



PANNON EGYETEM

VEGYÉSZMÉRNÖKI-ÉS ANYAGTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Szkenner-alapú kiértékelő rendszer kifejlesztése radon nyomdetektorokhoz

DOI:10.18136/PE.2018.695

DOKTORI (Ph.D.) ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE

Csordás Anita
okleveles környezetmérnök

TÉMAVEZETŐ

Dr. Kovács Tibor
egyetemi docens

Pannon Egyetem

Mérnöki Kar

Radiokémiai és Radioökológiai Intézet

2018

Szkenner-alapú kiértékelő rendszer kifejlesztése radon nyomdetektorokhoz

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
a Pannon Egyetem Vegyészmérnöki-és Anyagtudományok Doktori Iskolája keretében

bio-, környezet- és vegyészmérnöki tudományok tudományágban

Írta:
Csordás Anita

Témavezető:
Dr. Kovács Tibor

Elfogadásra javaslom (igen/nem)
témavezető

A jelölt a doktori szigorlaton %-ot ért el.

Veszprém,
Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: (igen/nem)
.....
bíráló

Bíráló neve: (igen/nem)
.....
bíráló

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

Veszprém,
Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése:

Veszprém,
EDHT elnöke

Tartalomjegyzék

KIVONAT	3
ABSTRACT	4
ABSTRAKTE	5
I. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	6
II. ELMÉLETI HÁTTÉR	8
1. Természetes háttérsugárzás	8
1.1. Kozmikus sugárzás.....	9
1.2. Földkérgi eredetű (terresztriális) külső sugárterhelés	9
1.3. Földkérgi eredetű belső sugárterhelés	10
1.4. Mesterséges forrásokból származó sugárterhelés	10
2. Radon	11
2.1. A radon és bomlástermékeinek egészségkárosító hatása	12
2.2. Beltéri radon felmérések	13
2.3. Magyarországi radon felmérések	16
2.4. Jogszabályi háttér	17
2.5. Radon mérési módszerek	19
2.5.1. Közvetlen és közvetett módszerek.....	19
2.5.2. Különböző időtartamú mérések	19
2.6. Radon mérésére alkalmas detektorok.....	20
2.6.1. Passzív detektorok	20
2.6.2. Aktív detektorok.....	21
3. Szilárdtest nyomdetektorok	22
3.1. Nyomok keletkezése	23
3.2. A kémiai maratás során végbemenő folyamatok	24
3.3. Nyomfejlődés geometriája	25
3.3.1. Nyomfejlődés konstans V_T és normál beesési szög esetén	26
3.3.2. Nyomfejlődés állandó V_T és ferde becsapódás esetén	27
3.3.3. Nyomfejlődés változó V_T esetén	29
3.4. Maratás sebességének meghatározása.....	30
3.4.1. Normál maratási sebesség	30
3.4.2. Normál maratási sebességet befolyásoló tényezők	34
3.4.3. Pályamenti maratási sebesség.....	37
3.5. Nyomdetektorok alkalmazása	37
3.5.1. Példák alap kutatásban való alkalmazásukra.....	38
3.5.2. Példák a gyakorlati alkalmazásokra	39
3.6. Kiértékelő rendszerek fejlődése	40

III. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	42
4.Nyomdetektorok.....	43
4.1. Háttér meghatározása	44
4.2. Nyomdetektor érzékenységének vizsgálata	44
4.3. Fóliák radon áteresztő képességének vizsgálata	45
5. Maratás	47
5.1. Optimális nyomátmérő tartomány meghatározása.....	47
5.2. Maratási paraméterek meghatározása	48
5.3. Maratási kapacitás növelése	50
6. Kiértékelés	51
6.1. Mikroszkóp alapú kiértékelő rendszer	51
6.2. Szkenner alapú kiértékelő rendszer.....	53
6.2.1. Szkennelési fázis beállításai	54
6.2.2. Képelemző szoftver kiválasztása.....	55
6.2.3. Vizsgált felület nagyságának meghatározása	61
6.2.4. Ismételhetségi vizsgálatok.....	61
IV. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK	62
7. Nyomdetektorok.....	62
7.1. Háttér meghatározása	62
7.2. Nyomdetektor érzékenységének vizsgálata	63
7.3. Fóliák radon áteresztő képességének vizsgálata	64
8. Maratás	65
8.1. Optimális nyomátmérő tartomány meghatározása.....	65
8.2. Maratási paraméterek meghatározása	69
8.2. Maratási kapacitás növelése	72
9. Kiértékelés	74
9.1. Mikroszkóp alapú kiértékelő rendszer	74
9.2. Szkenner alapú kiértékelő rendszer.....	75
9.2.1. A szkennelési üzemmód kiválasztása.....	75
9.1.2. Képelemző szoftver kiválasztása.....	76
9.3. Integrált detektor kiértékelő rendszer.....	78
9.3.1. Vizsgált felület nagyságának meghatározása	81
9.3.2. Ismételhetségi vizsgálatok.....	82
9.4. A régi (mikroszkópos) és új (szkenneres) nyomdetektor kiértékelő rendszer összehasonlítása	82
V. ÖSSZEFOGLALÁS.....	85
TÉZISPONTOK	87
THESIS STATEMENTS.....	89
FELHASZNÁLT IRODALOM.....	91
PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG	104
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	112

KIVONAT

A természetes eredetű háttérsugárzás több mint fele a radon izotópoktól valamint azok bomlástermékeiktől származik. Ezen izotópok egészségre gyakorolt káros hatásait ma már jól ismerjük. A hatások csökkentése érdekében a nemzetközi és hazai jogszabályok a radon házakban mérhető koncentrációjára határértékeket javasoltak, amely értékek felett javasolt a radon szint csökkentésére irányuló beavatkozást kivitelezni.

A radon épületekben történő meghatározására a különböző nyomdetektoros mérések terjedtek el azok egyszerű és könnyű alkalmazhatósága miatt. A nyomdetektorok kiértékeléséhez legtöbbször mikroszkópos rendszereket alkalmaznak, de találhatóak a szakirodalomban ettől eltérő megoldások is.

Jelen dolgozat célja egy szkennert alapú kiértékelő rendszer felépítése, amely gyors detektor kiértékelést tesz lehetővé. Az új rendszer kidolgozásához szükséges vizsgálatokat három fő témakörre lehet felosztani: a nyomdetektorok, a maratás és a szkennert.

A nyomdetektorokkal kapcsolatban a szerző megvizsgált két különböző gyártmányú (Baryotrak és Tastrak) CR-39 detektorokat a háttér nyomosság és a radonra való érzékenység szempontjából. A kapott eredmények alapján a Baryotrak detektort javasolta a további alkalmazásra.

Az új kiértékelési rendszer esetében meghatározta az optimális nyomátmérő tartományt, mely ArF lézer alkalmazásával készített kalibráló lemezekkel történt. Az így kapott átmérők (40-60 μm) teljesítéséhez a maratási paramétereket (hőmérséklet, idő) optimalizálta, melynek eredményeképpen a javasolt maratási körülmények 6,25M NaOH, 90°C, 8 óra.

A szkennert esetében a szerző megvizsgálta az alkalmazható üzemmódokat (transzmissziós és reflexiós). A kapott eredmények alapján a transzmissziós módot választotta, amely jobb minőségű felvételek készítését teszi lehetővé. Ezt követően két képelemző szoftvert (ImageJ és Image Analyzer-IMAN) alkalmazhatóságát vizsgálta meg és vetette össze a korábban használt mikroszkópos kiértékelő rendszerrel. Az eredmények alapján az új rendszer az IMAN szoftvert alkalmazásával épül fel, melynek morfológiai osztályozásában módosításokat kellett végrehajtani.

A jelölt – a dolgozat célkitűzéseit teljesítve – kidolgozott egy automatikus, szkennert alapú nyomdetektor kiértékelő rendszert, az IDES-t (Integrated Detector Evaluation System).

ABSTRACT

More than half part of the natural background radiation arise from the radon isotopes and their daughter elements. The harmful health effects of these isotopes is well-known for a long time. To reduce these effects reference level for the maximum indoor radon concentration has been recommended by the international organisations. Above these level radon activity concentration has to be reduced by active methods.

In case of indoor radon surveys track detector methods is used because of their simplicity and cheapness. For the evaluation of the track detectors optical microscope-based system is used in the most cases.

The aim of the dissertation is to prepare a new, scanner-based evaluation system, which facilitate fast and easy evaluation. Feasibility study of this new system should be divided into three categories: track detectors, etching method and evaluation (scanner).

In case of track detectors' tests two different types of CR-39 detector (Baryotrak and Tastrak) was investigated (background and sensitivity for radon). Based on the results the investigations were continued with the Baryotark type.

The optimal range of the track diameter (40-60 μm) of the new evaluation system was determined by a calibration sheet, which was prepared by ArF excimer laser. The etching parameters should be changed for this new range: the recommendation is 6.25 M NaOH, 90°C and 8 hours.

In case of the evaluation method, two operation modes (reflective and transmissive) was investigated. Transmissive mode was selected because of its better image quality. For the new evaluation system two image analyser softwares (ImageJ and Image Analyser-IMAN) was investigated and compared with the previous microscope system. Based on the comparison's result the IMAN was selected for the final version of the new evaluation system, which was modified in the morphological classification.

The developed new track detector evaluation system – what was the aim of the dissertation – is IDES (Integrated Detector Evaluation System).

ABSTRAKTE

Die mehr als die Hälfte der Hintergrundstrahlung natürlicher Herkunft stammt aus Radonisotopen und aus ihren Abbauprodukten. Heutzutage kennen wir die Wirkungen dieser Isotope auf die Gesundheit schon gut. Im Interesse der Reduzierung der Wirkungen haben die internationale und heimische Vorschriften die Grenzwerte auf die in den Radonhäusern messbare Konzentration vorgeschlagen. Es ist ratsam über diesen Werten eine Intervention, die sich auf die Reduzierung der Radonstufe richtet.

Auf die Definition des Radons in Gebäuden sind verschiedene Druckdetektormessungen wegen der einfachen Anwendbarkeit verbreitet. Zur Auswertung der Druckdetektoren werden meistens Mikroskopsysteme verwendet, aber man kann auch andere Lösungen in Fachliteratur finden.

Der Zweck dieses Referats ist der Aufbau eines Scanner-basierten Auswertungssystems, welches eine schnelle Detektorauswertung ermöglicht. Die zum neuen System erforderlichen Prüfungen kann man auf drei Hauptthemen teilen: Druckdetektoren, Aetze und Scanner.

Im Zusammenhang mit Druckdetektoren hat der Autor zwei verschiedene (Baryotrak és Tastrak) CR-39 Detektoren aus der Hinsicht der Hintergrunddruckdichtigkeit und der Radonempfindlichkeit geprüft. Laut der erhaltenen Ergebnisse wurde die Baryotrak-Detektor zur weiteren Verwendung empfohlen.

Bei dem neuen Auswertungssystem wurde der optimale Druckendurchmesserbereich durch die mit ArF-Laser-Verwendung gefertigten Kalibrierungsplatten festgelegt. Zur Erfüllung der auf dieser Weise erhaltenen Durchmesser (40-60 μm) hat sie die Aetzenparameter (Temperatur, Zeit) optimalisiert, wodurch die empfohlenen Aetzparameter 6,25M NaOH, 90°C, 8 Stunden sind.

Im Falle des Scanners hat der Autor die anwendbaren Betriebsarten (Transmission und Reflexion) geprüft. Laut der Ergebnissen hat sie die Transmissionsbetriebsart gewählt, was eine bessere Aufnahmequalität ermöglicht. Danach wurde die Verwendungsfähigkeit der zwei Bildanalysesoftware (ImageJ és Image Analyzer-IMAN) analysiert und hat sie mit dem zuvor verwendeten mikroskopischen Auswertungssystem verglichen. Nach den Ergebnissen wurde das neue System mit der Anwendung von IMAN Software gebaut, in deren morfologischer Klassifizierung Änderungen durchgeführt werden sollte. Der Kandidat hat das IDES (Integriertes Detektor Evaluation System) – ein auf Scanner basiertes Druckdetektorauswertungssystem ausgearbeitet, was die Ziele der Dissertation erfüllt.

I. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az embert érő természetes háttérsugárzás legfontosabb összetevője a radon, mely főként a zárt épületekben történő felhalmozódásával okozhat problémát. Az UNSCEAR (ENSZ Atomsugárzás Hatásait vizsgáló Tudományos Bizottsága) jelentése alapján ennek átlagértéke a világon 40 Bq m^{-3} , de az egyes országokban igencsak nagy eltéréseket lehet találni. Európa több országában is 10 Bq m^{-3} körül mozog az átlagérték (Hollandia [Smetsers et al., 2016], Ciprus [Sarrou és Pashalidis, 2003]), míg más területeken (Csehország [Tomasek et al., 2002]) számos helyen mérhetünk 100 Bq m^{-3} koncentrációt meghaladó értékeket. Regionálisan olyan területek is előfordulhatnak, ahol a koncentráció a több száz, vagy akár több ezer Bq m^{-3} -es szintet is elérheti (pl. Spanyolország egyes területei [Lopez-Abente et al., 2018]). A potenciálisan magas radon koncentrációjú országok közül több esetben is kidolgozásra került már egy nemzeti cselekvési program, amelynek célja a kritikus területek azonosítása, a veszélyeztetett lakosság tájékoztatása és a csökkentés lehetőségeinek feltárása.

A radon egészségkárosító hatásáról már sokéves tapasztalattal rendelkezünk. A hatásainak becsléséhez, a kockázat meghatározásához az LNT (Liner-No-Threshold) modell alkalmazása javasolt. Ez alapján a növekvő radon koncentráció lineárisan növeli a tüdőrák kialakulásának kockázatát. Emiatt kiemelt jelentőséggel bír a veszélyeztetett területek azonosítása a lakosság egészségének védelme érdekében.

Az Európai Unió – figyelembe véve a nemzetközi szakmai szervezetek ajánlásait a károsító hatások kockázatairól – 2013-ban egy új irányelvet fogadott el, amely a beltéri radon aktivitáskoncentrációjára egy vonatkoztatási szintet tartalmazott. Az LNT modell alapján a 300 Bq m^{-3} alatti koncentráció elfogadható kockázatot jelent a lakosságra nézve. Ennél magasabb értékek esetében viszont mindenképpen a csökkentésre irányuló beavatkozási módszereket kell alkalmazni.

A referenciaérték bevezetése mellett az új irányelv kötelezi a tagországokat egy nemzeti radon cselekvési terv kidolgozására is. Ennek a programnak három fő célkitűzése van: egyrészt a lakosság természetes forrásokból származó sugárterhelésének meghatározása (kiemelten a radon problémája), másrészt a lakosság kockázat tudatosságának növelése, megfelelő tájékoztatási kampányok szervezése, végül pedig a veszélyeztetett területek azonosítása és a radon csökkentésére irányuló módszerek kidolgozása és alkalmazása.

A cselekvési terv céljainak eléréséhez egy átfogó, nagy mérésszámú, országos beltéri radon felmérés kivitelezése elengedhetetlen. Ehhez azonban a megfelelő mérés technikai háttérrel és humán erőforrással kell rendelkeznie a kivitelezőknek.

A Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézete sokéves radon mérési tapasztalattal rendelkezik különböző eszközökkel, különböző területeken. Több, kisebb méretű (100-200 mérési pont) beltéri radon felmérés kivitelezése kapcsolódik az Intézethez. A felmérésekhez nyomdetektoros mérés technikát alkalmaztunk, amely a további felmérések esetében is – a nemzetközi és hazai tapasztalatokat figyelembe véve – javasolt annak egyszerűsége, olcsósága és nagy kapacitása miatt.

