



# XXXII. OTDK 2015

*Fizika, Földtudományok és  
Matematika Szekció*



**Szkenner alapú nyomdetektor elemző rendszer kifejlesztése és  
összehasonlítása hagyományos optikai mikroszkópos módszerrel**

Készítette:

**Bátor Gergő**

Környezetmérnök (MSc), I. évfolyam

Témavezető:

**Dr. Kovács Tibor**

Egyetemi docens

Radiokémiai és Radioökológiai Intézet

Mérnöki Kar

**Pannon Egyetem  
Veszprém**

# Tartalomjegyzék

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Bevezetés, célkitűzés .....                                  | 1  |
| Szakirodalmi áttekintés .....                                | 3  |
| 1. Lakosság sugárterhelése .....                             | 3  |
| 1.1 Radontól származó sugárterhelés.....                     | 3  |
| 1.2 Radon izotópjai .....                                    | 4  |
| 2. Radon mérési technikák.....                               | 4  |
| 2.1 Nyomdetektorok alkalmazhatósága .....                    | 5  |
| 3. Előkészítési, kiértékelési technikák .....                | 6  |
| 3.1 Nyomdetektorok előkészítése .....                        | 6  |
| 3.2 Nyomdetektorok kiértékelése .....                        | 7  |
| 3.2.1 Pásztázó elektronmikroszkópos technika .....           | 8  |
| 3.2.2 Optikai mikroszkópos technika.....                     | 9  |
| 3.2.3 Szkennert használó technika.....                       | 9  |
| Gyakorlati rész .....                                        | 10 |
| 4. Anyagok és módszerek .....                                | 10 |
| 4.1 Az alkalmazott nyomdetektor .....                        | 10 |
| 4.2 Mikroszkópos kiértékelő módszer .....                    | 11 |
| 4.2.1 Előkészítési szakasz .....                             | 11 |
| 4.2.2 Kiértékelési fázis .....                               | 12 |
| 4.3 Síkágys-szkenneren alapuló kiértékelő rendszer .....     | 12 |
| 4.3.1 Előkészítési szakasz .....                             | 13 |
| 4.3.2 Szkennelési fázis .....                                | 14 |
| 4.3.3 Kiértékelési lépés.....                                | 16 |
| 4.3.3.1 A nyílt forráskódú szoftver (ImageJ) működése: ..... | 17 |
| 4.3.3.2 Image Analyser (IA) szoftver működése: .....         | 18 |
| 4.4 Integrált detektor kiértékelő rendszer .....             | 21 |
| 5. Eredmények és értékelésük .....                           | 23 |
| 5.1 Paraméterek optimalizálása .....                         | 23 |
| 5.2 Összehasonlítás .....                                    | 28 |
| Összefoglalás .....                                          | 31 |
| Irodalomjegyzék .....                                        | 33 |
| Melléklet .....                                              | 36 |
| Függelék.....                                                | 39 |
| Köszönetnyilvánítás .....                                    | 40 |

## Bevezetés, célkitűzés

Napjainkban számos kutatás rávilágított arra, hogy a természetes háttérsugárzás feléért felelős radon izotópjai és azok leányelemei jelentősen hozzájárulnak a légzőszervi daganatok kialakulásában szerte a világon. Ennek megfelelően számos országban hangsúlyt fektetnek a légterek radonkoncentrációjának mérésére. A radon mérésére számos technika ismert, alapvetően két fő csoportot különíthetünk el az úgynevezett aktív és a passzív mérési módokat. Az aktív mérések során az elektronikusan működő készülékek valós időben, folyamatosan szolgáltatnak eredményeket, viszont a radonkoncentráció minél több épületben történő felméréséhez számos műszerre van szükség, mely rendkívül költségigényes. A másik csoportot alkotó passzív mérések során szilárdtest nyomdetektorokat alkalmaznak, mely detektorok különböző kialakítású polipropilén diffúziós kamrákban helyezve kerülnek a vizsgálandó terekbe. Manapság távol-keleten (Dél-Korea, Kína, Japán) és Európában a felméréseket nyomdetektoros eljárással hajtják végre a nagy elemszámú, költséghatékony mérések alkalmazhatósága miatt. Tehát szerte a világon előtérbe kerültek a nyomdetektort használó radonfelmérések.

Az alkalmazott nyomdetektorok polimer műanyagból készülnek. A széles körben alkalmazott típus a polikarbonátból felépülő CR-39 típusú detektor. Ez egy átlátszó műanyag, melyet szemüveglencsék és kontakt lencsék gyártására is alkalmaznak előnyös optikai tulajdonságai miatt.

A detektorok működésének alapja, hogy a nagyenergiájú töltött részecskék (ilyen a radon bomlását kísérő alfa részecske is) szerkezeti sérüléseket okoznak a haladási vonaluk mentén. Az anyagszerkezet roncsolásával látens nyomokat hoznak létre, melyek átmérője néhány nm körüli, mely túl kicsi ahhoz, hogy detektálni lehessen. Így a gyakorlatban a látens nyomok kémiai maratást követően válnak detektálhatóvá.

A detektálást legtöbb esetben manuálisan valamilyen optikai mikroszkóp segítségével végzik, mely kiértékelési módszer időigényes és folyamatos emberi beavatkozást igényel. A felmérések széleskörű elterjedése következtében a kiértékelendő detektorok száma egyre növekszik emiatt nélkülözhetetlen a kiértékelésre fordítandó idő minimalizálása és a megbízható eredmények kiadása. Ennek okán az elmúlt években a CR-39 nyomdetektorral történő mérések során keletkezett nyomok feldolgozásához és számlálásához, egyre több kutatócsoport fejleszt új megbízható módszereket.

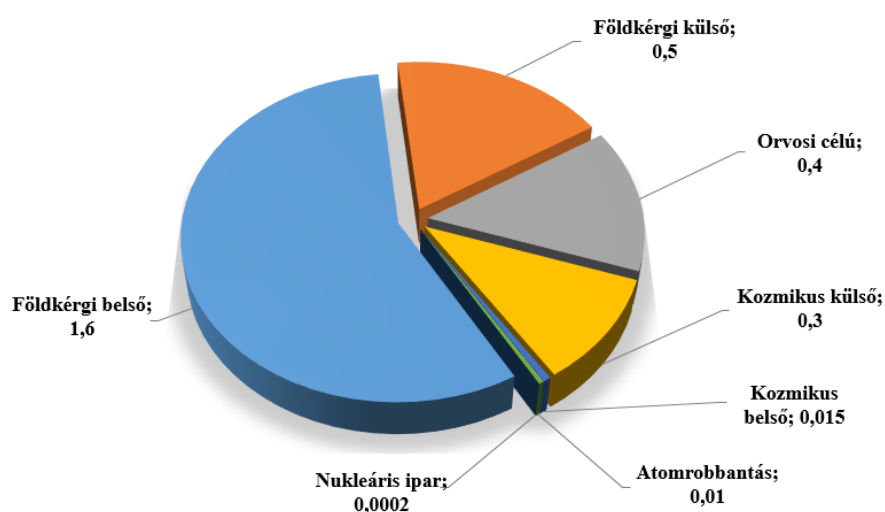
Munkám során célul tűztem ki a jelenleg forgalomban lévő kiértékelési módszerek áttekintését és a napjainkban elterjedt eljárások alkalmazhatóságának vizsgálatát.

Ennek keretében egy a – nagyfelbontású síkágyas-szkenneren alapuló – CR-39-es nyomdetektorok előkészítését, kiértékelését végző automatikus nyomszámláló rendszer kidolgozását és összehasonlítását (validálását) céloztam meg. Dolgozatomban az előkészítő - és kiértékelő rendszer működését valamint minőség-ellenőrzését mutatom be.

# Szakirodalmi áttekintés

## 1. Lakosság sugárterhelése

Az ember a Földön folyamatosan ki van téve a különböző mértékű természetes és mesterséges eredetű sugárzásnak. Napjainkban a lakosságot érő sugárterhelés az emberi tevékenységnek köszönhetően a természetes komponenseken kívül mesterséges forrásból is származhat. A természetes eredetű sugárterhelés két forrásból származik, a világegyetemből ( kozmikus sugárzás) és a Földön található, el nem bomlott radionuklidoktól ( földkérgi sugárzás). A természetes eredetű sugárzás, vagy más néven háttér sugárzás értéke a Föld különböző pontjain viszonylag kis eltéréseket mutat. Világátlag 2,4 mSv/év. A mesterséges sugárterhelés három részre osztható, legjelentősebb az orvosi célú felhasználás (például: sugárterápiák, röntgenvizsgálatok), a második csoport az atomrobbantások, melyek során a légkörbe kerülő radioizotópok okoznak többletterhelést és a harmadik csoportba sorolt nukleáris ipar. Így a mesterséges sugárterhelés világátlag 0,4 mSv/év. A különböző forrásokból származó természetes és mesterséges sugárterhelés megoszlását az 1. ábra szemlélteti [1].

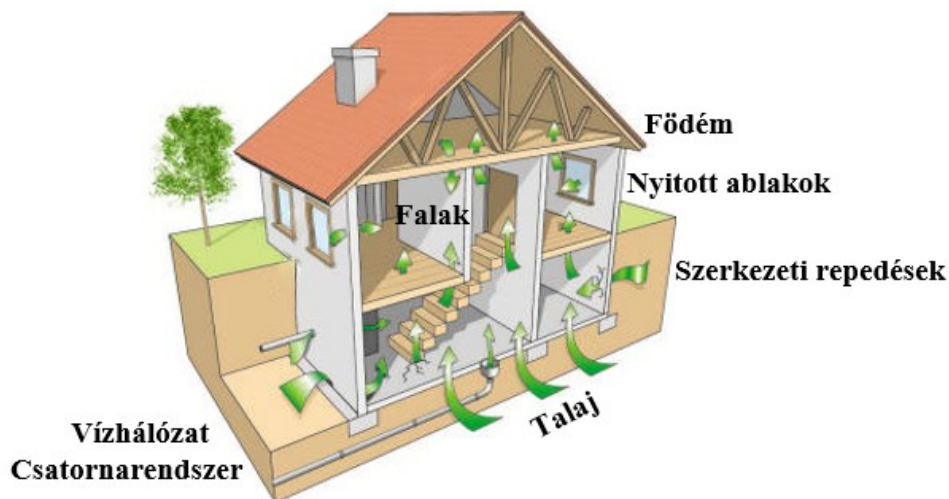


1. ábra: Természetes és mesterséges eredetű sugárterhelés megoszlása [mSv/év].

### 1.1 Radontól származó sugárterhelés

Az embert érő természetes eredetű földkérgi belső sugárterhelési kategóriába tartozó sugárterhelés legnagyobb része (1,26 mSv/év) a radon izotópjaitól és azok lányelemeitől származik [2]. Az elmúlt években számos kutatás megállapította, hogy a radonnak köszönhető sugárdózis annál nagyobb, minél több időt töltünk nem vagy rosszul szellőztetett helyiségben,

hiszen a talajból kiáramló radon a szabadban gyorsan felhígul, de a zárt terekben (lakások, munkahelyek) feldúsulhat [3]. Az épületekbe áramló radon lehetséges útvonalait a 2. ábra illusztrálja.[4]



2. ábra: Az épületekbe áramló radon lehetséges útvonalai.

## 1.2 Radon izotópjai

A radon ( $\text{Rn-222}$ ) kémiaiilag inert, színtelen, szagtalan a természetben is előforduló radioaktív nemesgáz. Szerves oldószerekben és vízben oldódik. Három különböző tömegszámú izotópja ismert. A legrövidebb felezési idővel (4 s) rendelkező U-235 bomlási sorából származó **aktinon** ( $\text{Rn-219}$ ), a Th-232 bomlási sorában lévő 55 s felezési idővel rendelkező **toron** ( $\text{Rn-220}$ ) és a 3,82 nap felezési idejű U-238 bomlási sorában található **radon** ( $\text{Rn-222}$ ). Környezetünkben, a  $\text{Rn-222}$  izotóp fordul elő a legnagyobb mennyiségben. A  $\text{Rn-222}$  az 1622 év felezési idejű rádium ( $\text{Ra-226}$ ) alfa-részecske kibocsátásával járó bomlásából keletkezik.[5] A három bomlási sort az 1-3. mellékletben részletezem [5].

## 2. Radon mérési technikák

A radioaktív sugárzás mérésére alkalmas detektorokat két nagy csoportra oszthatjuk. Első csoport az intenzitást mérő detektorok, melyek folyamatos mérés során azonnal jelzik a radon vagy leányelemei aktuális koncentrációját. Ezek a berendezések különböző mérési elveken működnek (ionizációs kamrák, alfa detektorok) és rendszerint nem közvetlenül a radont, hanem a leányelemi aktivitását mérik [6]. A másik csoportba az úgynevezett integráldetektorok tartoznak. Ezen detektorok hosszabb időtartamról, fizikai vagy kémiai jelenségen alapulva adnak információt. Ide tartoznak a termolumineszcens detektorok (TLD), a filmdoziméterek és kifejezetten a radon esetében a szilárdtest-nyomdetektorok [7].

