kirajzolt 4x4-es háló

Erre azért volt szükség, hogy a felületen található ásványokat könnyebben be lehessen azonosítani és a különböző mérések ugyanazon ásványokon legyenek elvégezve. A vízszintes és függőleges sorokat egyaránt beszámoltam, így a 10x10 [mm]-es kis kockákat egyedi számmal tudtam jelölni.

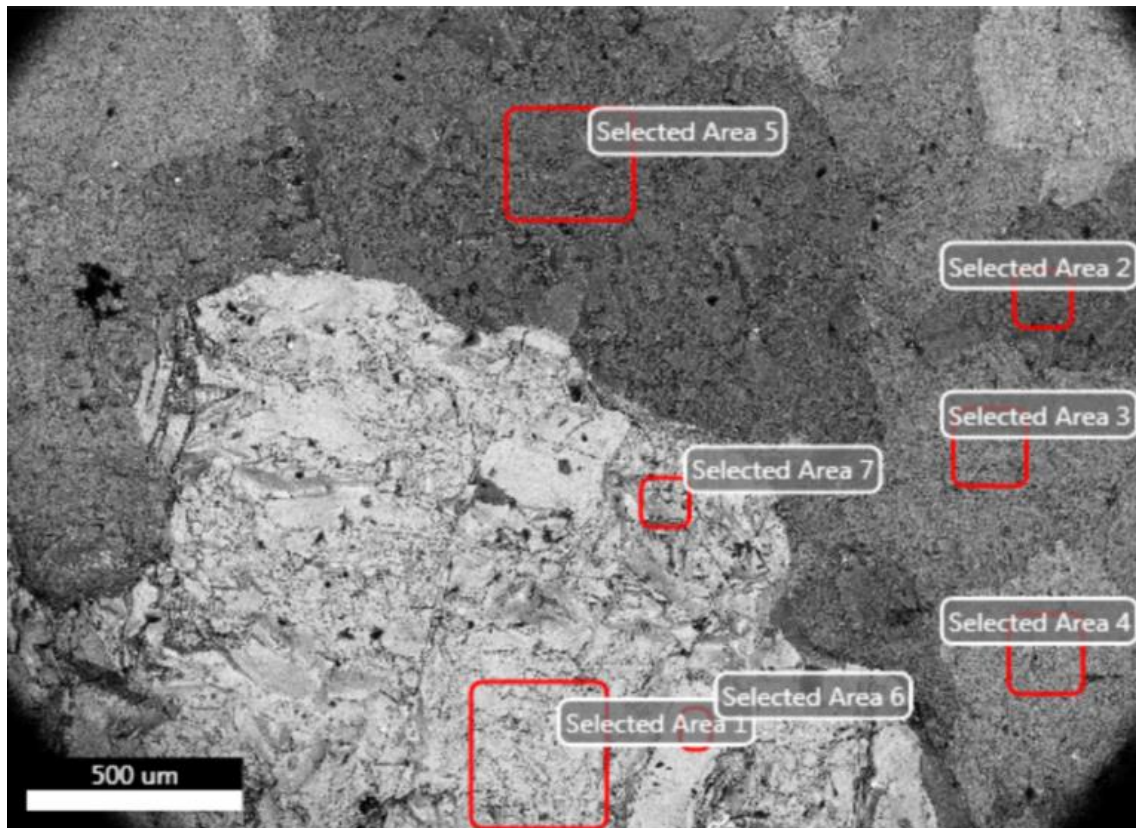
A vizsgálat során a Keyence VHX 2000 (2D/3D képalkotó, 54 megapixel 3CCD kamera) fénymikroszkópot használtam (39./3. ábra.). A mintadarabok felületeiről 50-szeres és 100-szoros nagyítást egyaránt készítettem (42. ábra). Korábbi vizsgálataim során a színek nagy jelentőséggel bírtak. Akkor a felületen elhelyezkedő ásványokat általánosságban vizsgáltam, és egyedi színük alapján tudtam beazonosítani. Ebben a vizsgálatban azonban nagyon fontos, hogy pontosan ugyanarról az ásványról készüljenek a felvételek és a mérések.



42. ábra A 41. ábrán látható mintadarab 2 oszlopában és 2 sorába lévő ásványok

A fénymikroszkópos felvételek elkészítése után pásztázó elektronmikroszkópba (39./5. ábra) kerültek a mintadarabok, és a korábban már fénymikroszkóppal megvizsgált területekről felvételek készültek. A mikroszerkezet alacsony vákuumban (20 [Å]) került megvizsgálásra. A felvételt ezt követően a szoftver kiértékelte (39./6. ábra).





43. ábra A 43. ábra SEM felvétele

A 43. ábrán látható eltérő kontraszttal rendelkező területek különböző ásványokat mutatnak. Az ásványok atom%-os összetételét az energiadiszperziós spektrométer (EDS) segítségével köszönhetően a szoftver kiértékelte (39./6. ábra). A kapott eredményeket a 4. táblázat foglalja össze, ahol a sorszámok a *Selected Area* sorszámaira utalnak:

4. táblázat A 11./2. számú mintadarab 2,2 cellájának atom%-os összetétele

Nr.	O	Mg	Na	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe
4-I-III (1) földpát	60,66	3,25		10,23	17,46		0,81	0,57	9,86
4-I-III (2) kvarc	66,53			0,67	32,8				
4-I-III (3) földpát	60,78		7,39	9,14	20,81	0,34	1,54		
4-I-III (4) földpát	63,07		2	7,5	21,82	5,32			0,28
4-I-III (5) kvarc	67,79				32,21				
4-I-III (6) földpát	67,36	3,55		9,56	13,05		0,39	0,34	5,75
4-I-III (7) földpát	58,18	2,49		9,4	14,85	0,25	0,82	0,79	13,22

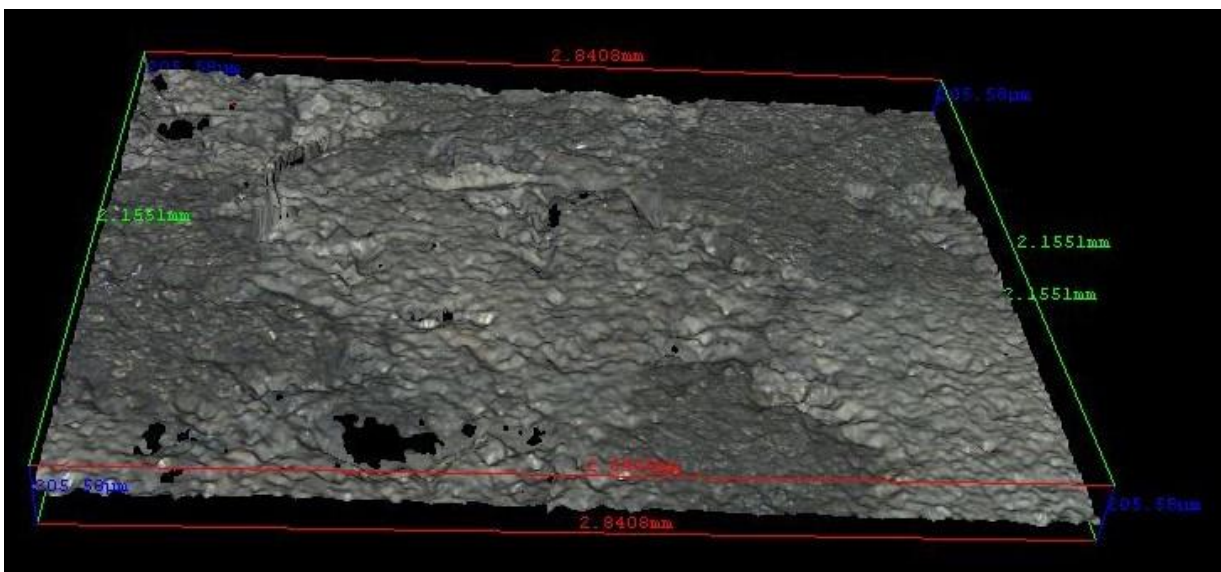


A vizsgálatok során nem az ásványok típusa (elnevezése) a meghatározó, hanem az alkotó ásványok elemi összetétele. A táblázatban is látható, hogy több földpát (mikroclin, labradorit, ortoklász, albit) is megvizsgálásra került a 11./2. számú mintadarab adott felületén, azonban az atom%-os összetételükben eltérnek. Ezen ásványoknál a legjelentősebb eltérés a vas mennyiségében látható. A vizsgálat alapjául az összetevők változásának a felületi érdességet befolyásoló hatása szolgált. Számos tanulmány foglalkozott már azzal, hogy az ásványok keménysége hogyan befolyásolja azok megmunkálhatóságát, különböző fizikai paramétereit. Ebből kiindulva vizsgáltam, hogy az ásványok összetétele milyen módon és mértékben befolyásolhatja a felületi minőséget.