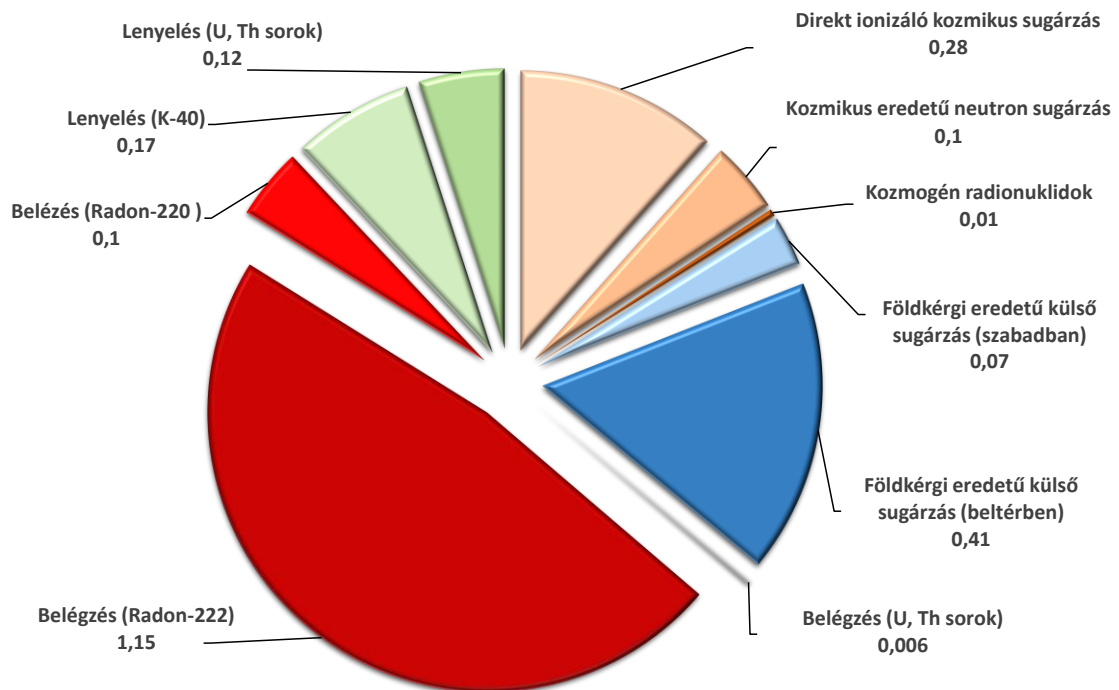
Az Intézetben jelenleg alkalmazott nyomdetektoros mérési eljárás nem megfelelő egy ilyen jelentős - akár több ezer épületet érintő - felmérés kivitelezésére, ezért annak fejlesztése kiemelt feladat. Ennek során figyelembe kell venni, hogy a beltéri radon mérések várhatóan joghatással járó méréssé válnak a közeljövőben. Ennek következtében csak hitelesített eszközzel végezhetőek el a mérések.

Jelen dolgozat célja egy akkreditálható nyomdetektoros mérési eljárás kidolgozása, mellyel nagyszámú radon felmérés kivitelezése biztosított. Ehhez feladatul tűztem ki a jelenlegi módszer szisztematikus felülvizsgálatát, az esetleges kockázati tényezők felmérését és lehetséges kiküszöbölését. Ezek alapján tervezem egy minőségbiztosítható és akkreditálható módszerre javaslatot tenni.

II. ELMÉLETI HÁTTÉR

1. Természetes háttérsugárzás

A Föld élővilágát, így az embert is, kialakulása óta folyamatosan éri természetes ionizáló sugárzás, melyet háttérsugárzásnak is nevezhetünk. Ez egyrészt kozmikus, másrészt földi (teresztriális) eredetű sugárzás, a nagysága pedig a Föld különböző pontjain eltérő. Magyarországon a lakosságot érő háttérsugárzás miatti sugárterhelés mértéke $3,1 \text{ mSv év}^{-1}$ az UNSCEAR 2008-ban kiadott jelentése alapján, míg a népességgel súlyozott világátlag $2,4 \text{ mSv év}^{-1}$ [UNSCEAR, 2008]. Az egyes összetevők közötti megoszlás az **1. ábrán** látható.



1. ábra: A természetes háttérsugárzás megoszlása [mSv év^{-1}] [UNSCEAR, 2008]

Az ICRP (International Commission on Radiation Protection) legújabb ajánlása alapján a radontól származó dózis jóval magasabb, mint azt korábban feltételezték. Az új dóziskonverziós tényezővel számolva (7000 óra/év tartózkodási idő és 0,4-es egyensúlyi faktor esetén) a radontól származó dózis világátlaga $1,86 \text{ mSv/év}$ [ICRP-137, 2017]

1.1. Kozmikus sugárzás

A kozmikus sugárzás a Földön kívülről származó, nagy energiával rendelkező részecskék alkotta sugárzás. Eredetük alapján megkülönböztetünk galaktikus és szoláris kozmikus sugárzást, valamint a van Allen sugárzási övből származó sugárzást [Spurny, 2001].

A galaktikus kozmikus sugárzás (GCR) a Naprendszeren kívülről származik. Nagyrészt protonokból (~85%) áll, de emellett tartalmaz hélium atommagot (~12%), elektronokat (~2%) és egyéb atommagokat (~1%) is. Energiája elérheti akár a 10^{20} eV-ot is [NCRP, 1989].

A szoláris kozmikus sugárzás (SCR) a Napból származik és szinte teljes mértékben protonokat tartalmaz (~99%). Energiája jóval kisebb: csak ritkán éri el a 100 MeV-ot [Spurny, 2001].

A Föld mágneses tere által befogott protonok és elektronok alkotják a Van Allen sugárzási öveket. Ezek a felszíntől 3 000 és 22 000 km magasságban találhatóak. Az övek részecskegyorsítóként is értelmezhetőek, ahol a befogott protonok energiája a néhány száz MeV-ot, míg az elektronok energiája a pár MeV-ot érheti el [Spurny, 2001].

A légkörbe belépő kozmikus sugárzás kapcsolatba kerül az ott lévő atomokkal, molekulákkal és magreakciók révén kozmogén radionuklidokat hoz létre. Ezek közül a legfontosabbak a H-3, C-14 és Be-7 [UNSCEAR, 2008]. A kozmogén radionuklidok részt vesznek a Földön zajló folyamatokban, és beépülhetnek az élő szervezetekbe, így az emberbe is.

1.2. Földkérgi eredetű (terresztriális) külső sugárterhelés

A földkérgi eredetű, ún. primordiális radionuklidok minden környezeti elemekben, valamint az élő szervezetekben is megtalálhatóak eltérő mennyiségben és megjelenési formában. Ezen izotópokra általánosan jellemző, hogy felezési idejük összemérhető a Föld korával és a környezetben radioaktív bomlástermékeiket is megtalálhatjuk. A külső sugárterhelés ezen izotópok gamma-sugárzásából adódik, a legjelentősebb környezeti elem pedig a talaj [UNSCEAR, 2008].

A legfontosabb primordiális radionuklidokat felezési idejükkel [Prelas et al., 2016] és a talajban mérhető átlagos koncentráció értékeikkel [UNSCEAR, 2008] az **1. táblázat** tartalmazza.

1. táblázat: A legfontosabb földkérgi radioizotópok

Radionuklid	Felezési idő [év]	Átlagos koncentráció a talajban [Bq kg ⁻¹]
U-238	$4,47 \times 10^9$	33
Th-232	$1,40 \times 10^{10}$	45
K-40	$1,25 \times 10^9$	412

A talaj mellett az építőanyagok is tartalmazhatnak – akár jelentős mennyiségben is – természetes radionuklidokat. Ennek következtében a szabadban és az épületekben mérhető gamma-dózisteljesítmények értékei eltérnek: míg az előbbinél a világátlag 58 nGy h^{-1} , addig az utóbbi esetében 84 nGy h^{-1} [UNSCEAR, 2000].

1.3. Földkérgi eredetű belső sugárterhelés

A teresztriális radionuklidok nemcsak külső sugárterhelésként okozhatnak problémát. Különböző útvonalakon keresztül (lenyelés, belélegzés, bőrön keresztüli felszívódás) bekerülhetnek a szervezetbe is. A belélegzett izotópok közül a legfontosabb a radon és annak bomlástermékei, melyek a természetes háttérsugárzás közel feléért felelősek. Az élelmiszerekben és ivóvízben megtalálható nuklidok közül általában a K-40, Ra és U izotópok a legfontosabbak. A földkérgi izotópok közül több komoly problémát is okozhat, mivel feldúsul a szervezet egyes részein és hosszú ideig ott is marad [UNSCEAR, 2008].

1.4. Mesterséges forrásokból származó sugárterhelés

A természetes források mellett az emberiséget antropogén eredetű sugárzások is érhetik, melyek mesterségesen előállított izotópokból származnak. Ezeket alkalmazzák a gyógyászatban (röntgen, CT, sugárterápia stb.), iparban (radiográfia, ellenőrző rendszerek, stb.), kutatás-fejlesztésben (kutatóreaktorok), energiatermelésben (atomerőművek), de a békés célú felhasználás mellett katonai célokra (nukleáris fegyverkezés) is használják. Normál működés során is számolnunk kell az ezek okozta sugárterheléssel, de egy baleseti helyzetben nagyságrendekkel is növekedhet az érintett lakosság terhelése [UNSCEAR, 2008].

2. Radon

A radon egy természetes előfordulású, színtelen, szagtalan, kémiaileg inert, radioaktív nemesgáz. A legnehezebb nemesgáz, magas olvadási- és forrásponttal. Hideg vízben jobban oldódik: az oldhatósága a hőmérséklet növekedésével csökken. Rendszáma 86, tömegszáma 200 és 226 között változhat: összesen 27 izotópja van, melyek mindegyike radioaktív [Cothorn és Smith, 1987].

A radon izotópjai közül a három legfontosabb a Rn-222, Rn-220 és a Rn-219. Ezek fontosabb adatait a **2. táblázat** tartalmazza [Cothorn és Smith, 1987].

2. táblázat: A radon fontosabb izotópjai és néhány tulajdonságuk [Cothorn és Smith, 1987]

Izotóp	Felezési idő	Alfa részecske energiája [MeV]	Bomlási sor
Rn-219 (aktinon)	4 s	6,82	U-235
Rn-220 (toron)	55 s	6,29	Th-232
Rn-222 (radon)	3,82 nap	5,49	U-238

A táblázatban szereplő nuklidok közül a Rn-219 hatása elhanyagolható, mivel anyaeleme, az U-235 a természetes urán mindössze 0,72%-át teszi ki. Másrészt a felezési ideje nagyon rövid ahhoz, hogy képes legyen szilárd közegből kijutni [Cothorn és Smith, 1987].

A Rn-220 (továbbiakban toron) a Th-232 bomlási sorában található, közvetlen anyaeleme a Ra-224. Szintén rövid felezési idővel rendelkezik, de jelentős tórium-tartalom esetén nagy mennyiségben juthat ki a szilárd mátrixból. Egészségügyi hatását és a hozzá kapcsolódó problémákat az utóbbi néhány évtizedben kezdték el vizsgálni [Kovács, 2010].

A Rn-222 (továbbiakban radon) az U-238 bomlási sorában található, közvetlen anyaeleme a Ra-226. Felezési ideje elegendően hosszú ahhoz, hogy kilépjen a szilárd közegből és lakóterekben, zárt helyeken feldúsuljon. A radon és bomlástermékeinek egészségkárosító hatása igencsak jelentős, régóta ismert és vizsgált probléma [ICRP-65, 1993].

2.1. A radon és bomlástermékeinek egészségkárosító hatása

Közép-Európában már a 16. században megfigyelték a bányászok körében a magas légzőszervi megbetegedéseket és az ezek miatti nagymértékű elhalálozásokat. Az 1800-as évek végén sikerült azonosítani a tüdőrákot, mint a halálesetek fő okát. Fél évszázad elteltével már a radont jelölték meg, mint a betegség kialakulásának egyik igen fontos okozóját. Az 1950-es években kezdődtek meg a bányák légtérében található radon meghatározására irányuló felmérések, amelyek kezdetben igencsak kis figyelmet kaptak [ICRP-65, 1993].

Az USA Ionizáló sugárzások biológiai hatásaival foglalkozó tudományos bizottsága több jelentést is kiadott, melyek közül a BEIR IV egy összegzést adott a bányászok körében végzett radon felmérésekről. Az eredmények azt mutatták, hogy a radon aktivitáskoncentrációjának növekedésével emelkedett a tüdőbetegségek, főként a tüdőrák kialakulásának kockázata [BEIR IV, 1988].

A bányákban végzett felmérések eredményei alapján az épületekben lévő radon hatásairól nem lehetett következtetéseket levonni. A bányákban ugyanis számos egyéb karcinogén tényező is jelen van, melyekkel épületek esetében nem kell számolnunk. Így a lakóházakra vonatkozóan is felméréseket kellett elvégezni, melyek az 1980-as évek elején kezdődtek el [WHO, 2009]. A felmérések eredményeinek vizsgálata közül a legjelentősebb Darby és munkatársainak jelentése, melyben nagy esetszám mellett (7148 tüdőrákos és 14 208 kontroll személy) vontak le következtetéseket. Megállapították, hogy magasabb beltéri radon koncentráció mellett megnövekszik a tüdőrák kialakulásának kockázata. Ennek mértékét a dohányzás tovább emelheti [Darby et al., 2005].

A Darby-féle elemzés mellett Amerikában [Krewski et al., 2005] és Ázsiában is végeztek elemzéseket a meglévő adatok alapján, melyek mindegyike hasonló eredménnyel zárult: a radon koncentráció növekedésével nő a tüdőrák kialakulásának valószínűsége. A növekedés mértéke kismértékű eltérést mutat: 8-13% / 100 Bq m⁻³-el nő a kockázat [WHO, 2009].

Az egészségügyi kockázatot kismértékben jelenti a radon, a nagyobb problémát annak bomlástermékei okozzák. A belélegzett radon jelentős része ugyanis kilégzés során távozik a szervezetből és mindössze 1-2 %-a bomlik el éppen a tüdőben. A radon bomlása

során kilépő alfa-részecske jelentős károsodásokat képes okozni a környező szövetekben [UNSCEAR, 2000].

A radon bomlástermékei – ellentétben a radonnal – szilárd részecskék, így viselkedésük a levegőben teljesen eltérő. A fontosabb bomlástermékek a **3. táblázatban** láthatóak [Cothorn és Smith, 1987].

3. táblázat: A radon bomlástermékei [Cothorn és Smith, 1987]

Radon bomlástermék	Felezési idő	Bomlás típusa
Po-218	3,05 perc	alfa
Pb-214	26,80 perc	béta
Bi-214	19,70 perc	béta
Po-214	164 μ s	alfa
Pb-210	22,3 év	béta
Bi-210	5,01 nap	béta
Po-210	138,4 nap	alfa
Pb-206	stabil	

A keletkező bomlástermékek pozitív töltésű ionokként a levegőben jelenlévő porrészecskékhez és egyéb szilárd részecskékhez tapadhatnak (tapadt frakció). A belélegzett aeroszolok a méretüktől függően a légzőrendszer különböző részeiben lerakódhatnak. A megtapadt bomlástermékek alfa- vagy béta- részecskét bocsátanak ki, melyek komoly károsodásokat okozhatnak a környező szövetekben. A zárt épületben való dohányzás során a jelenlévő aeroszolok mennyisége megnő, így sokkal nagyobb számban alakulnak ki radioaktív aeroszolok. Ezáltal nagyobb lesz a légzőrendszerbe kerülés mértéke, vagyis alapvetően a tüdőrák kialakulásának kockázata megnövekszik [Cothorn és Smith, 1987].