## 2.1 Nyomdetektorok alkalmazhatósága

A nyomdetektorokat nemzetközi és hazai mérési gyakorlatban is sokszor alkalmazzák különböző alfasugárzó radionuklidok mérésére. Az egyik leggyakrabban használt nyomdetektorok a CR-39-es detektorok, melyeket Cartwright [8] fejlesztett ki, és amelynek a fő komponense poliallildiglikol karbonát. A detektorok működésének alapja, hogy a nagyenergiájú töltött részecskék (ilyen a radon bomlását kísérő alfa részecske is) sérüléseket okoznak a haladási vonaluk mentén. A részecske és a detektoranyag közötti elsődleges folyamat az ionizáció és a gerjesztés. A töltött részecske több lépésben adja le az energiáját, melynek során Coulomb kölcsönhatások lépnek fel. A kölcsönhatások többsége az elektronokkal történik és csak néhány atommagra van hatással. A részecske az energiáját sorozatos kölcsönhatások közben viszonylag hosszú úton adja le, az egy kölcsönhatásra eső energiaveszteség alacsony a részecske teljes energiájához viszonyítva. A kis energiacsökkenések eredményeként a töltött részecske fokozatosan lassul le a detektor anyagban. A fékezési energia az a fizikai mennyiség, amely leírja a töltött részecske lassulását az anyagban  $-dE/dx$  képlettel számítható, ahol  $dE$ : az energia veszteség, míg  $dx$ : a megtett távolság. A fékezési energia mértékegysége J/m vagy keV/ $\mu\text{m}$ . Az energia, melyet a részecske elveszít a  $dx$  távolságon, megegyezik az anyagnak átadott energiával, ezt a mennyiséget hívják lineáris energiaátadási tényezőnek is [9]. Történetileg a fékezési energia leírása Bohr [10] nevéhez fűződik. Ez egy klasszikus megközelítése a részecske és a szabad elektron közti kölcsönhatásnak, ahol az egy elektronnal történő ütközés során elvesztett energiát integrálták a kölcsönhatás határain belül, és a fékezési energia kifejezést ebből származtatták. Ezt Bethe [11] módosította, aki belevette az összefüggésbe a kvantumhatást, valamint Bloch [12], aki a relativisztikus hatásokat vette figyelembe, és ezek összegeként született meg a Bethe-Bloch összefüggés a fékezési energia kiszámítására:

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{Z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_0 v^2} N \left[ \ln \frac{2m_0 v^2 W_{\max}}{\bar{I}^2 (1 - \beta^2)} - 2\beta^2 - \delta - U \right] [13]$$

Ahol,

$Z$ : a részecske töltése,

$v$ : a sebesség, és  $\beta = v/c$ ,

$m_0$ : az elektron maradék tömege,

$N$ : az elektronok száma térfogat egységenként,

$\bar{I}$ : az elektronok átlagos gerjesztési potenciálja a fékező anyagban,

$W_{\max}$ : a maximálisan átadott energiája az elektronnak,

$\delta$ : az anyag polarizációs korrekciós tényezője,

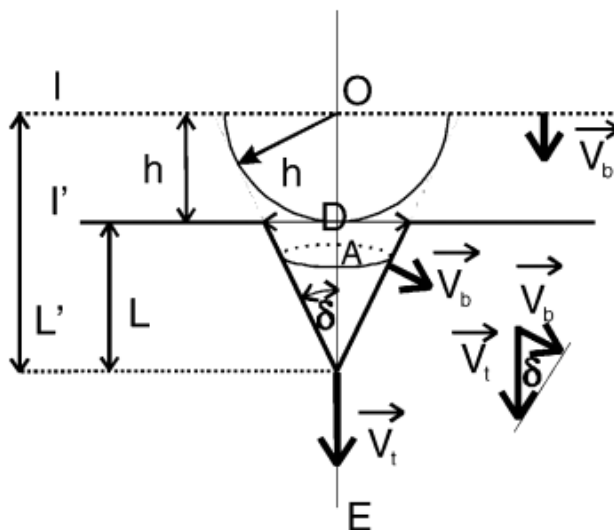
$U$ : pedig az ütközésben részt nem vevő elektronokat veszi figyelembe.

A fékezési energiára a megadott Bethe-Boch összefüggés az atommaggal történő eseményeket figyelmen kívül hagyja csak az elektronokkal történő ütközéseket veszi alapul.

### 3. Előkészítési, kiértékelési technikák

#### 3.1 Nyomdetektorok előkészítése

Az előző fejezetben leírt fékezési energia hatására a keletkező sérülések, vagy más néven nyomok száma a jelenlévő alfa részecskék számától függ, vagyis az adott nuklid koncentrációjától. A keletkezett nyom nagysága néhány nm, mely túl kicsi ahhoz, hogy érzékelni lehessen. Emiatt a detektorokon lévő nyomok előhívása szükséges. Erre a gyakorlatban valamilyen a detektor anyagát roncsoló vegyszert alkalmaznak. A maratószer az ép detektorfelületet egyenletes sebességgel oldja, viszont a sérülés helyén a maratás sebessége nagyobb lesz. A maratási sebesség ( $V_t$ ) és a nyomok növekedésének meghatározása számos vita tárgya. A probléma természete fizikai és geometriai jellegű. A 3. ábra szemlélteti a nyomok kialakulásának geometriáját. Ahol,

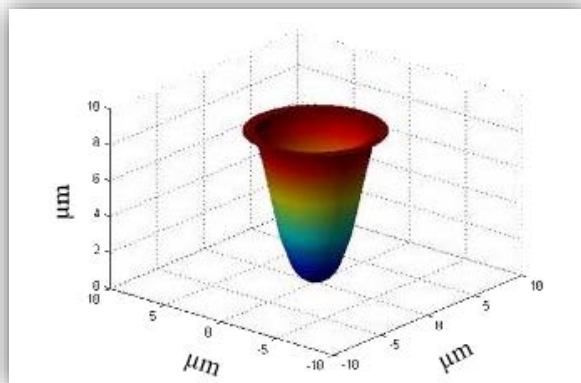


3. ábra: Nyom kialakulásának geometriája [13].

**I**: a detektor eredeti felülete,  
**I'**: a detektor felülete a maratás után,  
**V<sub>t</sub>**: a maratási sebesség a részecske pályája mentén,  
**V<sub>b</sub>**: a maratási sebesség a sértetlen detektor felületen,  
**O**: a belépési pont,  
**E**: a részecske végpontja az anyagban, és  
**EO = R** a részecske által megtett távolság a detektor anyagban.  
A távolság **I** és **I'** között megegyezik **h**-val, a maratás során eltávolított réteg vastagsággal,  
**L'**: a teljes út, melyet a marató anyag megtett a becsapódási pálya mentén,  
**L**: a nyom mélysége és  
**δ**: a helyi kialakulási szög.

A nyom kialakulása a  $V = V_t/V_b$  aránytól függ, és nem játszódik le, ha  $V$  értéke kisebb vagy egyenlő, mint 1. Vagyis egy nyom kialakulásához szükséges, hogy  $V$  értéke nagyobb legyen,

mint 1. A maratás az egész felületen lejátszódik  $V_b$  értékkel, kivéve a részecske útja mentén, ahol a maratási sebesség értéke:  $V_t$ . Három dimenzióban a nyom egy kúp  $\delta$  hajlásszöggel, mely a haladási irány menti körbeforgatással képezhető [13]. A 4. ábrán egy három dimenziós legjobban érzékelhető nyom alakja látható.



**4. ábra: Nyomprofil három dimenziós képe [14].**

A szilárdtest nyomdetektorokat legtöbbször lúg (NaOH, KOH) vizes oldatával készítik elő a nyomszámok számlálásához. A nemzetközi gyakorlatban egyéb módszerek is ismertek. Ilyen például a nátrium-hidroxid és etanol keverékét [15] alkalmazó eljárás, valamint a mikrohullámmal indukált [16] előkészítő művelet. Mind az etanolt hozzáadó és a mikrohullámot alkalmazó eljárásokhoz képest a tisztán nátrium-hidroxiddal maratott detektorok kiértékelése jobban bevált és szélesebb körben alkalmazható.

### 3.2 Nyomdetektorok kiértékelése

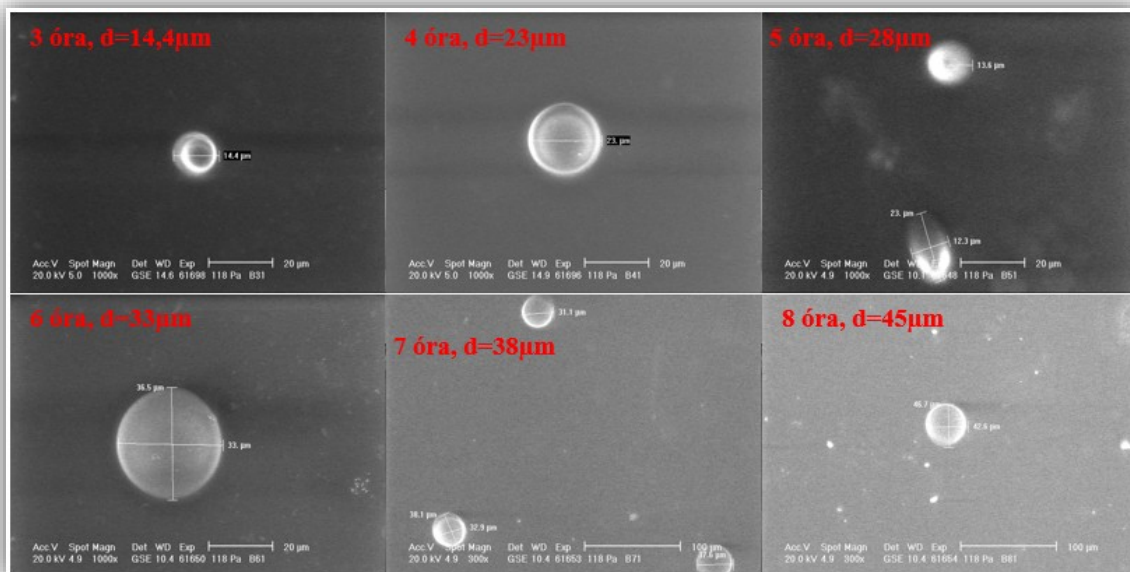
Az első nyomokat LiF kristályban D.A.Young észlelte 1958-ban [17]. Kezdetben a nyomok észleléséhez transzmissziós elektron mikroszkópot használtak, de hamarosan kialakult a nyomok számlálása optikai mikroszkóp segítségével [18]. Az optikai mikroszkópos manuális számlálási módszer maradt sokáig az egyik legelterjedtebb eljárás elsősorban az alacsony költsége miatt, azonban nagyszámú minta kiértékelésére ez a módszer nem alkalmas. Ennek köszönhető, hogy hamarosan megpróbálták a nagyon időigényes módszert automatizálni [19] már 1984-ben összefoglaló cikk jelent meg az első automatizált nyomszámláló rendszerről [20]. Ezek után számos fél-automata vagy automata rendszert fejlesztettek ki [21-24]. Kereskedelmi forgalomban az alábbi négy rendszer érhető el; az Autoscan 60 (Thermo Electron Corporation, Santa Fe, MN, USA), a Radometer 2000 sorozat (Radosys Kft., Budapest, Magyarország), a Taslimage rendszer (Track Analysis Systems Ltd., Bristol, U.K.), és a HSP-1000 (Seiko

Precision, Chiba, Japan). Ezek a kereskedelmi forgalomban kapható kiértékelő rendszerek általában túl drágák emiatt kevés laboratórium számára érhetőek el. A nyomdetektoros kiértékelés fejlesztések így több irányba folyódtak. Az egyik irány a nagymennyiségű és gyors adatszolgáltatást nyújtó kommersziális berendezések kifejlesztése a különböző nagy volumenű környezeti vagy epidemiológiai felmérésekhez. A másik irány a nyomok 3 dimenziós megjelenítése és az egyes nyomok nagyprecizitású elemzése [25-26]. A harmadik irány, pedig az olcsó mérési eljárások kifejlesztése. Ezek elsősorban szkennert használó képalkotáson alapulnak, hiszen a hagyományos optikai mikroszkópos, vagy CCD kamerás eljárások általában egyszerre csak egy detektor képalkotására alkalmasak így drága mechanikát igényelnek az automatizálás során. Emiatt a szkennerek alkalmazhatóságára hamar felfigyeltek a kutatások költségoptimalizálása érdekében. Steele már 1999-ban leírta [27] azt a módszert, ami gyakorlatilag az azóta kifejlesztett eljárások alapja. Azóta számos szkenneren alapuló eljárás kifejlesztése és publikációja történt meg [28-30], viszont e rendszerek kereskedelmi forgalomban nem hozzáférhetőek.

Az alábbiakban három a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézete számára elérhető szilárdtest nyomdetektorok kiértékelésére használható technika főbb jellemzőit mutatom be.

### *3.2.1 Pásztázó elektronmikroszkópos technika*

A lúggal történő kezelés végeztével a nyomok detektálhatóvá válnak, a legjobban érzékelhető nyomok képeit pásztázó elektronmikroszkóppal (angolul: Scanning Electron Microscope, továbbiakban SEM) készíthetjük el. Korábban a Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézetben, Bálint Zoltán szakdolgozati témájában [31] különböző maratási idővel vizsgálta a kialakuló nyomok morfológiai (átmérő, terület) változásait és a SEM technika alkalmazhatóságát. A SEM rendszer nagy előnye, hogy a különböző morfológiai tulajdonságokkal rendelkező nyomok jól elkülöníthetőek vele a kiváló mélységérzetet adó felvételeinek köszönhetően, viszont rendkívül költségigényes eljárás és a detektorok felületét is roncsolja. Eltérő ideig maratott detektorokról pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvételek láthatóak az 5. ábrán.



**5. ábra: Pásztázó elektronmikroszkóppal készített felvételek [31].**

Az 5. ábra jól mutatja, hogy a maratott nyomok jól elkülöníthetők az egyéb szennyeződésektől, és jól prezentálja, hogy a maratási idő növelésével a nyomok mérete megnő. Emiatt rávilágít arra, hogy lényeges szempont a megfelelő előkészítési paraméterek megválasztása. Hiszen nagy radonkoncentrációjú térbe helyezett detektorok esetén a hosszú maratási idő következtében egyes nyomok átfedhetnek így befolyásolva a mérési eredményt. Az jól bevált formula szerint a detektorokat 3 órán keresztül 90 °C –on 6 M-os nátrium-hidroxiddal maratva tudjuk a legoptimálisabban előkészíteni a nyomok sűrűségének meghatározásához.

### 3.2.2 Optikai mikroszkópos technika

Kezdetben a nyomok detektálására az egyetlen használható technika az optikai mikroszkópot használó eljárás volt [18]. A módszer lényege, hogy a mikroszkóp tárgylemezére helyezett detektort alulról megvilágítva a fókusz beállítása után láthatóvá válik az alfasugárzás okozta előhívott nyom. A módszer megbízható és jól alkalmazható, viszont kellő odafigyelést és megterhelő munkát jelent használóinak.

### 3.2.3 Szkennert használó technika

A gazdaságtalan, lassú és körülményes kiértékelési módszerek miatt szükség volt a műveletek automatizálására és a kiértékelési idő minimalizálására. Így kerültek előtérbe a rendkívül nagy felbontással rendelkező alacsony költségű síkágys-szkennerek. A szkennerek által készített képek önmagukban még nem oldják meg a problémát, mindenképpen szükség van egy a képek

feldolgozását végző szoftverre. A szkennelt kép a szürke árnyalataival kerül megjelenítésre. Majd az egyes pixelek vizsgálatával kerülnek kijelölésre a detektorokon található objektumok. A legnehezebb feladat a kirajzolt nyomok elkülönítése/megkülönböztetése egymástól. A képelemző szoftverek piacán fellelhető számos termék között eddig nem volt jól alkalmazható megoldás.