### 9.5 MÉRÉS AZ ALICONA INFINITEFOCUS IFM G4 BERENDEZÉSSEL

A minták vizsgálatához az *Alicona InfiniteFocus IFM G4* 3D-s képalkotó berendezést (39./9. ábra) használtam. A mérhető minimális érdesség  $0,15\ \mu\text{m}$ , a maximálisan mérhető felület  $10000\ \text{[mm}^2\text{]}$ , a mérési távolság pedig  $17,5\ \text{[mm]}$  volt.

A vizsgálat során a mintadarabot precízen lehetett mozgatni. A mérés során először a fénymikroszkóp segítségével megvizsgáltam a mintadarabok megfelelő felületét (40./3. ábra), majd bepozicionáltam és az érdességmérő szoftver segítségével a kiválasztott ásványon mérést végeztem (39./9. ábra). A megfelelő 3D-s kép elkészítéséhez először alá kellett fókuszálni, majd fölé és a berendezés e két fókusz között vizsgálta a felületet. A vizsgálat során a detektor nem érzékelt minden visszaverődő fényt, így a fókuszon kívülről érkező fény a detektort nem gerjesztette (44. ábra).



44. ábra A kijelölt terület felületi érdessége

A vizsgálat pár percig tartott, majd a szoftver kiértékelte az adatokat. A berendezés nem csak terület alapú felületi érdességet mért, hanem vonal alapút is. A gépkönyvben található adatok és a korábbi mérések is alátámasztották, hogy a terület alapú felületi érdesség mérése során pontosabb értéket kaptam az érdességértékek tekintetében.

A vonal alapú felületi érdesség esetében a berendezés alsó méréshatára 0,3 [ $\mu\text{m}$ ] volt, míg a terület alapú, ahogy azt korábban már ismertettem, 0,15 [ $\mu\text{m}$ ]. A mérés pontosságának függvényében változott a mérés idejének hossza is. Minél pontosabb mérést készítettem, annál több időt vett igénybe a kiértékelés.

## 9.6 EREDMÉNYEK

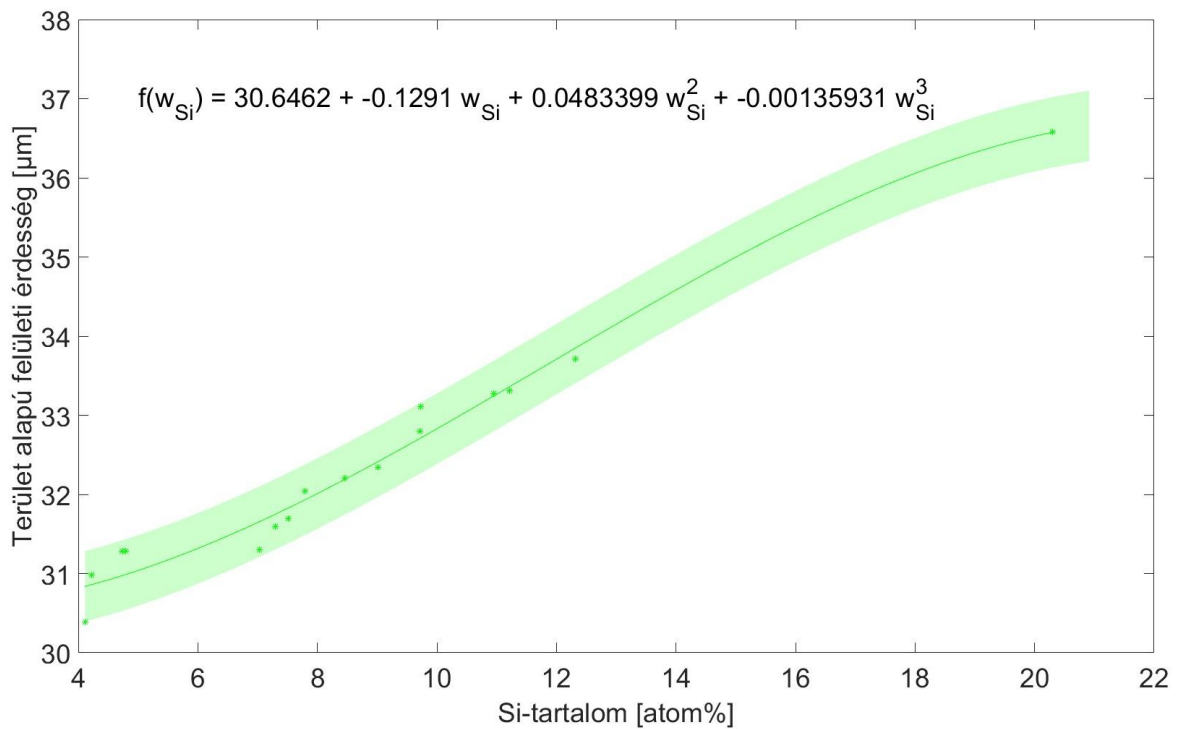
Az eredmények grafikus és statisztikai kiértékeléséhez egyaránt a MATLAB R2020a programot (39./11. ábra) használtam.

A mérések kiértékelése során megvizsgáltam a különböző összetevők hatását a felületi érdességre 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség mellett. Azokat az összetevőket figyeltem, amelyek az adott ásványtípus mindegyikében fellelhetők. Például a csillámok (biotit) esetében ilyen vizsgált összetevő a *Mg, Na, Al, Si, Ti, K* és a *Fe*. A földpátok, mint albit, mikroklin, labradorit, ortoklász esetében ezek a *Na, Al, Si, K, Ca* és *Fe* voltak.

A korábbi vizsgálatok segítségével megállapítottam az ásványok típusát (kvarc, földpát, csillám), SEM vizsgálattal pedig elemeztem az összetételüket.

Jelen kutatásommal megerősítettem, hogy a *Si*-tartalom nagy mértékben befolyásolta a kvarc ásvány felületi érdességét.

A kijelölt ásványok elemanalízisét elvégeztem, majd az alkotó elemeket táblázatba vezettem át.



45. ábra A Si-tartalom és a felületi érdesség közötti kapcsolat kvarc ásványok esetén