2.2. Beltéri radon felmérések

Az épületekben lévő radon főként a talajból és az építőanyagok szilárd fázisából áramlik ki. A kiáramlás mértékét mindkét esetben a Ra-226 tartalom, ezen felül talajnál a nyomás, hőmérséklet, egyéb meteorológiai paraméterek, építőanyagoknál pedig a belső szerkezet (porozitás, stb.) befolyásolja [UNSCEAR, 2006]. Egyéb forrásként jelentkezhethet még az épületben felhasznált víz és földgáz, de ezek csak ritkán tartalmaznak nagy mennyiségben radont [NRC, 1999].

Az 1950-es években megkezdődött bányafelmérések folytatásaként az 1980-as években a lakóházak beltéri radon koncentrációjának meghatározása is elkezdődött. Nagy-Britanniában közel 2000 lakóházat mértek fel, amely alapján meghatározták, hogy a brit átlag $20,5 \text{ Bq m}^{-3}$. Ezen felül meghatározták a radon szempontjából problémás területeket, ahol jóval magasabb beltéri koncentráció értékek mérhetőek, mint az ország többi részén [Green et al., 1985]. Nagy-Britanniában az 1990-es években készültek el a végleges radon térképek, amelyekhez kapcsolódó felmérések során összesen 40 000 ház esetében találtak a referenciaszintnél magasabb értékeket [Green és Lavey, 2005].

Franciaországban 1982 óta folytatják a beltéri radon meghatározására irányuló felméréseket, mely során több, mint 12 000 radon adatot sikerült összegyűjteniük. Az adatok elemzése és értékelése alapján megfigyelték a radon koncentráció szezonális ingadozását. Franciaországban az átlagos beltéri radon koncentráció 63 Bq m^{-3} [Billon et al., 2005].

Olaszországban 1989 és 1998 között 5631 lakóházban mérték a radon koncentrációt, mely alapján meghatározták, hogy a népességgel súlyozott átlag 70 Bq m^{-3} [Bohicchio et al., 2005]. 2005 és 2010 között Kelet-Szicíliában egy másik felmérés is történt, amelynek eredményeképpen megállapították, hogy ezen a területen az országos átlaghoz képest magasabb átlagérték mérhető (90 Bq m^{-3}) [Catalano et al., 2012]. 2006 és 2008 között Olaszország középső részén két, egymáshoz közel eső régiót hasonlítottak össze, ahol az egyiknél magas volt a geotermikus kutak száma. Iskolákban és óvodákban végezték a méréseket és megállapították, hogy a magasabb geotermikus aktivitás esetén a radon koncentráció kétszer magasabb volt (98 Bq m^{-3} és 45 Bq m^{-3}) [Ciolini és Mazed, 2010]. Egy másik esetben Nápoly környékén lévő 30 iskolában végeztek radon méréseket és az eredmények alapján az átlagos koncentráció 144 Bq m^{-3} volt [Venoso et al., 2009].

Az 1980-as években Hollandiában is elkezdődtek a lakóházakban végzett radon felmérések. Mostanáig nagyjából 2500 lakóházban végeztek mérések, amelyek alapján a népességgel súlyozott nemzeti átlaguk $15,3 \text{ Bq m}^{-3}$ [Smetsers et al., 2016; Smetsers et al., 2018].

Ausztriában a hosszútávú felmérések során összesen közel 7500 lakóházat vizsgáltak. A felső-ausztriai térségben 139 Bq m^{-3} , míg Alsó-Ausztriában 163 Bq m^{-3} volt a beltéri radon koncentráció átlagos értéke [Friedmann et al., 1996].

Norvégiában az 1980-1990-es években számos felmérést végeztek el, összesen 75 000 lakóépületben. Az átlagos éves radon koncentráció az országban 89 Bq m^{-3} . Itt található Európában a legmagasabb lakóházakban mért érték ($50\,000 \text{ Bq m}^{-3}$) [Strand et al., 2005].

Montenegróban 2002-ben kezdődtek el a hosszútávú beltéri felmérések. Összesen közel 1000 lakóházban történtek mérések. Az eredmények alapján az átlagérték 110 Bq m^{-3} volt, és a mérési pontok 8%-ánál haladta meg a vonatkoztatási szintet [Vukotic et al., 2018].

Romániában Cucos és munkatársai egyidejűleg vizsgálták a beltéri radon koncentrációt, valamint a talajgázban és vízben mérhető radon szintet. Összesen 1855 mérési pontot jelöltek ki és az átlagos beltéri radon koncentráció érték 90 Bq m^{-3} volt, 2592 Bq m^{-3} maximum értékkel [Cucos et al., 2017]. Egy másik felmérésben egy potenciálisan veszélyeztetett területet választottak, ahol 303 házban mérték a beltéri radon koncentrációt. Az egy évre vonatkoztatott átlag 241 Bq m^{-3} volt és a mérési pontok 28%-a esetén haladta meg a vonatkoztatási szintet [Cucos et al., 2012]. Ezek az értékek hasonlóak a korábban, szintén ezen a területen elvégzett felmérés eredményeihez [Sainz et al., 2009].

Oroszországban több mint 3000 lakóház és közel 300 iskola és óvoda bevonásával végeztek beltéri radon felmérést Sverdlovsk oblast területén. A legkritikusabb területen az átlag koncentráció 150 Bq m^{-3} volt, és a vizsgált épületek 22%-ánál haladta meg a 200 Bq m^{-3} értéket [Zhukovsky et al., 2012].

Írországban az első nemzeti radon felmérés 1992 és 1999 között zajlott. Ennek során 12 649 házban végeztek radon koncentráció mérést. Az átlagos radon koncentráció 89 Bq m^{-3} volt [Fennell et al., 2002]. Ennek eredményeit figyelembe véve 2015-ben egy kisebb létszámú (755 résztvevő) felmérést végeztek el, ahol a korábbi felmérés alapján választottak ki mérési pontokat. A kapott éves átlagkoncentráció 82 Bq m^{-3} volt [Dowdall et al., 2017].

Több kisebb radon felmérést követően [Papastefanou et al., 1994] Görögországban is elvégeztek egy nagy mintaszámú felmérést. 1277 mérési pontot jelöltek ki 1995 és 1998 között. Az éves átlagkoncentráció 55 Bq m^{-3} -nek adódott és a házak 1,1 %-nál haladta meg az akkor érvényben lévő vonatkoztatási szintet (400 Bq m^{-3}) [Nikolopoulos et al., 2002]. A következő nagyobb volumenű felmérés 1999 és 2006 között történt. Clouvas és munkatársai 561 munkahelyen végeztek radon felmérést. Az éves átlagkoncentráció

123 Bq m⁻³, míg a legmagasabb mért érték 695 Bq m⁻³ volt [Clouvas et al., 2007]. A legutóbbi felmérés 1999 és 2010 között történt 512 iskolában Görögország 13 tartományából 8-ban. Az éves átlag 149 Bq m⁻³, míg a maximum érték 958 Bq m⁻³ volt [Clouvas et al., 2011].

Az Egyesült Államokban is számtalan felmérést végeztek az 1980-as évektől kezdődően. Az eredmények alapján az éves átlagos radon koncentráció 46 Bq m⁻³, és mindössze a lakások 6%-ban haladja meg az országban érvényben lévő cselekvési szintet (150 Bq m⁻³) [Marcinowski et al., 1994; Marcinowski, 1992].

Japánban is készültek nagy mintaszámmal rendelkező felmérések. Ezekben több ezer munkahelyet és lakóházat vizsgáltak. A mérési eredmények alapján az átlagos éves radon koncentráció 18 Bq m⁻³ [Sanada et al., 1999; Oikawa et al., 2006].

2.3. Magyarországi radon felmérések

Az 1980-as években Magyarországon is megkezdődtek a beltéri radon aktivitáskoncentrációjának és az attól származó sugárterhelés meghatározására irányuló felmérések. Ezek közül az első Somogyi és munkatársai nevéhez fűződik, akik 1985 és 1988 között 122 helyszínen végeztek radon méréseket. A felmérés eredményeképpen meghatározott átlagos radon koncentráció érték 55,2 Bq m⁻³ volt [Somogyi et al., 1989].

Az 1990-es években egy nagyobb volumenű felmérés is történt: Nikl 998 lakásban végzett radon koncentráció meghatározást 1993 és 1994 között. Az éves átlagos érték 128 Bq m⁻³ volt [Nikl, 1996]. Az akkor érvényes ICRP ajánlás 200 és 600 Bq m⁻³ közötti cselekvési szintet ajánlott. [ICRP-65, 1993] A felmért lakások 16%-ánál a radon koncentráció meghaladta a 200 Bq m⁻³, míg 1,5%-ánál a 600 Bq m⁻³ ajánlott cselekvési szintet [Nikl, 1996].

Hámori és munkatársai 1994 és 2004 között 15 277 mérési ponton vizsgálták a beltéri radon koncentrációt. Az átlagos éves radon koncentráció 62 Bq m⁻³ volt. Megállapították, hogy nagyvárosokban jóval kisebb arányban fordulnak elő magas radon koncentrációjú terek, míg kisebb falvak esetében jóval gyakrabban. Továbbá meghatározták, hogy melyek azok a magyarországi területek, ahol várhatóan magas lesz a lakóházak radon koncentrációja a talaj tulajdonságainak köszönhetően [Hámori et al., 2006].

Szeiler és munkatársai 2011-2012 között 80 lakás és munkahely felmérését végezték el különböző nyomdetektorok alkalmazásával. Az átlagos radon koncentráció 79 Bq m^{-3} volt és mindössze egy esetben haladta meg a 200 Bq m^{-3} értéket [Szeiler et al., 2012].

A visegrádi országok együttműködésének keretein belül több radon felmérés is készült Magyarországon, Szlovákiában és Lengyelországban. 2011-2012-ben összesen 156 épületben vizsgálták a beltéri radon koncentráció értékeit. Az éves átlagkoncentráció Szlovákiában 1, míg Lengyelországban 3 esetben haladta meg a 300 Bq m^{-3} vonatkoztatási szintet [Müllerova et al., 2014; Müllerova et al., 2016]. 2015-2016-ban a három országban 20 óvodában történtek felmérések 3 hónapos szakaszokra bontva. Ennek előzetes eredményeként megállapították, hogy az első két szakaszban (2015 október és 2016 március között) a vizsgált óvodákban 86 és 82%-ban maradt a radon szint az előírt vonatkoztatási szint alatt [Müllerova et al., 2017].

Az UNSCEAR 2006-ban kiadott jelentése alapján Magyarországon az éves átlagos radon aktivitáskoncentráció 82 Bq m^{-3} [UNSCEAR, 2006]. Bár az átlagérték a vonatkoztatási szint alatt van, a felmérések bebizonyították, hogy ennél 300 Bq m^{-3} -nél magasabb értékek is előfordulhatnak. Fontos tehát, hogy azonosítsuk ezeket a problémás területeket, hogy a megfelelő radon csökkentési eljárás alkalmazásával elfogadható szintre csökkentsük az egészségkárosodás kockázatát.

2.4. Jogszábeli háttér

Az egyes országok sugárvédelmi szabályozásának alapja a nemzetközi szervezetek által kiadott ajánlások és irányelvek. A legfontosabb ilyen szervezetek az ICRP (International Commission on Radiation Protection), az UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on Effects on Atomic Radiations) és az ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Az ICRP a legújabb tudományos kutatások eredményeit és tapasztalatait összegyűjtve publikációkat jelentet meg. Ezeknek az ajánlásoknak nagy része a mérés technikához és a sugárvédelmi szabályozáshoz ad alapot [Fehér és Deme, 2010]. A szervezet által 2014-ben kiadott ICRP Publications sorozat 126. kötete adja meg a munkahelyekre és a lakóházakra javasolt maximális radon szint értékét (300 Bq m^{-3}) [ICRP-126, 2014].

Az ajánlások gyakorlati alkalmazásához szükséges technikai megoldások az IAEA (International Atomic Energy Agency) vezetésével készülnek. Az IAEA egyik fő feladata

a lakosság (mind természetes, mind mesterséges eredetű) ionizáló sugárzásokkal szembeni védelme. Ennek egyik legfontosabb kiadványa a biztonsági szabályzatot (International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, röviden: IBSS), melyet néhány évente felülvizsgálunk. A legújabb IBSS 2014-ben jelent meg, amelyben – az ICRP ajánlásaival összhangban – a beltéri radon aktivitáskoncentrációját 300 Bq m^{-3} értékben maximalizálták. A szabályzat alapján ennél magasabb szintek esetén beavatkozás szükséges [IAEA-IBSS, 2014].

Az IAEA biztonsági szabályzatát alapul véve dolgozza ki az Európai Unió a sugárvédelemmel kapcsolatos irányelveit. A legújabb IBSS alapján adták ki a 2013/59/EURATOM (2013.december 5.) irányelvét. Ebben az ICRP és IAEA által megadott radon szintet határozták meg vonatkoztatási szintnek. Ezen felül a tagországoknak feladatul tűzték ki egy nemzeti radon cselekvési terv kidolgozását [EUBSS, 2013].

Magyarországon az atomenergia békés célú alkalmazásának jogszabályi alapjait a 1996. évi CXVI. törvény az atomenergiáról határozza meg [1996. évi CXVI. törvény]. Ennek a végrehajtási rendeleteként született meg a 16/2000. (VI.8) EüM rendelet, amely a radon koncentrációra vonatkozóan 1000 Bq m^{-3} határértéket írt elő munkahelyekre. [16/2000. EüM rendelet]. Ezt a rendeletet váltotta a 487/2015. (XII.30.) Kormányrendelet. Ebben – az új Európai Unió direktívát figyelembe véve – mind lakóházakra, mind munkahelyekre vonatkozóan 300 Bq m^{-3} radon vonatkoztatási szintet határoztak meg [487/2015. Kormányrendelet]. Továbbá az 1862/2017. (XI.29.) kormányhatározatban megfogalmazták a Nemzeti Radon Cselekvési Terv kidolgozását és végrehajtását szolgáló intézkedéseket [1862/2017. Kormányhatározat].

2.5. Radon mérési módszerek

A radon meghatározására számos módszert dolgoztak ki, melyek más-más alapelven működnek. A mérési módszereket többféle szempontból is csoportosíthatjuk: közvetett (a radon alfa-részecskéjét detektáljuk) vagy közvetlen (a bomlástermékeinek alfa-, béta- vagy gamma-sugárzását mérjük), mérés időtartama alapján (pillanatnyi, folyamatos, integrális) és az alkalmazható detektortípusok alapján [WHO, 2009].

2.5.1. Közvetlen és közvetett módszerek

A közvetlen radon mérési módszerek esetén a radon bomlásakor keletkező alfa-részecskéket detektáljuk a bomlástermékeiből (Po-218, Po-214) származó alfa-részecskékkel együtt. Az alfa-részecskék detektálása során gondot jelent azok rövid hatótávolsága. Így a detektorok kialakításánál figyelembe kell venni, hogy a minta és a detektor között a lehető legkevesebb abszorbens legyen. Meghatározásában nagy előnyt jelent nagy fajlagos ionizációs képessége, a detektor érzékeny térfogatába lépve 100%-os valószínűséggel lép kölcsönhatásba a detektor anyagával [Nagy, 1983].

A közvetett radon mérési módszerek esetében nem a radonból származó alfa-részecskét detektáljuk, hanem a bomlástermékeinek alfa-, béta- vagy gamma-sugárzását. Vagyis a gáz halmazállapotú radon bomlásakor keletkező szilárd részecskéket összegyűjtjük és a belőlük származó sugárzást detektáljuk. Az összegyűjtés történhet nagyfeszültségű térrel, aktív szénrel, stb. [Nagy, 1983; Gervino et al., 2004; Limoto et al., 2004].