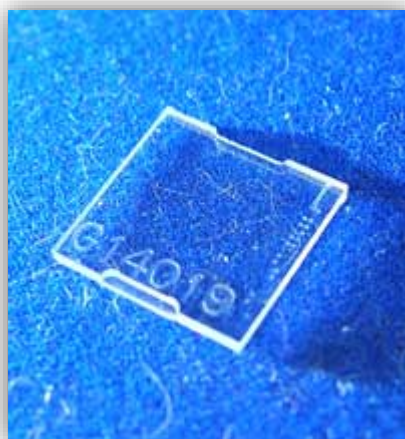
## Gyakorlati rész

Az alábbi fejezetben mutatom be a Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet laboratóriumában fejlesztett síkágys-szkenneren alapuló CR-39 típusú nyomdetektor kiértékelő rendszert.

## 4. Anyagok és módszerek

### 4.1 Az alkalmazott nyomdetektor

A vizsgálatok során a 10 mm x 10 mm x 0,5 mm –es CR-39 (allil-diglikol-karbonát) típusú Baryotrak (Japán) szilárdtest nyomdetektorokat használtam, mely a 6. ábrán látható.



**6. ábra: CR-39-es szilárdtest nyomdetektor.**

Alfasugárzás hatására a detektor anyaga roncsolódik, azonban ezek a sérülések mikroszkóppal, illetve egyéb optikai berendezésekkel nem detektálhatóak. Azonban, megfelelő maratási eljárás segítségével a nyomok láthatóvá válnak. A maratás során a sérült részeken gyorsabb a maratás sebessége, mint a sértetlen felületeken, ezáltal a becsapódás szögétől függően kör, vagy ellipszis alakú, a maratási körülményektől függő méretű nyomok alakulnak ki, melyek detektálása már megoldható. Átlagosan 10-100  $\mu\text{m}$  közötti átmérőben keletkeznek a nyomok.

## 4.2 Mikroszkópos kiértékelő módszer

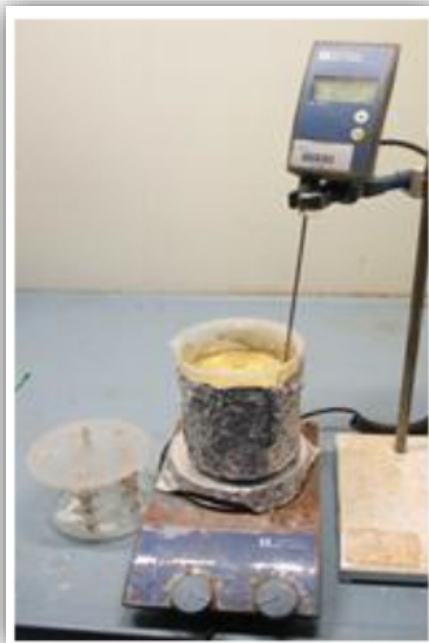
A Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézetében több évtizedes múltja van a szilárdtest nyomdetektorokat alkalmazó radonfelméréseknek, mely során, a CR-39 típusú detektorokat optikai mikroszkópon alapuló módszerrel értékelik ki. A módszer alapvetően két (előkészítési és kiértékelési) lépésből áll. A módszer lépéseiről készített sematikus ábra a 7. ábrán látható.



7. ábra: Mikroszkópon alapuló kiértékelő módszer sematikus ábrája.

### 4.2.1 Előkészítési szakasz

A maratást 6 M-os NaOH-oldattal végeztem, 90 °C hőmérsékleten, melyet kontakthőmérővel ellátott termosztáttal biztosítottam. A maratási idő 3 óra. A maratószer homogenitását mágneses keverő segítségével valósítottam meg. A szilárdtest nyomdetektorok maratására korábban használt eszköz a 8. ábrán látható.



8. ábra: Nyomdetektor előkészítő eszköz.

Az eszköz hátránya, hogy mindösszesen 24 db, kizárólag felfogató lyukkal ellátott detektor előkészítésére alkalmas. A zsúfolt kialakítás és a nem megfelelő áramlás miatt a maratólúg koncentrációja nem egyenletes eloszlású a detektorok körül.

#### 4.2.2 Kiértékelési fázis

A jelenleg használt módszer egy mikroszkópra szerelt CCD kamerából, egy képmegjelenítő monitorból, és a tárgylemez precíziós mozgatásáért felelős elektromotoros vezérlőegységből áll. A detektor képét egy monitor mutatja valós időben, míg a rákapcsolt számítógép képernyőjén a Virginia 99 program fut [32], mely részben jelfelismerésre, és jelmorfológiai vizsgálatokra is alkalmas. A mikroszkópot használó kiértékelő berendezés az 9. ábrán látható.



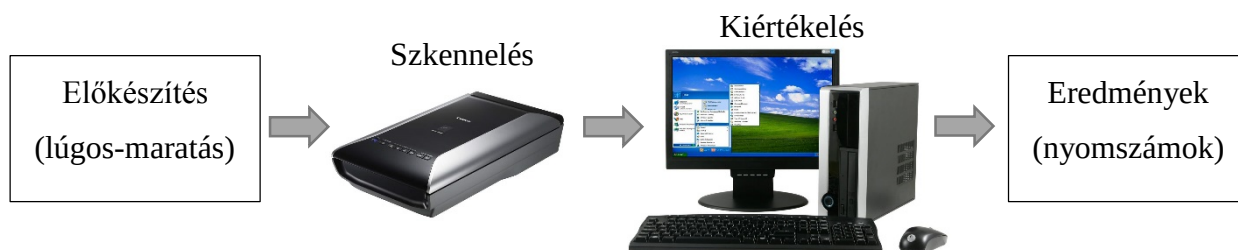
**9. ábra: Mikroszkópot használó kiértékelő rendszer.**

A kiértékelés során a detektorokat egyesével, alkohollal történő tisztítás után helyeztem a mikroszkóp tárgylemezére, majd a kamera pozícionálása a detektor egyik oldalára történő fókusz beállításával a detektor 14 pontján összesen  $1,025 \text{ mm}^2$ -en manuálisan végeztem a nyomok számlálását. Az eljárás reprezentatíván használható, azonban meglehetősen körülményes és lassú, valamint a mikroszkóp motorikus egysége nem megbízható. Nagy mintaszám esetén nem megfelelő.

### 4.3 Síkágyas-szkenneren alapuló kiértékelő rendszer

Az előbbi pontokban leírt problémák megoldásaként, a szakirodalom tanulmányozását követően a nyomdetektorok előkészítésére egy biztonságosabb, egyszerűen működtethető maratókádat, valamint a nyomok számlálására egy nagyfelbontású síkágyas-szkennert használó

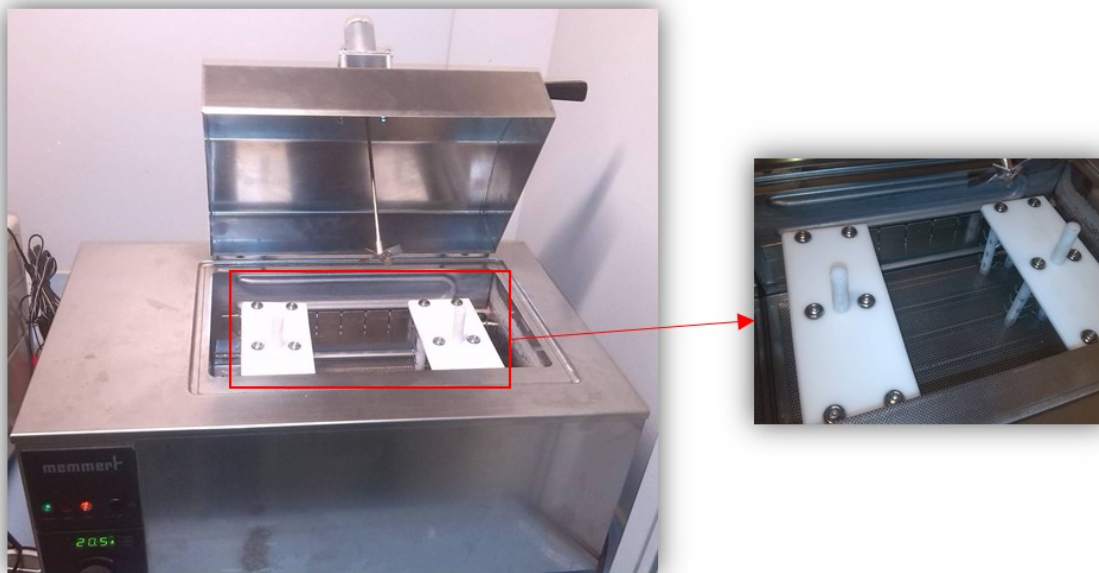
félautomata kiértékelő rendszert alakítottam ki. A rendszer működése három fő szakaszból áll: az előkészítési szakasz, a szkennelési fázis és a kiértékelési lépés. A kiértékelő rendszer sematikus ábráját a 10. ábrán mutatom be.



**10. ábra:** Szkenneren alapuló kiértékelő rendszer sematikus ábrája.

#### 4.3.1 Előkészítési szakasz

A korábban említett okok miatt a maratókád kialakítása és a maratási technika nem tette lehetővé a nagyszámú detektorok előkészítését ezért ennek a lépésnek fejlesztésére is felmerült az igény. Az előkészítési szakasz során a nyomdetektorok maratását a 11. ábrán látható maratókáddal hajtottam végre, melyet a kiértékelő rendszerrel párhuzamosan fejlesztettem ki.



**11. ábra:** Maratókád.

A kereskedelmi forgalomban kapható erre a célra kialakított berendezést mind a Magyarországi Radosys [33] mind a Svédországi Gammadata-Landauer [34] értékesít, azonban ezek beszerzési ára túl magas. Így saját fejlesztésű maratókészüléket hoztam létre. Erre a legcélszerűbbnek a különböző vízfürdők bizonyultak, két berendezést egy körszimmetrikus és

egy téglatest alakú kivittelt vizsgáltam illetve alakítottam ki. Azonban a körszimmetrikus kialakításban a detektorok elhelyezése nehézkes volt így ennek a további alkalmazását elvettem. Az automata hőmérséklet szabályozóval és keverőrendszerrel felszerelt készülékben, a lág koncentrációjának egyenletes eloszlása mellett a 11. ábrán látható detektor tartó egységben egyidejűleg 144 db detektor előkészítése valósítható meg.

#### 4.3.2 Szkenelési fázis

Az Intézetben kifejlesztett rendszer egy félautomata CR-39 –es detektorokat elemző rendszer. A rendszerhez egy nagy felbontású fotó szkennerek (Canon Canoscan 9000F; 4800dpi), és egy számítógépes munkaállomás (Fujitsu CELSIUS W520; 16GB RAM) tartozik. A szkennerek alapuló módszer a 12. ábrán látható.



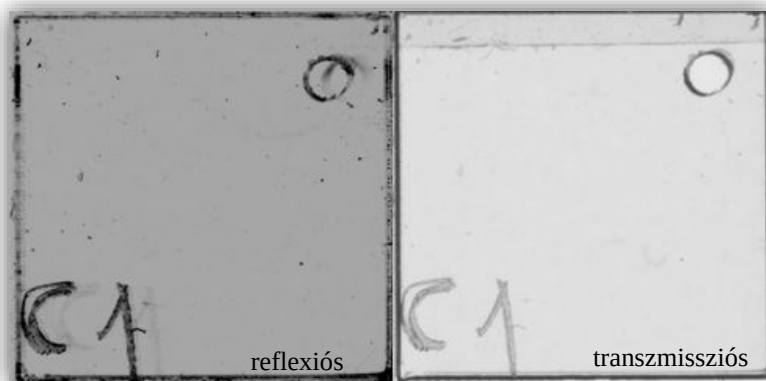
**12. ábra: Nagyfelbontású szkennerek és a számítógépes munkaállomás.**

A szkennelési fázisban megvizsgáltam a szkennerek különböző üzemmódjaival készített képek alkalmazhatóságát. A ma forgalomban lévő síkgyas-szkennerek két üzemmódban (reflexiós és transzmissziós) működtethetők. A reflexiós üzemmódban a fényforrás alulról világítja meg a detektorokat, majd a visszaverődő fényt letapogatva készül a kép. A transzmissziós üzemmód során a fényforrás és a letapogató fej együttes mozgása során készül a kép. Ennek megfelelően

reflexiós és transzmissziós letapogatással is készítettem képeket. A két különböző üzemmódban a szkennelési beállítások megegyeztek, értékei az alábbiakban láthatók:

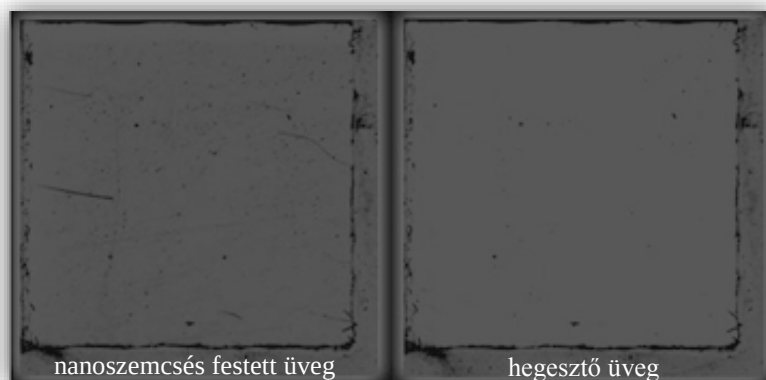
- Felbontás: 4800 dpi
- Szín: 8 bites szürke
- Szűrés: nincs

Az 13. ábrán láthatóak a reflexiós és a transzmissziós üzemmódban készített képek.



**13. ábra: Reflexiós és transzmissziós üzemmódban készült képek.**

Reflexiós üzemmód esetén visszavert fényt használ a készülék a képalkotáshoz. Emiatt a szkennelés során szükség volt egy fekete háttérű árnyékolóra. Kezdetben egy nanoszemcsés fekete festett üveglapot használtam, azonban az így készített képen túl sok volt a határkritériumoknak megfelelő szemcséből adódó ál objektumok száma. A probléma csökkentésére egy fekete hegesztő-üvegre cseréltem a korábban használt festett üveglapot. Az új háttér segítségével a fals nyomok kiküszöbölhetőekké váltak. A háttérrel a nanoszemcsés festett és a hegesztő üveggel készített képek az 14. ábrán láthatóak.



**14. ábra: Különböző háttérrel reflexiós üzemmódban készült felvételek.**

Ennek ellenére a reflexiós üzemmódban készített képeken a fény visszaverődése miatt sok homályos, él nélküli folt keletkezett. Így teszteltem a transzmissziós lehetőséget is. Ez esetben nem a fejegység része világítja meg alulról a beolvasandó felületet, hanem a felülről érkező, a beolvasandó anyagot átvilágító fény képe kerül az érzékelőre. Ennek következtében nem keletkeztek homályos, árnyékkal rendelkező részek, ami a 13. ábrán is látható. A továbbiakban a kontúrvonalak élesítése, a háttér zavaró hatásának kiküszöbölése érdekében a képeket transzmissziós üzemmódban készítettem.