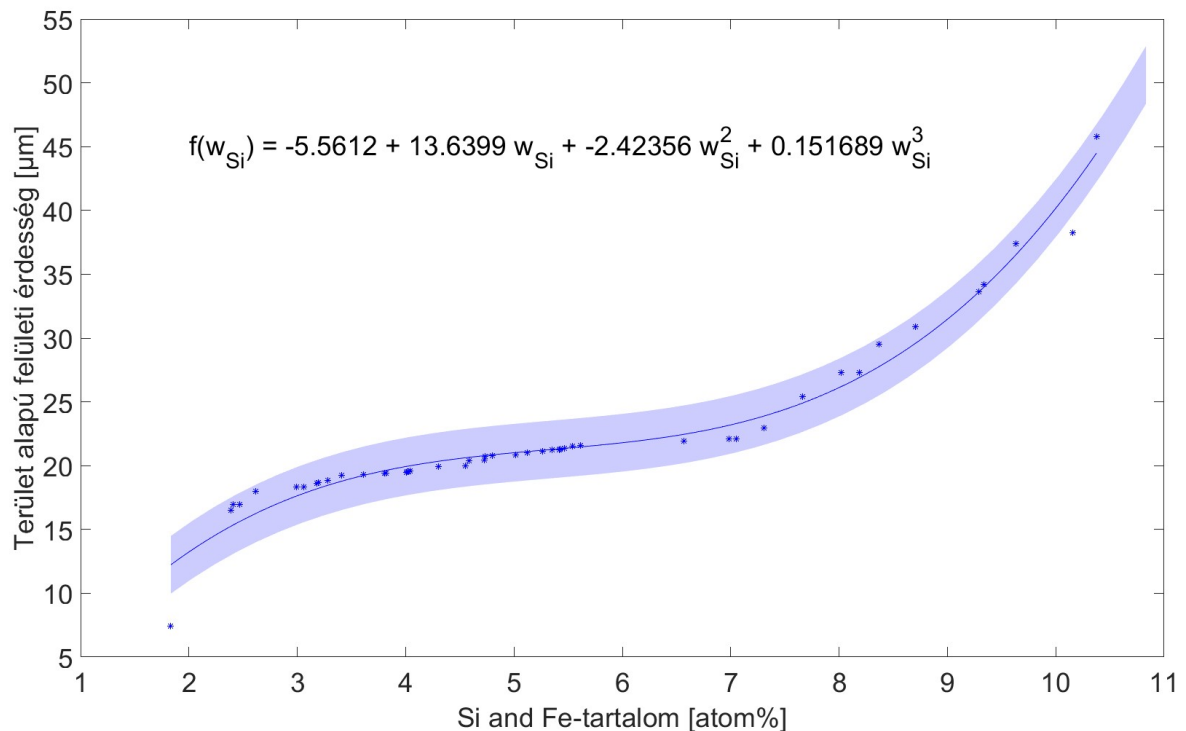
A kvarc esetén elmondható, hogy 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség mellett a megmunkálhatóságot a Si-tartalom befolyásolta, ezáltal nagy hatással volt a felületi érdességre is. A mérések is azt mutatták, hogy ahogy nő a Si mennyisége, úgy nő a felületi érdesség értéke is (45. ábra). Tehát minél nagyobb a Si-tartalma egy kvarc ásványnak, azaz minél kevesebb adalékanyagot és szennyezőanyagot tartalmaz, annál nagyobb felületi érdességi értéket mutat 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség értéknél. A természetben előforduló gránitokban levő kvarcok azonban többnyire tartalmaznak szennyeződések, ezért volt fontos része a kutatásnak, hogy a „szennyezett” kvarcokra is megvizsgáljuk a Si-tartalom és a felületi érdesség közötti kapcsolatot.

A diagramon jól látható, hogy a Si-tartalom nagyban befolyásolta a kvarc ásvány felületi érdességét. A mérési pontokra illesztett harmadfokú görbéhez erősen korreláltak az eredmények:  $R^2 = 0,871$ , és a szignifikancia együtthatója  $P_{quartz} = 1,83 \cdot 10^{-21}$  is azt támasztotta alá, hogy az eredmény statisztikailag szignifikáns. A szignifikancia együttható értéke annyira kis érték, hogy akár 0 értéknek is tekinthető.

Minden görbe esetén elmondható, hogy a modell predikciója valamekkora hibával terhelt, és ezekből a modell hibákból konfidencia intervallumot tudunk számolni. A konfidencia

intervallumot különböző szintek mellett lehet megadni, a 46-48. ábrákon a 95%-os konfidencia intervallum látható, amely azt jelzi, hogy 95% valószínűséggel a tartományba esnek a mérési adatok és nagy valószínűséggel a további mérési eredmények is ezen tartományon belül fognak megjelenni.

Emellett megállapítottam, hogy ez a jellegzetesség a másik két vizsgált ásványcsoport esetén (földpát és csillám) nem jelenthető ki, a *Si*-tartalom önmagában nem módosította a felületek érdességét. A *Si* és *Fe*-tartalom folyamatosan változott, egyik esetben a *Si* mennyisége volt a meghatározóbb, másik esetben a *Fe* volt a domináns alkotó. A méréseket a kvarchoz hasonlóan végeztem, mindig ugyanarról az ásványról készült az elemanalízis, amelyikről utána a felületi érdesség mérés.



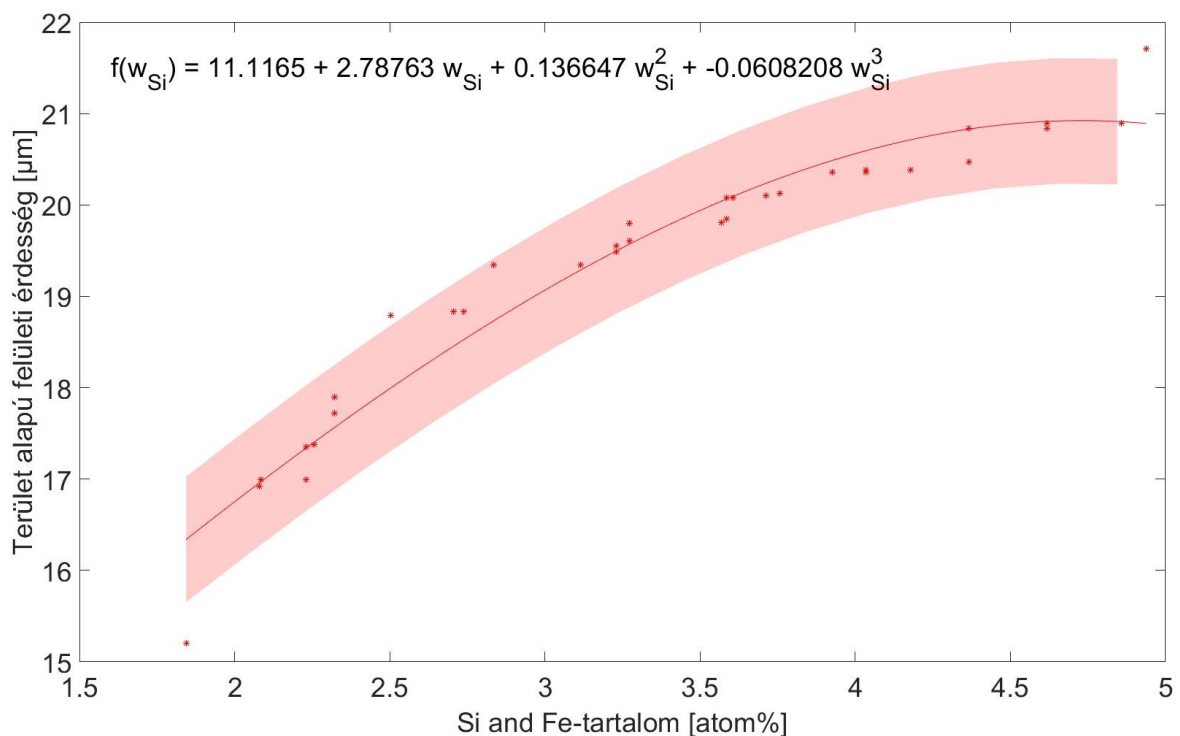
46. ábra *Si*- és *Fe*-tartalom együttes hatása a földpátok felületi érdességre

A mérések kiértékelése során megfigyeltem a földpátokban lévő *Si* befolyásoló hatását. Azonban a kapott eredmények nem mutattak semmilyen szabályszerűséget. A többi alkotó elemet, a *Fe, Mg, Na, Al, K, Ca* külön-külön, valamint kombináltan vizsgálva sem mutattak semmilyen tendenciát.

Azonban amikor a *Si* és *Fe* alkotók hatását együtt kezdem el elemezni, akkor az eredmények azt mutatták, hogy a *Si* és a *Fe*-tartalom együttes jelenléte befolyásolja a felületi érdesség változását. A többi alkotót is vizsgáltam, csoportosítottam őket különböző módokon, de nem találtam összefüggést.

