

# **Lebegő útanyag szemcsék 2.**

OTDK pályamunka

2024-2025

BMSZC Petrik Lajos Két Tanítási Nyelvű Technikuma

Készítők: Sallai Edina Angéla

Felkészítő: Gögh Zsolt



**Tudományos Diákkörök XXIII. Kárpát-medencei Konferenciája**

**2023**

## Tartalomjegyzék

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés .....                                                                      | 3  |
| 2. A projekt célkitűzései.....                                                          | 4  |
| 3. Mintavételi helyszínek bemutatása .....                                              | 5  |
| 3.1. Általános szempontok .....                                                         | 5  |
| 3.2. M3-as autópálya bevezető szakasza (Szerencs utca) (1. számú mintavételi pont)..... | 5  |
| 3.3. Baross tér (2. számú mintavételi pont) .....                                       | 5  |
| 3.4. A Petrik Lajos Technikum udvara (3. számú mintavételi pont) .....                  | 6  |
| 4. A mintavételi eszköz .....                                                           | 7  |
| 4.1. Sigma-2 passzív pormintavevő .....                                                 | 7  |
| 5. Az aggregátumok mennyiségi és minőségi elemzése .....                                | 8  |
| 5.1. A mennyiségi meghatározás módszertana .....                                        | 8  |
| 5.1.1 Manuális, leszámlálásos meghatározás .....                                        | 8  |
| 5.1.2 Mennyiségi elemzés a MI gépi tanulás módszertanával .....                         | 10 |
| 5.2. Minőségi szemcseanalízis .....                                                     | 11 |
| 5.2.1. Elektronmikroszkópos, SEM-EDX vizsgálatok.....                                   | 12 |
| 5.2.2. Minőségi elemzés a Raman-spektroszkópia segítségével.....                        | 13 |
| 6. Az aggregátumokkal kapcsolatos vizsgálati eredmények .....                           | 14 |
| 6.1. A mennyiségi vizsgálatok eredményei.....                                           | 14 |
| 6.1.1. Manuális leszámlálás.....                                                        | 14 |
| 6.1.2. A MI gépi tanulási módszertanának eredményei.....                                | 15 |
| 7. A minőségi vizsgálatok eredményei.....                                               | 18 |
| 7.1. A SEM-EDX analízis eredményei.....                                                 | 18 |
| 7.2. A Raman-spektroszkópiai vizsgálatok eredményei.....                                | 18 |
| 8. A zajvédő falak növényesítésének lehetőségei .....                                   | 20 |
| 9. Összefoglalás, a projekt eredményei .....                                            | 22 |
| 10. Köszönetnyilvánítás és szakirodalom .....                                           | 23 |
| 10.1. Köszönetnyilvánítás .....                                                         | 23 |
| 10.2. Szakirodalom .....                                                                | 23 |
| 11. MELLÉKLETEK .....                                                                   | 24 |

## 1. Bevezetés

Immár három esztendeje elindított projektünk figyelem felhívó kíván lenni egy Magyarországon mindeddig kevésbé ismert környezeti szennyezéssel kapcsolatban. A nemzetközi szakirodalom alapján ellenben ismert tény, hogy a forgalmas közutak mentén, még inkább városi környezetben, a szállópor koncentráció jelentékeny részét teszi ki az útfelületeken autógumikból, az aszfaltot alkotó anyagokból, fém- és műanyagelemek kopásából keletkező szemcsék (a nemzetközi szakirodalomban TRWP- Tyre and Road Wear Particles)) igen komplex, finom, lebegő állományba kerülő frakciója.

A kopásból képződő mikroaggregátumok összetételüket tekintve még inkább veszélyes tényezőknek tekintendők, elég, ha a gumiszemcsék (TWP) komplex összetételére, valamint a felületükön megtapadó nehézfémekre, dízelkoromra, az aszfaltból és egyéb, a szállítások során koncentrálnódó útanyag elemekből származó alkotókra gondolunk.

Kutatási szempontból a lebegő állományba kerülő szemcsék szakszerű, további vizsgálatokra is alkalmas mintavételezése is megoldandó módszertani feladat, nem beszélve a komplex aggregátumok többirányú minőségi és mennyiségi analíziséről. Nem kevés vizsgálati módszerből álló és több részeredményt produkáló projektünket alapkutatásnak tekintjük, a fenti kérdések tisztására szánjuk.

Mindezek mellett az alapprobléma megoldásának irányába is lépéseket tettünk. Az autópályák városi, bevezető szakasza mentén húzódó zajvédő falak növényesítési feltételeit, műszaki, telepítési és gondozási kérdéseit tisztáztuk, emellett hatékonysági vizsgálatokat is végeztünk. Ez többnyire sűrűn lakott, közintézményekkel ellátott területek szállópor terhelésének csökkentése kérdésében jelenthet előrelépést.

## 2. A projekt célkitűzései

Projektünk első, a későbbi analitikai lépéseket meghatározó alapvető célkitűzése volt a **mintavételezési módszer, a mintavevő eszköz** biztosítása. Ebben a kérdésben az alábbiakat kívántuk megvalósítani:

- + Passzív mintavételezési módszert használjunk.
- + Nemzetközileg szabványosított, az összehasonításokra is alkalmas mintavevőt alkalmazzunk.
- + Az ülepítő felületek minőségi és mennyiségi elemzésre is alkalmasak legyenek.

A **mintavételi helyek** tekintetében az egymással összevethető, ám eltérő karakterű helyszínek megtalálása volt a cél. Szakmailag értelmezhető, mindenképpen engedéllyel rendelkező és megközelíthető pontokban (autópálya úttengelye), rögzítő felületekben (villanyoszlop, közlekedési tábla-, és lámpaoszlopok) gondolkodhattunk csak a gyakori mintavételezés és az avatatlan rongálás elkerülése érdekében.

Az utóbbi évtizedben a tudományos kutatásban az utakon termelődő mikro-gumi szemcsék helyett (TWP) már az igen összetett „útanyag aggregátumokról” beszélnek (TRWP), amelyek analitikája igen nehéz, így minderre még csak kezdeti lépéseket alkalmaztak, vagy még nincs kidolgozott protokoll nemzetközi viszonylatban sem. Feladatul jelöltük ki tehát a **megfelelő minőségi és mennyiségi elemzési módszerek megtalálását**, a majdani protokoll eljárások kísérleti végig vitelét.

A minőségi analízis terén külön ki kellett térjünk az aggregátumok alapjait jelentő mikroműanyagok, az autógumi szemcsék, valamint az azok felületén megtapadó egyéb szennyezők, leginkább a nehézfémek azonosításának kérdésére.

A mennyiségi elemzés terén ugyan felmerültek a kémiai analízis lehetőségei is (pl. GC-MS), de már a kezdetekben a mikroszkópi képelemzés iránya tűnt megvalósíthatónak, ennek mentén pedig a MI gépi tanulási módszerének alkalmazása. Határozott célunk volt e tekintetben, hogy a városi közutak tekintetében **a teljes szállópor koncentráció viszonylatában százalékos arányszámot tudjunk meghatározni az útanyag aggregátumok terhelésének kérdésében**. Ezzel a veszély mértékét kívántuk meghatározni.

Az útanyag aggregátumok negatív egészségügyi hatásának csökkentése érdekében, egy jól körülírható mikrokörnyezetben, az autópályák városi szakaszainak övezetében **a zajvédő falak növényesítési lehetőségeit** akartuk körbejárni. Ehhez hatékonysági vizsgálatokat terveztünk, mindemellett pedig a megvalósítás feltételeit kellett feltérképeznünk.

### **3. Mintavételi helyszínek bemutatása**

#### **3.1. Általános szempontok**

„A mintavételi helyszínek kiválasztásában több általános szempont is szerepet játszott. Ilyen tényezők például, a jó és biztonságos megközelíthetőségek, a meghatározott ciklusokban, veszélytelenül történő folyamatos mintavételi lehetőségek voltak. Elsődleges kiindulópontunk az volt, hogy a mintavételi helyszíneink karakteresen különböző helyszínek legyenek. Figyelembe vettük a jellemző vezetési stílust, a megengedett sebességkorlátot és közlekedési lámpák darabszámát a megfelelő terület választásakor. Erre azért volt szükség, mert ezek a tényezők befolyásolják leginkább a lebegő útanyag szemcse termelődését. Ezekkel a helyekkel párhuzamosan egy olyan helyszínen is folyt a kutatás, amely a főúttól kissé távolabb, némileg zártabb léttérként működik. A mintavételi eszközök kihelyezése úgynevezett közútkezelői engedélyhez kötött, amelyben egyrészt forgalomtechnikai kritériumoknak kell megfelelni, mellette területhasználati, objektumkezelői (pl. egy közlekedési lámpa oszlopára) engedélyt is kell tartalmaznia. Az eszközöket a VIII. kerületi Baross térre, az M3-as bevezető szakaszának Szerencs utcai kereszteződéséhez, valamint iskolánk udvarán helyeztük el.” (Sallai E. et al. 2023)

#### **3.2. M3-as autópálya bevezető szakasza (Szerencs utca) (1. számú mintavételi pont)**

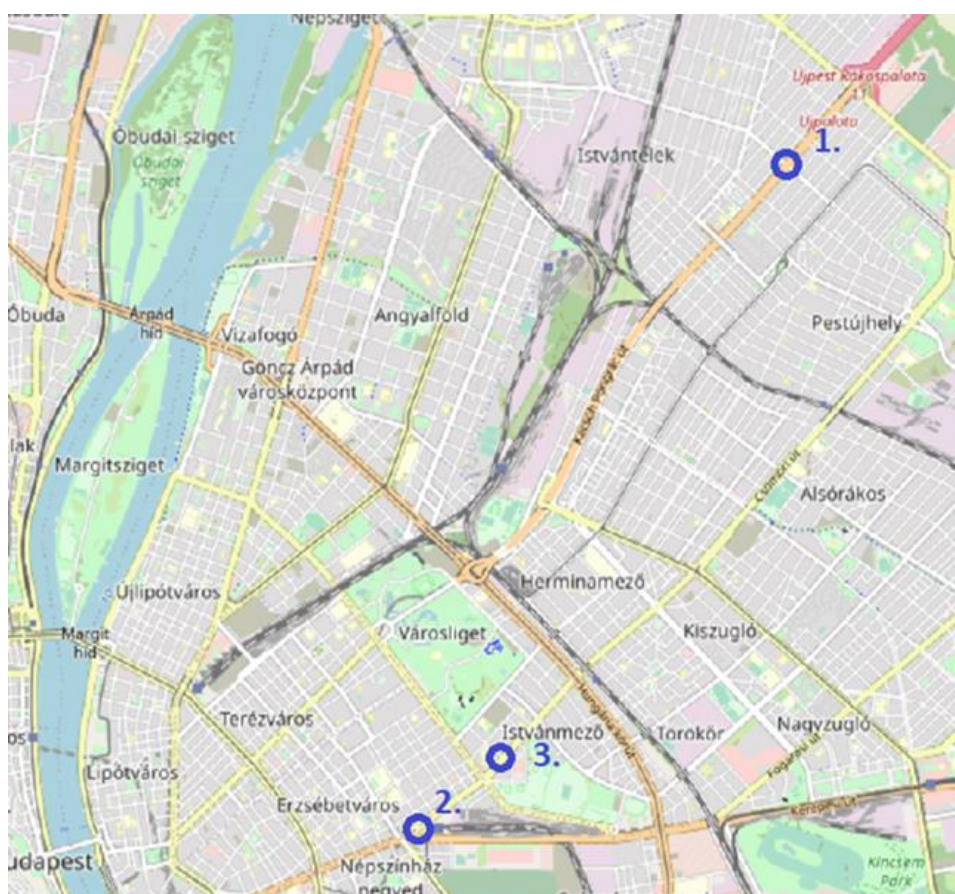
„Az M3-as autópálya bevezető szakaszán magas útanyag szemcse termelődésre számítottunk a nagymértékű forgalom, főként a teherforgalom és a terület kialakítása által keletkezett kanyonhatás miatt. Az autópálya mellett sűrű beépítettségű lakóövezet húzódik, így kiemelt kutatási területként kezeltük ezt a helyszínt.” (Sallai E. et al. 2023)