A transzmissziós üzemmód során felmerül egy fontos kérdés, hogy ebben az esetben a detektor mindkét oldalán lévő nyomokat érzékeljük vagy csak a letapogató fejhez közelebbi a szkennelő üveglapjára felfekvő oldalát látjuk a detektornak. Ezen problémára megoldásként a Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Tanszékvezetője: Dr. Hopp Béla és munkatársai segítségével excimer lézeres technikával a maratás során kialakuló mélyedések (nyomok) –hez hasonló előre definiált nyomátmérőkkel rendelkező pontokat hoztunk létre korábban nem használt detektor egyik oldalán. Reprodukálva a sugárzása okozta sérülések maratást követő megjelenését. Így ellenőrizve azt, hogy a kép szkennelése után a szoftver a detektor mely oldalán érzékeli a nyomokat. A megfelelő technika kiválasztása előtt megvizsgáltuk két (KrF, ArF) excimer lézeres módszert és kísérletet tettek CO<sub>2</sub> lézeres módszerrel is a detektor felületének jelölésére.

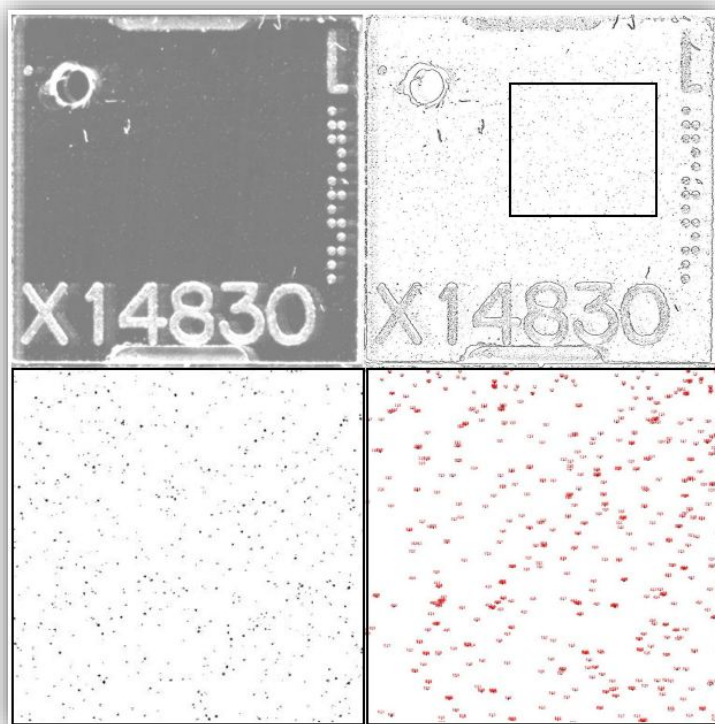
#### *4.3.3 Kiértékelési lépés*

A detektorokat a szkennelő üvegén egy 5 x 19 –es rácshálóra helyeztem így egyszerre 95 db detektorról készült nagy felbontású kép. A keletkezett közel 1 GB helyigényű kép méretének csökkentése és a könnyebb, gyorsabb feldolgozás érdekében a teljes mind a 95 db detektort tartalmazó kép detektoronkénti feldarabolására volt szükség. A darabolást a beszkenelt kép koordinátái alapján az általános célú Perl programozási nyelvet [35] felhasználó, általam készített egyszerű program segítségével végeztem el. A detektorokat külön-külön tartalmazó képeket kezdetben egy nyílt forráskódú szoftver (ImageJ) segítségével, a későbbiekben az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet (MFA) szakemberei által eredetileg különböző ipari termékek porozitás vizsgálatára létrehozott Image Analyser (IA) szoftvert [36] alkalmaztam és ennek a szoftvernek az átdolgozását (illesztését) végeztem el a detektorokon lévő nyomok felismerésére.

#### 4.3.3.1 A nyílt forráskódú szoftver (ImageJ) működése:

Kezdetben a kiértékelési fázis során a készített képeken a nyomszámok meghatározására a nyílt forráskódú ImageJ szoftvert használtam. A szoftver működése alapvetően 3 lépésből áll, mely lépések a 15. ábrán láthatóak:

- a szkennelés majd darabolás után kapott képből monochróm kép készítése,
- a vizsgált terület kijelölése,
- a területen belül lévő nyomok számlálása.



**15. ábra: ImageJ kiértékelés lépései.**

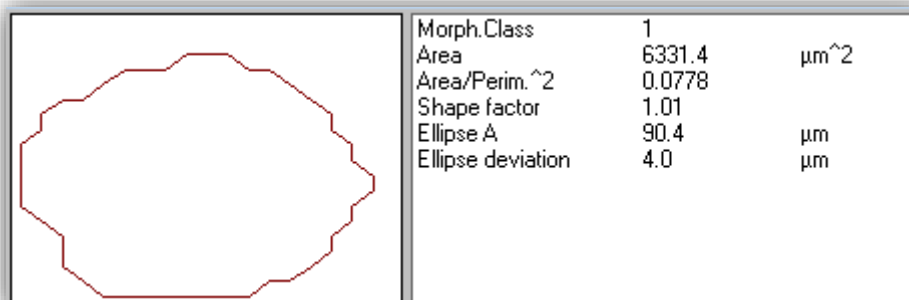
A módszert teszteltem reflexiós és transzmissziós üzemmódban is, de nem kaptam megfelelő eredményeket, mivel az ImageJ szoftver nem alkalmas a különböző nyomok alak szerinti osztályozására ezáltal az esetleges szennyeződések (por, törlőkendő részei), karcok valós nyomoktól történő megkülönböztetésére. Ezáltal minden a detektoron és a szkennер üvegén található objektum megszámlálásra kerül, mely problémát előzetesen, a detektorok nélkül készített úgynevezett háttér felvételekkel való korrigálással sem sikerült megoldani. Tehát szükségem volt a nyomok alakját és egyéb morfológiai paramétereit azonosítani képes képelemző szoftverre.

#### 4.3.3.2 Image Analyser (IA) szoftver működése:

Az IA szoftver (átdolgozása a nyomok elemzésére) segítségével mind reflexiós, mind transzmissziós üzemmódban készült képek kiértékelését elvégeztem. A reflexiós üzemmódban készített képek kiértékelésekor a korábban említett fényvisszaverődésből adódó problémák miatt nem sikerült minden nyomot azonosítani. Ennek következtében a képeket transzmissziós üzemmódban készítettem. Az IA szoftver képkorrekciót végez és összehasonlítja az azonosított objektumokat az előre definiált kritériumoknak megfelelő értékekkel. Az előre megadott értékeket előzetesen taníthatjuk meg a programmal. A feltérképezett objektumok öt paraméter alapján kerülnek összevetésre az előre definiált kritériumokkal;

- terület,
- terület/kerület<sup>2</sup>,
- ellipszis nagytengelye,
- ellipszis elhajlása,
- alaktényező.

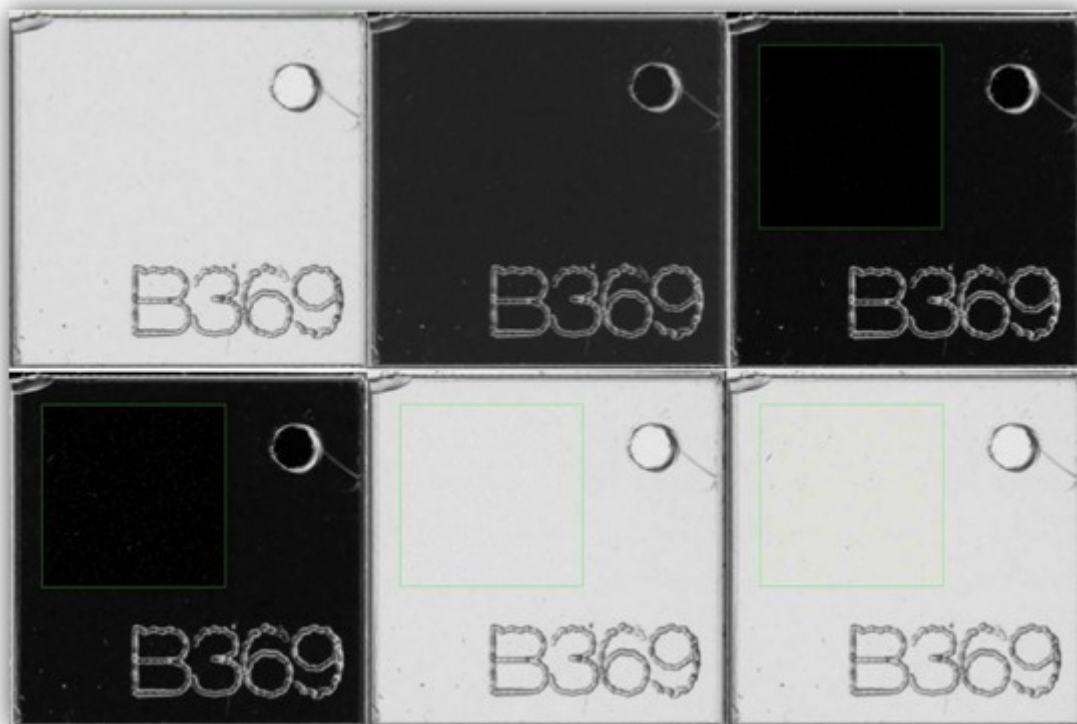
Ezek a paraméterek lehetővé teszik, hogy megkülönböztessük a valós objektumokat a nem a sugárzásból eredő nyomoktól. Az objektum szétválogató eljárás a nyomokat sokszögletű formákba rajzolva válogatja szét. A 16. ábrán látható egy IA-val azonosított a radontól származó maratott nyom.



16. ábra: Image Analyserrel sokszögletű formára rajzolt objektum.

A darabolt képek kiértékelése a következő lépéseken keresztül valósul meg, mely a 17. ábrán látható;

- inverz kép készítése,
- kontraszt növelése,
- a vizsgált terület kijelölése,
- szűrés,
- és a nyomok osztályozása.

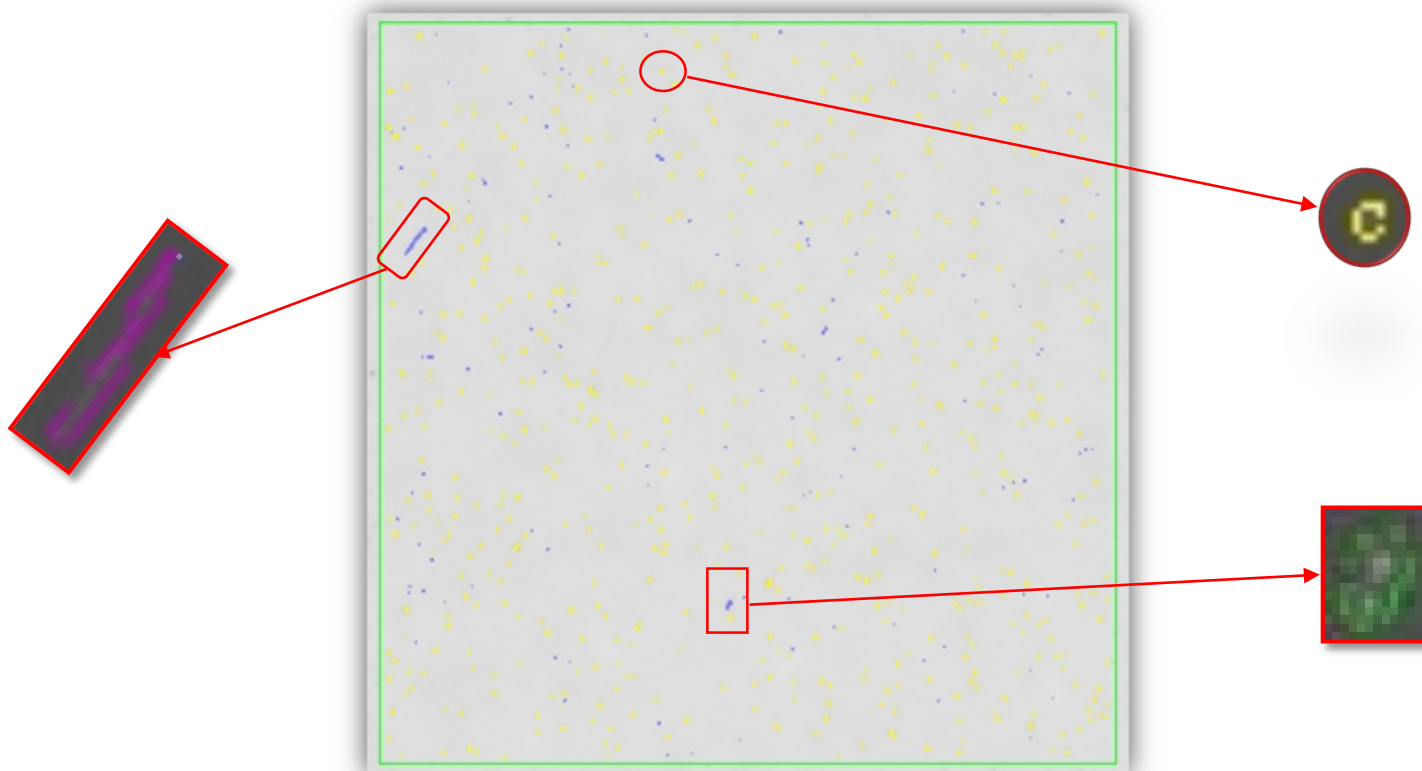


**17. ábra: Image Analyser kiértékelésének lépései.**

Az azonosított objektumok három csoportba kerülnek. A valós sugárzás okozta nyomok az első csoportba, a második csoport foglalja magába, azon nyomokat melyek a nagy radonkoncentráció miatt átlapolva keletkeznek, végül a szennyeződés és karcként azonosított elemek a harmadik csoportba kerülnek. A nyomok osztályokba sorolásának példáját az 1. táblázat és a 18. ábra demonstrálja.

| X1<br>[μm] | Y1<br>[μm] | X2<br>[μm] | Y2<br>[μm] | Terület<br>[μm <sup>2</sup> ] | Terület/kerület <sup>2</sup> | Alaktényező | Ellipszis<br>nagy tengelye<br>[μm] | Ellipszis<br>elhajlása<br>[μm] | Morfológiai<br>osztály |
|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 8112       | 4198,59    | 8238,75    | 4283,09    | 9399,5                        | 0,0688                       | 1,41        | 129,8                              | 6,1                            | 1                      |
| 8576,75    | 4261,97    | 8640,12    | 4383,44    | 14098,7                       | 0,0647                       | 2,39        | 114,6                              | 6,3                            | 2                      |
| 7230,03    | 7061,03    | 7752,88    | 7150,81    | 27278                         | 0,0204                       | 6,37        | 470,5                              | 30,1                           | 3                      |

1. táblázat: Morfológiai paraméterek.