A diagramon jól látható (46. ábra), hogy a *Si* + *Fe*-tartalom nagyban befolyásolja a földpát ásványok felületi érdességét 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség esetén. Erősen korrelált a harmadfokú görbéhez:  $R^2 = 0,962$ , és a földpátok esetében is elmondható, hogy a szignifikancia együttható elhanyagolhatóan kicsi volt ( $P_{feldspar} = 2,47 \cdot 10^{-30}$ ), ami szintén azt mutatja, hogy az eredmény statisztikailag szignifikáns.

A földpátok esetében megjelenő *Fe* egyértelműen szennyezőként van jelen az ásványokban. Általában az *Al* helyére épül be, de a *Fe* által kialakított kötési energia nagyobb, mint az *Al* esetén kialakuló kötés, így növekszik az ásvány szilárdsága, amely az anyagleválasztással szemben ellenállóbb lesz. Ez már molekula szintű értelmezése a kutatási folyamatnak.



47. ábra A *Si*+*Fe* együttes hatása a csillámok felületi érdességére

Ahogy a földpátok esetében is, úgy a biotit (csillám) ásványok esetében is a felületi érdességet nagyban befolyásolta a *Si* és *Fe*-tartalom (47. ábra). A földpátokhoz hasonlóan erről az ásványcsoportról is elmondható, hogy a *Si*-tartalom önmagában nem módosította nagy mértékben a felületi érdességet és a többi alkotó ásványt megvizsgálva sem mutatkoztak szabályszerűségek. Azonban a *Fe* mennyiségét is figyelembe véve egyértelmű tendenciát mutat a *Fe + Si*-tartalom és a felületi érdesség változásának mértéke 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség esetén.

Az eredmények által kirajzolt diagram szintén monoton növekvő tendenciát mutatott. A statisztikai számítások eredményei azt mutatták, hogy erős korreláció van a biotit ásvány felületi érdessége és a *Si + Fe*-tartalom között:  $R^2 = 0,937$ . Emellett a szignifikancia értéke  $P_{biotite} = 3,52 \cdot 10^{-60}$ , ami még a korábbi szignifikancia értékeknél is kisebb volt.

## 9.7 KÖVETKEZTETÉSEK

A korábbi vizsgálatokat és a kapott eredményeket figyelembe véve elmondható, hogy a gránit mintákban szereplő ásványok felületi érdességét a *Fe* és a *Si* együttes tartalma határozta meg 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség mellett. Ahogy növekedett a *Si* és *Fe* koncentrációja, úgy nőtt a felületi érdesség értéke is. Megállapítottam, hogy a felületi érdesség értékének változására elsősorban a *Fe* és *Si*-tartalom volt hatással, tehát ezek a felületi érdességet növelő alkotó elemek.

Kimutattam továbbá, hogy a *Fe* és *Si* összetételt külön-külön megvizsgálva a felületi érdesség tekintetében nem mutatott szabályos tendenciát, kivéve a kvarc esetében, amely nem, vagy csak kis mértékben tartalmazott *Fe*-t, mint szennyező elemet. A földpátok, mint mikroklin, albit, ortoklász, labradorit és a biotit ásványok esetében mind a *Fe*, mind a *Si*-tartalom külön-külön folyamatosan változott, csökkent is és nőtt is, miközben a felületi érdesség folyamatosan nőtt.

A többi alkotó elemet is megvizsgálva, azokat csoportosítva nem kaptam szabályszerű változást, így arra a következtetésre jutottam, hogy a *Mg, Na, Al, K, Ca* meghatározó mértékben nem befolyásolták a felületi érdességet, atom%-os változásuk nem eredményezett jelentős érdességnövekedést, sem csökkenést.

Tehát az alkotó elemeket vizsgálva egy újfajta szabályszerűség rajzolódott ki, amely a *Si* és a *Fe* változásán alapult. A mintadarabokban együttesen jelenlévő *Si* és *Fe* jelentős

befolyásoló hatással volt a megvizsgált darabok felületi érdességére. A mintadarabok *Si* és *Fe*-tartalmának változásával a felületi érdesség értéke is változott. Ha alacsonyabb volt a *Si* és *Fe*-tartalom, akkor a felületi érdesség értéke is kisebb volt, azonban, ha növekedett a *Si* és *Fe*-tartalom, akkor a felületi érdesség is növekedést mutatott 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebesség mellett.

## 10. ÖSSZEFOGLALÁS

A globális problémák miatt egyre nagyobb teret kapnak a természetes anyagok, azok, amelyek mind felhasználás során, mind pedig később hulladékként nem jelentenek komoly környezeti terhelést. Ehhez a csoporthoz tartoznak a természetes kőzetek is, amelyek felhasználási területe folyamatosan szélesedik.

Az irodalomkutatási részben látható volt, hogy bár számos cikk foglalkozott gránitokkal, természetes kőzetekkel, legtöbbjük mégis azok terhelhetőségét, mechanikai ellenállóképességét vizsgálták. Ide tartoznak a különféle melegítés és hűtésnek kitett kísérletek, az ütés hatásának vizsgálata, szakítószilárdsági vizsgálatok. Emellett a már említett globális problémák következtében a kőzeteket, mint hulladékot vizsgálták. Fontos szempont volt a hulladékpor felhasználása, így jutottak el a kutatók a gránitpor hulladék adalékanyagként történő felhasználásáig. Voltak, akik a felületi érdességgel foglalkoztak, de ők többnyire a feszültségek okozta repedések, törések felületét vizsgálták. A leginkább kutatott terület azonban a marás során kialakított felület hatása a marószerszámra, legtöbbször gyémántszegmensű tárcsára. A természetes kőzetek felületi minősége egyelőre feltáratlan maradt, azok heterogén összetételéből adódóan nehéz vizsgálata miatt.

Dolgozatomban a természetes ásványok minőségét befolyásoló tényezők vizsgálatával foglalkoztam. A vizsgálatok során a lépcsősen mart mintadarabokból 5 x 5 [cm]-es kis mintadarabok lettek levágva, amelyek könnyebbé tették a különböző vizsgálóberendezések mintatartójába való behelyezést. Az eredmények elérése érdekében számos eltérő vizsgálatnak vettem alá a mintákat. Vizsgáltam őket fénymikroszkópban, hogy a pontos színüket, formájukat vizsgálhassam, elektronmikroszkópban és röntgendiffraktométerben, hogy az elemi összetételüket meghatározhassam, konfokális mikroszkópban a felületi érdesség mérése érdekében. Használtam keménységmérőt és polírozó berendezést. A pontos keménységi adatok elérése érdekében a polírozó berendezés elhagyhatatlan kelléke volt a kutatási folyamatnak.

A vizsgálatok eredményeiből több összefüggést is le lehetett vonni. Fény derült arra, hogy a különböző ásványok nagyban, de eltérő módon befolyásolták a felület érdességét. A vizsgálat során a kvarc ásvány eredményezte a legérdesebb felületet, a biotit pedig a legsimábbat. A földpátok értékei a kettő között helyezkedtek el, legérdesebb a mikroklin, a labradorit majd az ortoklász volt, végül pedig az albit foglalt helyet a sorban.



A kőzetek marása során a különböző lépcsőket eltérő anyagválasztási sebességgel alakították ki. További kutatások eredménye arra mutatott rá, hogy a növekvő megmunkálási sebesség mellett a kialakult felületi érdesség fokozatosan csökkent, és ez összetételtől függetlenül elmondható minden mintadarab esetén. A mintákban található ásványok fokozatos csökkenő tendenciája minden mintadarab esetén fennállt, valamint az alkotó ásványok egymáshoz viszonyított sorrendje is megmaradt a különböző marási sebességek mellett.

A keménységmérő és polírozó berendezés mérési eredményei azt mutatták, hogy a felületi Vickers-féle mikrokeménységet befolyásolják az elemi ásványalkotók.

A korábban felállított ásványi sorrend az eltérő sebességek esetén is fennáll, valamint a felületek érdessége a marási sebesség növekedésének hatására csökkeni kezdett és ez mindegyik mintadarab esetén változatlanul igaz volt.