#### **3.3. Baross tér (2. számú mintavételi pont)**

„A Baross téren (amely a város egy központi forgalmi csomópontja) is magas útanyag szemcse termelődésre számítottunk, a kanyonhatás és turbulencia, az épületek és a Rottenbiller utcai felüljáró általi zárt tér és a megannyi autó és autóbusz áthaladása miatt.” (Sallai E. et al. 2023)

### 3.4. A Petrik Lajos Technikum udvara (3. számú mintavételi pont)

„A harmadik mintavevő a Petrik Lajos Technikum udvarán kapott helyet, a forgalmas Thököly úttól mintegy 60 m távolságra. Egy olyan területre telepítettük, ahol nyomon követhető a lebegőanyag élettani hatása. A terület a Thököly út felől nagy részben zárt, így pontos képet kaphatunk arról, hogy ilyen szeparált területre mennyi lebegőanyag jut be.” (Sallai E. et al. 2023)



*A mintavételi helyszínek térképe*

## 4. A mintavételi eszköz

### 4.1. Sigma-2 passzív pormintavevő

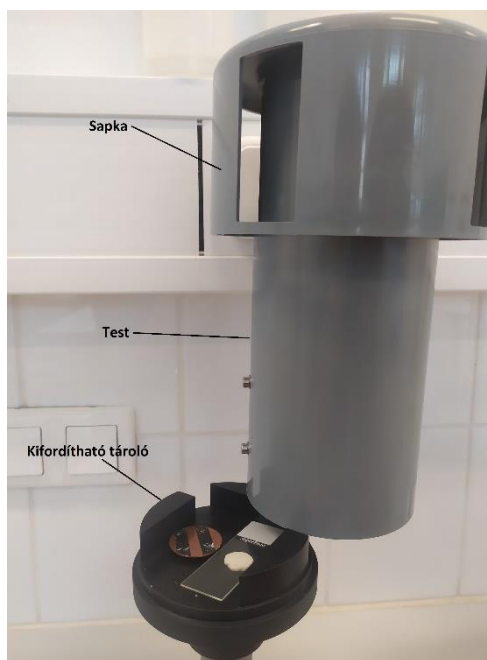
„Az eszköz egy passzív pormintavételi készülék, amelyet a Német Mérnöki Kamara szabványa szerint készítettek el (VDI2119: Blatt 4). Fontosnak tartottuk ezeknek a mintavevőknek a beszerzését (Particle Vision cég). A szakirodalom alapján az e témakörrel foglalkozó kutatók nagy többsége ezt az eszköz használja, mi is a minőségi kutatás irányába kívántunk elindulni, a minél pontosabb mérés érdekében.

Az eszköz képes a 80 µm alatti szemcsék felfogására és megtartására. A levegő az eszköz belső részén lelassul, időt hagyva a szemcsék kiülepedésére.

A mintavevőt mi két eszköz tárgylemezével használjuk: ezek a fénymikroszkóp használatához való nagyméretű fedőlemez, valamint a SEM-EDX vizsgálati eszköz mintáinak előkészítéséhez szükséges acélkorong, tetején kétoldalas, speciális szénszalaggal. Ezeket minden mintavételi ciklus után cseréljük.

A mintavevőt az ajánlás szerint a tartó objektumtól (fal, oszlop), legalább 30 cm-nyi elállással, 2-3 m közötti magasságba kell felerősíteni, hogy a szálló szemcséket minél könnyebben és hatékonyabban tudja felfogni.

A mintavételezést, a tárgylemezek cseréjét döntés szerint 7-14 napos periódusban érdemes elvégezni.” (Sallai E. et al. 2023)



*A Sigma-2 passzív pormintavevő eszköz a benne elhelyezett vizsgálati elemekkel (saját kép)*

## 5. Az aggregátumok mennyiségi és minőségi elemzése

Szakirodalmi adatokra támaszkodva kijelenthető, hogy a közutakon termelődő aggregátumok vonatkozásában még nem alakultak ki protokoll eljárások sem a mennyiségi, sem pedig a minőségi meghatározás terén. A meglévő tudományos tapasztalatok még csak kevés adalékkal szolgálnak az autógumi mikrométerű szemcséinek morfológiai vonatkozásában, és mivel az aggregátumok minőségükben igen összetettek, továbbá egymáshoz képest is igen eltérőek, minden további új információ hasznos előrelépést jelent ezen a területen.

A mennyiségi elemzések tekintetében a relatíve kis mennyiségű kiüledett minta nem elegendő a teljes pormintában lévő gumiarány százalékos műszeres analitikai (pl. GC-MS) meghatározásához. Ennek következtében fogalmazódott meg az egyes összetevők fénymikroszkópos morfológiai meghatározása és százalékos képi elemzése. A manuális leszámlálás után megkíséreltük a mesterséges intelligencia (MI) un. felügyelt gépi tanulási modelljének módszertanának alkalmazását.

A minőségi analízis tekintetében két irányban kellett gondolkodnunk. Egyrészt kémiai módszerrel igazolnunk kellett a gumiszemcsékre vonatkozó morfológiai megfigyelésünk helyességét. Ezt, bár a más esetben hasznos SEM-EDX vizsgálat is nyújtott némi támpontot, de egyértelműen a Raman spektroszkópia segítségével sikerült véghez vinnünk.

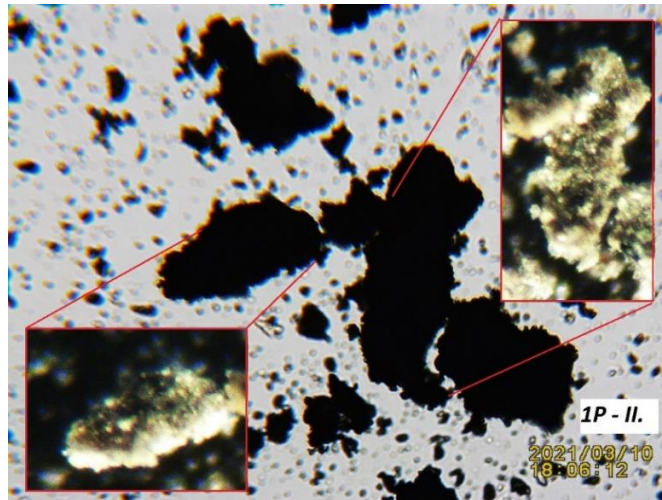
Másrészt az aggregátumok felszínén megtapadó szervesetlen elemek, főként a nehézfémek jelenlétéről is igazolást kellett kapjunk. Több szakirodalomban is fellelhető (Z. Tian et al.2017) un. „egyszemcsés” vizsgálatokkal, a SEM-EDX analízis segítségével ebben a kérdésben is megfelelő eredményekhez juthattunk.

### 5.1. A mennyiségi meghatározás módszertana

#### 5.1.1 Manuális, leszámlálós meghatározás

Előzetesen is célunk volt, hogy valamilyen általunk is kivitelezhető módszert találjunk a lebegő állományba kerülő és a mintákban kiüledő szemcsék százalékos mennyiségi eloszlásának meghatározására. A szakirodalomban fellelhető gépi tanulós módszer is jelentős mértékben a mikroszkópi morfológiai megfigyelésekre támaszkodott (Z. Tian et al.2017). Az általunk alább kifejtendő manuális leszámlálási módszer is ebből indult ki.

A manuális mennyiségi elemzésnél alapvetően az áteresztő (transmitted) beállítású fénymikroszkópban gondolkodtunk, kisebb arányban a ráeső (reflected) beállítást is használtuk. Méréseinket a Bresser LCD Micro 5MP, digitális mikroszkóp segítségével végeztük el.



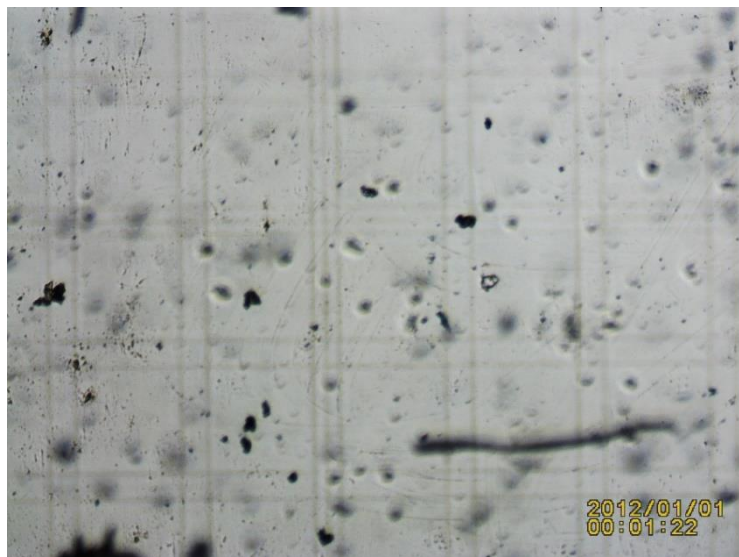
*Útanyag szemcsék átvilágító és reflexiós üzemmódban készült mikroszkópi képe*

*(a nagy szemcsék hossza kb.100  $\mu\text{m}$ )*

*(saját kép)*

Az általunk használt Sigma-2 eszköz mintavételi felületei közül a szénréteggel bevont acél korongok a minőségi elemzés érdekében kerültek kihelyezésre. A svájci és a német kutatócsoport (J. Rausch et al. 2022), (Z. Tian et al.2017) által kihelyezett hagyományos vastagságú üveg tárgylemezt ellenben igen vékony, 0,13mm vastagságú, 25X25 mm méretű nagy fedőlemezekre cseréltük ki (a mintákat a helyszínen is ilyen lemezzel fedtük le a minta védelme érdekében).