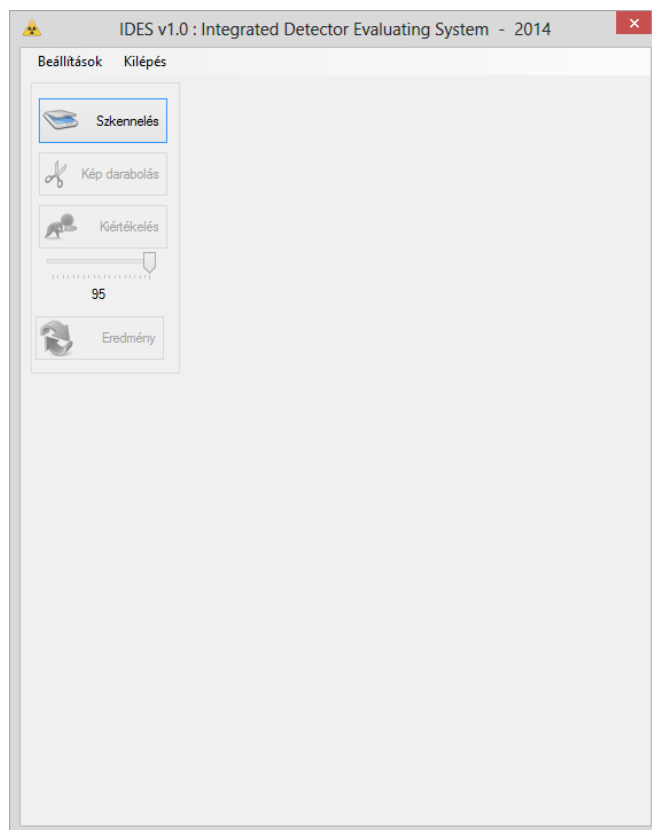


18. ábra: Nyomok osztályozása az előre definiált paraméterek alapján.

A különböző objektumok azonosítása során az előbbieken is látható részletes információhoz jutunk, viszont a radon aktivitáskoncentrációjának meghatározásához elsősorban az adott detektoron lévő nyomok számára van szükség. Így az Image Analyser által rendszerezett nyomok darabszámát meg kell határozni. Az első és második csoportba tartozó elemek összeszámolására a képek darabolásához hasonlóan Perl programnyelv [35] használatával egy úgynevezett összegző/szűrő programot hoztam létre, melynek segítségével táblázatos formában az adott detektoron lévő alfa-sugárzás okozta nyomok száma jeleníthető meg.

#### 4.4 Integrált detektor kiértékelő rendszer

A fentiek alapján a transzmissziós szkennelési üzemmódot használó és Image Analyserrel történő szilárdtest nyomdetektor kiértékelése a maratást követően a következő lépésekből tevődik össze. **1. Szkennelés, 2. Darabolás, 3. Értékelés (objektumok osztályozása), 4. Nyomok összegzése.** A különböző lépéseket kezdetben manuálisan egyesével hajtottam végre, a lépések idejének csökkentésére és a négy különálló szoftver kezelése során adódó apróbb hibák (figyelmetlenségek) kiküszöbölésére készítettem a négy különböző lépést magába foglaló programot, mely automatizálja a folyamatokat. A programot Integrált Detektor Kiértékelő Rendszer angolul Integrated Detector Evaluating System röviden IDES-nek neveztem el. Melynek munkaablaka a 19. ábrán látható.



19. ábra: IDES munkaablaka.

A munkaablakon belül négy gomb található melyek sorban a fenti lépéseket hajtják végre. A szkennelés gombra kattintva automatikusan megnyílik a szkennelő alkalmazás, mely az előre beállított paraméterekkel elkészíti a felvételt, majd a beolvasás végeztével a nagyméretű kép archiválási célzattal a szkennelés időpontjának (év-hónap-nap-óra-perc) megfelelő fájlnevvvel elmentésre kerül egy megadott mappába. Ezt követően válik elérhetővé a kép darabolása gomb, ennek használatával a darabolt képek egyesével szintén egy megadott mappába mentésre kerülnek. A képek darabolására azért van szükség, mert ezáltal az IA szoftver kiértékelési ideje csökkenthető, hiszen a programnak nem kell a közel 1024 MB méretű teljes mind a 95 db detektort tartalmazó képet beolvasnia, hanem elegendő a körülbelül 10 MB méretű képekkel dolgoznia. A darabolni kívánt képek számát 1-től 95-ig a kiértékelés gomb alatt lévő csúszka segítségével adhatjuk meg, ennek akkor van jelentősége, ha szkennelés után nem szeretnénk az összes kép elemzését elvégezni, a megfelelő érték megadása után az Image Analyser program kiértékeli (osztályozza az objektumokat) a detektorokról készült képeket és megadja a hozzájuk tartozó számos morfológiai paraméter pontos értékét. Az utolsó lépésként az eredmény gombra kattintva történik az osztályokba sorolt nyomok összegzése, vagyis a kijelölt területen lévő adott detektorhoz tartozó nyomok számának táblázatos megadása.

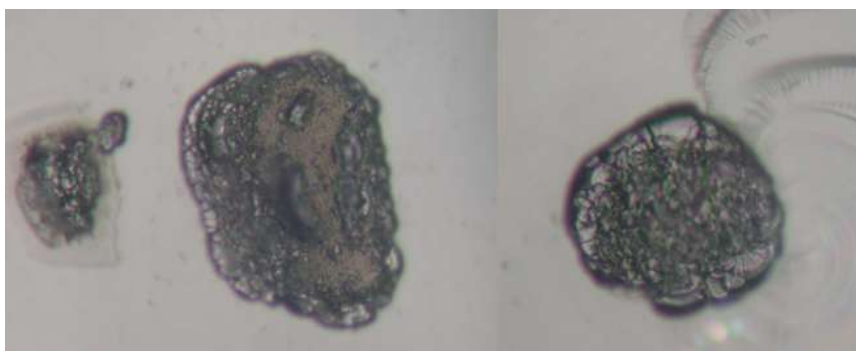
Az összegzett egységnyi területre eső nyomszámok és egyéb paraméterek (expozíciós idő, kalibrációs faktor) segítségével számolható a vizsgált légtér radonkoncentrációja.

## 5. Eredmények és értékelésük

### 5.1 Paraméterek optimalizálása

Az optimális nyomreprodukáló technika (lézeres jelzés) kiválasztása során abból indultunk ki, hogy a CR-39 –es detektor transzmissziója meglehetősen nagy, vagyis az anyag átlátszó, így olyan lézerek illetve hullámhosszok jöhetnek szóba ahol a detektor anyaga jól elnyelő. Ennek megfelelően a vizsgálatok UV-tartományban lévő KrF és ArF excimer lézerrel, valamint IR-tartományban működő CO<sub>2</sub> lézerrel készültek.

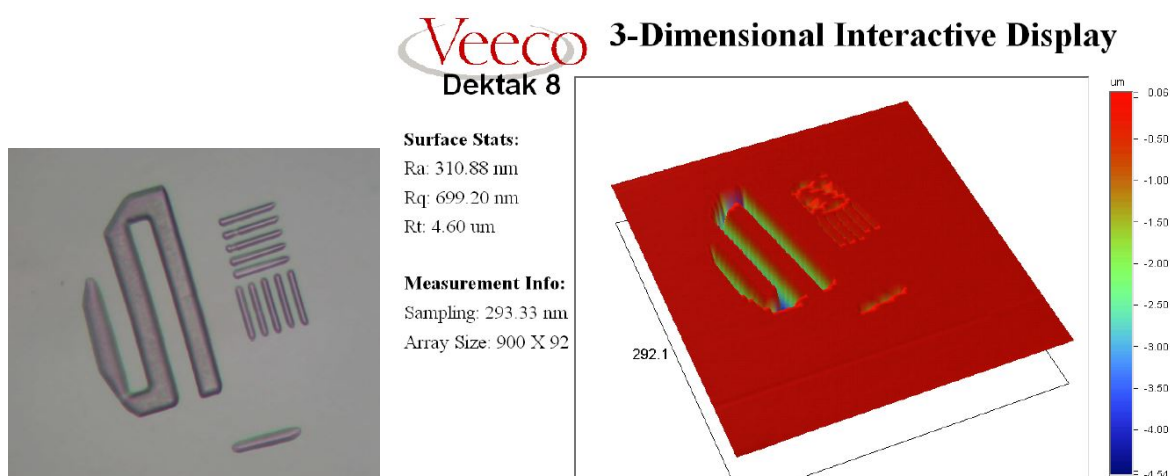
A KrF excimer lézer ( $\lambda=248$  nm) használat során a minta jelentősen repedezett a 20. ábrán látható módon.

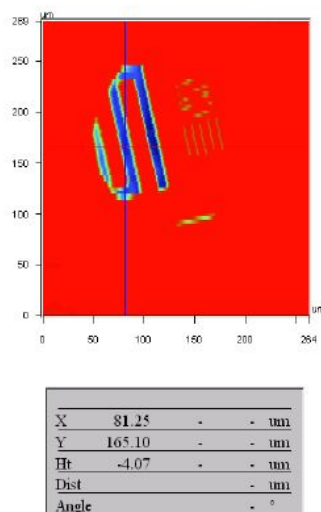


20. ábra: KrF-lézerrel készített próba felvétel.

Ennek oka feltehetően az, hogy nagyon alacsony az anyag abszorpciója ezen a hullámhosszon. Így ez a módszer nem alkalmas a jelölésre.

Az ArF excimer lézer ( $\lambda=193$  nm) használatakor a detektoron egyenletesen a kívánt tartományban jött létre a felvitt mintázat, legkisebb jelölhető átmérő 10  $\mu\text{m}$ , mely az 21. ábrán látható a tús profilométerrel készült képpel együtt.



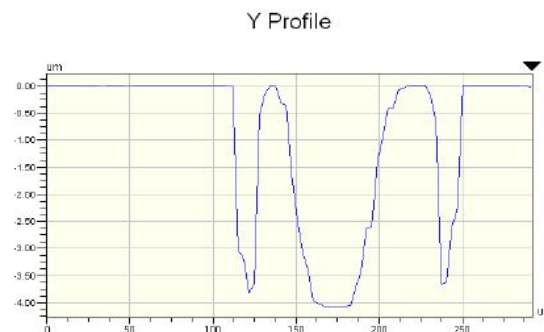


Title:



|    |          |
|----|----------|
| Rq | 1.09 μm  |
| Ra | 0.71 μm  |
| Rt | 4.51 μm  |
| Rp | 0.02 μm  |
| Rv | -4.50 μm |

|        |             |
|--------|-------------|
| Angle  | -77.54 urad |
| Curve  | 8.15 mm     |
| Terms  | None        |
| Avg Ht | -0.46 μm    |
| Area   | -121.16 μm2 |

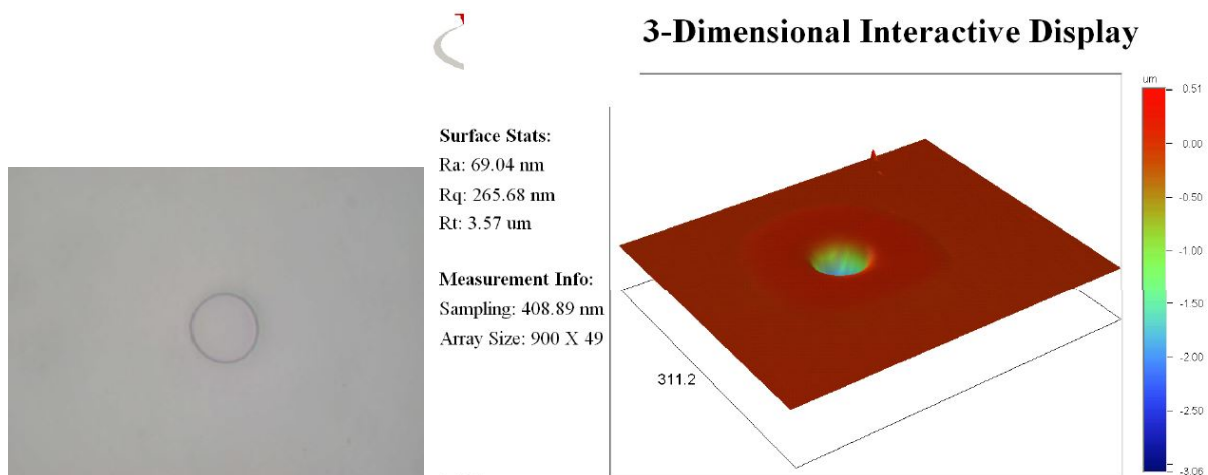


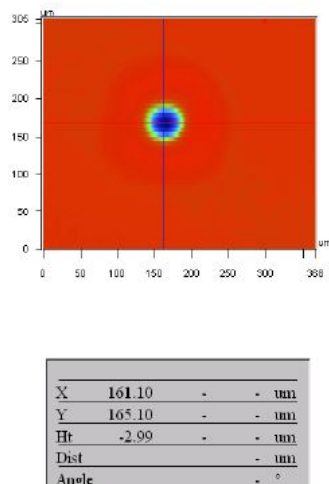
|    |          |
|----|----------|
| Rq | 1.51 μm  |
| Ra | 1.28 μm  |
| Rt | 4.10 μm  |
| Rp | 0.03 μm  |
| Rv | -4.07 μm |

|        |              |
|--------|--------------|
| Angle  | -103.13 urad |
| Curve  | 4.17 mm      |
| Terms  | None         |
| Avg Ht | -0.93 μm     |
| Area   | -268.86 μm2  |

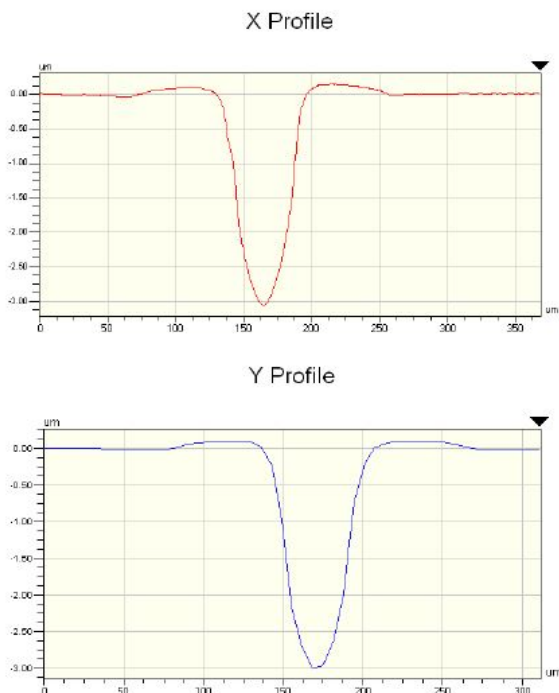
**21. ábra: ArF lézeres technikával készült mérési eredmények.**

A CO<sub>2</sub> lézernyalábban ( $\lambda=10,6 \mu\text{m}$ ,  $P_{\text{max}}=30\text{W}$ ) lefókuszálásával kapott „gödör” megegyezett a kívánt értékekkel. Ezzel a módszerrel az előre beállított átmérőnél  $\sim 10\%$ -al nagyobb mélyedés keletkezett, de ez előre tervezhető, valamint az alsó mérettartománya (átmérő tekintetében)  $50 \mu\text{m}$ . A készült felvétel optikai mikroszkópos képe és a tús profilométerrel készült ábra a 22. ábrán látható.