2.5.2. Különböző időtartamú mérések

Egy szoba légtérét vizsgálva folyamatosan változó értékeket kaphatunk a szellőztetés radon csökkentő hatása miatt, így egy adott időpontban történő meghatározással nagyon alá vagy fölé becsülhetjük a koncentrációt. A radon pillanatnyi aktivitáskoncentrációjának meghatározásakor csak tájékoztató adatokat nyerhetünk. Erre a leggyakrabban a Lucas-cellás mérési módszert alkalmazzák [WHO, 2009].

A néhány napig vagy néhány hétig tartó mérésekhez aktív mérőeszközöket alkalmaznak, melyeket magas költségük miatt hosszútávú (egész éves) mérésekre nem használnak. Legtöbbször óránkénti (esetleg félóránkénti) átlagokkal számolnak, így a napi ingadozások már megfigyelhetőek. Ezek az aktív mérőrendszerek legtöbbször félvezető detektorral, szcintillációs cellával vagy ionizációs kamrával felszereltek [WHO, 2009].

A korábban bemutatott radon felmérések esetében az integrális méréseket alkalmazzák. Ennek során a mérési pontra kihelyeznek egy radon mérő detektort, amely hosszú időn keresztül (néhány hét vagy hónap) gyűjti a radontól származó jeleket. A mérési időszak végén begyűjtik és kiértékelik a detektorokat. Az így kapott eredmény az adott időszakra vonatkozóan adja meg az átlagos radon koncentrációt. Ezzel a módszerrel hosszútávú (szezonális) változások figyelhetőek meg. Erre a mérési módszerre olyan detektorokat alkalmazhatunk, amelyek kisméretűek, olcsók, egyszerűek, tehát nagyszámban kihelyezhetőek a mérési pontokra és az esetleges elvesztésük nem okoz jelentős anyagi kárt [WHO, 2009].

2.6. Radon mérésére alkalmas detektorok

A radon mérésére alkalmas eszközöket és azok karakterisztikáját a **4. táblázatban** láthatjuk [WHO, 2009].

4. táblázat: Radon mérésére alkalmas mérés technikák

Detektor típusa	Aktív/passzív módszer	Tipikus mérési időtartam	Költsége
Szilárdtest nyomdetektorok (SSNTD)	passzív	1-12 hónap	alacsony
Aktívszenes detektor	passzív	2-7 nap	alacsony
Elektret detektor	passzív	5 nap – 1 év	közepes
Folyamatos radon monitor	aktív	1 óra – évek	magas

2.6.1. Passzív detektorok

A szilárdtest nyomdetektorok szakirodalomban használt rövidítése (SSNTD) az angol megnevezésből származik: **s**olid **s**tate **n**uclear **t**rack **d**etector. A radon mérési gyakorlatban a polikarbonát és a cellulóznitrát alapú detektorok terjedtek el. A mérés során az alfa-részecskékre érzékeny detektort egy diffúziós kamrába helyezik, és ebben kerül ki a mérési pontra. Lakóterek esetében a mérési periódus általában 1-3 hónap. A módszer részleteit a következő fejezetben ismertetem [Bódizs, 2006].

Az aktív szenes mérések alapja, hogy a kihelyezett aktív szén adszorbeálja a felületén a helyiségben jelenlévő radon gázt. Ennek a módszernek korlátot szab az aktív szén megkötési képessége, így csak néhány napos mérési idővel alkalmazható. A mintavétel után elzárják az aktív szenet a környezettől, megvárják a radon és bomlástermékei közötti

egyensúly beállítását, majd elvégzik a gamma-spektrometriai elemzést. Ennek során a bomlástermékek gamma-sugárzásán keresztül mérhető a radon aktivitáskoncentrációja [WHO, 2009].

Az elektret detektor egy passzív radon mérő eszköz, ami egy műanyag fallal körbevett ionizációs kamra. A mérés során a kamrába diffundál a radon és a bennlévő levegőt ionizálja. A keletkező ionok a kamra falához vándorolva csökkentik az elektromos töltöttségét. Ennek a csökkenésnek a mértéke arányos lesz a légtérben lévő radon aktivitáskoncentrációval [Gervino et al., 2004].

2.6.2. Aktív detektorok

Az alkalmazható aktív eszközök közé tartozik az ionizációs kamra, szcintillációs és félvezető detektorok.

Az ionizációs kamra a gázionizációs detektorok csoportjába tartozik. A radonból kilépő alfa-részecske ionizációt okoz a detektortérben, és a töltések összegyűjtése miatt keletkező áram arányos lesz a radon aktivitáskoncentrációjával. Mintavételes és folyamatos üzemmódban is alkalmazhatóak [Bódizs, 2006].

A radon mérésére alkalmas szcintillációs detektor a Lucas-cella, amely egy fémhenger. Belső felülete vékony ZnS(Ag) porral bevont, amelyben alfa-részecskékkel való kölcsönhatás eredményeképpen fény keletkezik. Ez a fény egy fotoelektronsokszorozó segítségével mérhető, elektromos jellé alakítható. Rendkívül elterjedt mérési módszer, mivel nagyon egyszerűen kivitelezhető [Abbady et al., 2004].

A harmadik típusba tartozik a félvezető detektor. A radon tartalmú levegőt egy szűrőn keresztül a mérőkamrába juttatjuk és a radon és bomlástermékeinek aktivitását mérjük. A teljes alfa-beütésszámból határozható meg a radon aktivitáskoncentrációja [Cothorn és Smith, 1987].

3. Szilárdtest nyomdetektorok

A nyomdetektorok alkalmazásának kezdete 1958-ra tehető, amikor Young felfedezte az első nyomokat LiF kristályban. A kristályt egy urán fólia mellé helyezte, melyben termikus neutronokkal maghasadást idézett elő. A hasadványtermékek becsapódtak a kristályba és sérüléseket, ún. nyomokat hoztak létre. A károsodás helyén egy kémiailag aktívabb terület alakult ki a nem sérült területekhez képest [Young, 1958]. A következő évben Silk és munkatársai fedeztek fel hasonló sérüléseket csillámban, melyeket transzmissziós elektronmikroszkóppal vizsgáltak meg [Silk et al., 1959].

A nyomdetektorok működésének alapja, hogy egy nagyméretű, nehéz, töltött részecske az anyagban jelentős mértékű ionizációt okoz. Ez a nagy energiával rendelkező részecske főként az elektronokkal lép kölcsönhatásba és azoknak adja át az energiáját. Például egy 6 MeV energiájú alfa-részecske a cellulózban haladva 150 000 ionpárt hoz létre. Mivel a részecske 4 μm -t képes megtenni az anyagban, ez 3700 ionpár/ μm -t jelent, vagyis 3-4 ionpár nanométerenként. Az ionizáció eredményeképpen kémiai reakciók is végbemennek az anyagban, amely során szabadgyökök keletkeznek. Az alfa-részecske útja mentén ezeknek a kémiailag aktív komponenseknek a feldúsulása figyelhető meg, amelyet látens nyomnak nevezünk [Nikezic és Yu, 2004].

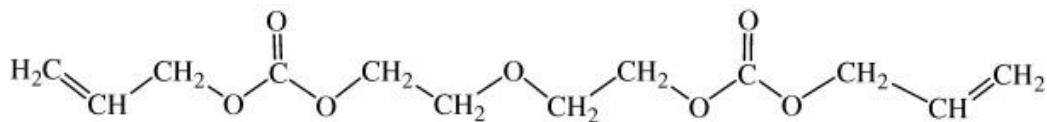
Ez a jelenség számos anyagban megfigyelhető. A nyomdetektorként alkalmazható legfontosabb anyagok az **5. táblázatban** láthatóak. A legjellemzőbb a hosszú molekulákat tartalmazó anyagokban (pl.: cellulóz nitrát, polikarbonátok, stb.), ezért ezek a legelterjedtebben alkalmazott nyomdetektor alkotók. A vezető és félvezető anyagok esetében rekombinációs folyamat figyelhető meg, ami a látens nyomok instabilitását okozza [Fleischer et al., 1975].

5. táblázat: Nyomdetektorként alkalmazható anyagok [L'Annunziata, 2012]

Kristályok	Üvegek	Polimerek
Apatit	Természetes eredetű üvegek	Poliállil-diglikol-karbonát
Cirkon	Mesterséges eredetű üvegek	Polikarbonát
Olivin		Cellulóznitrát
Csillám		Polietilén-tereftalát

Az anyagban keletkező látens nyomok szabad szemmel nem láthatók, csak nagy felbontású mikroszkópok segítségével lehet a sérüléseket észrevenni. Ezért fontos a nyomok méretének megnövelése, hogy egy optikai mikroszkóp alkalmazásával már láthatóak legyenek. Ezt a folyamatot nevezzük maratásnak [Nikezic és Yu, 2004].

A leggyakrabban alkalmazott nyomdetektorok közé tartozik a poliallil-diglikol-karbonát alapú, CR-39 típusú detektor [Cartwright és Shirk, 1978], melynek monomere a **2. ábrán** látható. A másik elterjedt detektoranyag a cellulóznitrát, melyet LR-115 típusjelzéssel forgalmazznak. Ezeken kívül természetes anyagokat is használnak, főként hasadási termékek meghatározásánál. Ilyen anyagok a csillám [Qureshi et al., 1995], az apatit [Enkelmann et al., 2012] vagy az olivin [Perron és Bourot-Denise, 1988].



2. ábra: CR-39 monomer [Tse et al., 2007]

3.1. Nyomok keletkezése

A nyomdetektorok igen elterjedtek a nukleáris mérések területén egyszerűségük és könnyű kezelhetőségük miatt. Azonban maga a nyom keletkezésének folyamata már korántsem ilyen egyszerű, teljes mértékben még ma sem ismert folyamat.

Az első lépés egy fizikai folyamat, amikor a töltött részecske átadja az energiáját a közegnek és emiatt ionizáció vagy gerjesztés fog bekövetkezni. Ez a jelenség nagyon gyorsan (néhány pikoszekundum alatt) lejátszódik. Az így keletkező szabad elektronok ionizáció vagy gerjesztés során veszítik el energiájukat további szabad elektronok létrehozása mellett. A második szakasz fizikai-kémiai folyamatokból áll, amely során új kémiai specicsenek keletkeznek. Ezen folyamatok pontos leírására, az anyagban lejátszódó jelenségek pontos ismeretére vonatkozóan számos elmélet született, de még egyik sem nyert bizonyítást [Nikezic és Yu, 2004].

A két legelfogadottabb elmélet az ionrobbanásos (ion-explosion spike model) és a hőtüske modell (thermal-spike model).

Az ionrobbanásos elmélet lényege, hogy a töltéssel rendelkező részecske az anyagban létrehoz egy keskeny csatornát, amely pozitív ionokkal töltött. Az azonos töltések miatt

az ionok között taszítás lép fel, amelynek hatására szétrepülnek és maguk is számos további ionpárt hoznak létre [Fleischer et al., 1965].

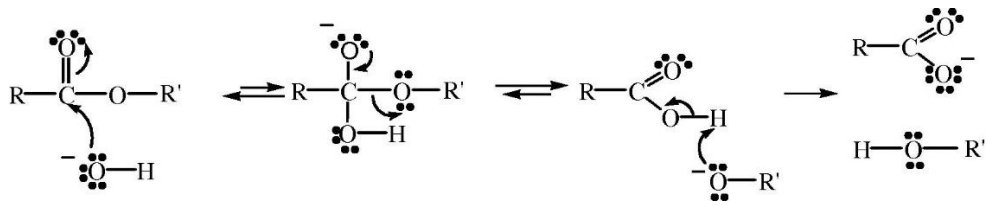
A hőtüske modell alapján az anyagon áthaladó töltött részecskék nemcsak ionizációval és gerjesztéssel veszítenek az energiájukból, hanem – a veszteség nagyon kis részéért – az atommagokkal történő rugalmatlan ütközés felel. Ez az energia hő formájában jelenik meg, ami az anyagban lokális túlmelegedést okoz. A modell azt feltételezi, hogy ez a melegedés fázisátalakulást okoz a detektor anyagában, ami a károsodás fő okozója [Toulemonde et al., 2000].

3.2. A kémiai maratás során végbemenő folyamatok

A maratás során a keletkező látens nyomok méretének növelése és azok fixálása a célunk. Ez a leggyakrabban kémiai kezelést jelent, mely során többféle vegyszert is alkalmazhatnak. Ezek közül a NaOH és a KOH [Charvat és Spurny, 1988] a legelterjedtebbek. Számos tanulmány készült arra vonatkozóan, hogy ezekhez a lúgoldatokhoz egyéb vegyszereket – leggyakrabban alkoholokat [Matiullah et al., 2005; Ashry et al., 2014] - adva, hogyan változik a maratás folyamata. A kémiai kezelést kiegészítve alkalmaznak még elektrokémiai [Sohrabi és Soltani, 2016], ultrahangos [Pandey et al., 1998] vagy mikrohullámú kémiai maratást [Tripathy et al., 2010].

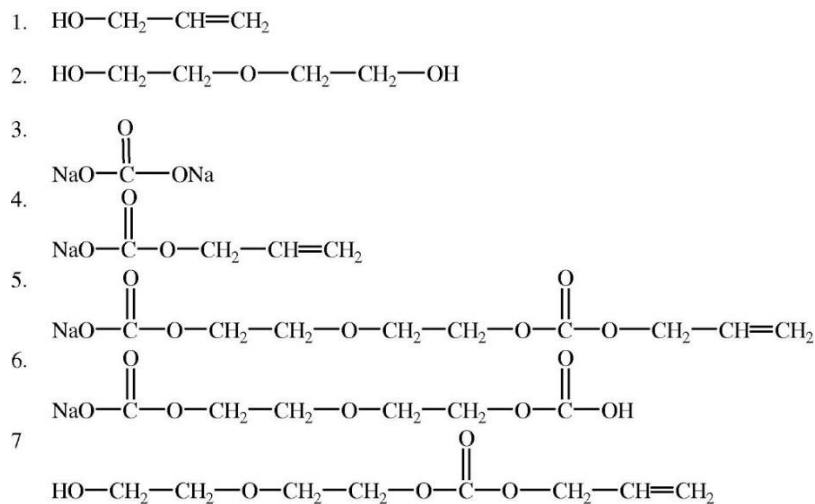
A folyamat alapja, hogy a detektoranyag és a maratószer között reakció lép fel. A kémiai folyamatok a sérült területeken gyorsabban végbemennek, vagyis az eltávolított anyag mennyisége is nagyobb lesz, mint az ép részek esetében. Az adott detektoranyag ép részén lejátszódó folyamatok sebessége nagyjából állandónak tekinthető, ha a maratási körülmények nem változnak [Durrani és Bull, 1987].

Tse és munkatársai vizsgálták meg a CR-39 típusú nyomdetektorok NaOH/víz és NaOH/etanol oldatokban történő maratása során keletkező termékeket [Tse et al., 2007]. Mindkét maratószer esetében ugyanazokat a keletkező vegyületeket találták meg az oldatban. Ez azt az elméletet igazolja, mely szerint a maratás során a hidroxidion az észter hidrolízisén keresztül felszakítja a karbonát észter kötését [Nguyen és Trinh, 1995]. Ennek folyamata a **3. ábrán** látható [Tse et al., 2007].



3. ábra: Az észter csoport hidrolízisének folyamata a maratás során [Tse et al., 2007]

A CR-39 esetében a hidroxidion megtámadja az alkoxi-karbonil csoportban lévő szén atomot és felszakítja a kettős kötést. A folyamat során a polimer lánc feldarabolódik és különböző termékek keletkeznek, melyek a 4. ábrán láthatóak [Tse et al., 2007].