A leszámláláshoz nélkülözhetetlen, osztott, kalibrált méretű felületet a biológiában használatos Bürker-kamra „tárgylemezén” találtuk meg. A több rétegben fókuszálható kép előállításáért miatt volt szükségünk az igen vékony mintavételi üveglemezekre, mert vastag lemez esetében a szemcséket és az osztott felületet nem lehet együttesen látni.



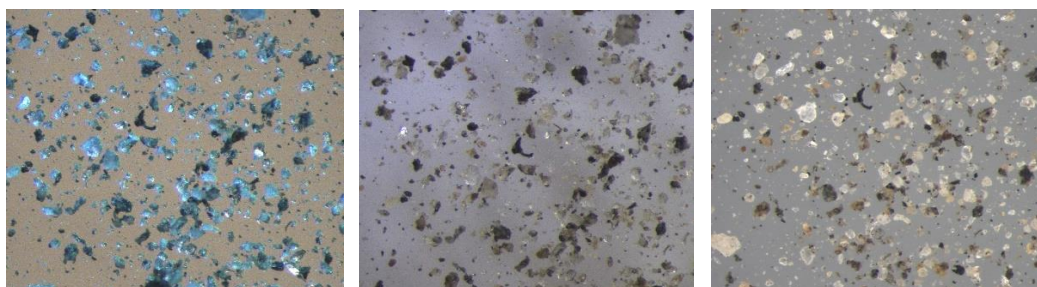
*A vékony mintavételi lemez és az osztott felület együttes optikai kezelhetősége (saját kép)*

A  $\text{mm}^2$ -nyi felület 16db kis egységét tekintve fele arányban, 8 részfelületen számoltunk opak és átlátszó, gumi morfológiájú, valamint a frakciókat tekintve  $30\mu\text{m}$ -nél nagyobb és kisebb szemcséket. A 2-vel való felszorzás után  $1\text{ mm}^2$  - re vonatkoztatott adatokat kaptunk.

## 5.1.2 Mennyiségi elemzés a MI gépi tanulás módszertanával

### Módszertani alapok

- A minőségi képalkotás:** A gépi tanulás alapja a megfelelő minőségű és mennyiségű képanyag előállítása azokról az „objektumokról”, amelyek felismerésére be akarunk tanítani egy erre kialakított modellező programot. A mikroszkópi méretű szemcsék elkülönítéséhez ezért elengedhetetlen volt számunkra egy jó felbontású fény-, vagy más elven működő speciális mikroszkóp használata. A HUN-REN Természettudományi Kutatóközpontja, Krisztallográfiai laboratóriumában Holczbauer Tamás vezetésével egy Nikon SMZ800 polarizációs mikroszkóp használatát sajátíthattuk el. A műminták első vizsgálatakor már egyértelművé vált, hogy a polarizációs szűrőt kizárva inkább a felső megvilágítás használatával lesz részletgazdagabb képünk. Az igazi megoldást a felső megvilágítás maximalizálásával értük el, egy saját készítésű henger kialakítású LED-lámpa elkészítésével, amellyel színgazdag és árnyékmentes felvételeket tudtunk készíteni.



*Adott mikroszkópi részlet polarizált, normál felső megvilágítású, valamint LED-es megvilágítású fényben (balról jobbra,  $6.3\times$ )  
(saját képek)*

A képek további feldolgozása során kiderült, hogy ez a képalkotási minőség legfeljebb  $30\mu\text{m}$  fölött, és itt sem mindig az elvárt biztonsággal használható. Célunk pedig egyértelműen a  $10\mu\text{m}$  alatti mérettartomány kezelése maradt. Így az MI használatával felépített képelemzést a továbbiakban a HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpontjában, a témában élenjáró Lendület Mikroszkópos Képfeldolgozó és Gépi Tanulási Csoportban dolgozó munkatársak segítségével végezhetjük el. A biológiai vonatkozású képanyag feldolgozásában jártas szakemberek számára is új feladat lesz az aeroszol alkotók kutatása. Bízunk abban, hogy fényfelbontás elvi határát súroló mikroszkópok, a fluoreszcens fényben való elkülönítési lehetőség és a megfelelő modellalkotó program mind-mind segítségünkre lesznek majd a statisztikai elemzésben.

- A műminták kezelése:** A kezdeti vizsgálatok során az is egyértelművé vált, hogy felbontási lehetőségek okán a  $80$  és  $30\mu\text{m}$  közötti tartományban vizsgálódhatunk, ebben a frakcióban tudunk majd részletes morfológiai leírást elvégezni a műminták

esetében. 80 µm a mintavételi eszközünk felső határa, 30 µm alatt pedig a mikroszkóp felbontása szab határt. Műmintáinkat szitálással és 20 µm-es szűrőpapíron vizes atmoszával szorítottuk ebbe a tartományba.

Szakirodalom alapján a hat leggyakrabban előforduló útanyag szemcse (TRWP) műmintáját állítottuk elő a fent megadott mérettartományban (A. Beji et al. 2023). A gumi, az aszfalt (bitumen), a fékbetét, a féktárcsa, közettörmelékként a lösz, valamint a dízelkorom szemcséit állítottuk elő, vagy szereztük be. Közülük a dízelkorom szemcséket, lévén azok 20 µm alattiak, nem vizsgáltuk behatóbban. Ezen termékek részletes morfológiai leírását alkottuk meg, amelyről az alábbi bekezdés és a megalkotott táblázat ad részletes felvilágosítást.

 **A mikroszkópi szemcsék részletes morfológiai leírása:** A jellemzéskor néhány kristálytani és szedimentológiai leíró fogalmat vettünk figyelembe, amelyek a következők voltak: általános méret, alak, sarkosság-kerekítettség, hosszúság-szélesség aránya, szín, átlátszóság-áttetszőség. Az egyes műminták főbb jellemzőinek összefoglalása az alábbi táblázatában található.

|                    | <b>Alakja/kinézete</b>                                                                                                                                                                                          | <b>Színe</b>                                         | <b>Nagysága</b>                                      |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Aszfalt</b>     | Szögletes hasadási részek egyértelműen fölfedezhetőek rajta. Peremeken lévő kisebb recék is szögletesek. A szögletes csúcsok enyhén lekerekednek. Halmazszerű felszín, ami kisebb darabok összeragadására utal. | Alapszíne antracit szürke, felülete foltokban barnás | ~20 mikron nagyságú darabok                          |
| <b>Lösz</b>        | Nem pontosan kivehető ásványi formákat alkotnak. Tromboéder hasadásúak                                                                                                                                          | Barnás-krém színűek                                  | ~4-5 mikron nagyságúak, ezek vannak összetapadva     |
| <b>Gumi</b>        | Hullámos csipkés szegélyűek, esetenként rojtos nyúlványúak. Néha Y/ ág képet mutatnak/adnak. A nyúlványok végei kicsúcsosodnak.                                                                                 | Ébenfekete, nincs benne más árnyalat.                | ~ 1-5 mikron között van a szél-hossz arány           |
| <b>Fékbetét</b>    | Formája az aszfalthoz hasonlít, inkább a színben tér el. Egységes grízes felületűek, szögletes, nyílhegy alakúak.                                                                                               | Grafitszürke színűek, néha fémes csillogással        | Maximum 20 mikron, de átlagosan 10 mikron nagyságúak |
| <b>Dízel korom</b> | 1:2, 1:3 széleik és hosszuk aránya                                                                                                                                                                              | Körömfekete                                          | 1 mikron méretűek                                    |

*A részletes morfológiai szemcseleírást tartalmazó táblázat (saját összeállítás)*

## 5.2. Minőségi szemcseanalízis

A megfelelő minőségi elemzési módszerek megtalálása terén két fő irányban kellett gondolkodnunk. Egyrészt megoldást kellett találnunk az aggregátumok felületén megtapadó nehézfémek jelenlétének igazolására, mivel a szállópor egészségkárosító hatása köztudottan főképpen ezekhez az elemhez kötődik. Olyan műszeres analitikai mérés típusra volt szükségünk, amely akár 1 µm alatti mérettartományban lévő egységek szervesen összetevőiről,

kifejezetten az aggregátumok felületével kapcsolatban nyújt felvilágosítást. Szakirodalmi olvasmányok (Z. Tian et al.2017), valamint kialakított kapcsolataink alapján a SEM-EDX analízisre esett a választásunk.

Másrészt pedig kutatásunk alapmotívumához igazodva a mikroműanyag szennyeződések egyik fő összetevőjét az autógumi mikroszemcsék anyagát kellett valamely kémiai módszerrel igazolnunk. Ezek az útanyag aggregátumok többségének alapjait jelentik. A Raman spektroszkópia jelentette azt a műszeres analitikai megoldást, amelyet a morfológiai megfigyeléseink igazolására választottunk.

### 5.2.1. Elektronmikroszkópos, SEM-EDX vizsgálatok

„A vizsgálat célja, az általunk morfológiailag felismert gumiszemcsék felületén lévő apró szemcsés szennyezők azonosítása, illetve kisebb részben a gumi alap összetételének vizsgálata hasonlóan Frank Sommer és társai (2018) által használt vizsgálati módszerekkel. Mintáinkat a Budapesti Műszaki Egyetemen Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék munkatársainak (Dr. Szilágyi Imre Miklós, egyetemi docens, illetve Karajz Dániel, PhD hallgató) segítségével tudtuk beméretni. A mérések több esetben a személyes jelenlétünkben történtek. A SEM (Scanning Electron Microscopy) felvételek és az EDX (Energy Dispersive X-ray) analízis egy JEOL JSM-5500LV típusú pásztázó elektronmikroszkóppal készültek. A mintákat módosítás, kezelés nélkül vizsgáltuk, kis vákuum (LV–low vacuum) üzemmódban 50 Pa nyomáson. Ez az előfeltétel azért kedvező, mert nem volt szükség a minták bearanyozására vagy szenezésére, mivel a mintatérben lévő gáz gondoskodott arról, hogy a minták ne töltődjenek.