Title:



|    |          |
|----|----------|
| Rq | 0.83 μm  |
| Ra | 0.54 μm  |
| Rt | 3.20 μm  |
| Rp | 0.14 μm  |
| Rv | -3.06 μm |

|        |             |
|--------|-------------|
| Angle  | 28.57 urad  |
| Curve  | 15.84 mm    |
| Terms  | None        |
| Avg Ht | -0.29 μm    |
| Area   | -108.42 μm2 |

|    |          |
|----|----------|
| Rq | 0.87 μm  |
| Ra | 0.59 μm  |
| Rt | 3.10 μm  |
| Rp | 0.11 μm  |
| Rv | -2.99 μm |

|        |             |
|--------|-------------|
| Angle  | -39.01 urad |
| Curve  | 9.51 mm     |
| Terms  | None        |
| Avg Ht | -0.33 μm    |
| Area   | -100.95 μm2 |

**22. ábra: CO<sub>2</sub>-lézeres technikával készült mérés eredményei.**

A kísérletek során a CO<sub>2</sub> lézernyalábos módszer a 22. ábrán látható nyomprofil alapján megfelelő eredményekkel szolgált, viszont e módszer alsó jelölési határa 50 μm, emiatt nem alkalmazható. Az ArF excimer lézeres technikával jelöltük meg a detektorokat mivel az előzetesen feltérképezett nyomok átlagos átmérője az optimális maratási körülmények között 10-100 μm tartományba esnek.

A kísérletek után a 2. táblázatban szereplő előzetesen feltérképezett átlagos nyomátmérők jelölése történt meg a mintadetektoron. A 23. ábrán szerepel a 2. táblázatban lévő átmérőkről készített mintarajz a jelöléshez.

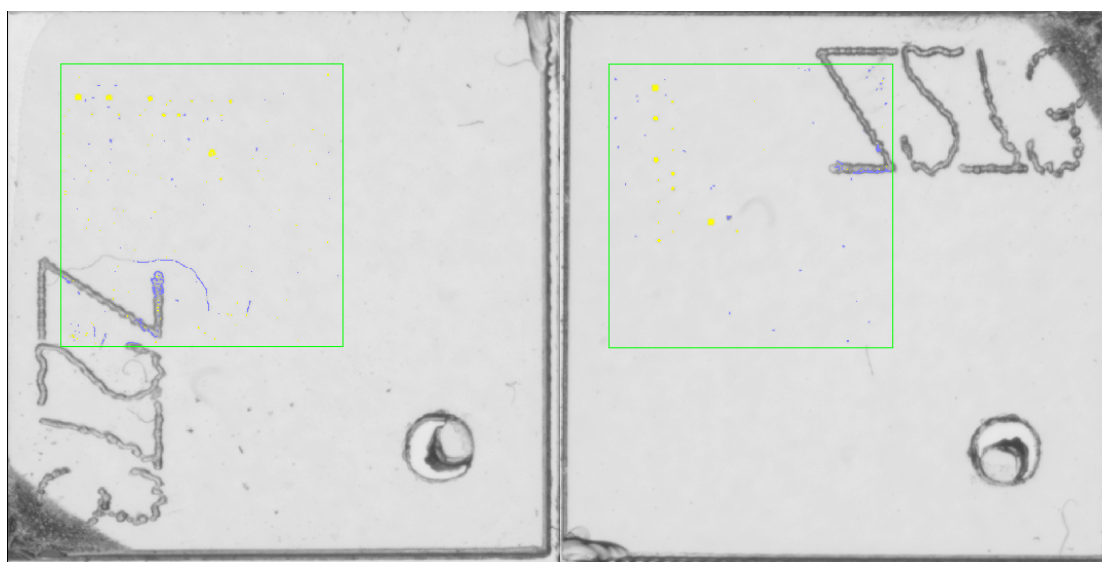
| Elem.szám | Átmérő<br>[μm] |
|-----------|----------------|
| 1.        | 91,2           |
| 2.        | 75,7           |
| 3.        | 84,4           |
| 4.        | 25,9           |
| 5.        | 40,5           |
| 6.        | 20,7           |
| 7.        | 53,6           |
| 8.        | 26,2           |
| 9.        | 24,2           |
| 10.       | 16,6           |
| 11.       | 56,1           |
| 12.       | 64,0           |
| 13.       | 24,8           |
| 14.       | 20,3           |
| 15.       | 63,8           |
| 16.       | 12,3           |

2. táblázat: Lézeres technikával felvitt nyomátmérők.



23. ábra. Lézeres jelöléshez készített mintarajz.

A jelölés végeztével az IA szoftverrel kiértékeltem a transzmissziós üzemmódban készített képeket a jelölt felületet a letapogató fejhez fordítva és ellenkező irányba is. A használt detektor teljesen új volt, nem történt lúgos maratás csak a lézeres jelöléssel készített nyomok voltak rajta. A szkennelés után kiértékelt képek a 24. ábrán láthatóak.



24. ábra: Lézerrel jelölt detektor kiértékelt képe (normál és fordított állapotban).

A képeken a sárgával jelölt részek a valós nyomok a kékkel kitöltött elemek nem a nyomok osztálya kategóriába tartoznak. Ezek alapján megállapítható, hogy a transzmissziós üzemmódban nincsen jelentősége, hogy a detektort a szkennel letapogató fejéhez képest melyik oldalára helyezzük. Mind a két esetben a szoftver érzékelte a nyomokat. Ebből következik, hogy adott radonfelmérés után a maratott detektor mindkét oldalán érzékelni tudjuk a nyomokat, ezáltal kétszeresére nő az egyébként is  $25,7 \text{ mm}^2$  –re növelt kiértékelő felület. Valamint kaphatóak olyan diffúziós kamrák (amiben a detektorok kihelyezésre kerülnek) ahol a detektor mindkét oldala szabad az alfa-részecskék befogadására, így egy kiértékelés során  $51,4 \text{ mm}^2$  –nyi felületet tudunk megvizsgálni. Magyarországon a legelterjedtebb diffúziós kamra az NRPB típusú kamra, melynek képe a 25. ábrán látható.



**25. ábra: NRPB diffúziós kamra.**

Ebben a kamrában a CR-39 típusú detektort rögzítő anyag segítségével egyik oldalánál fogva a kamra falához rögzítik, így a radon mérése során ezen az oldalán a detektornak nem keletkeznek sérülések. Így az optikai mikroszkóphoz hasonlóan a szkennelrel csak az egyik oldalán vizsgáljuk a detektorokat a kiértékelés során.

Az általam kidolgozott eljárást a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetében már régóta használt, elfogadott módszerrel, nevezetesen a mikroszkópos kiértékeléssel vettem össze. 20 db CR-39 –es nyomdetektort ismert radonkoncentrációjú térbe helyeztem, majd kémiai maratást követően minden detektoron rajtam kívül még négy személy, tehát összesen öt ember megszámolta a nyomokat és ezeket az értékeket átlagolva kaptam az eredményt, majd ezen eredményeket hasonlítottam össze az általam kidolgozott szkennelre alapuló módszerrel meghatározott értékekkel. A számolt paramétereket az 3. táblázat tartalmazza.

| <b>Paraméter</b>                    | <b>Meghatározott érték</b><br>[nyomszám] |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| Referencia érték (20db)             | 17,87                                    |
| Referenciaérték összbizonytalansága | 1,03                                     |
| Átlagérték (20db)                   | 17,59                                    |
| Átlagérték összbizonytalansága      | 1,08                                     |
| Kimutatási határ                    | 1                                        |

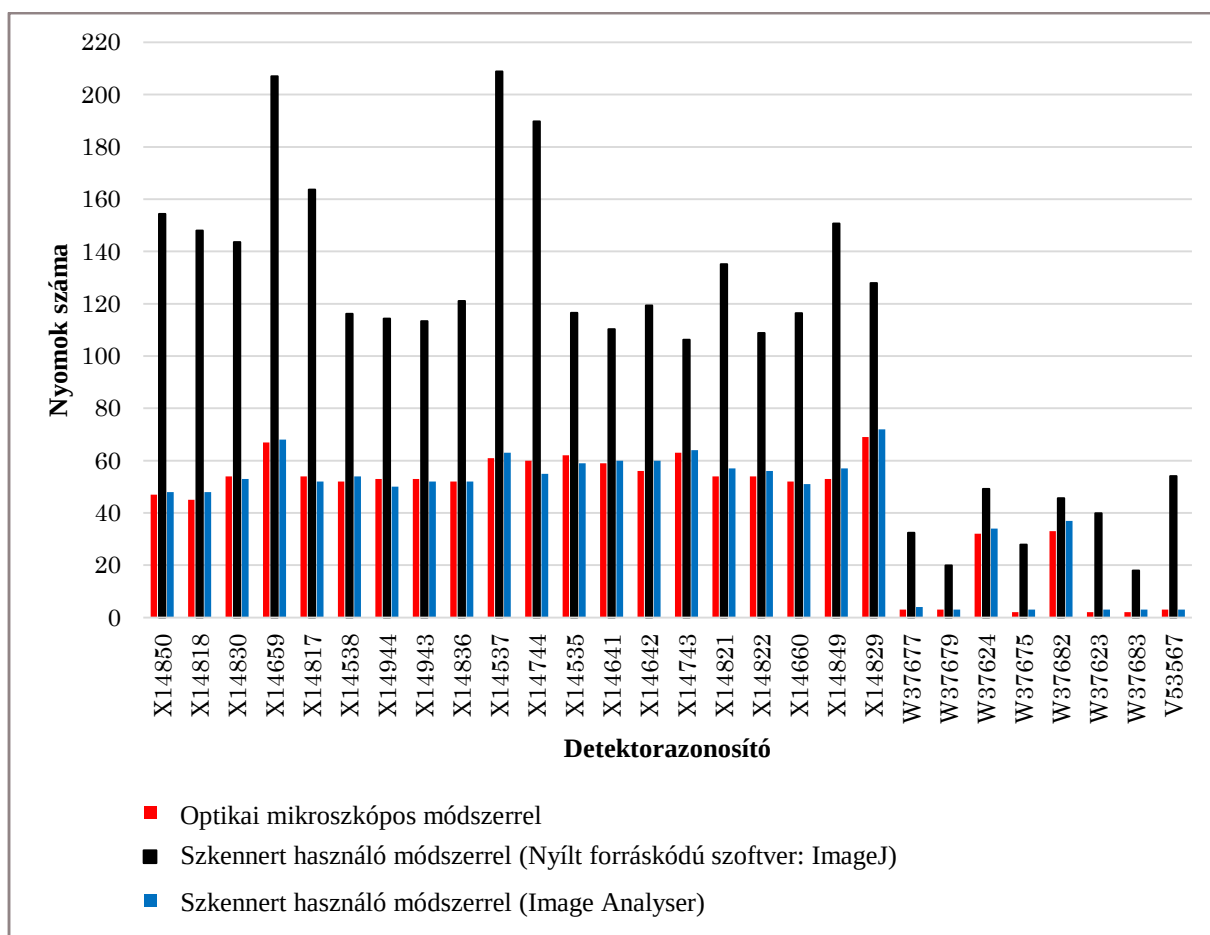
**3. táblázat: Mért és számolt paraméterek.**

A detektorokkal végeztem ismételhetőségi és reprodukálhatósági vizsgálatokat is. A tesztek során, ha ugyan azt a képet mozgathatás nélkül többször beszkennelem és kiértékeltem a szórás értéke 0%. Ha két szkennelés közben a detektort kivettem a szkennerből és újra megtisztítottam a szórás értéke 2 %. Ha a detektort a szkennel más pontjára helyeztem a szórás értéke 3 %.

A szkennelés és nyomelemzés vizsgálatával megállapította, hogy a detektor élek, repedések, karcok, por szemcsék, és egyéb részecskék lényeges különbséget nem okoztak a kép feldolgozása során, és így a nyomok számolásánál a CR-39 detektorokon. Probléma abban az esetben adódott, ha szemmel is jól látható szennyeződés (nagyobb, mint a vizsgált terület 10 % -a) került a szkennelőre és a detektorok közé, mert a nagyobb felületű objektum számos kisméretű nyomot kitakart az elemzés során. Ez a probléma megfelelően tisztított szkennelőre és detektor esetén kiküszöbölhető. Fontos még, hogy a radonkoncentráció növekedésével a nyomok sűrűsége is növekszik, ezáltal megnő annak az esélye, hogy több nyom átlapol. Azon nyomokat ahol az átlapolás mértéke legfeljebb 80 % -os a szoftver külön nyomokként számolja, ettől nagyobb átfedés esetén egy nyomként rögzíti.