További vizsgálatok eredményei a Vickers-keménység és az ásványok összetétele közötti kapcsolatot tárta fel. Az ásványi összetevőket vizsgálva, külön-külön és különböző csoportokban is, azt a trendet mutatta, hogy a *Na + Al*-tartalom mértéke a földpátok esetén nagyban befolyásolja a felületen mért Vickers-féle mikrokeménységet. Ahogy a felületen lévő ásványban elkezdi csökkeni a *Na + Al* együttes tartalma, úgy kezd el növekedni annak a felületen mért Vickers-féle mikrokeménység értéke.

Az ásványalkotókat tovább csoportosítva, vizsgálva együttes hatásukat a *Fe* és *Si*-tartalom mutatott szabályszerűséget. Már nem csak a földpátok, hanem a biotit ásványok esetében is egyértelmű összefüggést mutatott a *Fe + Si*-tartalom változása. Ahogy az említett ásványalkotók mértéke növekedni kezdett a felületen, hasonlóan kezdett a felületi érdesség is növekedni. Minél nagyobb a *Fe + Si*-tartalom, annál nagyobb a felületi érdesség értéke is. Ez a kvarc ásványok esetében nem jelenthető érthető okokból, miszerint a kvarc maximum csak szennyező anyagként tartalmaz *Fe*-t.

A felsorolt eredmények mind-mind ahhoz járulnak hozzá, hogy a természetes kőzetek megmunkálása során a megmunkálás minél hatékonyabb lehessen, kevesebb anyagot kelljen leforgácsolni, így kevesebb legyen a veszteség, kevesebb hulladék keletkezzen és ez hozzájárul a gazdasági hatékonyság növeléséhez is.

A további adatok, mérési eredmények gyűjtése során lehetőség nyílik egy konkrét adatokkal rendelkező előrebecslő rendszer kialakítására, amely az elméleti és gyakorlati tapasztalatokat egyaránt tartalmazza, és segíti a későbbi anyagválasztási lehetőségek

optimalizálását. Nagyobb vagy kisebb anyagleválasztási sebességet kell-e alkalmazni, esetleg több lépésben lehet csak a megfelelő felületet kialakítani. Legyen szó akár sima, akár érdes felületről. A további adatok tekintetében vizsgálni lehetne az ásványok orientációját, egymásra gyakorolt hatását, az ásványok találkozásánál lejátszódó folyamatokat, mennyiben befolyásolják egymást megmunkálás során a szomszédos ásványok és hogyan változnak az ásványhatárok.

## 11. SZAKIRODALOM

- [1] H. Schunnesson, 'Rock Characterisation Using Percussive Drilling', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 35, no. 6, pp. 711–725, 1998.
- [2] M. Yurdakul, 'Effect of cutting parameters on consumed power in industrial granite cutting processes performed with the multi-disc block cutter', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 76, pp. 104–111, 2015, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.008.
- [3] M. Toncelli, 'Process for automatically smoothing and polishing slabs or marble, granite, stones and the like', US4914870A, 1987
- [4] H. Huang, Y. Li, J. Y. Shen, H. M. Zhu, and X. P. Xu, 'Micro-structure detection of a glossy granite surface machined by the grinding process', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 403–407, 2002.
- [5] L. Bin, J. Xiang-Min, C. Zhong-Chen, H. Tian, and L. Kai-Long, 'Theoretical and experimental analysis of material removal and surface generation in novel fixed abrasive lapping of optical surface', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 279, no. May 2020, p. 116570, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116570.
- [6] T. Saksala, 'Cracking of granitic rock by high frequency-high voltage-alternating current actuation of piezoelectric properties of quartz mineral: 3D numerical study', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 147, p. 104891, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2021.104891.
- [7] D. N. G. Krishna and J. Philip, 'Review on surface-characterization applications of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Recent developments and challenges', *Applied Surface Science Advances*, vol. 12, p. 100332, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.APSADV.2022.100332.
- [8] X. P. Zhang, P. Q. Ji, Q. Zhang, Q. S. Liu, and S. C. Wu, 'Study of contact pressure distribution between cutter and rock surface using the discrete element method', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 146, p. 104875, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2021.104875.
- [9] S. S. Rajpurohit, R. K. Sinha, and P. Sen, 'Influence of Cerchar hardness index of hard rock granite on wear of diamond tools', in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2020, pp. 5471–5475. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.273.

- [10] B. Brook, 'Principles of diamond tool technology for sawing rock', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 41–58, 2002, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00007-2.
- [11] X. Xu, Y. Li, and Y. Yu, 'Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 139, no. 1–3, pp. 281–285, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00236-X.
- [12] S. Turchetta, 'Cutting force and diamond tool wear in stone machining', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 441–448, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3717-4.
- [13] A. S. Eyuboglu, Y. Ozcelik, S. Kulaksiz, and I. C. Engin, 'Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites', vol. 40, pp. 405–414, 2003, doi: 10.1016/S1365-1609(03)00002-9.
- [14] S.Y.Luo, 'Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite', *Journal of Materials Processing Tech.*, 1997.
- [15] J. Konstanty, 'Theoretical analysis of stone sawing with diamonds', *J Mater Process Technol*, vol. 123, no. 1, pp. 146–154, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00071-7.
- [16] A. Di Ilio and A. Togna, 'A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting', *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, no. 11, pp. 1171–1177, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00101-9.
- [17] A. Ersoy, S. Buyuksagic, and U. Atici, 'Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks', *Wear*, vol. 258, no. 9, pp. 1422–1436, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.WEAR.2004.09.060.
- [18] X. P. Xu, Y. Li, W. Y. Zeng, and L. B. Li, 'Quantitative analysis of the loads acting on the abrasive grits in the diamond sawing of granites', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 50–55, 2002.
- [19] Y. Li, H. Huang, J. Y. Shen, X. P. Xu, and Y. S. Gao, 'Cost-effective machining of granite by reducing tribological interactions', *Miner Eng*, vol. 129, pp. 389–394, 2002.
- [20] X. Wei, C. Y. Wang, and Z. H. Zhou, 'Study on the fuzzy ranking of granite sawability', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 139, no. 1–3, pp. 277–280, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00235-8.

- [21] A. M. Lang, K. Aasly, and S. L. Ellefmo, 'Mineral characterization as a tool in the implementation of geometallurgy into industrial mineral mining', *Miner Eng*, vol. 116, no. November 2017, pp. 114–122, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2017.10.021.
- [22] I. S. Buyuksagis, 'Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 183, no. 2–3, pp. 399–406, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.034.
- [23] J. Xie and J. Tamaki, 'Parameterization of micro-hardness distribution in granite related to abrasive machining performance', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 186, no. 1–3, pp. 253–258, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.041.
- [24] A. J. López, J. S. Pozo-Antonio, A. Ramil, and T. Rivas, 'Influence of the commercial finishes of ornamental granites on roughness , colour and reflectance', *Constr Build Mater*, vol. 182, pp. 530–540, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.144.
- [25] M. Peltoniemi, R. Kallio, A. Tanhua, S. Luukkanen, and P. Perämäki, 'Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding', *Miner Eng*, vol. 156, no. June, 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106500.
- [26] R. Elo and S. Norgren, 'Rock adhering to cemented carbide surfaces – The role of image acquisition', *Wear*, vol. 476, p. 203766, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.WEAR.2021.203766.
- [27] Z. Li, F. Rao, M. A. Corona-Arroyo, A. Bedolla-Jacuinde, and S. Song, 'Comminution effect on surface roughness and flotation behavior of malachite particles', *Miner Eng*, vol. 132, no. June 2018, pp. 1–7, 2019, doi: 10.1016/j.mineng.2018.11.056.
- [28] R. P. Ribeiro and A. B. Paraguassú, 'Relationship between technological properties and slab surface roughness of siliceous dimension stones', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, no. 8, pp. 1526–1531, 2008, doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.02.006.
- [29] Z. Su, S. Zhang, J. Wu, and L. Liu, 'Diamond & Related Materials Cutting performance evaluation of nickel-plated graphite Fe-based diamond saw blades', *Diam Relat Mater*, vol. 114, no. January, p. 108344, 2021, doi: 10.1016/j.diamond.2021.108344.
- [30] V. Rasouli and J. P. Harrison, 'Assessment of rock fracture surface roughness using Riemannian statistics of linear profiles', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 47, no. 6, pp. 940–948, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2010.05.013.