A mintákról visszaszórt elektron detektort (BSE–Back-Scattered Electron) használva készítettünk felvételeket. A SEM képeken több, kisebb területen vagy ponton végeztünk EDX elemzést. Az EDX spektrumokban a jellemző karakterisztikus röntgensugárzás segítségével azonosíthatók az egyes elemeket, majd számíthatók a vizsgált területen az észlelt elemek atom- és tömegszázalékos koncentrációi.” (Sallai E. et al. 2023)

A SEM-EDX analízishez előzetesen megtervezett mintavételi felületet kellett alkalmaznunk. A felület alapja egy a mikroszkóp megfelelő mélyedésébe pontosan illeszkedő acélkorong volt (J. Rausch et al. 2022), amelyet speciális, erre a mérésre alkalmas karbon szalaggal kellett bevonnunk, majd a mintavételezéskor a Sigma-2 ülepítő henger aljába helyezni. Az utólagos szennyeződésekkel szemben a mintafelület védelmét kisméretű kartondobozzal oldottuk meg.



*A SEM-EDX méréshez előkészített mintavételi felület a védődobozban (saját kép)*

### 5.2.2. Minőségi elemzés a Raman-spektroszkópia segítségével

Ezzel az analitikai eljárással a morfológiailag legnehezebben elkülöníthető gumi és bitumen mikro szemcsék elkülönítése volt a legfontosabb célunk. Míg a SEM-EDX vizsgálatok un. egyszemcsés vizsgálatokra alkalmasak és leginkább az aggregátumokra feltapadt szervesetlen összetevők azonosítására alkalmasak, addig a Raman spektroszkópiával a mikro szemcsék alapját jelentő anyagok, főként a gumi minőségi meghatározását kívántuk elvégezni. A szénvegyületek esetében ez járható útnak tűnt és végül annak is bizonyult, mivel ez az eljárás képes a kémiai szerkezetekről, a kristályosság mikéntjéről is felvilágosítást adni.

Az anyagvizsgálatokra a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontjában került sor Veres Miklós és Gál Dávid vezetésével. Segítségüket ezúton is köszönjük!

Műmintáinkat közvetlenül, míg valós mintáinkat a korábban márt leírt 0,13 mm vastagságú üveglemezek között, megfelelő, bár meglehetősen nehéz fókuszálással vizsgálhattuk. A próbamérések alkalmával a gumianyag tekintetében megállapíthatóvá vált, hogy gyakorlatilag minden esetben az 532nm hullámhosszú lézerrel való 0,1-1%-os beállítás tűnt megfelelőnek. A méréssorozatot minimum 25-ös ismétlésszámra állítottuk be.



*Raman laboratórium a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontjában (<https://www.ek.hun-ren.hu>)*

## 6. Az aggregátumokkal kapcsolatos vizsgálati eredmények

### 6.1. A mennyiségi vizsgálatok eredményei

#### 6.1.1. Manuális leszámlálás

A három helyszínen –az M3-as autópálya tengelyében, a Baross téren és a Petrik technikum udvarán - kihelyezett ülepítők segítségével 2022. decembere és 2023. márciusa között, összesen hat héten keresztül zajlott a mintavételezés. Az ülepítő felületek cseréjét szakirodalmi adatok alapján (Z. Tian et al.2017) kéthetes periódusokban hajtottuk végre.

A 0,13mm vastagságú üveglemezek használata bevált, a Bürker-kamra osztott (rácsosított) felületével egyesített optikai fókuszálás lehetővé tette a szemcseszámlálást. A 30 µm feletti tartományban a felbontási korlátok okán és áttetsző, az opak szemcséken belül pedig gumi és egyéb elemeket tudtunk elkülöníteni az ebben a mérettartományban már megismert morfológia alapján. Két frakciót („nagy-kicsi”) a 30 µm-es határ alapján választottunk el. Számlálási adatainkat az alábbi táblázatban összesítettük.

| A mennyiségi szemcsevizsgálat eredményei (2022.12.14.-2023.03.6.) |                                        |            |        |                          |            |        |                          |            |        |                                  |            |        |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|--------|--------------------------|------------|--------|--------------------------|------------|--------|----------------------------------|------------|--------|
| Mintavétel                                                        | Összes szemcse db szám/mm <sup>2</sup> |            |        | Opak/átlátszó %-os arány |            |        | Gumiszemcsék %-os aránya |            |        | Nagy szemcsék(>30µm) %-os aránya |            |        |
|                                                                   | M3                                     | Baross tér | Petrik | M3                       | Baross tér | Petrik | M3                       | Baross tér | Petrik | M3                               | Baross tér | Petrik |
| 1.                                                                | 104                                    | 103        | 53     | 81/19                    | 72/28      | 64/36  | 15                       | 16,5       | 9,5    | 11,5                             | 3          | 9      |
| 2.                                                                | 96                                     | 95         | 49     | 81/19                    | 72/28      | 65/35  | 14,5                     | 16         | 10     | 10                               | 3          | 10     |
| 3.                                                                | 270                                    | 184        | 104    | 82/18                    | 78/22      | 62/38  | 15,5                     | 16         | 9,5    | 7                                | 11         | 4      |
| 4.                                                                | 254                                    | 120        | 102    | 73/27                    | 60/40      | 61/39  | 12                       | 8          | 8      | 18                               | 6,5        | 4      |
| 5.                                                                | 338                                    | 218        | 126    | 71/29                    | 83/27      | 68/32  | 12,5                     | 13         | 6      | 23,5                             | 1          | 12,5   |
| 6.                                                                | 274                                    |            | 154    | 84/16                    |            | 81/19  | 15                       |            | 6,5    | 24                               |            | 9      |

*A mennyiségi szemcsevizsgálati adatok összesítő táblázata (saját munka)*

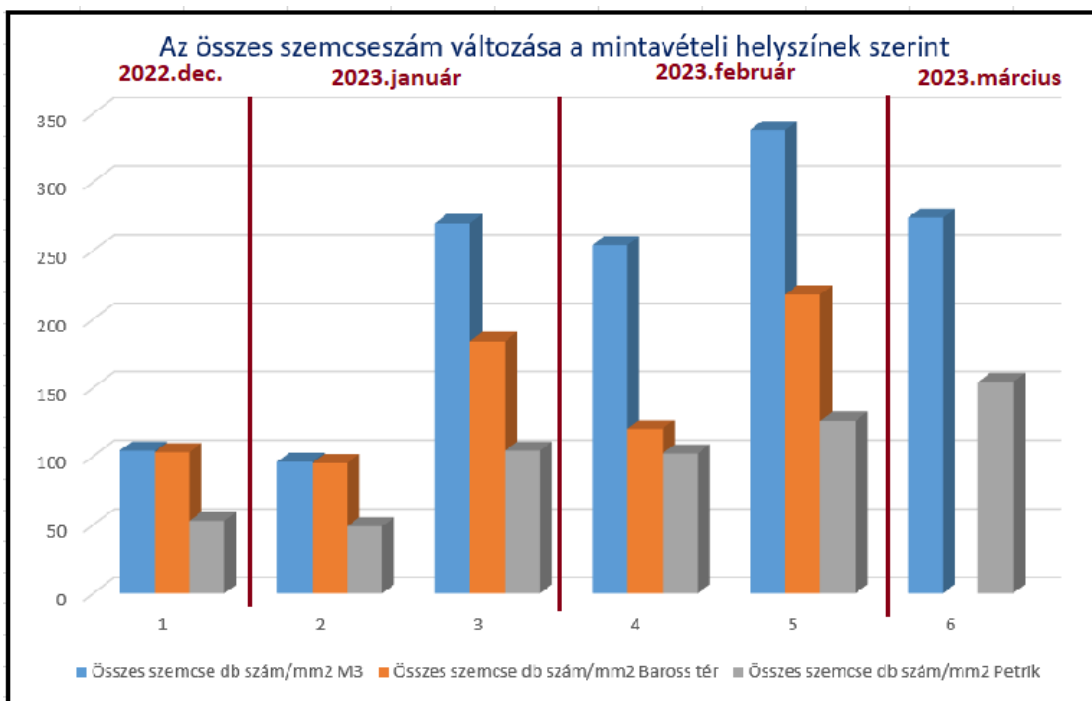
A táblázat adatai alapján megállapítható:

- A gumiszemcsék részaránya még az iskolaudvar viszonylatában is 8-9%-ra becsülhető, a másik két helyszínen ez magasabb, jellemzően 12-16 % közötti érték.
- A technikum udvarán (mintavető kb. 60m-re található a Thököly út szélétől) a nagyobb szemcsék aránya valamelyest lecsökken, viszont egyértelműen lecsökken az opak, feltételezéseink szerint jellemzően útanyag szemcsék részaránya.

Az un. „összes szemcseszám” adatokból a három helyszínt mutatta oszlopdiagramot készítettünk, ezt tanulmányozva az alábbiak olvashatók ki:

- Egyértelműen látszik a karácsonyi és a január eleji szabadságolási időszak hatása. A forgalom mértékének csökkenése a szállópor termelődés lehetőségét is csökkenti.

- Szignifikáns eredmény a három mintavételi helyszín közötti különbség megnyilvánulása. Az M3-as bevezető és a Baross tér közötti szállópor koncentráció közötti különbség az utak közvetlen környezetében egyértelműen az autópályára nézve előnytelen többletet jelent. Korábban ez kérdéses volt.
- Az **1. számú mellékletben** szereplő időjárási adatokkal kapcsolatban elmondható, hogy egyelőre nem állapítható meg kismértékű korreláció sem. Feltehetőleg ez csak hosszabb mintavételi időszak esetében válhat csak komolyabban felmerülő szemponttá.