## **5.2 Összehasonlítás**

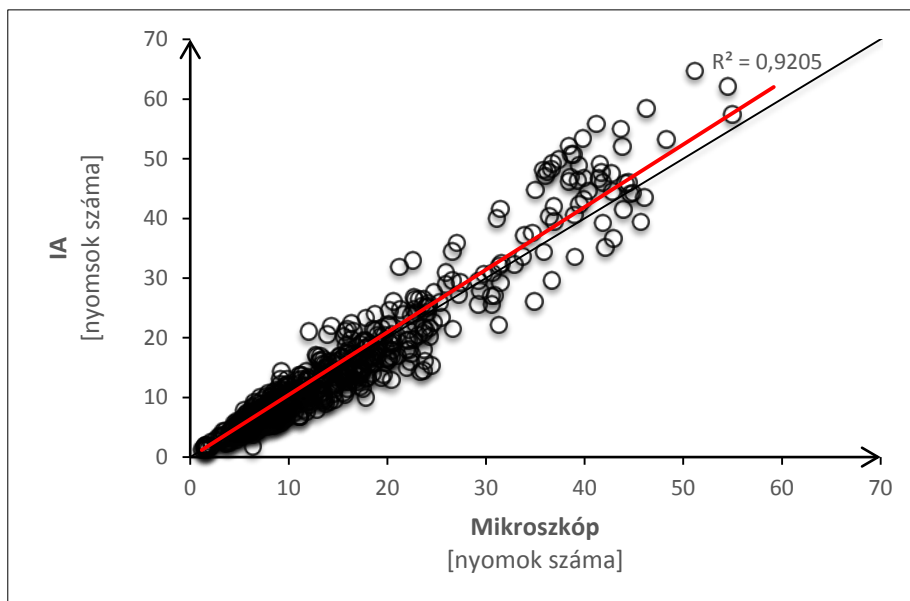
Összehasonlítottam a korábbi fejezetekben részletezett 3 módszert. 28 db különböző radonkoncentrációjú térbe helyezett detektort értékeltem ki. Először a régóta alkalmazott mikroszkópos módszerrel ezt követően transzmissziós üzemmódban szkennelt képet kiértékelő nyílt forráskódú ImageJ szoftverrel és ugyan azt a szkennelt képet Image Analyser szoftverrel. Az összehasonlítás eredményei a 26. ábrán láthatóak.



**26. ábra: Optikai mikroszkóp, szkennert használó módszer (ImageJ, IA) kiértékelés eredményei.**

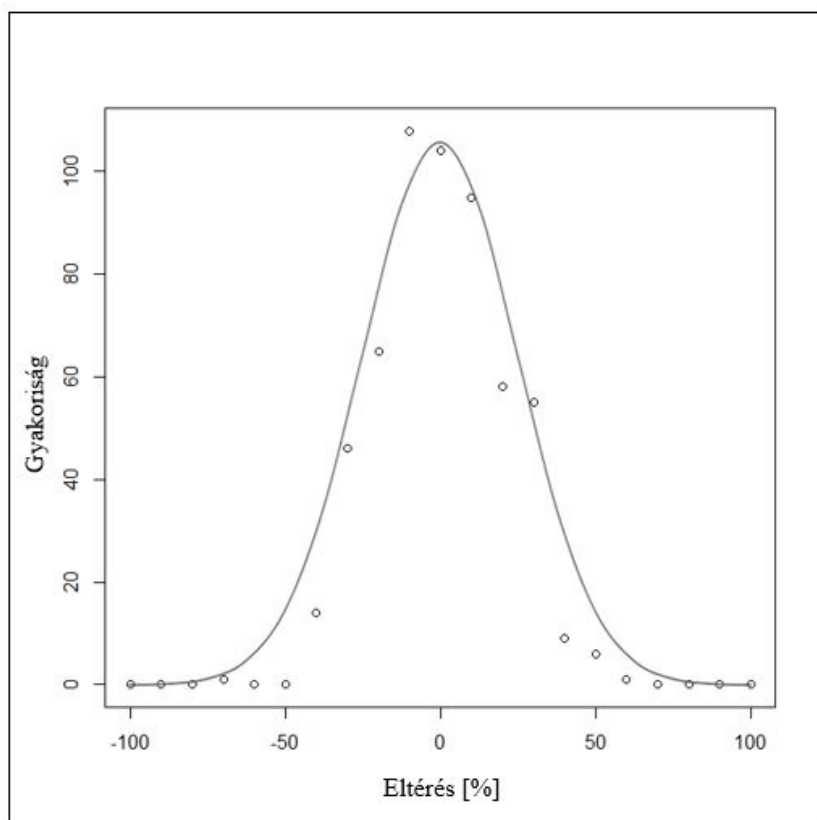
A pirossal jelölt mikroszkópos kiértékelés eredményei a kék színnel jelölt Image Analysterrel elemzett transzmissziós szkennelt kép eredményei közel azonosak. Az eltérés 5 %-on belüli. Ellentétben a nyílt forráskódú ImageJ képelemző szoftver eredményeivel, itt jól látszik, hogy több mint kétszer annyi nyomot regisztrált a program, mely azzal magyarázható, hogy a nyílt forráskódú szoftver a nyomalak meghatározására és így a nyomok osztályozására nem alkalmas. Tehát a három módszer összehasonlítása alapján elmondható, hogy a régóta alkalmazott optikai mikroszkópos módszerhez hasonlóan az IA alapján elemző szkennert használó rendszer jól alkalmazható.

A továbbiakban összesen 563 db, előzetesen optikai mikroszkóppal is kiértékelte detektort értékeltem ki az általam fejlesztett, új módszerrel. Az optikai mikroszkóppal kapott nyomszámok összevetése a transzmissziós üzemmódban készített képek IA –al történő kiértékelésével a 27. ábrán látható.



**27. ábra: Optikai mikroszkóppal kapott nyomszámok összevetése az IA –al történő kiértékeléssel.**

A két módszer eredményeinek összehasonlításakor a Pearson-féle khí-négyzet próba [37] során elvégzett normalitás teszt alapján megállapítottam, hogy  $\chi^2_{220}=231$ ,  $p=0,292$  tehát az optikai mikroszkóppal számlált nyomszámok, valamint a transzmissziós üzemmódban készített képek IA –al történő kiértékelése során kapott eredmények normál eloszlásúak, mely a 28. ábrán látható.



**28. ábra: Nyomszámok normál eloszlása.**

## Összefoglalás

A munkám során célul tűztem ki a nyomdetektor kiértékelési módszer felülvizsgálatát és fejlesztését. A kidolgozás során a következő eredményeket értem el.

A maratási lépés esetében korábban alkalmazott módszer kis hatékonyságú a nagyszámú nyomdetektort alkalmazó felmérésekre alkalmatlan. A maratási paramétereket változtatlanul hagyva (3 óra, 90 °C –os 6 M-os NaOH –oldat) új maratókészüléket terveztem. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az általam fejlesztett nyomdetektor maratási módszer költséghatékony, gyors, pontos és reprodukálható információt szolgáltat. A fejlesztett marató berendezés segítségével a korábban 24 db detektor helyett 144 db nyomdetektor kémiai előkészítését tudjuk egyidejűleg elvégezni ez hatszor annyi detektort jelent, mint korábban.

A detektor kiértékelések során a korábban alkalmazott mikroszkópos manuális rendszer kiváltására síkgyas lapszkenneres automatikus eljárás alkalmazását valósítottam meg.

Az automatikus képfeldolgozáshoz szükséges megfelelő képhez vizsgáltam a szkennerek különböző üzemmódjaiban (transzmissziós, reflexiós) kapott képek és nyomok minőségét, kutatásokat végeztem a reflexiós üzemmód alkalmazás esetén a megfelelő kis háttérzajt okozó háttér kikísérletezéséhez, ennek eredményeként megállapítható volt, hogy a különböző speciális fekete nanoszemcsés festett üveglap és a speciális hegesztő üveg sem adott megfelelő eredményt.

A továbbfejlesztéshez a transzmissziós üzemmódot választottam. A szkennelés során kapott képek képfeldolgozása során több szoftver (ImageJ és Image Analyser) alkalmazhatóságát vizsgáltam meg. A megfelelő háttérkorrekció alkalmazhatósága és a jelalak-felismerési opció miatt az utóbbi alkalmazása mellett döntöttem.

Perl-nyelvű szoftverkörnyezetben egy a teljes kiértékelést nyomon követhető szoftvert készítettem, amelybe beintegráltam az átalakított IA szoftvert is.

Az így kialakított rendszerrel a mikroszkópon alapuló rendszerhez képest az egyszerre vizsgálható detektorok száma lényegesen több (95db), így töredékére csökken az időtényező. Az automatizált kiértékelés és nyomszámolásnak köszönhetően az emberi hibából eredő problémák kiküszöbölhetőek. Egy kémiaiag maratott detektor szkennelési és kiértékelési ideje mindösszesen 18 s. Ezáltal nagy elemszámú radonfelmérés után is gyorsan megbízható eredményt kapunk. A felhasznált szkennerek olcsón beszerezhető, bárki számára elérhető. Az általam fejlesztett programok használata egyszerű, segítségükkel a kiértékelés gyorsan megoldható. Az vizsgált terület, amin az Image Analyser (IA) program a nyomok számlását

végzi  $25,7 \text{ mm}^2$  ez az érték  $51,4 \text{ mm}^2$ –ig bővül abban az esetben, ha a diffúziós kamra lehetővé teszi a detektor mindkét oldalának besugárzását, amelyet az excimer lézeres nyomreprodukáló eljárással sikerült igazolnom.

563 db manuálisan (mikroszkóppal) kiértékelte detektor eredményeivel összevettem az új kiértékelő rendszerrel kapott eredményeket és megállapítottam, hogy az eredmények kis hibahatáron belül reprodukálhatóak, és a korábbi módszerrel ellentétben teljesen kizárja az emberi tényezőtől származó hibafaktort. A mérés során lényegesen nagyobb területet analizálunk, így a felületen található nyom inhomogenitások jobban kiküszöbölhetők és csökken az eredmény bizonytalanságának értéke is. A megfelelően betanított nyomszámláló program egyértelműen csak a nyomokat számolja, és a konkurens programokkal ellentétben, nem csak a kör alakú egyes nyomokat találja meg és ismeri fel a program, hanem a kettős nyomokat is, amennyiben az átlapolás mértéke ezt lehetővé teszi.

## Irodalomjegyzék

Az internetes hivatkozások utolsó letöltésének dátuma: 2014. november 03. 17:37

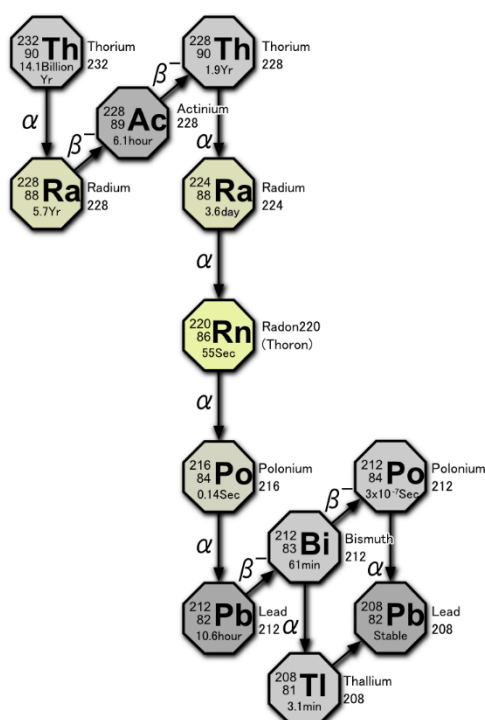
- [1] Turai I.: Sugáregészségügyi Ismeretek, Medicina Kiadó, Budapest, 1993.
- [2] Kanyár B., Somlai J., Szabó D. L.: Környezeti sugárzások, radioökológia, Veszprémi Egyetem, Radiokémia Tanszék, Veszprém, 1996.
- [3] Radó K., Szeiler G.: Radon detektálás szilárdtest nyomdetektorokkal, Mérési jegyzet, Veszprém, 2006.
- [4] Prof. Patricia Shapley, Radon and Health, University of Illinois, 2011.
- [5] Griffin H. C.: Natural Radioactive Decay Chains Handbook of Nuclear Chemistry, pp 667-687, 2011.
- [6] Kanyár B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S. A.: Radioökológia és Környezeti Sugárvédelem, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 2000.
- [7] Németh Z. : Radiokémiai és izotóptechnikai alapismeretek. Veszprémi Egyetemi kiadó, Veszprém, 1996.
- [8] Cartwright B.G., Shirk E.K., Price P.B., Nucl. Instrum. Methods 153 457, 1978
- [9] Chadderton L.T., Radiation Measurement. 36 13, 2003.
- [10] Bohr N., Philos. Mag. 15 10, 1913.
- [11] Bethe H., Ann. Phys. 5 325, 1930.
- [12] Bloch F., Zeits Phys. 81 363, 1933.
- [13] Nikezic D., Yu K. N.: Fomation and growth of tracks in nuclear track materials, Materials Science and Engineering R46 51-123, 2004.
- [14] Azooz A.: CR-39 track profile for protons and alpha particles, Mosul Univerity Iraq, 2012.
- [15] Ashrya A.H., Abdallaa A.M., Rammahc Y.S., Eisaa M., Ashrafa O.: The use of CH<sub>3</sub>OH additive to NaOH for etching alpha particle tracks in a CR-39 plastic nuclear track detector, Radiation Physics and Chemistry, Volume 101, Pages 41–45, 2014.

- [16] Sahoo G.S., Tripathy S.P., Bandyopadhyay T.: Optimization of microwave-induced chemical etching for rapid development of neutron-induced recoil tracks in CR-39 detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 739, Pages 83–88, 2014.
- [17] Young DA: Nature 182:375-377, 1958.
- [18] Gold R., Armani R.J., Roberts J.H.: Absolute fission-rate measurements with solid-state track recorders. Nuclear Science and Engineering 34:13-32, 1968.
- [19] Adams J.H.Jr., Automated track measurements in CR-39, Nuclear Tracks 4:67-76, 1980.
- [20] Gold R., Roberts J.H., Preston C.C., McNeece J.P., Ruddy F.H., The status of automated nuclear scanning systems. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 8:187-197, 1984.
- [21] Dolleiser M., Hashemi-Nezhad S.R.: A fully automated optical microscope for the analysis of particle tracks in solids. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 198:98-107, 2002.
- [22] Yasuda N., Namiki K., Honma Y., Umeshima Y., Marumo Y., Ishii H., Benton E.R.: Development of a high speed imaging microscope and new software for nuclear track detector analysis. Radiation Measurements 40:311-315, 2005.
- [23] Moore M.E.: Laser illuminated etched track scattering (LITES) dosimetry system. Radiation Protection Dosimetry 101:43-45, 2002.
- [24] Bedogni R.: Development of a reader for the routine analysis of CR-39 fast neutron dosimeters improvement of the dosimetric performance using automatic vision and motion tools. Radiation Measurements 36:239-243, 2003.
- [25] Vaginay F., Fromm M., Pusset D., Meesen G., Chambaudet A., Poffijn A.: 3-D Confocal microscopy track analysis a promising tool for determining CR-39 response function. Radiation Measurements 34:123-127, 2001.
- [26] Félix-Bautista R., Hernández-Hernández C., Zendejas-Leal B.E., Fragoso R., Golzarri J.I., Vázquez-López C., Espinosa G.: Evolution of etched nuclear track profiles of alpha particles in CR-39 by atomic force microscopy. Radiation Measurements 50:197-200, 2003.
- [27] Steele J.D., Bhakta J.R., Tanner R.J., Bartlett D.T.: Development of a reader for track etch detectors based on a commercially available slide scanner. Radiation Measurements 31:179-184, 1999.