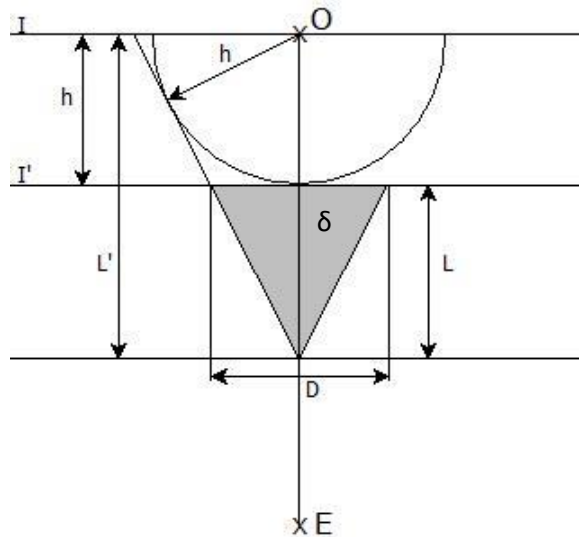


4. ábra: A NaOH/víz és NaOH/etanol maratóoldatokban keletkező termékek [Tse et al., 2007]

3.3. Nyomfejlődés geometriája

A nyomok fejlődésével, a maratás során végbemenő változásokkal kapcsolatban számos kérdés merült fel a detektorok alkalmazása során. A magyarázatokra több elmélet is született, de igazából egyik sem képes a teljes kialakulási folyamatot leírni és megadni a nyomok paramétereinek meghatározási módszerét. A továbbiakban ezeket a magyarázatokat szeretném bemutatni a különböző esetekben.

A legegyszerűbb eset, amikor a sérülést okozó részecske a felületre merőlegesen csapódik be. Ennek vázlatát és a fontosabb jelöléseket az 5. ábrán találjuk.



5. ábra: Maratott nyom alakja és a fontosabb paraméterek (I=eredeti felület; I'=maratott felület; h=maratás során eltávolított réteg; L'=a maratóanyag teljes útja a részecske pályája mentén; D=nyomátmérő; L=nyom mélysége; O=részecske belépési pontja; E=részecske végpontja az anyagban; δ =fejlődési szög) [Nikezic és Yu, 2004]

A nyom kialakulásának feltétele, hogy a maratási sebesség ($V = \frac{V_T}{V_B}$) nagyobb legyen, mint 1. Ez azt jelenti, hogy a sérült rész maratási sebessége (V_T) nagyobb, mint az ép felületé (V_B). A két maratási sebesség meghatározása az **1.** és a **2. egyenlet** alapján történik, ahol t a maratási idő [Tse et al., 2007].

$$h = V_B \times t \quad (1)$$

$$L' = V_T \times t \quad (2)$$

A nyomok pontos keletkezésére, a lejátszódó folyamatok leírására számos modell született, melyek közül a legfontosabbak az alábbiakban részletezem. A nyom keletkezésének leírása – az egyszerűség érdekében – két dimenzióban történik, de mindenképpen fontos megjegyezni, hogy a nyomoknak 3 dimenziós kiterjedésük van.

3.3.1. Nyomfejlődés konstans V_T és normál beesési szög esetén

A maratás paramétereinek meghatározása az állandó V_T esetében a legegyszerűbb. Ez az eset azonban csak akkor áll fenn, ha nagyon nagy a nyom maratási sebessége. Ez csak akkor teljesül, ha nehéz ionok vagy bomlástermékek hozták létre a látens nyomokat [Durrani és Bull, 1987; Nikezic és Yu, 2004].

Az **5. ábra** alapján belátható a következő összefüggés.

$$\tan \delta = \frac{D/2}{L} = \frac{h}{\sqrt{L'^2 - h^2}} \quad (3)$$

Ezek alapján a nyomátmérő egyszerűen meghatározható:

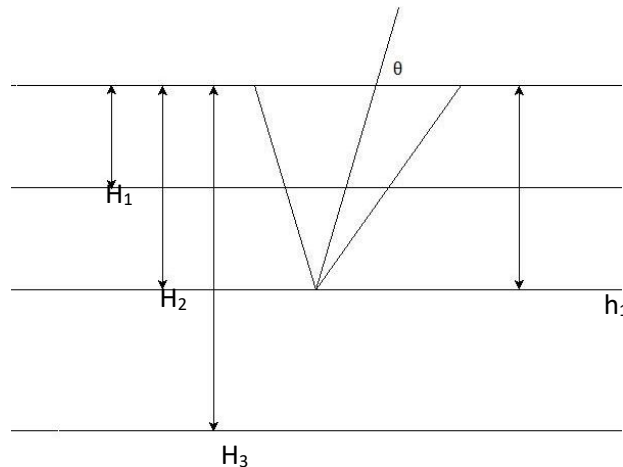
$$D = 2 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{v-1}{v+1}} \quad (4)$$

Ha a maratási sebesség lényegesen nagyobb, mint 1, akkor a négyzetgyök alatti rész 1-nek vehető, vagyis a $D \approx 2h$ [Nikezic és Yu, 2004].

3.3.2. Nyomfejlődés állandó V_T és ferde becsapódás esetén

A legtöbb valós helyzetben ez az eset áll fenn, például a radon és bomlástermékeinek mérésekor is. Az ennél az esetnél lezajló nyomfejlődés folyamatával Somogyi és Szalay foglalkozott [Somogyi és Szalay, 1973].

A nyom keresztmetszete egy ellipszis, amelyet a nagytengelye (D) és a kistengelye (d) egyértelműen leír. A maratás során a nagytengely három (D_1, D_2, D_3), míg a kistengely két (d_1, d_2) fő szakaszon (**6. ábra**) halad át, amelyeket az eltávolított rétegvastagság függvényében lehet értelmezni [Somogyi és Szalay, 1973].



6. ábra: A nyom kialakulásának fázisai ferde becsapódás esetén [Somogyi és Szalay, 1973]

Az első fázisban a nyom alakja egy ellipszis, a harmadik fázisban egy kör, míg a másodikban összetett: részben kör, részben pedig ellipszis. Az első két szakaszban a nagytengely hossza változik, míg a kistengelyé nem. A harmadik fázisban az eltávolított réteg vastagsága meghaladja a h_1 vastagságot – kör alakú nyom keletkezik – és a két tengely hossza megegyezik ($d_2=D_3$) [Somogyi és Szalay, 1973].

A nagytengely hosszának meghatározása az első szakaszban az **5. egyenlet** alkalmazásával adható meg. Ebben a fázisban $0 \leq h \leq H_1$, ahol H_1 értéke a **6. egyenlettel** számolandó [Somogyi és Szalay, 1973].

$$D_1 = 2 \cdot h \cdot \frac{\sqrt{V^2-1}}{V \cdot \sin\theta+1} \quad (5)$$

$$H_1 = \frac{R}{V} + R \cdot \frac{V \cdot \sin\theta - 1}{V - \sin\theta + \cos\theta \cdot \sqrt{V^2-1}} \quad (6)$$

A második fázisban ($H_1 \leq h \leq H_2$), ahol egy része kör, másik része ellipszis, a **7. egyenlet** adja meg a nagytengely hosszát és a **8. egyenlet** segítségével határozhatjuk meg a H_2 vastagságot [Somogyi és Szalay, 1973].

$$D_2 = \frac{1}{2} \cdot (D_1 + D_3) + \left(R - \frac{h \cdot V}{V \cdot \sin\theta+1}\right) \cdot \cos\theta \quad (7)$$

$$H_2 = \frac{R}{V} + R \cdot \frac{V \cdot \sin\theta - 1}{V - \sin\theta - \cos\theta \cdot \sqrt{V^2-1}} \quad (8)$$

A harmadik szakaszban ($h \geq H_2$), ahol kör alakú nyom alakul ki, a **9. egyenletet** alkalmazva határozzuk meg a D_3 és d_2 értékeket [Somogyi és Szalay, 1973].

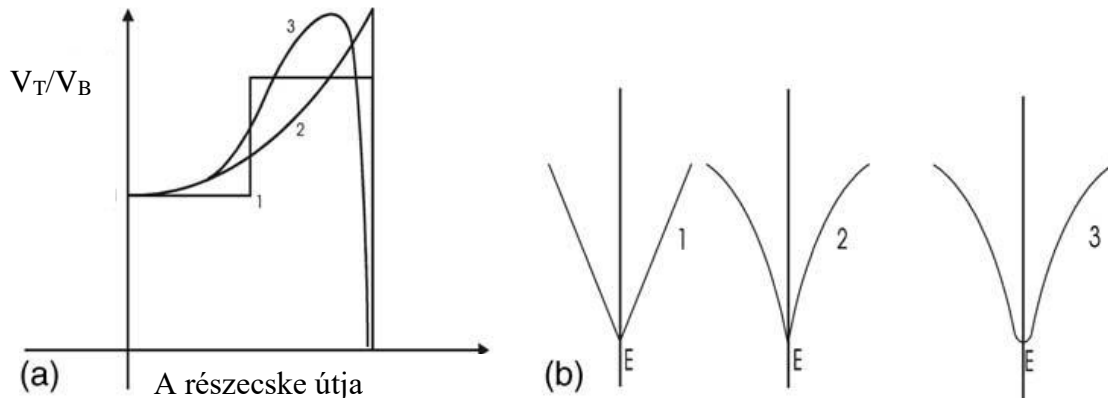
$$D_3 = d_2 = 2 \cdot \sqrt{R \left(\sin\theta - \frac{1}{V}\right) \left[2 \cdot h - R \left(\sin\theta + \frac{1}{V}\right)\right]} \quad (9)$$

A kistengely esetében az első szakasz addig tart, amíg az eltávolított réteg vastagsága el nem éri a becsapódó részecske pályájának végét, vagyis $0 \leq h \leq h_1$. Ebben a lépésben a maradt nyom ellipszis alakú és a kistengely hosszának meghatározása a **10. egyenlettel** történik [Somogyi és Szalay, 1973].

$$d_1 = 2 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{V \cdot \sin\theta - 1}{V \cdot \sin\theta + 1}} \quad (10)$$

3.3.3. Nyomfejlődés változó V_T esetén

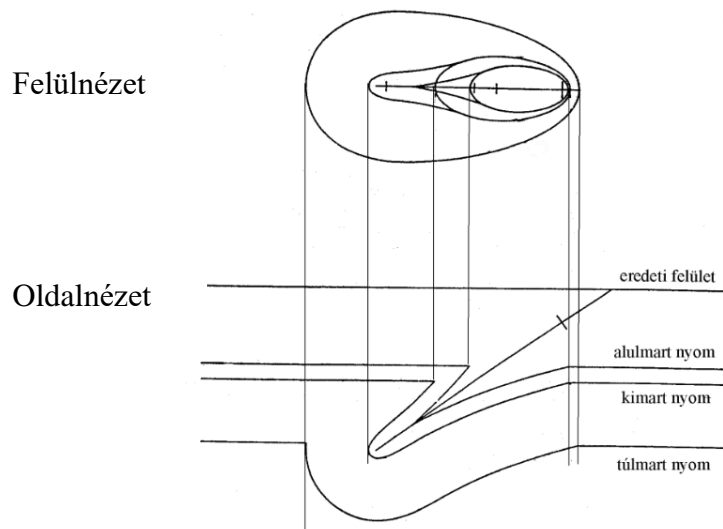
A 3.3.1. és 3.3.2. fejezetben az állandó nyom maratási sebesség esetére vonatkozó egyenleteket és összefüggéseket tüntettem fel. A valóságban legtöbbször viszont változó maratási sebességre kell számítanunk, amelyre nem érvényesek az előzőekben bemutatott szabályok. A legfontosabb különbség, hogy a nyom fala nem írható fel egyszerű kúpként, a nyom átmérője pedig egyszerű ellipszisként, annál bonyolultabb és összetettebb formákat vehet fel a V_T változásának függvényében [Nikezic és Yu, 2004].



7. **ábra:** (a): A függvény változása a részecske pályája mentén. (b): A maratott nyom alakja. Mindkettő esetében (1): V_T =állandó; (2): V_T maximuma a pálya végén; (3): V_T maximuma a pálya vége előtt [Nikezic és Yu, 2004]

A változó nyom maratási sebességre vonatkozó egyenleteket, a maratási profil paramétereit több modellben is meghatározták [Somogyi és Szalay, 1973; Fews, 1982, Barillon et al., 1997; Nikezic és Yu, 2004]. Ezek a modellek egy függvényt alkalmazva írják le a maratási sebesség változását, melyeknek egyszerűsített változata a **7. ábrán** látható [Nikezic és Yu, 2004].

Nikezic és Yu összehasonlította a különböző modelleket, hogy azok mennyire pontosan és egymáshoz képest mennyire hasonlóan írják le az adott energiájú részecske okozta nyom fejlődésének paramétereit. Véleményük szerint a leginkább az közelíti meg a valóságot, hogy a nyom maratási sebességnek a pálya vége előtt van maximuma [Nikezic és Yu, 2004]. Ennek az az oka, hogy a részecske az anyagban haladva folyamatosan lassul és energiájának jó részét a pályája végéhez közel adja le. Ezt az energiaátadás görbe maximumát nevezzük Bragg-csúcsnak [Ditlov et al., 2005]. A CR-39 típusú detektorok esetében ez a maximum $2,2 \mu\text{m}$ távolságban van a részecske pályájának végétől [Nikezic és Yu, 2004].



8. ábra: Alulmart, kimart és túlmart nyomok felül-és oldalnézetből [Fews, 1992]

A részecske pályája mentén haladó maratószer a maratás során többféle mélységig hatolhat. Ez alapján megkülönböztetünk alulmart, kimart és túlmart nyomot, melyek felül-és oldalnézete a **8. ábrán** látható. Az alulmart nyom esetében a maratószer nem éri el a pálya végét. Ebben az esetben a nyom felülnézete ellipszis. Ha az oldat pont eléri a pálya végét, akkor kimart nyomról, míg, ha azon túlhalad, akkor túlmart nyomról beszélünk. Ennél a két esetnél a nyom alakja szintén ellipszis, esetleg kör [Fews, 1992].

Ugyanazon a detektoron egy maratás során mindhárom típus előfordulhat. Ha egy nagy energiájú részecske csapódik a detektorba és mélyen lehatol abban, akkor a maratószer nem éri el a pálya végét, vagyis alulmart nyomot kapunk. Viszont kisebb energiák esetén a pálya vége közel esik a felszínhez, így rövid idő elteltével már kimart, esetleg túlmart nyomokat figyelhetünk meg [Fews, 1992].

3.4. Maratás sebességének meghatározása

A maratás sebességét a sérült (pályamenti maratási sebesség- V_T) és sértetlen felület (normál maratási sebesség- V_B) maratásának sebessége befolyásolja [Fleischer et al., 1975]. A továbbiakban ezek meghatározási módszereit szeretném ismertetni.

3.4.1. Normál maratási sebesség

A normál maratási sebesség (V_B) adja meg a sértetlen detektorfelület eltávolításának sebességét. Ennek végső határa a detektor anyagának teljes eltávolítása. A maratás során a detektor anyaga rétegenként válik le, így a folyamat során a detektor vastagsága fokozatosan csökken [Nikezic és Yu, 2004].

A V_B meghatározásával kapcsolatban számos tanulmány készült és a meghatározására többféle módszer (direkt vagy indirekt) is létezik [Nikezic és Yu, 2004].

V_B direkt mérése

A direkt mérések esetén digitális mikrométer, atomerő mikroszkóp vagy felületi profilométer segítségével megmérjük a maratás előtti és utáni vastagságot, amelyből számítható az eltávolított réteg vastagsága és ebből a normál maratási sebesség [Nikezic és Yu, 2004].