*Az összes szemcseszám változását ábrázoló oszlopdiaagram (saját munka)*

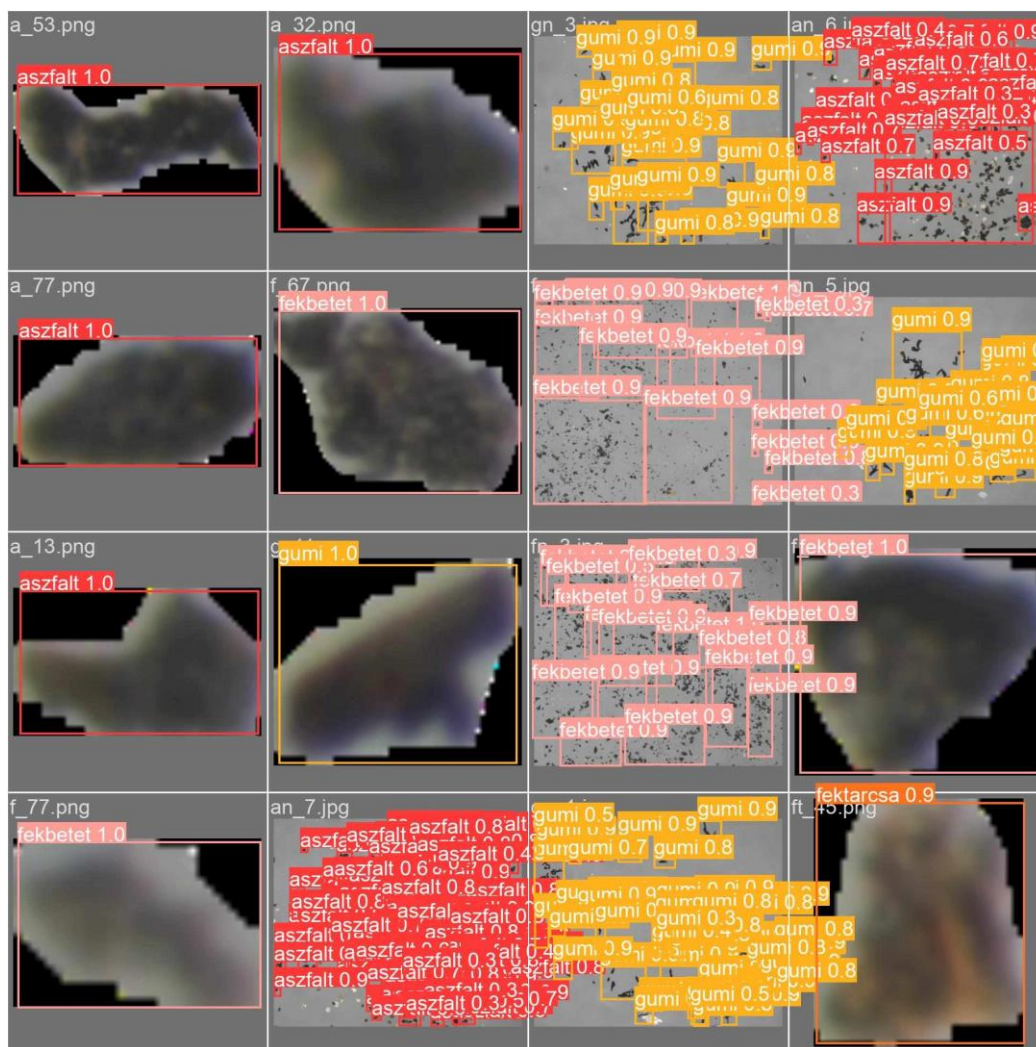
## 6.1.2. A MI gépi tanulási módszertanának eredményei

### 6.1.2.1. A szemcsék képi szelektálása és az elemző modell eredményei a műminták esetében

Az egyes műminták morfológiai alapú kijelölését a **Segment Anything Research by Meta AI** alkalmazást használva végeztük el. A program automatikusan lehatárolja a kijelölt szemcséket, ezt a lehatárolást azonban több esetben kézi korrigálással volt szükséges kiegészíteni a nagyobb hatékonyság elérése érdekében. Első próbálkozásként valamennyi műminta típusból 100-100 szemcse szelekcióját végeztük el.

Modell programunk a gépi tanulási formák egyik típusa, az ún. felügyelt gépi tanulási modell (**Supervised Machine Learning**). Címkeztet adatkészleteket használ az algoritmusok betanításához az eredmények előrejelzésére és a minták felismerésére. A modell első körös lefuttatása után alábbi képen látható találati eredmények alakultak ki az egyes műminta környezetben. A számunkra legfontosabbnak tekintett gumiszemcsék sokszor 80-90 százalékos

találati aránya nem tekinthető rossz eredménynek ezzel a bemeneti adatszámmal. A szemcsék morfológiáját tekintve ezen műminták közül egyértelműen a mikro-gumi darabok tekinthetők a leginkább karakteresebbnek. A szemcsék körvonalán belüli rossz felbontás ellenben valamennyi szemcse esetében hátráltatja a tanulás folyamatát.

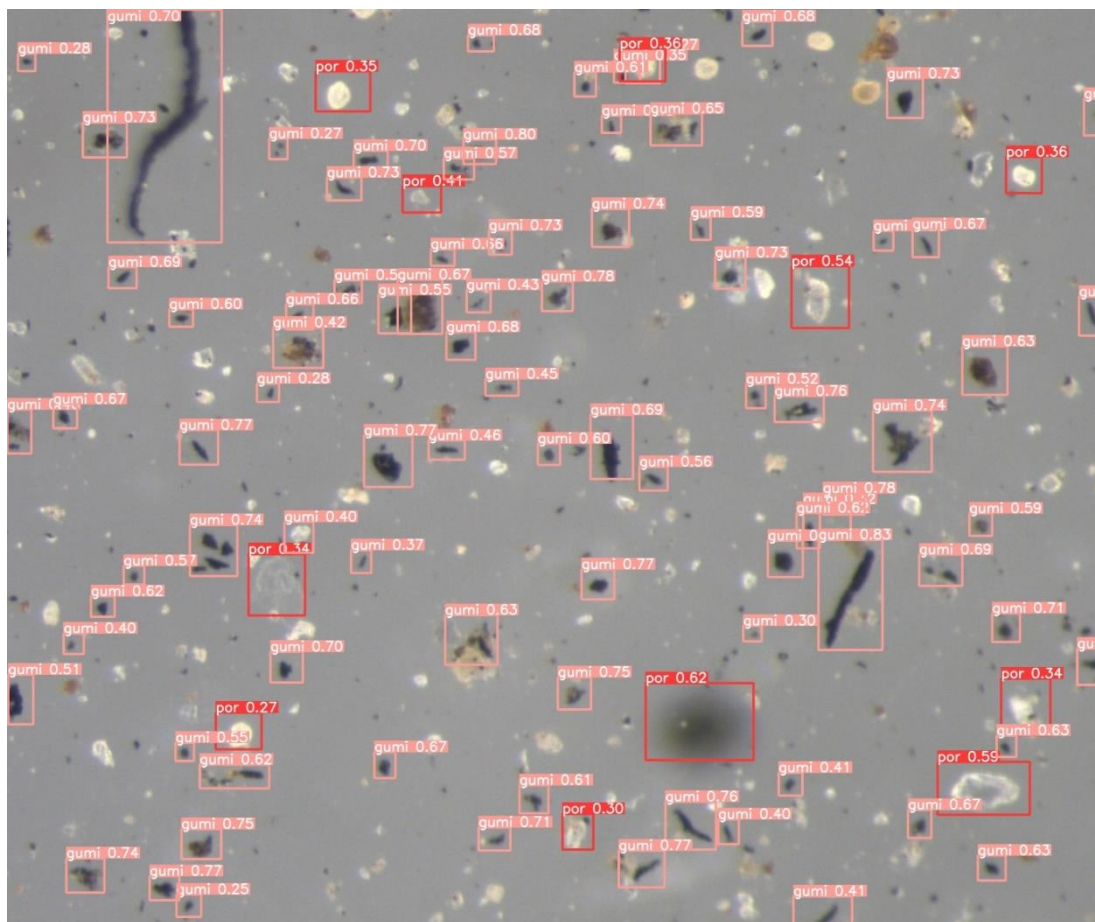


*A műminták százalékos találati értékei- példák*

#### 6.1.2.2. Az elemző modell eredményei valós minták esetében

A modell műmintákon történő betanítása (tréningek) után a valós mintákon történő futtatások következtek. Nézzük az alább mellékelt képen található valós mintát (M3-as autópálya) ábrázoló kép gépi elemzését. Ezen megállapítható, hogy a gumiszemcsékre vonatkozó találati arány az összes jelzett ilyen területet nézve 62%. A nagyobb szemcséket nézve (50-80  $\mu$ m között) a találati arány már 70% körüli értékre emelkedik, míg a 20-30  $\mu$ m –es elemeknél 40% közelébe esik vissza. A felülvizsgálati szempontokat tekintve néhány nagy szemcse esetében egyértelmű a téves meghatározás, hiszen csak a morfológiai körvonal alapján meghatározott értékelés nem egyezik a színárnyalat, vagy pl. áttetszőség jellemzőivel. Az általunk használt

szakirodalom alapján (J. Rausch et. al 2022) első próbálkozásként igen kis létszámú minta után nem is várhattunk magasabb %-os találati arányt, ennyit viszont mindenképpen vártunk.



*Valós minta (M3-as autópálya) modellvizsgálata - példa*

Egyelőre csak kezdeti lépéseket végeztünk el a gépi tanulás módszertanát tekintve. Feladatunk a jövőben, hogy még jobb felbontású és nagyobb mennyiségű tréning képanyag segítségével növeljük a fentebb látható értékeket. E tekintetben említjük meg a HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpontjában, a témában élenjáró Lendület Mikroszkópos Képfeldolgozó és Gépi Tanulási Csoportban dolgozó munkatársakkal megtörtént kapcsolatfelvételt. A biológiai vonatkozású képanyag feldolgozásában jártas szakemberek számára is új feladat lesz az aeroszol alkotók kutatása. Bízunk abban, hogy fényfelbontás elvi határát súroló mikroszkópok, a fluoreszcens fényben való elkülönítési lehetőség és a megfelelő modellalkotó program mind-mind segítségünkre lesznek a statisztikai elemzésben. Célunk az, hogy a PM10 alatti tartományban előforduló összes lebegőanyaghoz képest a mikroműanyag (autógumi) alapú aggregátumok százalékos arányszámáról vizsgálataink segítségével egyértelmű elképzelésünk legyen akár az időjárási elemek változásának függvényében is.

## 7. A minőségi vizsgálatok eredményei

### 7.1. A SEM-EDX analízis eredményei

Példaként az első mintavételi időszak (2022. dec.14-28.), az M3-as autópályán kihelyezett mintavevőnkől származó minta (1/1-es minta) összefoglalóját közöljük, amely teljességében a **2. sz. mellékletben** tekinthető meg.

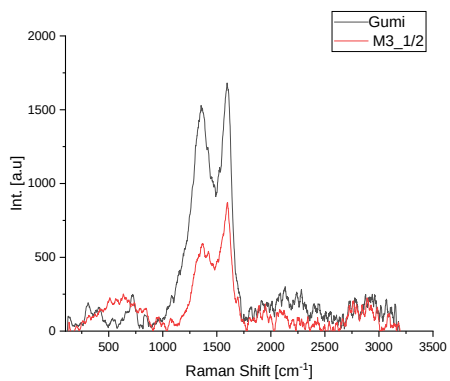
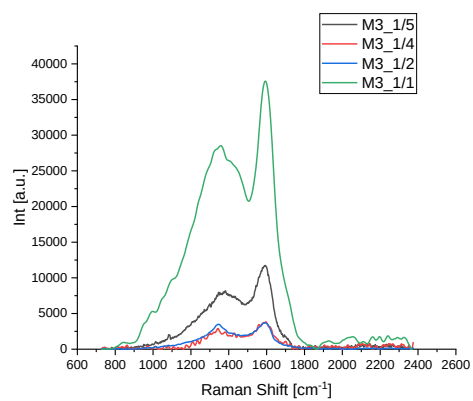
„Az első felvételen látható részecske mérete 236  $\mu\text{m}$  hosszú és 72.8  $\mu\text{m}$  széles. Fő komponensei szén és oxigén, de tartalmaz még nátriumot, magnéziumot, alumíniumot, szilíciumot (főként az 1-es mérési ponton), ként, klórt, kalciumot (nagy mennyiségben), vasat és kis mennyiségben káliumot. A felvétel morfológiája alapján, úgy néz ki, mint egy gumirészecske, amibe kisebb, szögletesebb ásványi részecskék vannak beleragadva.