- [31] P. Lai, C. Samson, and P. Bose, 'Surface roughness of rock faces through the curvature of triangulated meshes', *Comput Geosci*, vol. 70, pp. 229–237, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.CAGEO.2014.05.010.
- [32] A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian, and M. A. Kavooosi, 'Measuring the surface roughness of geological rock surfaces in SAR data using fractal geometry', *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 349, no. 3, pp. 114–125, May 2017, doi: 10.1016/J.CRTE.2017.04.003.
- [33] Y. Jiang, B. Li, and Y. Tanabashi, 'Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, no. 6, pp. 837–846, Sep. 2006, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2005.11.013.
- [34] Z. Li, B. Nocelli, and S. Saydam, 'Effect of rock strength and surface roughness on adhesion strength of thin spray-on liners', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 91, pp. 195–202, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.IJRMMS.2016.11.011.
- [35] J. Z. Zhang, J. C. Chen, and E. D. Kirby, 'Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 233–239, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029.
- [36] M. M. Osterloo, V. E. Hamilton, and F. S. Anderson, 'A laboratory study of the effects of roughness on the thermal infrared spectra of rock surfaces', *Icarus*, vol. 220, no. 2, pp. 404–426, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.ICARUS.2012.04.020.
- [37] M. Diaz, K. Yeom, S. Yeom, L. Zhuang, S. Park, and K. Min, 'Surface roughness characterization of open and closed rock joints in deep cores using X-ray computed tomography', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 98, no. October 2017, pp. 10–19, 2017, doi: 10.1016/j.ijrmms.2017.07.001.
- [38] G. Chen, Y. Zou, X. Qin, J. Liu, Q. Feng, and C. Ren, 'Geometrical texture and surface integrity in helical milling and ultrasonic vibration helical milling of Ti-6Al-4V alloy', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 278, p. 116494, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116494.
- [39] G. Aydin, I. Karakurt, and K. Aydiner, 'Investigation of the surface roughness of rocks sawn by diamond sawblades', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 61, pp. 171–182, 2013, doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.03.002.

- [40] G. Zhang, H. Konietzky, and T. Frühwirt, 'Investigation of scratching specific energy in the Cerchar abrasivity test and its application for evaluating rock-tool interaction and efficiency of rock cutting', *Wear*, vol. 448–449, p. 203218, May 2020, doi: 10.1016/J.WEAR.2020.203218.
- [41] K. G. Anbarasu, L. Vijayaraghavan, and Arunachalam N., 'Effect of multi stage abrasive slurry jet polishing on surface generation in glass', *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 267, no. January, pp. 384–392, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.001.
- [42] K. Wang *et al.*, 'Investigation of diamond wear characteristics of combination saw during granite cutting based on the chip geometry', *Diam Relat Mater*, vol. 119, 2021, doi: 10.1016/j.diamond.2021.108554.
- [43] M. S. Bobji, K. Shivakumar, H. Alehossein, V. Venkateshwarlu, and S. K. Biswas, 'Influence of surface roughness on the scatter in hardness measurements - A numerical study', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 399–404, 1999.
- [44] N. S. Delgado, A. Rodriguez-Rey, L. M. S. del Ríó, I. D. Sarriá, L. Calleja, and V. G. R. de Argandona, 'The influence of rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite ( Spain )', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 42, pp. 161–166, 2005, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.08.010.
- [45] W.-L. Tian, S. Q. Yang, L.-X. Xie, and Z.-L. Wang, 'Cracking behavior of three types granite with different grain size containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 1580–1596, 2018, doi: 10.1016/j.acme.2018.06.001.
- [46] P. Li *et al.*, 'Dynamic mechanical behavior and cracking mechanism of cross-jointed granite containing a hole', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 22, pp. 1572–1594, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.12.034.
- [47] C. Zhao, R. Zhang, Q. Zhang, S. Du, and C. Yang, 'Experimental study on the rift plane of granite under uniaxial compression', *J Appl Geophy*, vol. 199, p. 104590, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2022.104590.
- [48] F. Homand, D. Hoxha, T. Belem, M.-N. Pons, and N. Hoteit, 'Geometric analysis of damaged microcracking in granites', *Mechanics of Materials*, vol. 32, no. 6, pp. 361–376, 2000.

- [49] X. F. Li, H. B. Li, L. W. Liu, Y. Q. Liu, M. H. Ju, and J. Zhao, 'Investigating the crack initiation and propagation mechanism in brittle rocks using grain-based finite-discrete element method', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 127, no. December 2019, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmms.2020.104219.
- [50] Y.-H. Huang, S.-Q. Yang, M. R. Hall, W.-L. Tian, and P.-F. Yin, 'Experimental study on uniaxial mechanical properties and crack propagation in sandstone containing a single oval cavity', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 1359–1373, 2018, doi: 10.1016/j.acme.2018.04.005.
- [51] N. Yoshihara and T. Hattanji, 'Estimation of shallow subsurface structures on granitic hillslopes based on electrical resistivity distribution', *J Appl Geophy*, vol. 203, p. 104704, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2022.104704.
- [52] A. C. da Silva, I. Resende, R. C. da Costa, R. E. S. Uagoda, and A. de S. Avelar, 'Geophysical for granitic joint pattern and subsurface hydrology related to slope instability', *J Appl Geophy*, vol. 199, p. 104607, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2022.104607.
- [53] F. Wang, H. Konietzky, T. Frühwirt, Y. Li, and Y. Dai, 'Impact of cooling on fracturing process of granite after high-speed heating', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 125, no. July 2019, p. 104155, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmms.2019.104155.
- [54] Y. Jiang, Z. Zhu, L. Yu, L. Zhou, R. Zhang, and L. Ma, 'Investigation of the fracture characteristics of granite and green sandstone under different thermal treatments', *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 118, p. 103217, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.TAFMEC.2021.103217.
- [55] S. S. Tabatabaee Moradi, 'Development of a water-based drilling fluid for chemical enhancement of drilling rate in a dolomite rock sample', *J Pet Sci Eng*, vol. 216, p. 110768, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.PETROL.2022.110768.
- [56] Q. Sun and J. Hu, 'Effects of heating on some physical properties of granite, Shandong, China', *J Appl Geophy*, vol. 193, p. 104410, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JAPPGEO.2021.104410.
- [57] F. Zhang, Y. Zhang, Y. Yu, D. Hu, and J. Shao, 'Influence of cooling rate on thermal degradation of physical and mechanical properties of granite', *International Journal of*



- Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 129, no. February, p. 104285, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmms.2020.104285.
- [58] N. Pai *et al.*, 'An investigation on the deterioration of physical and mechanical properties of granite after cyclic thermal shock', *Geothermics*, vol. 97, p. 102252, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.GEOTHERMICS.2021.102252.
- [59] M. Klichowicz, T. Frühwirt, and H. Lieberwirth, 'New experimental setup for the validation of DEM simulation of brittle crack propagation at grain size level', *Miner Eng*, vol. 128, pp. 312–323, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.08.033.
- [60] D. Han, K. Li, and J. Meng, 'Evolution of nonlinear elasticity and crack damage of rock joint under cyclic tension', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 128, no. March, p. 104286, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmms.2020.104286.
- [61] P. Hartlieb, F. Kuchar, P. Moser, H. Kargl, and U. Restner, 'Reaction of different rock types to low-power (3.2 kW) microwave irradiation in a multimode cavity', *Miner Eng*, vol. 118, no. 15 March 2018, pp. 37–51, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.01.003.
- [62] Q. Li, B. Cheng, X. Li, T. Yin, and L. Huang, 'Fracture behaviour of microwave-heated granite under indentation: Experimental and numerical investigation', *Eng Fract Mech*, vol. 269, p. 108535, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2022.108535.
- [63] G. Bai, Q. Sun, H. Jia, Z. Ge, and P. Li, 'Variations in fracture toughness of SCB granite influenced by microwave heating', *Eng Fract Mech*, vol. 258, p. 108048, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2021.108048.
- [64] D. Li, J. Ma, Q. Wan, Q. Zhu, and Z. Han, 'Effect of thermal treatment on the fracture toughness and subcritical crack growth of granite in double-torsion test', *Eng Fract Mech*, vol. 253, p. 107903, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2021.107903.
- [65] M. H. B. Nasser, B. Mohanty, and P.-Y. F. Robin, 'Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 42, no. 3, pp. 450–460, 2005, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.11.007.
- [66] A. Golshani, Y. Okui, M. Oda, and T. Takemura, 'A micromechanical model for brittle failure of rock and its relation to crack growth observed in triaxial compression tests of granite', *Mechanics of Materials*, vol. 38, no. 4, pp. 287–303, 2006, doi: 10.1016/j.mechmat.2005.07.003.