- [28] Ibrahim Z.F., Miles J.C.H.: Performance review of a slide scanner based automated counting system for PADCrads detectors. Radiation Measurements 43:S395-S400, 2008.
- [29] Tsankov L., Pressyanov D., Mitev K., Georgiev S., Dimitrova I.: Automatic counting of chemically etched tracks by means of a computer scanner. Radiation Measurements 39:557-559, 2005.
- [30] Fairchild R., Tjong L., Wright T.: Automating radon solid state track detector measurements, Radiation Measurements 46:1773-1777, 2011.
- [31] Bálint Z.: Lapszkenneres nyomdetektor kiolvasó mérési paramétereinek meghatározása (szakdolgozat), Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézet, Veszprém, (2012)
- [32] Pálfalvi JK, Eördögh I, Szász K, Sajó-Bohus L, (1996) A new generation image analyser for evaluating SSNTDs. Radiation Measurement 28:849-852
- [33] <http://www.radosys.com/radon%20-%20page%201.htm>
- [34] <http://www.landauernordic.com/default.aspx?PID=97>
- [35] Tom Christiansen - Randal L. Schwartz : A PERL programozási nyelv, Kossuth Kiadó Zrt., 1998
- [36] Menyhárd M. és Daróczi Cs. S.: MTA MFA Évkönyv, Budapest, 2011.
- [37] [http://psycho.unideb.hu/munkatarsak/hidegkuti\\_istvan/targyak/Kiraly\\_Zoltan\\_Statisztika\\_2\\_jegyzet\\_1.pdf](http://psycho.unideb.hu/munkatarsak/hidegkuti_istvan/targyak/Kiraly_Zoltan_Statisztika_2_jegyzet_1.pdf)

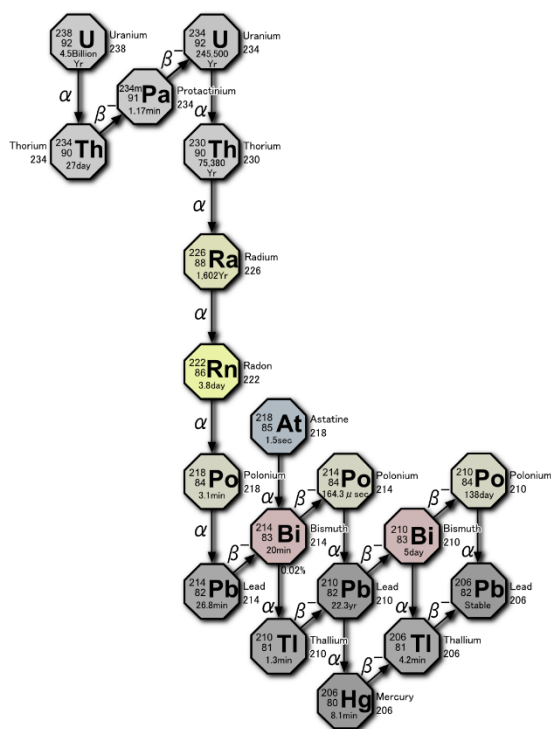
## Melléklet

### 1. Melléklet: Th-232 bomlási sora és jellemzői:



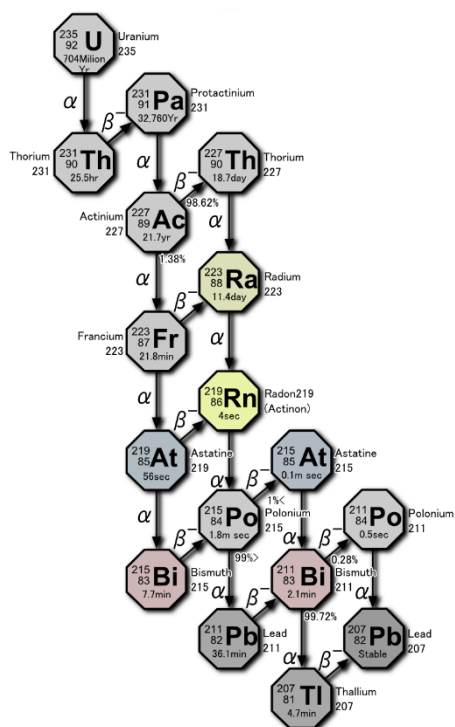
| Nuklid            | Bomlási mód                         | Felezési idő             | Felszabaduló energia, [MeV] | Bomlástermék                           |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| $^{232}\text{Th}$ | $\alpha$                            | $1,405 \cdot 10^{10}$ év | 4,081                       | $^{228}\text{Ra}$                      |
| $^{228}\text{Ra}$ | $\beta^-$                           | 5,75 év                  | 0,046                       | $^{228}\text{Ac}$                      |
| $^{228}\text{Ac}$ | $\beta^-$                           | 6,25 óra                 | 2,124                       | $^{228}\text{Th}$                      |
| $^{228}\text{Th}$ | $\alpha$                            | 1,9116 év                | 5,52                        | $^{224}\text{Ra}$                      |
| $^{224}\text{Ra}$ | $\alpha$                            | 3,6319 nap               | 5,789                       | $^{220}\text{Rn}$                      |
| $^{220}\text{Rn}$ | $\alpha$                            | 55,6 s                   | 6,404                       | $^{216}\text{Po}$                      |
| $^{216}\text{Po}$ | $\alpha$                            | 0,145 s                  | 6,906                       | $^{212}\text{Pb}$                      |
| $^{212}\text{Pb}$ | $\beta^-$                           | 10,64 óra                | 0,57                        | $^{212}\text{Bi}$                      |
| $^{212}\text{Bi}$ | $\beta^-$ 64,06%<br>$\alpha$ 35,94% | 60,55 perc               | 2,252<br>6,208              | $^{212}\text{Po}$<br>$^{208}\text{Tl}$ |
| $^{212}\text{Po}$ | $\alpha$                            | 299 ns                   | 8,955                       | $^{208}\text{Pb}$                      |
| $^{208}\text{Tl}$ | $\beta^-$                           | 3,053 perc               | 4,999                       | $^{208}\text{Pb}$                      |
| $^{208}\text{Pb}$ | stabil                              | -                        | -                           | -                                      |

## 2. Melléklet: U-238 bomlási sora és jellemzői:



| Nuklid             | Bomlási mód                            | Felezési idő             | Felszabaduló energia, MeV | Bomlástermék                           |
|--------------------|----------------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| <sup>238</sup> U   | α                                      | 4,468·10 <sup>9</sup> év | 4,27                      | <sup>234</sup> Th                      |
| <sup>234</sup> Th  | β <sup>-</sup>                         | 24,10 nap                | 0,273                     | <sup>234m</sup> Pa                     |
| <sup>234m</sup> Pa | β <sup>-</sup> 99,84 %<br>IT 0,16 %    | 1,16 perc                | 2,271<br>0,074            | <sup>234</sup> U<br><sup>234</sup> Pa  |
| <sup>234</sup> Pa  | β <sup>-</sup>                         | 6,70 óra                 | 2,197                     | <sup>234</sup> U                       |
| <sup>234</sup> U   | α                                      | 245500 év                | 4,859                     | <sup>230</sup> Th                      |
| <sup>230</sup> Th  | α                                      | 75380 év                 | 4,77                      | <sup>226</sup> Ra                      |
| <sup>226</sup> Ra  | α                                      | 1602 év                  | 4,871                     | <sup>222</sup> Rn                      |
| <sup>222</sup> Rn  | α                                      | 3,8235 nap               | 5,59                      | <sup>218</sup> Po                      |
| <sup>218</sup> Po  | α 99,98 %<br>β <sup>-</sup> 0,02 %     | 3,10 perc                | 6,115<br>0,265            | <sup>214</sup> Pb<br><sup>218</sup> At |
| <sup>218</sup> At  | α 99,90 %<br>β <sup>-</sup> 0,10 %     | 1,5 s                    | 6,874<br>2,883            | <sup>214</sup> Bi<br><sup>218</sup> Rn |
| <sup>218</sup> Rn  | α                                      | 35 ms                    | 7,263                     | <sup>214</sup> Po                      |
| <sup>214</sup> Pb  | β <sup>-</sup>                         | 26,8 perc                | 1,024                     | <sup>214</sup> Bi                      |
| <sup>214</sup> Bi  | β <sup>-</sup> 99,98 %<br>α 0,02 %     | 19,9 perc                | 3,272<br>5,617            | <sup>214</sup> Po<br><sup>210</sup> Tl |
| <sup>214</sup> Po  | α                                      | 0,1643 ms                | 7,883                     | <sup>210</sup> Pb                      |
| <sup>210</sup> Tl  | β <sup>-</sup>                         | 1,30 perc                | 5,484                     | <sup>210</sup> Pb                      |
| <sup>210</sup> Pb  | β <sup>-</sup>                         | 22,3 év                  | 0,064                     | <sup>210</sup> Bi                      |
| <sup>210</sup> Bi  | β <sup>-</sup> 99,99987%<br>α 0,00013% | 5,013 nap                | 1,426<br>5,982            | <sup>210</sup> Po<br><sup>206</sup> Tl |
| <sup>210</sup> Po  | α                                      | 138,376 nap              | 5,407                     | <sup>206</sup> Pb                      |
| <sup>206</sup> Tl  | β <sup>-</sup>                         | 4,199 perc               | 1,533                     | <sup>206</sup> Pb                      |
| <sup>206</sup> Pb  | stabil                                 | -                        | -                         | -                                      |

### 3. Melléklet: U-235 bomlási sora és jellemzői:



| Nuklid            | Bomlási mód                            | Felezési idő            | Felszabaduló energia, MeV | Bomlástermék                           |
|-------------------|----------------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| <sup>235</sup> U  | α                                      | 7,04·10 <sup>8</sup> év | 4,678                     | <sup>231</sup> Th                      |
| <sup>231</sup> Th | β <sup>-</sup>                         | 25,52 óra               | 0,391                     | <sup>231</sup> Pa                      |
| <sup>231</sup> Pa | α                                      | 32760 év                | 5,15                      | <sup>227</sup> Ac]]                    |
| <sup>227</sup> Ac | β <sup>-</sup> 98,62%<br>α 1,38%       | 21,772 év               | 0,045<br>5,042            | <sup>227</sup> Th<br><sup>223</sup> Fr |
| <sup>227</sup> Th | α                                      | 18,68 nap               | 6,147                     | <sup>223</sup> Ra                      |
| <sup>223</sup> Fr | β <sup>-</sup> 99,994%<br>α 0,006%     | 22,00 perc              | 1,149<br>5,34             | <sup>223</sup> Ra<br><sup>219</sup> At |
| <sup>223</sup> Ra | α                                      | 11,43 nap               | 5,979                     | <sup>219</sup> Rn                      |
| <sup>219</sup> At | α 97,00%<br>β <sup>-</sup> 3,00%       | 56 s                    | 6,275<br>1,7              | <sup>215</sup> Bi<br><sup>219</sup> Rn |
| <sup>219</sup> Rn | α                                      | 3,96 s                  | 6,946                     | <sup>215</sup> Po                      |
| <sup>215</sup> Bi | β <sup>-</sup>                         | 7,6 perc                | 2,25                      | <sup>215</sup> Po                      |
| <sup>215</sup> Po | α 99,99977%<br>β <sup>-</sup> 0,00023% | 1,781 ms                | 7,527<br>0,715            | <sup>211</sup> Pb<br><sup>215</sup> At |
| <sup>215</sup> At | α                                      | 0,1 ms                  | 8,178                     | <sup>211</sup> Bi                      |
| <sup>211</sup> Pb | β <sup>-</sup>                         | 36,1 perc               | 1,367                     | <sup>211</sup> Bi                      |
| <sup>211</sup> Bi | α 99,724%<br>β <sup>-</sup> 0,276%     | 2,14 perc               | 6,751<br>0,575            | <sup>207</sup> Tl<br><sup>211</sup> Po |
| <sup>211</sup> Po | α                                      | 516 ms                  | 7,595                     | <sup>207</sup> Pb                      |
| <sup>207</sup> Tl | β <sup>-</sup>                         | 4,77 perc               | 1,418                     | <sup>207</sup> Pb                      |
| <sup>207</sup> Pb | stabil                                 | -                       | .                         | .                                      |

## **Függelék**

### **1. Függelék: Kutatási feladat bemutatása.**

#### **A Témavezetőm által kiírt feladat:**

A Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetében CR-39 típusú detektorok kiértékelésére alkalmas szkennert alapú módszer fejlesztése/tökéletesítése és összehasonlítása hagyományos nyomdetektor kiértékelő módszerrel.

#### **A munka során elvégzendő specifikus feladatok:**

- nyomdetektor előkészítő rendszer tökéletesítése,
- síkágys szkennert különböző üzemmódjainak vizsgálata,
- különböző képanalizáló szoftverek alkalmazása,
- a kiértékelés lépéseinek automatizálása,
- az elkészített kiértékelő rendszer összehasonlítása a hagyományos optikai mikroszkópot használó módszerrel.

#### **Az alkalmazott módszerek a feladatok elvégzéséhez:**

- Az előkészítő berendezéshez és a szkennerthez szükséges tartóelemeket és egyéb alkatrészeket 3D gépészeti tervezésre alkalmas szoftvert (AutoCAD Inventor) segítségével terveztem és rajzoltam meg, így biztosítva a pontos méretű és kialakítású elemek legyártását.
- A nyomdetektorokról készített képek feldolgozásához szükséges lépések automatizálását, Perl programnyelvű környezetben valósítottam meg és készítettem el a kiértékelést összefogó szoftvert is.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni **Dr. Kovács Tibor** egyetemi docens / Intézetigazgató Úrnak, aki témavezetőmként a dolgozat tárgyául szolgáló kutatásokba bevezetett, valamint szakmai tanácsaival, tapasztalataival segítséget nyújtott dolgozatom elkészítésében és támogatott elképzeléseim megvalósításában.

Külön köszönöm **Dr. Kántor Zoltánnak** és **Dr. Hopp Béla** egyetemi docens Úrnak valamint a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék dolgozóinak, hogy segítséget nyújtottak és rendelkezésemre álltak a lézeres vizsgálatok során.

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében dolgozó **Dr. Eördögh Imrének** a kiértékelő szoftver átalakításában nyújtott segítségét.

Köszönettel tartozom továbbá a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézet minden dolgozójának, különösen **Csordás Anitának, Hegedűs Miklósnak, Horváth Dávidnak** és **Dr. Szeiler Gábornak**, hogy segítségükre bármikor számíthattam, és szakmai tapasztalataikkal rendelkezésemre álltak.

**Köszönöm!**