A második felvételen látható részecske mérete több száz  $\mu\text{m}$ -es és már szabad szemmel is látható. Fő komponensei szén, oxigén, klór, kalcium, vas és a második mérési pontnál szilícium. Ezen kívül kimutattunk alumíniumot, ként, káliumot és az **első mérési pont esetében titánt, krómot és mangánt**. Morfológiája szálasnak tűnik és hasonlóan ásványi jellegű darabok vannak lerakódva rajta.” (Karajz Dániel PhD hallgató összefoglalójából)

Az un. „egyszemcsés” vizsgálattal már az első mintánkban igazoltuk tehát az aggregátumok felszínén megtapadó nehézfémek jelenlétét! Megemlítendő, hogy az egyes nehézfémek az autók mely elkopó szerkezeti eleméhez tartozhatnak. Esetünkben a **titán** vékonyrétegű bevonatokhoz (szelep- és fogaskerék bevonatok), a fékbetétekhez kapcsolódnak, a **króm** és a **mangán** pedig nagyon sok acélelem ötvöző anyagaként szerepel.

### 7.2. A Raman-spektroszkópiai vizsgálatok eredményei

Az eredményekből megállapítható volt, hogy a gumi és bitumen szemcsék ezzel az analitikával jól elkülöníthetők. Mindkettő amorf szénvegyület lévén nem éles, hanem széles csúcsot adott az 1380 valamint az 1600  $1/\text{cm}$  körüli frekvencia értékeknél. A különbség jól láthatóan megmutatkozott abban, hogy a bitumen esetében az 1380  $1/\text{cm}$  körüli frekvencia csúcs jóval kisebb intenzitású, szinte alig észrevehető még nagy ismétlésszámú mérés, illetve zajsűrés esetében is. A mellékelt baloldali ábrán az autópályáról különböző időpontokban vett gumiminták elemzését mutatjuk be, amely esetekben előzetesen valamennyiszer már alapos morfológiai ismeretünk birtokában találtuk meg a bemérendő szemcséket. A csúcspontok egybeesése egyértelmű. Még inkább tökéletesen összeillik a mű- és a valós gumimintánk spektruma (jobbra)! **A Raman analitikával igazoltuk tehát morfológiai megfigyeléseinket!**



*Valós minták (balra), továbbá a mű-és valós gumiminta egymásra illesztett spektruma (jobbra)*

## 8. A zajvédő falak növényesítésének lehetőségei

„Ismert tény, a növényzet hatékony pormegkötő képessége, illetve a légminőséget más egyéb módon javító szerepe. Az M3-as autópálya bevezető szakasza, gyakorlatilag teljes hosszában, 5 méter magas zajvédő falakkal szegélyezett. Praktikus gyakorlati ötletünk, a falak tudatos növényesítésére, ebből az alaphelyzetből született.

Távlati célunk, hogy Magyarországon a fent jellemzett környezetben az új zajvédő falak megépítésével egy időben szükségszerűen valósuljon a növényesítés is, illetve régi védfalak esetében, ahol ez műszakilag megvalósítható, pótlólag kerüljön ez kialakításra. Mindezek okán kerestük meg a zajvédő falakat is tervező Unitef83 Zrt. környezetvédelmi csoportját, akik a megfelelő műszaki feltételek kialakításában nyújtottak és nyújtanak majd háttér támogatást.

Középtávú célunk egy vizsgálati célú növényesített referencia felület kialakítása az M3-as autópálya budapesti bevezető szakaszának mentén, a lakótelepek övezte terület tözsomszédságában. Az üzleti stratégiát is érintő tájékoztató kapcsolatfelvétel egy kivitelező céggel már megtörtént. A COMPACT NATURE Kft. egy előnevelt borostyán kerítéselemeket országosan forgalmazó cég, de nagyobb növényesített felületeket is sikeresen kialakítottak már (Debreceni Aquaticum Élményfürdő, Szélkapu Park Budapesten).” (Sallai E. et al. 2023)

„Előzetes tájékoztatásuk alapján az általuk nagytömegben előnevelt, holland licence alapján nemesített borostyán felület több szempontból is alkalmas lesz a növényesített zajvédő falak kialakítására. Az erdei borostyántól (*Hedera helix*) eltérően ez a növény több szempontból is már „ipari növény”-nek tekinthető. Nem virágzik, ezért a madarak, rovarok, élelem szempontjából nem keresik. „Kontroll alatt” fejlődő növény, amely a rendelkezésre álló rácsos panel befutása után nem növekedik túl és a kezdeti fejlődési életszakasz után szélsőséges körülmények között is életképes tud maradni.” (Sallai E. et al. 2023)

„Egy majdan kialakítandó referencia felületen a hatékonysági vizsgálatok mellett, a megtelepedési arányok, a gondozási szükségletek vizsgálata is feladatunk lesz majd. A fal hosszmeretének és magasságának kialakítását a valós, már nem „laboratóriumi” körülményeknek megfelelő elvek, a műszaki feltételek, és a pénzügyi lehetőségek fogják meghatározni.” (Sallai E. et al. 2023)

A XII.ker-i Hegyalja út mentén (Csörsz park) egy már meglévő, félig-meddig növényesített zajvédő fal esetében hatékonysága vizsgálatot folytattunk. 25x50 cm-es pályaburkoló gumilapokat, mintavételi felületként a falra erősítettünk, szabadon hagyva, illetőleg borostyánnal burkolva, 170 és 230 cm magasságokban, ahogy az a mellékelt képen is látszik. A felületekre ülepedő oldhatatlan por (gumi és borostyán is) visszamosásával a kiülepedő pormennyiségek különbségét kívántuk meghatározni. 17 nap elteltével, sajnos még a bevételezés előtt az eső meghiúsította a mérés kívánt véghezvitelét. Laboratóriumban egyetlen értékes tájékoztató adatot azonban sikerült így is meghatároznunk: kiadós esőzés utáni állapotban 1 m<sup>2</sup>-nyi kezelt borostyánnal futtatott felületen még 5,6 g pormennyiséget tudtunk visszamérni! Számításunk alapján továbbá a kezelt, növényrel futtatott felület minimálisan 3x-os felületnövekedést biztosít!



*Kihelyezett mintavevő felületek a XII..ker-i Hegyalja úton (saját kép)*

„A zajvédő falakkal kapcsolatban felmerülő felhasználói igény, hogy a kialakított védelmi objektum amennyire tud, tájba illeszkedő legyen. Ezzel kapcsolatban, a nem plexi anyagú elemek tudatos növényesítése több pozitív hatása mellett ezért is előnyös lenne. Lakókörnyezetben áthaladó, városi autópálya szakaszokon, megfontolandó lehetne a zajvédő falak ilyen típusú kialakítása, amely a borostyán, mint igen stressztűrő növény alkalmazásával kevés gondozási feladattal járna.” (Sallai E. et al. 2023)

## 9. Összefoglalás, a projekt eredményei

Érdemben immár három esztendeje tartó projektünkben több irányban igen jelentős lépést tudtunk tenni a közutakon termelődő, lebegőállományba kerülő „útanyag aggregátumok” (TRWP) tekintetében. Ezeket az alábbi pontokban foglaljuk össze:

- Szakszerű, nemzetközi összehasonlításra is alkalmas passzív pormintavételi eszközt szereztünk be (Sigma-2).
- Három karakteres, engedélyezett helyszínen három hónapos időtartamú, különböző analitikai vizsgálatokra és összehasonlításokra alkalmas mintavételi sorozattal rendelkezünk.
- Fénymikroszkópos manuális mennyiségi meghatározásra alkalmas mintavételi és számlálási módszert alkottunk meg.
- Fénymikroszkópos környezetben, a 20-80  $\mu\text{m}$ -es tartományban, a közutakon előforduló leggyakoribb kopástermékek részletes morfológiai elemzését adtuk meg.
- Morfológiai alapismereteinkre támaszkodva leraktuk a MI gépi tanulás módszertanának alapjait a TRWP témakörben, és amely az előzetes valós mintákon történt modellfuttatások alapján reménykeltő mennyiségi meghatározási módszert jelenthet!
- A minőségi szemcse analízis terén jelentős előrelépést tettünk: a Raman spektroszkópia segítségével műszeres analitikai módszerrel már valós mintákon is igazoltuk a mikrogumi szemcsék megfelelő morfológiai kategorizálását! Ezzel az analitikával a gumi és bitumen szemcsék is elkülöníthetővé váltak.
- Az alkalmazott SEM-EDX analitika az un. „egyszemcsés” vizsgálat tekintetében, a leginkább egészségkárosító nehézfémek „letapogatására” alkalmas módszernek bizonyult.
- Az autópályák városi szakaszai mentén húzódó zajvédő falak növényesítési feltételeinek áttekintésével egy jól körül határolható területen elindítottuk az alapprobléma megoldásának egy lehetséges irányát.

Úgy gondoljuk, hogy a fent leírtak **alkalmas eszközök és módszerek** arra, hogy most már sorozatban, több helyszínen, több mintán alkalmazzuk őket, és egy komolyabb teszt sorozatban, meghatározó és sok következtetésre alkalmas eljárásrendnek bizonyuljanak.

## 10. Köszönetnyilvánítás és szakirodalom

### 10.1. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk mentorunknak, Dr. Vonderviszt Ferencnek (Pannon Egyetem) a szakmai útbaigazításért. Az egyes kutatóintézetekben, egyetemeken biztosított analitikai lehetőségekért Dr. Holczbauer Tamásnak (HUN-REN TTK), Karajz Dánielnek PhD hallgatónak (BME), Dr. Veres Miklósnak és Gál Dávidnak (HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont), mondunk köszönetet. Köszönjük Preisler Andrásnak (Petrik Technikum) informatikus iskolatársamnak, valamint Deme Alexandrának (Petrik Technikum) a gépi tanulás módszertanában és munkájában nyújtott pótolhatatlan segítségét.