Nikezic és Janicijevic egy felületi profilométer segítségével LR-115 típusú detektorokon mérte a normál maratási sebességet [Nikezic és Janicijevic, 2002]. Ezt a módszert fejlesztette tovább Yasuda és munkatársai a maszkolási technikával. Ennek lényege, hogy a detektor egy kis részét epoxyval kenték be, így a maratás során megvédték a maratóoldattól. Ez a rész tehát a maratást követően változatlan volt. A maszkírozás eltávolítása után a rétegek vastagságának különbségéből határozták meg a V_B értékét [Yasuda et al., 2001]. Ugyanezt a módszert alkalmazták Ho és munkatársai a kevertetés maratási sebességre gyakorolt hatásának tanulmányozására CR-39 detektorok esetében [Ho et al., 2003].

Az atomerő mikroszkópia (AFM) egy igencsak új módszer a maratási sebesség vizsgálatára. Az egyes pásztázó mikroszkópok összehasonlító elemzését a nyomelemzéssel kapcsolatban Vukovic és Antanasijevic végezték el [Vukovic és Antanasijevic, 1995]. Az ő munkásságuknak köszönhetően számos tanulmány készült a normál maratási sebesség meghatározására AFM technika alkalmazásával [Yasuda et al., 2001; Ho et al., 2002].

A maratási sebesség meghatározása mellett a detektorok felületi érdességére vonatkozóan is végeztek tanulmányokat. Vazquez-Lopez és munkatársai [Vazquez-Lopez et al., 2001], valamint Yasuda és munkatársai [Yasuda et al., 1999] különböző gyártmányú CR-39 detektorok esetében megállapították, hogy a keletkező nyomok alakja is eltérő volt az egyes gyártmányok esetében. Palmino és munkatársai pedig LR-115 detektorok esetében végezte el a vizsgálatait. A munkája során egy speciális fúrdőt alkalmazott, amelyben in-situ körülmények között tudta vizsgálni a nyom kialakulásának fázisait [Palmino et al., 1999].

V_B indirekt mérése

A normál maratási sebesség meghatározásra léteznek indirekt módszerek is, melyek egyszerűségük és könnyebb kivitelezhetőségük miatt elterjedtebbek [Nikezic és Yu, 2004].

Kibocsátott részecskék okozta nyomok átmérőjének meghatározása

Ez a legrégebben és leggyakrabban alkalmazott módszer a normál maratási sebesség meghatározására. A mérés során legtöbbször Cf-252 izotópot használnak, melyből neutronok lépnek ki. Mivel a hatótávolságuk viszonylag rövid, így a pályamenti maratási sebesség állandónak tekinthető a maratási folyamat alatt. Ezekkel a feltételezésekkel a nyom átmérője a **3. egyenlettel** adható meg. A $V \gg 1$ esetén az egyenletből az alábbi összefüggéssel számítható a normál maratási sebesség [Nikezic és Yu, 2004]:

$$D \cong 2 \cdot h = 2 \cdot V_B \cdot t \quad (11)$$

Dajkó CR-39 detektorokat vizsgált különböző anyagokkal kevert NaOH oldatokkal történő maratás során [Dajkó, 1991]. Leonardí és munkatársai különböző gyártású CR-39 detektorok esetében vizsgálta a maratási sebességet [Leonardi et al., 2009]. Matiullah és társai több tanulmányban is NaOH oldathoz adott szerves anyagokra vizsgálták a normál maratási sebesség változását [Matiullah et al., 2005; Matiullah et al., 2005b]. Singh és munkatársai pedig bárium és lítium-hidroxiddal történő maratást vizsgált és hasonlított össze a NaOH oldatban eljárással [Singh et al., 1988].

Az elterjedt alkalmazás ellenére léteznek olyan esetek, amikor ez a módszer nem alkalmazható. Egyrészt nagyon rövid (<10 perc) maratási időknél, másrészt pedig olyan detektoroknál, amelyek a maratás előtt gamma-sugárzással lettek kezelve [Hermsdorf et al., 2007].

Detektor tömegének változása (gravimetriai módszer)

A mérés lényege, hogy megméri a detektor tömegét a maratás előtt és után. A tömegkülönbségből számítható az eltávolított réteg vastagsága, amelyből a maratási sebesség is meghatározható a **12. egyenlet** alapján [Nikezic és Yu, 2004].

$$V_B = \frac{\Delta m}{2 \cdot A \cdot \rho \cdot t} \quad (12)$$

ahol Δm a maratás előtt és utáni tömegek különbsége, A a maratott detektor felülete, ρ a detektoranyag sűrűsége és t a maratás időtartama. A módszer pontosságának határt szab, hogy mennyire nagy pontossággal tudjuk a tömeget meghatározni [Nikezic és Yu, 2004].

Kocsis és munkatársai különböző gyártmányú CR-39 detektorokat sugároztak be különböző energiájú részecskékkel és határozták meg a normál maratási sebességet gravimetriás módszerrel [Kocsis et al., 1997]. Sahoo és társai mikrohullámmal indukált kémiai maratás során a vizsgálták V_B értékének változását [Sahoo et al., 2015]. Sharma és munkatársai a gamma-sugárzással kezelt detektorok esetében mérhető maratási sebesség meghatározásához alkalmazták [Sharma et al., 1991]. Henke és munkatársai összevetették a normál maratási sebesség meghatározására szolgáló módszereket és véleményük szerint a tömegmérés a legpontosabb és legmegbízhatóbb ezek közül. Alkalmazhatóságának feltétele, hogy a tömegmérés pontossága legalább 0,01 mg legyen [Henke et al., 1986].

Spektroszkópiás módszer

Ennek lényege, hogy valamely spektroszkópiás módszer által meghatározható mennyiségből következtethetünk a normál maratási sebességre. Ezek közül Yip és munkatársainak javaslata volt az egyik első. Megmérték az LR-115 detektor fluoreszcens abszorpcióját röntgen fotonokra és azt találták, hogy lineáris kapcsolat van az eltávolított réteg vastagsága és a fluoreszcens röntgen intenzitás között [Yip et al., 2003].

Ezzel a módszerrel azonban az a probléma, hogy röntgen sugárzás hatására a maratási sebességek megváltoznak. Erre többek között Clark és Stephanson, valamint Fowler és Munro jöttek rá, mikor kimutatták, hogy a röntgen-sugarak a cellulóznitrát degradációját idézik elő [Clark és Stephanson, 1982; Fowler és Munro, 1985]

Ng és munkatársai dolgoztak ki egy olyan módszert, amellyel elkerülhetik a degradációs változásokat, valamint a detektor felülete/anyaga sem károsodik a vizsgálat alatt. Ennek lényege, hogy infravörös sugárzással világítják meg a detektort és a sugárzás elnyelődéséből lehet következtetni a detektor vastagságára. [Ng et al., 2004].

3.4.2. Normál maratási sebességet befolyásoló tényezők

A nyomok kialakulásában a V_B a meghatározó paraméter, így ezzel kapcsolatban számos kutatási eredmény és publikáció fellelhető. Több tanulmány született azzal kapcsolatban, hogy egyes paraméterek hogyan változtathatják meg az értékét. Ilyen paraméterek lehetnek a detektor anyagi minősége, összetétele, a detektor előkészítése, maratás paraméterei, esetleges maratás előtti besugárzások [Nikezic és Yu, 2004].

Maratási körülmények befolyásoló hatása

A maratás paraméterei közül a hőmérséklet és a maratószer koncentrációja a leginkább vizsgált összetevő. Hermsdorf és társai kutatásukban meghatározták, hogy a V_B a maratási hőmérséklettől és a maratószer koncentrációjától exponenciálisan függ [Hermsdorf et al., 2007]. Hasonló eredményre jutott Rana és Qureshi, akik CR-39 detektorokat marattak különböző hőmérsékleten és maratószer koncentráció mellett [Rana és Qureshi, 2002]. Fromm és munkatársai különböző NaOH oldatkonzentrációk és hőmérsékletek mellett vizsgálták a normál maratási sebesség változását és ők is exponenciális összefüggést találtak [Fromm et al., 1991].

A fentebb említett tanulmányokból meghatározott összefüggések mindegyike tartalmazza paraméterként az aktivációs energiát, ami CR-39 detektorok esetében 0,7-1 eV tartományba esik. Az aktivációs energia adja meg a maratószer és a detektoranyag közötti reakció beindulásához szükséges energiát. A különböző aktivációs energiák beeső részecskéktől való függését vizsgálta Awad és El-Samman. A munkájuk során megállapították, hogy az aktivációs energia nem a beeső részecskék energiájától, hanem a detektor anyagától függ [Awad és El-Samman, 1999].

A hőmérséklet és a koncentráció mellett a kevertetés is egy fontos befolyásoló paraméter. Yip és munkatársai LR-115 detektorok esetében vizsgálták a kevertetés hatását. Állandó hőmérsékleten és koncentráció mellett végezték el a maratást kevertetéssel és anélkül. A kevertetéssel a normál maratási sebesség értéke közel kétszer nagyobb volt, mint amikor nem volt kevertetés [Yip et al., 2003b].

Ho és társai hasonló vizsgálatot végeztek el CR-39 detektor esetében. Az előzővel ellentétben itt nem volt megfigyelhető lényeges különbség a kevertetést alkalmazó és nem alkalmazó maratás V_B értéke között [Ho et al., 2003].

A detektor öregedésének hatása

Több tanulmányban is kimutatták, hogy a detektorok kora befolyásolhatja a maratási sebességet. Ez azonban a különböző nyomdetektorok esetében eltérő mértékű lehet [Nikezic és Yu, 2004].

Cecchini et al. CR-39 detektorok esetén különböző korú detektorokat sugároztak be és határozták meg a normál maratási sebesség értékeit. Az évek között kismértékű eltérést nem tapasztaltak, így megállapították, hogy ennél a típusnál a kor csak kismértékben befolyásoló tényező [Cecchini et al., 2001].

Caresana et al. hasonló vizsgálat során ugyanerre a következtetésre jutottak, viszont ők vizsgálták a pályamenti maratási sebességet is, ami jelentős változást mutat a detektor korának növekedésével [Caresana et al., 2010; Caresana et al., 2011].

Calamosca és társai azt vizsgálták, hogy a mérések megbízhatóságára van-e hatása a detektorok öregedésének. Megállapították, hogy bár az öregebb detektorok esetében kisebb a nyomátmérő (a csökkent pályamenti maratási sebesség, így a kisebb maratási sebesség miatt), de ez a mérések megbízhatóságát nem zavarja. Az általuk vizsgált detektorok legfeljebb 1 évesek voltak [Calamosca és Penzo, 2008].

Siems és munkatársai az LR-115 detektorok esetében vizsgálták az öregedés hatását. Megállapították, hogy öt év után a kémiai változások miatt már nem alkalmazhatóak. De ez az átalakulás megakadályozható, ha +4°C-os hőmérsékleten tárolják őket [Siems et al., 2001].

A detektorok előzetes besugárzásának hatása

Számos tanulmány készült arra vonatkozóan, hogy a detektorok maratás előtti besugárzása befolyásolja a maratás sebességét. Ezt a hatást vizsgálták gamma-, béta-, proton-, ultraibolya és infravörös sugárzás esetén. Általános megállapításként elmondható, hogy a V_B értéke a dózis növekedésével nő. Ennek oka, hogy a különböző sugárzások a polimer láncok szakadását idézik elő, aminek hatására a maratószer és a detektoranyag között végbemenő reakció sebessége megnő [Nikezic és Yu, 2004].

Sinha a gamma-sugárzás hatásait vizsgálta CR-39 detektorokon 1-10⁶ Gy dózistartományban. Megállapította, hogy 10⁴ Gy dózis felett minimális növekedés figyelhető meg mind a normál, mind pedig a pályamenti maratási sebességben. Ez a növekedés 10⁵ Gy dózis felett sokkal jelentősebb [Sinha et al., 1997].

Yamauchi és társai gamma- és elektron-sugárzással kezeltek CR-39 detektorokat, melynek maximum dózisa 100 kGy volt. Mindkét esetben megállapították, hogy a normál maratási sebesség exponenciálisan nő a dózissal [Yamauchi et al., 1999].

Fazal-ur-Rehman et al. PM-355 típusú nyomdetektorokat sugároztak be 10^5 - $1,2 \times 10^6$ Gy gamma dózissal. A normál maratási sebességet mindhárom mérési módszerrel (gravimetriás, nyomátmérős, eltávolított réteg vastagság mérése) meghatározták. A vastagság és tömegmérés által meghatározott sebességek közel estek egymáshoz, de a nyomátmérő meghatározásának módszere gamma-sugárzás esetén nem működött [Fazal-ur-Rehman et al., 2001].

Mishra és társai 2 MeV energiájú elektronnyalábbal sugároztak be polietilén-tereftalát és poliimid anyagokat. A maratási sebesség esetében növekedést figyeltek meg, mivel az elektronok elhasítják a polimer láncokat. A probléma a polimerek felületén bekövetkező változások, amelyek megnehezítik a nyomok kiértékelését [Mishra et al., 2001].

Abu-Jarad et al. CR-39 detektorokat kezeltek ultraibolya sugárzással, megvizsgálva, hogy alkalmasak lehetnek-e UV-sugárzás mérésére. A normál maratási sebesség növekszik az UV-sugárzás intenzitásával. Ez alapján feltételezték, hogy a CR-39 alkalmazásával mérhető az UV-sugárzás intenzitása [Abu-Jarad et al., 1997]. Emellett vizsgálták a lézerrel történő besugárzás hatását is. Megállapították, hogy rövid lézeres besugárzás (40 sec) esetén mind a normál, mind a pályamenti maratási sebesség kismértékben nő. Ennél hosszabb expozíció esetén a detektorok felülete megsérül: színváltozás, sérülések és égések keletkezhetnek [Abu-Jarad et al., 1991].

Tripathy és munkatársai különböző polimereket bombáztak 62 MeV energiájú protonokkal. A poliimid esetében a normál maratási sebesség megnövekedett (80 kGy dózisonál nagyjából 30%-al), viszont az aktivációs energia állandó maradt. Az Makrofol-N esetében 75%-os növekedés figyelhető meg a V_B értékében a legnagyobb dózisonál. Ezen kívül igazolták az aktivációs energia csökkenését [Tripathy et al., 2003].

Prasher és Singh az infravörös sugárzás maratási sebességre gyakorolt hatását vizsgálták. Az expozíció időtartamának növekedésével a normál maratási sebesség is növekedett [Prasher és Singh, 2003].

3.4.3. Pályamenti maratási sebesség

A V_B -vel ellentétben ennek a meghatározása nagyobb nehézséget okoz. Korábban az értékét állandónak tekintették, de ma már tudjuk, hogy ez csak néhány esetben igaz. A valóságban legtöbbször változik az értéke a nyom pályája mentén. Az irodalomban számos tanulmány és módszer található a mérésére [Nikezic és Yu, 2004].

Durrani és Bull szerint a V_T/V_B arány az alábbi összefüggéssel meghatározható [Durrani és Bull, 1987]:

$$V = \frac{V_T}{V_B} = \frac{4 \cdot V_B^2 \cdot t^2 + D^2}{4 \cdot V_B^2 \cdot t^2 - D^2} \quad (13)$$

Ez a képlet azonban csak állandó maratási sebességek esetében alkalmazható [Nikezic és Yu, 2004].

A kidolgozott módszerek a nyom alakjának vizsgálatán alapulnak, ahol bizonyos paraméterek alapján a V függvény meghatározható. Ezek a paraméterek számos részecske, becsapódási energia és szög esetében írják le a nyom alakját. Ezek alapján modelleket alkottak, melyekkel meghatározható a maratási sebesség [Nikezic és Yu, 2004].

A modellek közül az egyik legkiemelkedőbb Nikezic és Yu modellje. Ők egy számítógépes programot alkottak, amelybe betáplálva a megfelelő információkat (beeső részecske energiája, maratás időtartama, normál maratási sebesség, beesési szög), megadja a keletkező nyom paramétereit és a maratási sebességet [Nikezic és Yu, 2003; Nikezic és Yu, 2003b; Nikezic és Yu, 2008].