- [67] Prikryl R., 'Some microstructural aspects of strength variation in rocks', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, no. 5, pp. 671–682, 2001.
- [68] T. Zhang, L. Yu, B. Wu, Y. Tan, H. Su, and L. Zhou, 'Influence of grain-to-particle size ratio on the tensile mechanical response of granite based on a novel three-dimensional grain-based model', *Eng Fract Mech*, vol. 259, p. 108161, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENGFRACTMECH.2021.108161.
- [69] M. N. Saidi, V. Songmene, J. Kouam, and A. Bahloul, 'Study of surface quality and dust particles emission and dispersion during dry polishing of granite', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 9–12, pp. 4675–4684, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04166-3.
- [70] M. N. Saidi, V. Songmene, J. Kouam, and A. Bahloul, 'Experimental investigation on fine particle emission during granite polishing process', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 9–12, pp. 2109–2121, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7303-z.
- [71] M. N. Saidi, V. Songmene, J. Kouam, and A. Bahloul, 'Rotational and translation-free polishing of granite : surface quality and dust particles emission and dispersion', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, pp. 289–303, 2018.
- [72] I. Pérez-Rey, L. R. Alejano, A. Riquelme, and L. González-Desantos, 'Failure mechanisms and stability analyses of granitic boulders focusing a case study in Galicia (Spain)', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 119, pp. 58–71, 2019, doi: 10.1016/j.ijrmms.2019.04.009.
- [73] L. Li, M. A. Nearing, V. O. Polyakov, M. H. Nichols, F. B. Pierson, and M. L. Cavanaugh, 'Evolution of rock cover, surface roughness, and its effect on soil erosion under simulated rainfall', *Geoderma*, vol. 379, p. 114622, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.GEODERMA.2020.114622.
- [74] Y. Zhang *et al.*, 'Systematic review of feldspar beneficiation and its comprehensive application', *Miner Eng*, vol. 128, pp. 141–152, 2018, doi: 10.1016/j.mineng.2018.08.043.
- [75] C. Zhang, L. Li, Z. Yuan, X. Xu, Z. Song, and Y. R. Zhang, 'Mechanical properties of siderite and hematite from DFT calculation', *Miner Eng*, vol. 146, no. October 2019, p. 106107, 2020, doi: 10.1016/j.mineng.2019.106107.

- [76] K. Ostrowski, D. Stefaniuk, Ł. Sadowski, K. Krzywiński, M. Gicala, and M. Różańska, 'Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete', *Constr Build Mater*, vol. 238, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117794.
- [77] K. L. Jain, G. Sancheti, and L. K. Gupta, 'Durability performance of waste granite and glass powder added concrete', *Constr Build Mater*, vol. 252, p. 119075, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119075.
- [78] L. K. Gupta and A. K. Vyas, 'Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder', *Constr Build Mater*, vol. 191, pp. 155–164, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203.
- [79] S. Ghorbani *et al.*, 'Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions', *Constr Build Mater*, vol. 194, pp. 143–152, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.023.
- [80] A. Chajec, Ł. Sadowski, and M. Moj, 'The adhesive and functional properties of cementitious overlays modified with granite powder', *Int J Adhes Adhes*, p. 103008, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJADHADH.2021.103008.
- [81] G. Medina, I. F. Sáez del Bosque, M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas, and C. Medina, 'Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations', *J Clean Prod*, vol. 148, pp. 467–476, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.048.
- [82] M. Lokeshwari and K. S. Jagadish, 'Eco-friendly Use of Granite Fines Waste in Building Blocks', *Procedia Environ Sci*, vol. 35, pp. 618–623, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENV.2016.07.049.
- [83] S. F. Ahmadi, M. Reisi, and M. C. Amiri, 'Reusing granite waste in eco-friendly foamed concrete as aggregate', *Journal of Building Engineering*, p. 103566, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103566.
- [84] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, and V. B. Patil, 'Investigation of the effect of granite waste powder as a binder for different molarity of geopolymer concrete on fresh and mechanical properties', *Mater Lett*, vol. 309, p. 131302, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.MATLET.2021.131302.
- [85] S. Tangaramvong, P. Nuaklong, M. T. Khine, and P. Jongvivatsakul, 'The influences of granite industry waste on concrete properties with different strength grades', *Case*

- Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00669, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.CSCM.2021.E00669.
- [86] S. K. Nayak, A. Satapathy, and S. Mantry, 'Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review', *Journal of Building Engineering*, vol. 46, p. 103742, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.103742.
- [87] L. Gautam, J. K. Jain, P. Kalla, and M. Danish, 'Sustainable utilization of granite waste in the production of green construction products: A review', *Mater Today Proc*, vol. 44, pp. 4196–4203, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.532.
- [88] D. C. Kumar, P. Vasanthi, and A. Devaraju, 'Experimental studies on composite bricks using black cotton soil, fly ash and granite waste', *Mater Today Proc*, vol. 39, pp. 868–874, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.663.
- [89] H. Arumugam, M. Iqbal M, C. H. Ahn, S. Rimdusit, and A. Muthukaruppan, 'Development of high performance granite fine fly dust particle reinforced epoxy composites: structure, thermal, mechanical, surface and high voltage breakdown strength properties', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 2795–2811, May 2023, doi: 10.1016/J.JMRT.2023.03.199.
- [90] L. Gautam, J. Kumar Jain, A. Jain, and P. Kalla, 'Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete', *Constr Build Mater*, vol. 315, p. 125730, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125730.
- [91] A. Jain, S. Chaudhary, and R. Gupta, 'Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste', *Constr Build Mater*, vol. 314, p. 125480, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125480.
- [92] T. Balasubramaniam and S. J. Stephen, 'Influence of industrial wastes on the mechanical and durability characteristics of high strength concrete', *Constr Build Mater*, vol. 317, p. 126202, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126202.
- [93] M. M. Salgado Lopes *et al.*, 'Influence of the incorporation of granite waste on the hiding power and abrasion resistance of soil pigment-based paints', *Constr Build Mater*, vol. 205, pp. 463–474, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.046.
- [94] B. B. Manfred Zamzow, Stefan Harke, 'Parts of an armature elements with a granite decor surface', EP1137359A2, 1998
- [95] 'GOLDEN Plus CNC Working centers'. [Online]. Available: <https://www.prussiani.com/working-centers/golden-plus/>

- [96] '8-segment High-Speed Finger Bit - Granite - Nicolai'. [Online]. Available: <https://amastone.com/shop/nicolai-8th-wonder-finger-bit-granite/>
- [97] H. Károly and D. Zoltán, 'Pásztázó elektronmikroszkópia'. Accessed: Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf>
- [98] 'Építési kőanyagok közzettani megnevezése és osztályozása', 1976.
- [99] G. István Gábor and D. Értekezés, 'Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és-technológia Tanszék Mart gránitfelület-élek minősítése és kitöredezéseinek vizsgálata technológiai optimalizálás céljából'.
- [100] W. Habrat, A. P. Markopoulos, M. Motyka, and J. Sieniawski, 'Machinability', *Nanocrystalline Titanium*, pp. 209–236, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-814599-9.00011-0.