### 10.2. Szakirodalom

Zhaoxue Tian, Volker Dietze, Frank Sommer, Anja Baum, Uwe Kaminski, Jan Sauer, Christoph Maschowski, Peter Stille, Kuang Cen, Reto Gieré (2017) Coarse-Particle Passive-Sampler Measurements and Single-Particle Analysis by Transmitted Light Microscopy at Highly Frequented Motorways. *Aerosol and Air Quality Research*, 17: 1939–1953

Frank Sommer, Volker Dietze, Anja Baum, Jan Sauer, Stefan Gilge, Christoph Maschowski, Reto Gieré (2018) - Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18: 2014–2028

Urbán,B.Gy.,Kassai,Cs.M.,Mészáros,N. (2019) Blurred tire tracks, Quantitative data on microparticles from tire wear on road surface washing into surface water. International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies. 21-22 November 2019 Budapest, Óbuda University, 276-285

Juanita Rausch, David Jaramillo-Vogel , Sébastien Perseguers , Nicolas Schnidrig , Bernard Grobéty, Phattadon Yajan (2022) Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier. Elsevier,2-16

Sallai, E., Szentesi, P. (2023) Lebegő útanyag szemcsék. OTDK Pályázat, Kézirat

Asma Beji, Karine Deboudt, Bogdan Muresan, Salah Khardi, Pascal Flament, Marc Fourmentin, Laurence Lumiere (2023): Physical and chemical characteristics of particles emitted by a passenger vehicle at the tire-road contact, Elsevier

## 11. MELLÉKLETEK

| December 14. - Január 9. |            |  | 1. mintavétel | December 28.-Január 9. |            |  | 2. mintavétel | Január 10. - Január 23. |            |  | 3. mintavétel |
|--------------------------|------------|--|---------------|------------------------|------------|--|---------------|-------------------------|------------|--|---------------|
| Időpont                  | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] | Időpont                | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] | Időpont                 | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] |
| Dec 14                   | 4.5        |  | 0.0           | Dec28                  | 2.5        |  | 0.0           | Jan 10                  | 5.2        |  | 24.4          |
| Dec15                    | 2.0        |  | 0.1           | Dec29                  | 2.2        |  | 0.0           | Jan 11                  | 4.2        |  | 0.0           |
| Dec16                    | 3.3        |  | 10.8          | Dec30                  | 1.9        |  | 0.5           | Jan 12                  | 2.0        |  | 1.0           |
| Dec17                    | 3.8        |  | 0.3           | Dec31                  | 1.7        |  | 0.0           | Jan 13                  | 2.7        |  | 0.0           |
| Dec18                    | 2.0        |  | 0.0           | Jan1                   | 1.9        |  | 0.0           | Jan 14                  | 4.1        |  | 2.6           |
| Dec19                    | 3.4        |  | 0.0           | Jan2                   | 3.2        |  | 0.0           | Jan 15                  | 4.0        |  | 0.2           |
| Dec20                    | 3.4        |  | 0.0           | Jan3                   | 2.3        |  | 0.0           | Jan 16                  | 6.1        |  | 2.8           |
| Dec21                    | 2.3        |  | 0.0           | Jan4                   | 2.8        |  | 0.0           | Jan 17                  | 6.1        |  | 14.7          |
| Dec22                    | 2.2        |  | 1.0           | Jan5                   | 6.7        |  | 2.2           | Jan 18                  | 4.4        |  | 5.8           |
| Dec23                    | 3.6        |  | 0.4           | Jan6                   | 6.2        |  | 0.0           | Jan 19                  | 5.3        |  | 12.4          |
| Dec24                    | 5.1        |  | 1.3           | Jan7                   | 1.9        |  | 0.0           | Jan 20                  | 3.2        |  | 0.0           |
| Dec25                    | 2.1        |  | 0.0           | Jan8                   | 4.4        |  | 0.0           | Jan 21                  | 2.2        |  | 0.2           |
| Dec26                    | 2.0        |  | 0.0           | Jan9                   | 4.5        |  | 22.8          | Jan 22                  | 2.5        |  | 2.8           |
| Dec27                    | 6.1        |  | 0.3           |                        |            |  |               | Jan 23                  | 3.6        |  | 0.0           |

| Január 24. - Február 6. |            |  | 4. mintavétel | Február 7. - Február 20. |            |  | 5. mintavétel | Február 21. - Március 13. |            |  | 6. mintavétel |
|-------------------------|------------|--|---------------|--------------------------|------------|--|---------------|---------------------------|------------|--|---------------|
| Időpont                 | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] | Időpont                  | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] | Időpont                   | Szél [m/S] |  | Csapadék [mm] |
| Jan 24                  | 1.6        |  | 0.0           | feb. 7                   | 1.8        |  | 0.0           | feb. 21                   | 6.9        |  | 0.0           |
| Jan 25                  | 3.1        |  | 0.0           | feb. 8                   | 4.6        |  | 0.0           | feb. 22                   | 3.0        |  | 0.0           |
| Jan 26                  | 2.2        |  | 0.1           | feb. 9                   | 1.6        |  | 0.0           | feb. 23                   | 2.7        |  | 0.0           |
| Jan 27                  | 3.0        |  | 0.0           | feb. 10                  | 3.7        |  | 0.0           | feb. 24                   | 4.8        |  | 0.1           |
| Jan 28                  | 2.5        |  | 0.0           | feb. 11                  | 4.4        |  | 0.0           | feb. 25                   | 6.8        |  | 1.0           |
| Jan 29                  | 2.4        |  | 0.0           | feb. 12                  | 5.4        |  | 0.0           | feb. 26                   | 5.0        |  | 0.0           |
| Jan 30                  | 6.6        |  | 0.8           | feb. 13                  | 1.5        |  | 0.0           | feb. 27                   | 3.3        |  | 0.0           |
| Jan 31                  | 8.4        |  | 0.1           | feb. 14                  | 1.7        |  | 0.0           | feb. 28                   | 2.1        |  | 0.0           |
| Feb 1                   | 7.4        |  | 0.9           | feb. 15                  | 1.6        |  | 0.0           | Mar 1                     | 2.9        |  | 0.0           |
| Feb 2                   | 8.5        |  | 3.3           | feb. 16                  | 2.3        |  | 0.0           | Mar 2                     | 1.3        |  | 0.0           |
| Feb 3                   | 8.9        |  | 17.7          | feb. 17                  | 3.7        |  | 0.4           | Mar 3                     | 3.0        |  | 0.0           |
| Feb 4                   | 9.5        |  | 0.4           | feb. 18                  | 7.9        |  | 0.0           | Mar 4                     | 6.6        |  | 0.0           |
| Feb 5                   | 4.6        |  | 0.0           | feb. 19                  | 8.2        |  | 3.6           | Mar 5                     | 6.0        |  | 0.0           |
| Feb 6                   | 2.4        |  | 0.0           | feb. 20                  | 5.7        |  | 0.0           | Mar 6                     | 3.6        |  | 1.5           |

**1. sz. melléklet: a mintavételi időszakok (2022 dec.14 és 2023.márc. 06. között) időjárási adatai a kéthetes mintavételi időszakok bontásában**

**(forrás: met.hu)**

**2. sz. melléklet: az alábbiakban a példaként felhozott mintánk (1/1), SEM-EDX eredményeinek összefoglalója olvasható**

**A mérések a BME Szervetlen és Kémiai Analitikai Tanszékén készültek.**

**A méréseket a jelenlétünkben Karajz Dániel PhD hallgató végezte el 2023. márciusában.**



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék  
1111 Budapest, Szent Gellért tér 4.

---

## **1/1-es minta SEM-EDX vizsgálata**

### **1. Minták**

#### **1.1. 1/1-es minta**

### **2. Mérési körülmények**

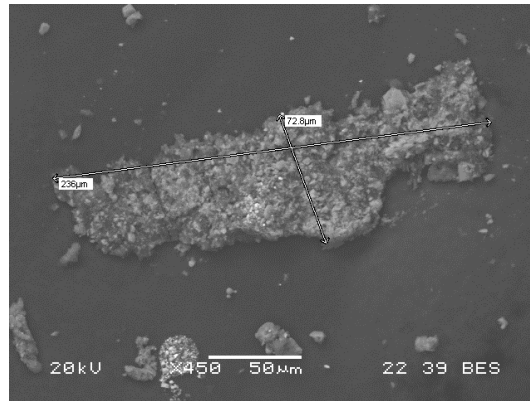
A SEM (scanning electron microscopy) és az EDX (energy dispersive X-ray analysis) felvételek egy JEOL JSM-5500LV típusú pásztázó elektronmikroszkóppal készültek. Az EDX spektrumokban a karakterisztikus röntgensugárzásuk segítségével azonosítottuk az elemeket, majd kiszámítottuk a vizsgált területen az észlelt elemek tömeg százalékos koncentrációját. A mintákat vezető réteggel való bevonat nélkül vizsgáltuk, hogy az elem összetétel méréseket az ne zavarja. A mintákat szekunder és visszaszórt elektron detektorokkal is vizsgáltuk (SEM képeken ez SEI vagy BEI rövidítés alapján lehet eldönteni).