3.5. Nyomdetektorok alkalmazása

A 20. század második felében a nyomdetektoros mérés technika nagymértékű fejlődésnek indult. Ennek oka, hogy a nyomdetektorok olyan egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek, melyek bizonyos mérések esetében nagy előnyt jelentenek. Ezek az okok a következők voltak [Durrani, 2001]:

- Természetes anyagok: néhány természetes anyag (pl.: egyes ásványok) esetében megfigyelhető a nyomképződés. Ezzel a módszerrel geológiai vagy kozmikus jelenségeket vizsgálhatnak [Kratschmer, 1977]

- Hosszú tárolási idő: meteoritok esetében a kozmikus sugárzás okozta nyomok akár több millió évig is megmaradhatnak [*Fleischer et al., 1967, Fleischer et al., 1967b*]
- A hő és a dinamikus folyamatok hatása: melegítés és bizonyos dinamikus folyamatok hatására a nyomok paraméterei (hosszúság, átmérő, stb.) megváltozhatnak, vagyis ezáltal hőmérsékleti változásokat megfigyelhetünk [*Schwartz et al., 2001; Schauries et al., 2013*]
- Eltérő válaszok: a beeső részecskék mérete, energiája, töltése, stb. befolyásolja a kialakuló nyom paramétereit. Vagyis ezáltal elválaszthatóak a különböző részecskéktől származó nyomok [*Durrani és Bull, 1987*]
- Integrális mérési mód: a mérés során kapott jel egy hosszabb időszakról ad információt. Ennek nagy előnye, hogy a nem gyakori, de esetleg zavaró jelenségeket elfedi [*Durrani, 2001*]
- Nem elektromos eszköz: nincs szükség villamos áramra a működéséhez. Ezáltal könnyen alkalmazható extrémebb helyzetekben is (pl.: űrkutatás) [*Benton et al., 1976*]
- Kis méret, nagy tűrőképesség, alacsony költség

3.5.1. Példák alapkutatásban való alkalmazásukra

A fent említett előnyei és tulajdonságai miatt számos alapkutatási területen alkalmazzák. A továbbiakban ezekből mutatok be néhány példát.

Meteoritok: a nyomdetektorokat ezek a területen Fleischer és munkatársai kezdték el alkalmazni. A beeső kozmikus részecskék okozta nyomokat vizsgálták a meteoritokban. Ezek az anyagok a kozmikus sugárzás nagy részét kitevő protonokat és alfa-részecskéket nem tudja kimutatni, mivel az azok okozta nyomok erősen túlsúfoltak. Ezért a nehezebb komponensek okozta nyomokat vizsgálták. Ehhez a nyom paramétereit vizsgálták és azokat hasonlították össze mesterségesen előállított nyomokkal [*Fleischer et al., 1967, Fleischer et al., 1967b*].

Hold minták vizsgálata: a Holdról származó különböző mintákat számos vizsgálati eljárásnak vetették alá, hogy minél több információt gyűjtsenek. Ezek közül az egyik a kőzetekben fellelhető nyomok vizsgálata volt, melyek a kozmikus sugárzás hatására keletkeztek. A nyom keletkezését azonban külső paraméterek – pl.: hőmérséklet –

befolyásolják, így a nyomok paramétereinek vizsgálatával a Holdon bekövetkező hőmérsékleti változásokat tudták megvizsgálni [*Durrani, 1991*]

Szupernehéz elemek: ezek az elemek legtöbbször csak mesterségesen állíthatók elő. Azonban több tanulmány is készült arról, hogy szupernehéz elemek okozta nyomokra bukkantak a természetben: Perelygin et al. valamint Yadav és társai meteorit mintákban fedezték fel a galaktikus eredetű kozmikus sugárzás okozta nyomokat [*Perelygin et al., 1977; Yadav et al., 1983*].

3.5.2. Példák a gyakorlati alkalmazásokra

Az alap kutatások mellett számos gyakorlati alkalmazását is kifejlesztették a nyomdetektoroknak az elmúlt évtizedekben.

Kormeghatározás: az egyik legrégebbi alkalmazása az SSNTD mérés technikának és jelenleg is több laboratóriumban alkalmazzák rutinszerűen. A módszer alapja, hogy minden ásvány tartalmaz valamekkora mennyiségben uránt, melynek 238-as tömegszámú izotópja spontán hasadásra képes. A hasadási termékek az ásványokban nyomok hagynak, melynek mennyiségét meghatározva megadható az ásvány kora [*Price és Walker, 1963; Wagner et al., 1975*].

Olajkutatás: az olajkutatást igencsak megkönnyíti Green és társainak munkája, amelyben megállapították, hogy jelentős összefüggés van az apatit ásványokban megtalálható, urán hasadási termékei okozta nyomok paramétereit és az olaj lelőhelyek között. Ez a hőmérséklet nyomok keletkezésére gyakorolt hatására vezethető vissza: a kőolaj keletkezési körülményei (nyomás, hőmérséklet) jól felismerhető és azonosítható nyomstruktúrákat alakít ki [*Green et al., 1989*].

Mikroporózus szűrők: széles körben alkalmazzák az iparban, környezetvédelemben és a gyógyászatban a mikroporózus anyagokat. Az előállításuk lényege, hogy nagyon vékony lemezeket megfelelő típusú és energiájú részecskékkel bombáznak, majd az adott maratási paraméterek segítségével eléri a kívánt átmérőt [*Durrani, 2001*].

Dozimetria: rendkívül elterjedt alkalmazási terület a sugárvédelmi mérések. Néhány országban a törvények a nyomdetektorok alkalmazását írják elő a személyi dozimetriában (pl.: Nagy-Britannia). Az SSNTD technikák segítségével alfa-részecskéket és neutron-sugárzást lehet detektálni. Az egyéb alkalmazható mérés technikákkal szemben nem

igényel túlságosan bonyolult és drága eszközöket, viszonylag kicsi a detektor sérülésének veszélye és egyszerűen kiértékelhető [Spurny és Turek, 1977, Durrani, 1982].

Geofizikai alkalmazások: az előzőek mellett számos geológiai tanulmányban is alkalmazták a módszert: geotermikus energia kutatás, földrengés előrejelzés, stb. Ezeknek a módszereknek az alapja a kiáramló radon gáz mérése [Khan és Qureshi, 1999]. Lopez et al. Mexikóban kutattak geotermikus energiaforrásokat a radon mérések alkalmazásával [Lopez et al., 1987]. Számos tanulmány készült arra vonatkozóan, hogy átlagostól eltérő radon kiáramlás figyelhető meg földrengések előtt. Ezzel a jelenséggel akár előre jelezhetőek lehetnek a földrengések [Ghosh et al., 2009, Planinic et al., 2004].

3.6. Kiértékelő rendszerek fejlődése

A nyomdetektorok kiértékelésére kezdetben elektronmikroszkópot alkalmaztak, de végül az optikai mikroszkópon alapuló nyomszámoló rendszer terjedt el [Gold et al., 1968]. Ez a rendszer egy manuális kiértékelést tesz lehetővé és - elsősorban alacsony költsége miatt - igen széles körben használják. Azonban fontos megjegyezni, hogy ez a módszer nem teszi lehetővé nagy mennyiségű detektorok egyidejű vagy gyors kiértékelését [Zeiler et al., 2012]. A manuális kiértékelés egy nagyon időigényes, szubjektivitással terhelt folyamat, ezért a rendszer automatizálása, az automata kiértékelő rendszerek kidolgozása igencsak fontossá vált [Adams, 1980].

Az első automata kiértékelő rendszerek az 1980-as években jelentek meg. Ezeknek a megjelenését és elterjedését a mikroprocesszorok fejlődése tette lehetővé [Gold et al., 1984]. Az elmúlt évtizedekben több félautomata vagy teljesen automata kiértékelő rendszert fejlesztettek ki. Az egyik első fejlesztések közé tartozott Price és Krischer munkája, akik egy félig automata rendszert hoztak létre, mellyel a nyomok néhány paraméterét (alakját, hosszát, stb.) voltak képesek meghatározni [Price és Krischer, 1985]. Hashemi-Nezhad és Dolleiser munkája is igen jelentős volt, melyben egy számítógép vezérelt optikai mikroszkóp segítségével értékelték ki a keletkezett nyomokat [Hashemi-Nezhad és Dolleiser, 1997]. Boukhair et. al CR-39 és LR-115 detektorokon lévő nyomok alakjának és méretének tanulmányozására készített egy automata rendszert, amely optikai mikroszkópot és hozzá csatlakoztatott CCD kamerát tartalmaz [Boukhair et al., 2000]. Dolleiser és Hashemi-Nezhad egy optikai mikroszkópon alapuló, teljesen automata rendszert alakítottak ki, melyhez a szoftver is saját készítésű volt [Dolleiser és Hashemi-Nezhad, 2002]. Bedogni egy gyors neutron doziméterként használt

nyomdetektor kiértékelő rendszert készített, amelyben a nyomok méretét és alakját egy mikroszkóphoz rögzített kamera segítségével vizsgálta. [Bedogni, 2003] Yasuda és munkatársai egy CCD kamerával felszerelt mikroszkópra építettek egy saját kiértékelő rendszert, automata fókusszal és mikroszkóp mozgatásáért felelős egységgel [Yasuda et al., 2005].

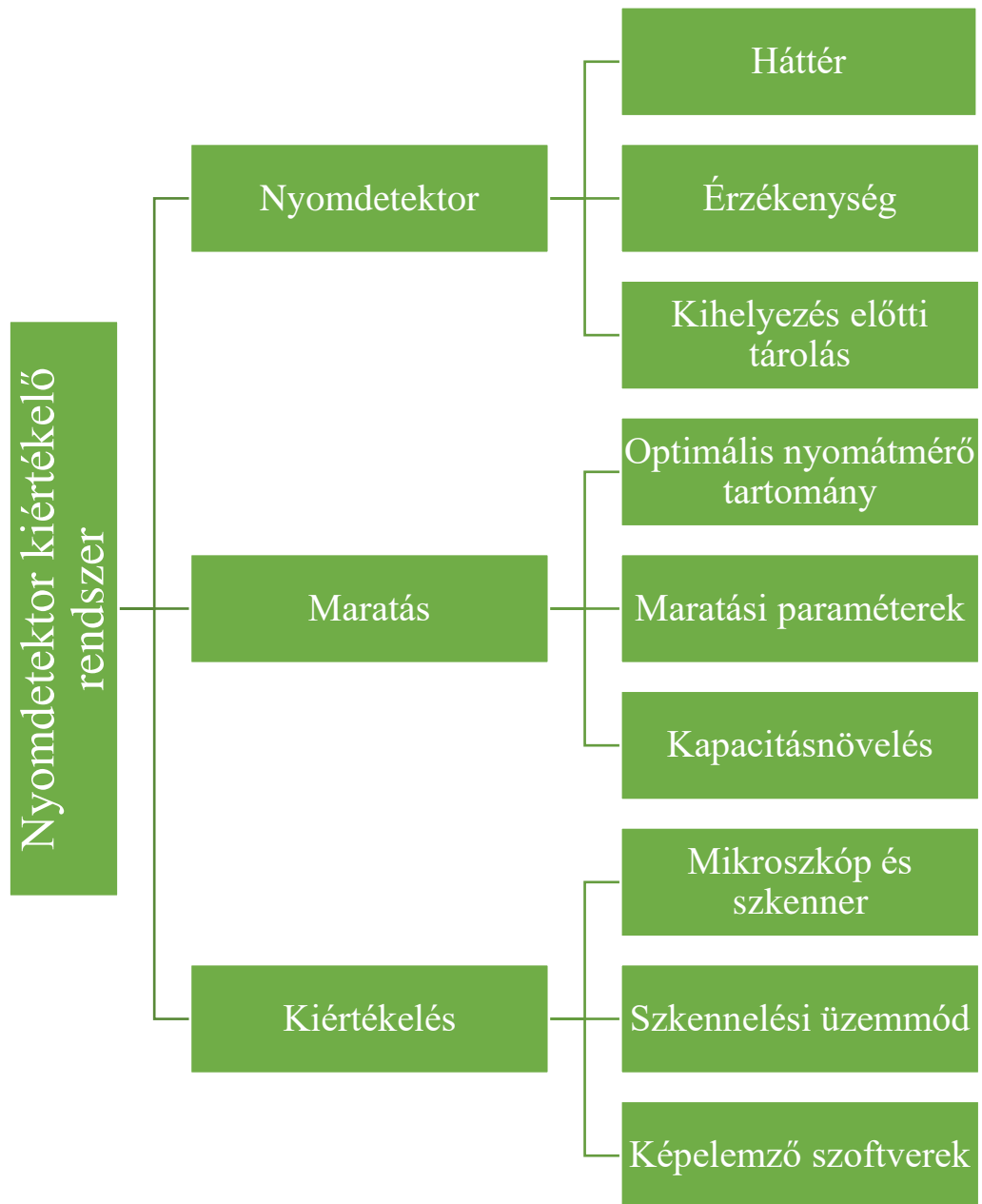
A jelenleg alkalmazott kiértékelő rendszerek kétféle elven működnek: egy részük a detektor felületén lévő nyomokat szoftver segítségével elemzik és megadják a nyomsűrűséget (egységnyi felületre eső nyomok száma) [Hülber, 2009]. Más részük arra épül, hogy a nyomok jelenléte befolyásolja a detektor optikai tulajdonságait és a visszaszóródott vagy a detektoron áthaladt fény intenzitása megváltozik a nyomok számának függvényében [Moore et al., 2002].

Az elérhető automata készülékek közül a legelterjedtebbek az Autoscan 60 (Thermo Electron Corporation, Santa Fe, MN, USA) [Moore et al., 2006], Radometer 2000 széria (Radosys Kft., Budapest, Magyarország) [Forkapic et al., 2006], Taslimage system (Track Analysis Systems Ltd., Bristol, UK) [Fiechtner-Scharrer et al., 2011] és HSP-1000 (Seiko Precision, Chiba, Japán) [Mamatkulov et al., 2016]. Ezek a rendszerek azonban sokszor nem elérhetőek a laboratóriumok számára, ezért több esetben is saját kiértékelő rendszer kiépítése volt a megoldás. Az így kidolgozott rendszereknek meg kellett felelniük több kritériumnak is: egyrészt tegye lehetővé nagyszámú felmérésből származó detektorok gyors és pontos kiértékelését, valamint a nyomok paramétereinek (alak, méret, stb.) elemzését [Bátor et al., 2015].

Hamar felismerték, hogy a fentebb felsorolt követelményeknek a kereskedelemben is kapható szkennerek is képesek megfelelni, sőt a CCD kamerával felszerelt mikroszkópokhoz képest gyorsabban és egyszerre több detektor kiértékelését tudja elvégezni. A szkennerek alapú kiértékelő rendszerek alkalmazhatóságának feltételeit Steele és munkatársai fektették le [Steele et al., 1999]. Az ő eredményeiket alapul véve több kutatást is végeztek és több szkennerek alapú kiértékelő rendszert is alkottak [Ibrahimi és Miles, 2008; Tsankov et al., 2005; Fairchild et al., 2011]. Ezek közül a brit Health Protection Agency rutinszerűen használja ezt a módszert, és a segítségével több, mint 116 000 detektor kiértékelését végezték el 2003 és 2008 között [Ibrahimi és Miles, 2008].

III. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

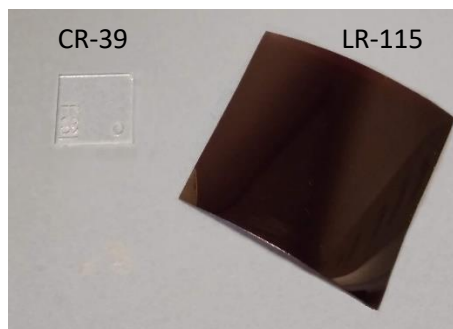
A jelenleg alkalmazott nyomdetektor kiértékelő rendszer felülvizsgálata, az akkreditálható mérési módszerre tett javaslatok alapjául szolgáló vizsgálatok összefoglalása az alábbi blokkdiagramon látható (9. ábra).