## 12. TÉZISPONTOK

1. Természetes gránitokat alkotó különböző ásványok felületi minőségével kapcsolatban a 37,7 - 226,2 [m/min] anyagleválasztási sebességtartományon belül az alábbi megállapítás tehető. **A természetes gránit kőzetek mart felületén található ásványok felületi érdességi értéke 14,1  $\mu\text{m}$  és 2,77  $\mu\text{m}$  között változik, méghozzá folyamatosan csökken az anyagleválasztási sebesség növekedésével. Ez a megállapítás érvényes a gránit felületén szereplő összes vizsgált ásvány esetében (kvarc, albit, mikroklin, labradorit, ortoklász, biotit).** Ez a szabályszerűség a szemcsemérettől függetlenül is igaznak bizonyult.

2. A gránitok felülete a változó ásványi összetételükből adódóan inhomogén felületi érdességet mutat, ami megnehezíti azok megmunkálását. A gránitot alkotó ásványok típusa és a marás nyomán kialakuló felületi minőség között a 37,7 - 226,2 [m/min] anyagleválasztási sebességtartományon belül az alábbi összefüggés állapítható meg. **A különböző gránitalkotó ásványok eltérő mértékben befolyásolják a felületi érdességet, ezzel kapcsolatban – a legnagyobb érdességtől a legkisebb felé – az alábbi sorrend állítható fel:**

- I. kvarc
- II. mikroklin
- III. labradorit
- IV. ortoklász
- V. albit
- VI. biotit.

A skála relatív, az ásványok az egymáshoz viszonyított, felületet befolyásoló hatásuk alapján kerülnek rangsorolásra. Ez a sorrend valamennyi vizsgált gránit mintadarab esetén fennáll. A fenti megállapítás a gránitok minél jobb felületi minőséget eredményező marásához nyújt támogatást.

3. A természetes gránitot alkotó ásványtípusok elemi összetétele változó. **Az ásványok különböző elemi összetétele hatással van a felületi érdességre.** Az ásványok felületi érdessége és azok elemi összetétele közötti összefüggéssel kapcsolatban az

alábbi megállapítás tehető. A biotit és a földpát ásványok (albit, labradorit, mikroklin, ortoklász) 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebességgel történő marási megmunkálása esetén a **Fe** + **Si**-tartalom növekedésével a felületi érdesség nő. Ennek feltételezhető oka a nagyobb lokális keménység, ami kőzetek esetében általában rosszabb felületi minőséget eredményez.

4. A természetes gránit kőzetek marásánál – többek között a megmunkálhatóság, valamint a szerszáméltartam szempontjából – lényeges körülmény az alkotó ásványok keménysége. Az ásványok keménysége és elemi összetétele közötti összefüggéssel kapcsolatban az alábbi megállapítások tehetőek. A **Mg, K, Ca** alkotók mennyiségének nincs jól definiálható hatása a vizsgált ásványok (kvarc, albit, mikroklin, labradorit, ortoklász, biotit) keménységére. A 37,7 [m/min] anyagleválasztási sebességnél a vizsgált földpátok (albit, mikroklin, labradorit, ortoklász) esetében a **Na** + **Al**-tartalom növekedésével a polírozott felületen mért Vickers-keménység csökken.

### 13.THESIS STATEMENT

1. Regarding the surface quality of the various minerals that make up natural granites, the following statement can be made within the material separation speed range of 37,7 – 226,2 [m/min]. **The surface roughness value of the minerals on the milled surface of natural granite rocks varies between 14,1  $\mu\text{m}$  and 2,77  $\mu\text{m}$ , and it continuously decreases as the material separation speed increases. This relationship is consistent across all investigated minerals on the granite surface, including quartz, albite, microcline, labradorite, orthoclase, and biotite.** This regularity proved to be true regardless of grain size.

2. Due to their variable mineral composition, granites exhibit inhomogeneous surface roughness, complicating their processing. The following correlation can be established between the type of minerals that make up granite and the resulting surface quality after milling within the material removal speed range of 37,7 – 226,2 [m/min]. **The different minerals in granite affect the surface roughness to a different degree, in this regard - from the highest roughness to the lowest - the following order can be established:**

- I. quartz
- II. microcline
- III. labradorite
- IV. orthoclase
- V. albite
- VI. biotite.

The scale is relative, the minerals are ranked based on their relative effect on the surface. This order is consistent across all granite samples examined. The above finding supports the milling of granites resulting in the best possible surface quality.

3. The elemental composition of the mineral types that make up natural granite varies. **The different elemental composition of minerals affects the surface roughness.** The following statement can be made regarding the relationship between the surface roughness of minerals and their elemental composition. **In the case of milling biotite**



and feldspar minerals (albite, labradorite, microcline, orthoclase) at a material removal rate of 37,7 [m/min], the surface roughness increases as the ***Fe + Si*** content increases. The presumed reason for this is the higher local hardness, which usually results in a poorer surface quality in the case of rocks.

4. The hardness of the constituent minerals is an important factor in the milling of natural granite media, impacting both workability and tool life. The following conclusions can be made regarding the relationship between the hardness and elemental composition of minerals. The ***Mg, K, Ca*** amount of constituents have no well-defined effect on the hardness of the minerals, including quartz, albite, microcline, labradorite, orthoclase, and biotite. At the material removal speed of 37,7 [m/min], the Vickers hardness measured on the polished surface decreases as the ***Na + Al*** content increases in the case of the examined feldspars, including albite, microcline, labradorite, orthoclase

## 14.A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ KÖZLEMÉNYEK

### Idegen nyelvű, külföldi folyóiratban megjelent közlemény

1. E. Cserta and I. G. Gyurika, 'Effects of the granite-forming minerals on the surface roughness in the milling processes', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, no. 11–12, pp. 3041–3052, 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06534-w
2. E. Kelemen-Cserta and I. G. Gyurika, 'Influencing effect of minerals composition in natural granite rocks on surface roughness', *Results in Materials*, vol. 21, p. 100504, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.RINMA.2023.100504.

### Idegen nyelvű, hazai folyóiratban megjelent közlemény

3. E. Kelemen-Cserta, I. G. Gyurika, 'Influencing effect of minerals composition in natural granite rocks on microhardness', *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, vol. 49, 2021, doi: <https://doi.org/10.33927/hjic-2021-11>

### Idegen nyelven tartott konferencia előadás, teljes szövegű megjelenéssel

4. E. Cserta, I. G. Gyurika, 'Research results and future orientations for the development of a pre-estimation system for the measure of the quantitative determination of milled granite surfaces', *Materials Science and Engineering* 448 (2018) 012038, doi:10.1088/1757-899X/448/012038, 2018.
5. E. Cserta, I. G. Gyurika: Investigation of the influence of mineral types on surface quality in the case of milled granite surface, Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'20), doi: 10.11159/mmme20.122, 2020

### Magyar nyelven tartott konferencia előadás, teljes szövegű megjelenéssel

6. Cserta E., Gyurika I. G., 'Az előtolás élkárosodásra gyakorolt hatásának vizsgálata különböző szemcseméretű gránit anyagok esetében', ISSN: 2068-1267, *OGÉT2018 Konferencia*, 2018. 04. 26-29. Marosvásárhely, Románia
7. Cserta E., Gyurika I. G., 'Kőzetalkotók hatása a megmunkált természetes kövek felületi minőségére', ISSN: 2068-1267, *OGÉT2019 Konferencia*, 2019.04.25-28. Nagyvárad, Románia

8. Cserta E., Gyurika I. G., 'Kutatási irányvonalak a természetes gránit kőzet megmunkálása során keletkezett felületi elváltozások területén', *Díszítőkő2019 Konferencia*, 2019.09.19-20., Tata

**Magyar nyelven tartott konferencia előadás, kivonatos megjelenéssel**

9. Cserta E., Gyurika I. G., 'Megmunkált természetes kőanyagok felületi- és élminőségét befolyásoló tényezők vizsgálata', *PhD hallgatók anyagtudományi napja XVIII.*, Veszprém, 2018. november 26.
10. Cserta E., Gyurika I. G., 'A természetes gránit kőzet megmunkálása során keletkezett felületi elváltozások kutatásának irányvonalai', *PhD hallgatók anyagtudományi napja XIX.*, Veszprém, 2019. december 2.