### **3. Mérési eredmények összefoglalása**

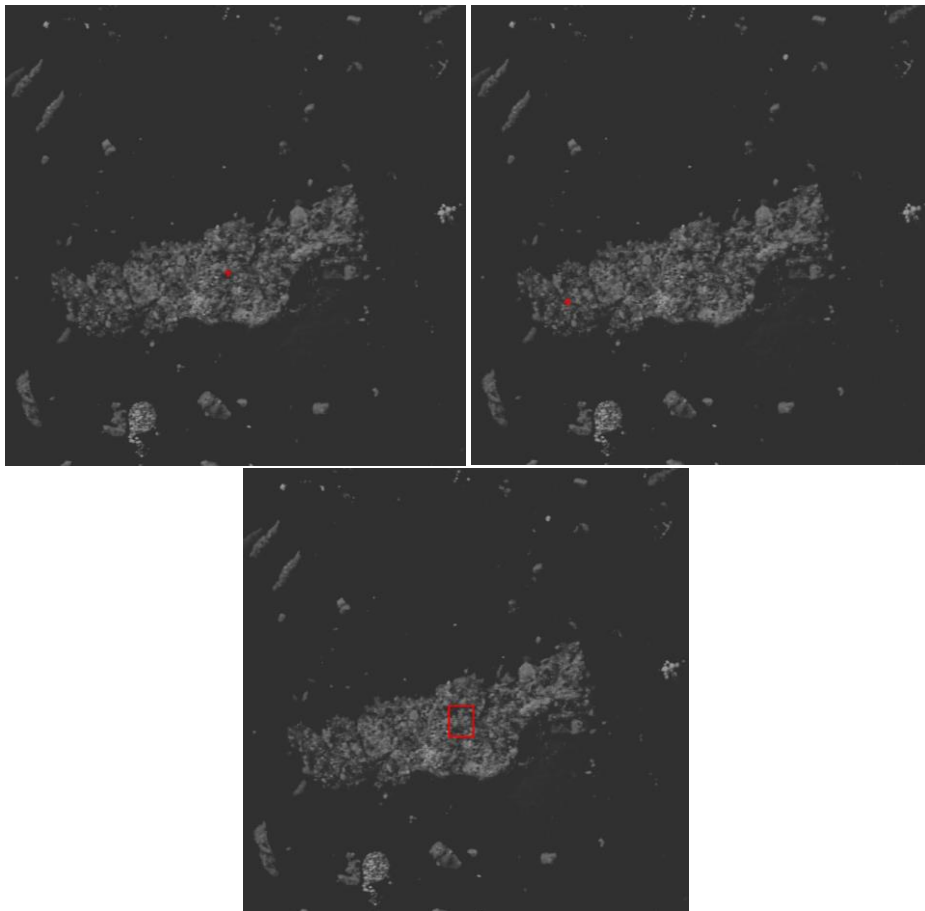
Az első felvételen látható részecske mérete 236  $\mu\text{m}$  hosszú és 72.8  $\mu\text{m}$  széles. Fő komponensei szén és oxigén, de tartalmaz még nátriumot, magnéziumot, alumíniumot, szilíciumot (főként az 1-es mérési ponton), kén, klórt, kalciumot (nagy mennyiségben), vasat és kis mennyiségben káliumot. A felvétel morfológiája alapján, úgy néz ki, mint egy gumirészecske, amibe kisebb, szögletesebb ásványi részecskék vannak bele ragadva.

A második felvételen látható részecske mérete több száz  $\mu\text{m}$ -es és már szabad szemmel is látható. Fő komponensei szén, oxigén, klór, kalcium, vas és a második mérési pontnál szilícium. Ezen kívül kimutattunk alumíniumot, kén, káliumot és az első mérési pont esetében titánt, krómot és mangánt. Morfológiája szálasnak tűnik és hasonlóan ásványi jellegű darabok vannak lerakodva rajta.

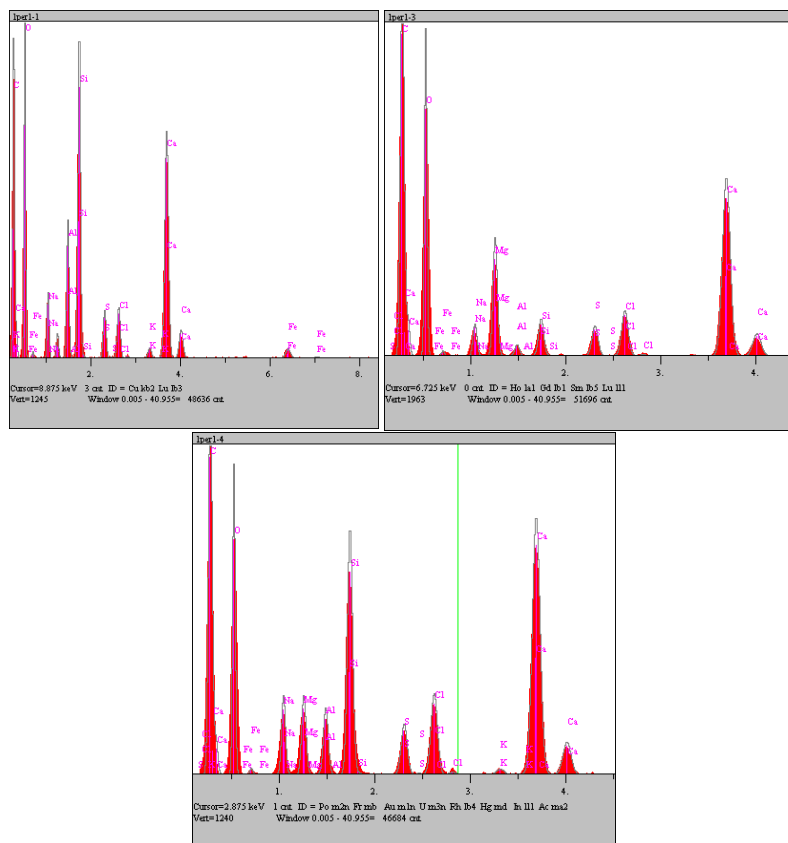
#### **4.1 Első szemcse**



SEM kép az első mérési területről, mérettel



EDX mérési pontok és egy mérési terület

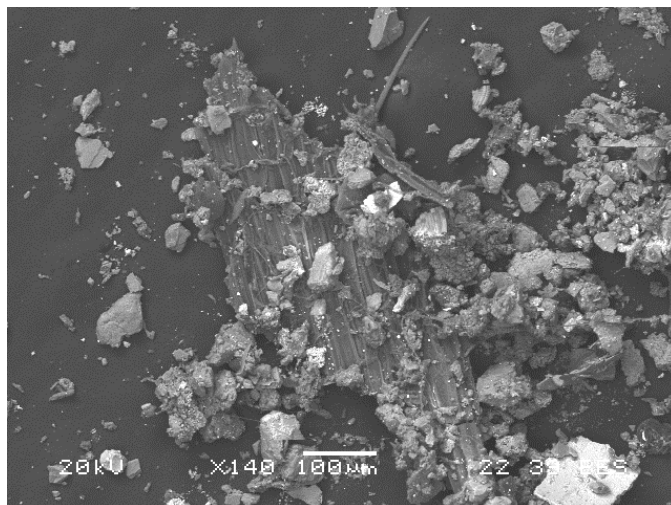


EDX spektruma a mérési pontoknak és a mérési területnek

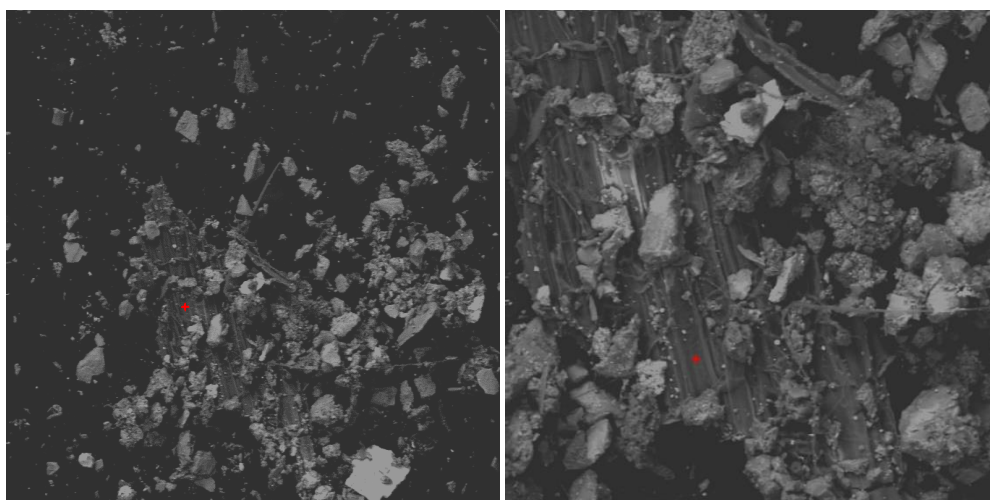
EDX mérési eredmények

| Elem | Pont1 / tömeg% | Pont2 / tömeg% | Terület / tömeg% |
|------|----------------|----------------|------------------|
| C    | 49.97          | 53.63          | 66.42            |
| O    | 33.03          | 34.55          | 25.81            |
| Na   | 1.38           | 0.84           | 1.00             |
| Mg   | 0.40           | 2.36           | 0.74             |
| Al   | 1.98           | 0.21           | 0.53             |
| Si   | 4.84           | 0.69           | 1.87             |
| S    | 0.77           | 0.60           | 0.37             |
| Cl   | 0.94           | 1.03           | 0.61             |
| K    | 0.23           | -              | 0.05             |
| Ca   | 5.76           | 5.82           | 2.46             |
| Fe   | 0.71           | 0.28           | 0.14             |

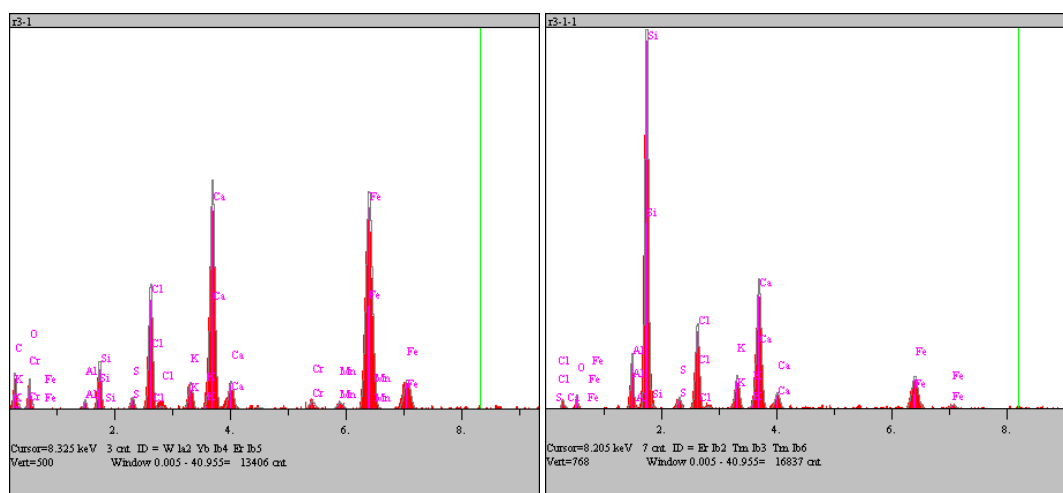
## 4.2 Második szemcse



SEM kép a második mérési területről



EDX mérési pontok



EDX spektruma a mérési pontoknak

EDX mérési eredmények

| Elem | Pont1 / tömeg% | Pont2 / tömeg% |
|------|----------------|----------------|
| C    | 25.24          | 23.12          |
| O    | 5.99           | 6.34           |
| Al   | 0.44           | 3.29           |
| Si   | 2.22           | 28.18          |
| S    | 0.50           | 0.97           |
| Cl   | 5.98           | 7.90           |
| K    | 1.52           | 3.56           |
| Ca   | 14.41          | 15.53          |
| Fe   | 41.67          | 11.11          |
| Ti   | 0.20           | -              |
| Cr   | 0.96           | -              |
| Mn   | 0.87           | -              |