9. ábra: Az alkalmazott kiértékelő rendszer esetében elvégzett tesztek összefoglalása

4.Nyomdetektorok

A kereskedelmi forgalomban többféle típusú nyomdetektor található. Ezek közül a két legelterjedtebb a CR-39 (poliallil-diglikol-karbonát) és az LR-115 (cellulóz-nitrát). A detektorokról készült felvételek a **10. ábrán** láthatóak. Ezek közül vizsgálataimhoz az első típust választottam. Ennek oka egyrészt az volt, hogy a CR-39 detektorral már korábban is végeztem vizsgálatokat, így voltak előzetes eredményeim is, amelyek a mérések tervezésekor jelentős segítséget nyújtottak. Másrészt a szkener használata miatt átlátszó detektorokat kellett alkalmaznom és a kettő közül csak a CR-39 típus felel meg ennek a követelménynek, az LR-115 vörös színű.



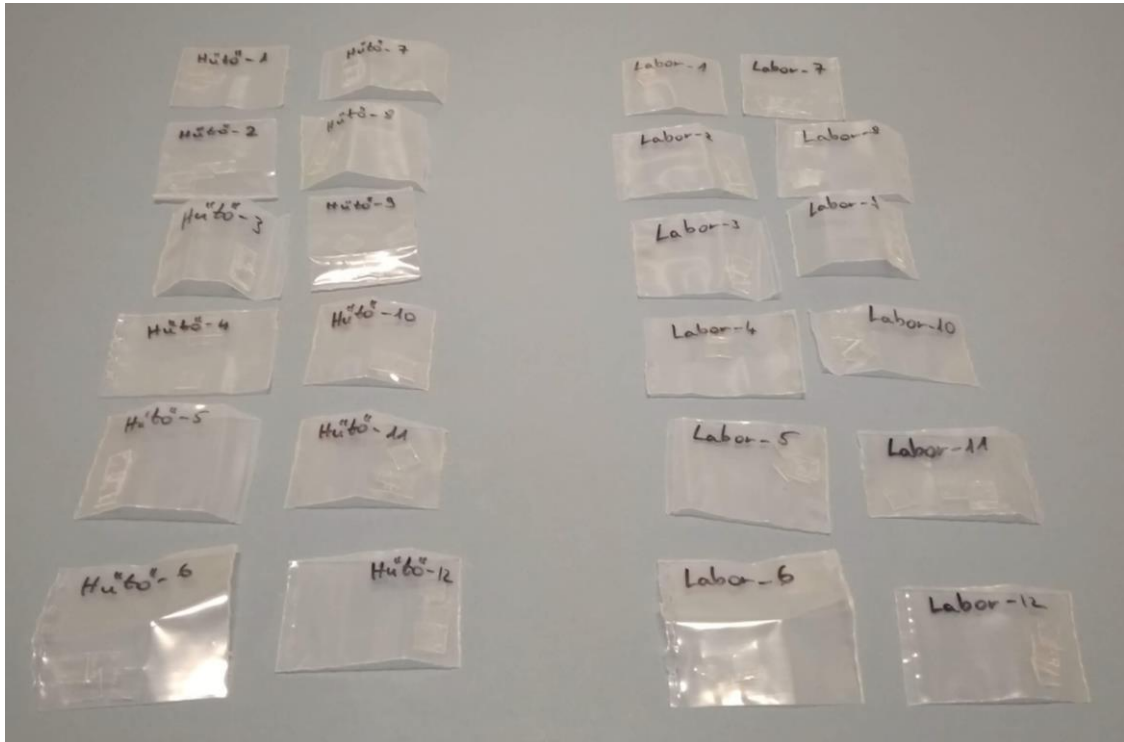
10. ábra: A CR-39 (bal oldalon) és LR-115 (jobb oldalon) detektorok

A CR-39 detektorok több gyártótól is beszerezhetőek, viszont az eltérő gyártási körülmények miatt egyes tulajdonságaikban eltérések figyelhetőek meg. Munkám elején kiválasztottam a két legelterjedtebb gyártmányt és ezeket hasonlítottam össze több szempont alapján.

Az általam vizsgált CR-39 nyomdetektorok a TASTRAK (Track Analysis Systems Ltd., Nagy-Britannia) és a BARYOTRAK (Fukuvi Chemical Ltd., Japán) gyártmányok. Mindkét típusnál a detektorok mérete 1 cm×1 cm×0,1 cm.

4.1. Háttér meghatározása

Első lépésben a detektorok háttér nyomszámát és a tárolás során esetlegesen bekövetkező háttér nyomszám növekedést vizsgáltam. 24 detektort lezártam kis radon áteresztő képességű fóliába, majd felét szobahőmérsékleten, másik felét pedig hűtőszekrényben tároltam (**11. ábra**). Az eltérő hőmérsékletekre azért volt szükség, hogy megvizsgáljam, a detektor tárolási hőmérséklete befolyásolja-e a háttér változását.



11. ábra: A háttér meghatározásához és a detektorok érzékenységvizsgálatára lezárt detektorok

Minden hónap elteltével kivettem 1-1 detektort, melyeket 3 órán keresztül 90°C-os 6,25M NaOH oldatban marattam és kiértékeltem a mikroszkópos rendszer segítségével.

4.2. Nyomdetektor érzékenységének vizsgálata

A megvásárolt nyomdetektorok felhasználás előbb akár hosszabb időt (néhány hónap, akár 1 év) is eltölthetnek a laboratóriumban. Számos kutatás rávilágított arra, hogy a hosszú idejű tárolás során megváltoznak bizonyos tulajdonságai a detektoranyagoknak. Ezek főként a maratást és annak jellemzőit befolyásolják. Ezt figyelembe véve, fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy a tárolás során bekövetkező változások befolyással vannak-e a detektor érzékenységére.

Ennek meghatározására - a háttérvizsgálatnál alkalmazotthoz hasonló módon (**11. ábra**) - elzárt detektorok közül minden hónapban kivettem 1-1 darabot, majd ismert

koncentrációjú radon térbe helyeztem. A besugárzás minden esetben 8 napig tartott és a radon koncentráció 451 és 521 Bq m⁻³ között változott. A besugárzást követően a detektorokat a háttér detektorokkal együtt marattam 3 órán keresztül 90°C-os 6,25M NaOH oldatban és mikroszkóppal kiértékeltem. Az érzékenység jellemzésére meghatároztam a kalibrációs faktor értékeit, mely faktor azt adja meg, hogy egységnyi radon koncentráció mellett egységnyi idő alatt hány darab nyom keletkezik a detektor egységnyi felületén. Meghatározása az alábbi formula alkalmazásával történik:

$$K = \frac{N_{minta} - N_{háttér}}{t \cdot A_{Rn}} \quad (14)$$

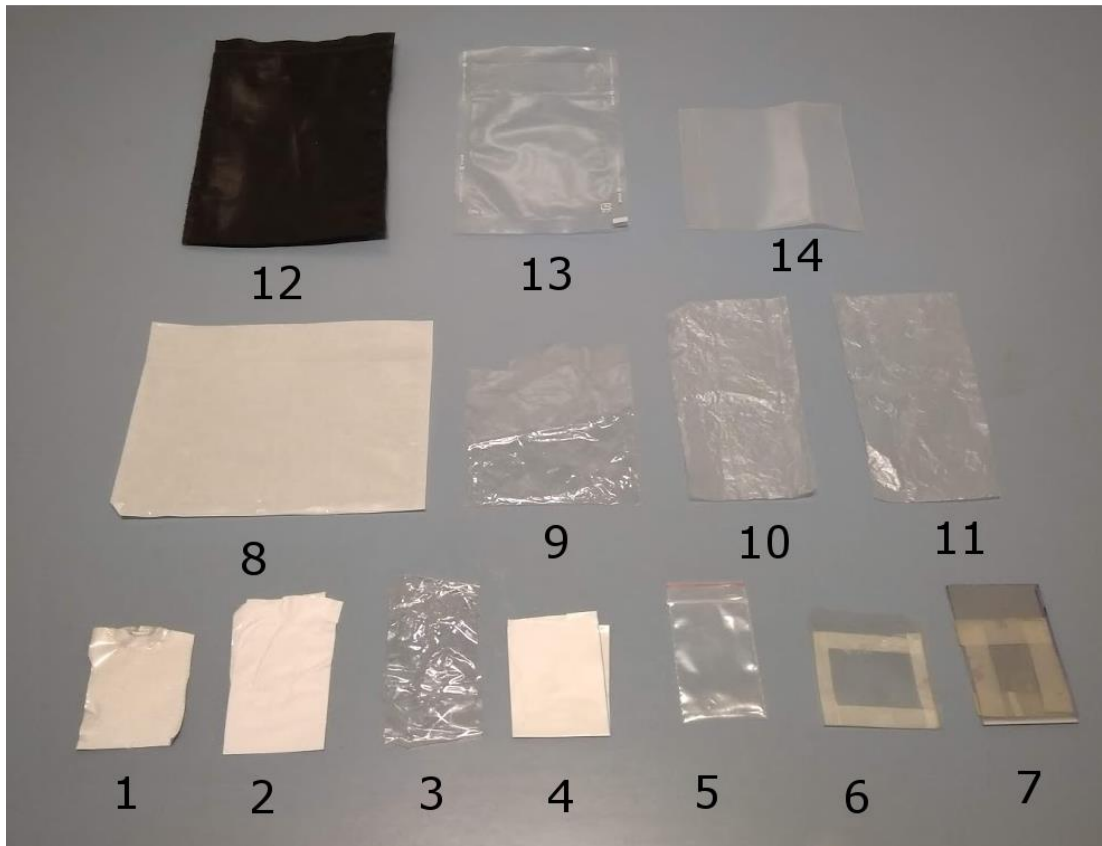
ahol

K	kalibrációs faktor [(nyom cm ⁻²)/(Bq nap m ⁻³)]
N _{minta}	besugárzott detektorokon mért nyomsűrűség [nyom cm ⁻²]
N _{háttér}	háttér detektorokon mért nyomsűrűség [nyom cm ⁻²]
t	besugárzás időtartama [nap]
A _{Rn}	radon aktivitáskoncentrációja a besugárzás alatt [Bq m ⁻³]

4.3. Fóliák radon áteresztő képességének vizsgálata

A nyomdetektorokat tartalmazó radon monitorok esetében az elkészítés és a kihelyezés közötti nem megfelelő tárolás tovább növelheti a háttérből származó nyomok számát. Ez azonban a legtöbb esetben nem meghatározható növekedést jelent és így növeli a mérés bizonytalanságát. Emiatt nagyon fontos a megfelelő radon elleni védelem a mérőeszközök kihelyezését megelőzően.

A megfelelő radon elleni védelmet biztosító csomagolás meghatározása érdekében egy tesztsorozatot végeztem el 14 különböző típusú fólián (**12. ábra**). Ezek közül 2 LDPE (10,11), 4 BOPP (1,2,3,12), 7 PE (4,5,6,7,9,13,14) és 1 CPP (8) fólia volt, melyeket különböző gyártóktól szereztem be.



12. ábra: Fóliák radon átteresztő képességének vizsgálata

Minden fóliába 2-2 nyomdetektort csomagoltam, lezártam, majd behelyeztem egy ismert koncentrációjú ($c=1000 \text{ Bq m}^{-3}$) radon térbe. A fóliába csomagolt detektorok mellett egy csomagolás nélküli detektort is elhelyeztem a kamrában, amellyel meghatároztam az ismert radon koncentrációhoz tartozó nyomsűrűséget. 4 nap elteltével kivettem őket, majd a nyomdetektorokat 3 órán keresztül 90°C -os $6,25\text{M}$ NaOH oldatban marattam és kiértékeltem a mikroszkópos rendszer segítségével. A védelem nélküli és a fóliába csomagolt detektorok nyomsűrűségeit összevetve megállapítható, hogy a különböző fóliaanyagok milyen hatásfokkal engedik át a radont.

5. Maratás

A CR-39 nyomdetektorok esetében a maratószer legtöbbször valamilyen lúgoldat (NaOH, ritkábban KOH), vagy lúg és hozzáadott adalékanyag (alkohol, stb.). Dolgozatomban a NaOH oldatot választottam maratószernek, melynek koncentrációját 6,25M értékben rögzítettem. Ennek alkalmazásával állítottam be a vizsgált paramétereket.

5.1. Optimális nyomátmérő tartomány meghatározása

A tervezett új kiértékelő rendszer alkalmazásához meg kellett adnom a maratás paramétereit. Ehhez azonban első lépésben meg kellett határoznom, hogy mekkora nyomátmérőre van szükség a kiértékelés során.

Az ideális tartomány alsó határát a szkener felbontása határozza meg, ami 4800 dpi (4800 képpont per hüvelyk). Ebből kiszámítható, hogy ez a felbontás $5,3 \mu\text{m} \times 5,3 \mu\text{m}$ nagyságú pixeleket jelent. A keletkező nyom legkisebb mérete ennél mindenképpen nagyobb kell, hogy legyen. Célszerű azonban – a paraméterek (nyom alakja, mérete, stb.) meghatározásának pontosítása érdekében – ha nem ezt a minimális értéket adjuk meg határnak. A minimálisan értékelhető nyomok így legalább két pixel nagyságot el kell, hogy foglaljanak, így a legkisebb méretük $10,6 \mu\text{m}$.

Az optimális nyomátmérő meghatározásához készítettem egy kalibráló lemezt, amelyre ennél a minimális méretnél nagyobb lyukakat alakítottam ki. A kialakításnál figyelmem kellett arra, hogy a keletkező lyukak profilja hasonló legyen az alfa-részecske okozta sérülésekhez.

A lemez készítése előtt különböző lézerek alkalmazhatóságát vizsgáltam meg: CO₂ lézer ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$, $P_{\text{max}}=30\text{W}$) az infravörös, valamint KrF lézer (248 nm hullámhossz, 18 ns impulzushossz, max. 250 mJ impulzusenergia) és ArF lézer (193 nm hullámhossz, 20 ns impulzushossz, max. 150 mJ impulzusenergia) az ultraibolya tartományból.

A nyalábbal létrehozott nyomokat egy Veeco Dektak-8 (NUFAB, Evanston, IL, USA) típusú tűs, kontakt profilométer alkalmazásával vizsgáltam meg. Az eszköz különböző minták felszínének 3-dimenziós, nanométeres pontosságú képét adja meg. A topográfiai vizsgálat segítségével megadható a felület érdessége, görbülete, felszín közeli struktúrák

alakja. A vizsgálat eredményeit figyelembe véve választottam ki a legalkalmasabb lézeres módszert.¹

A lézer kiválasztását követően összesen 16 db, különböző átmérőjű nyomot készítettem egy teljesen új, nem maratott detektor felületén. A nyomok 10 és 100 µm közötti mérettartományba estek és egymástól kis távolságban helyezkedtek el. A pontos értékeket a **6. táblázat** tartalmazza.

6. táblázat: A kalibráló lemezre készített nyomok átmérői

Sorszám	Átmérő [µm]	Sorszám	Átmérő [µm]	Sorszám	Átmérő [µm]	Sorszám	Átmérő [µm]
1	91,2	5	40,5	9	24,2	13	24,8
2	75,7	6	20,7	10	16,6	14	20,3
3	84,4	7	53,6	11	56,1	15	63,8
4	25,9	8	26,2	12	64,0	16	12,3

Az elkészített kalibráló lemezt az új kiértékelő rendszerrel kiértékeltem. A többszöri kiértékelést követően meghatároztam, hogy mekkora a minimálisan észlelhető nyom átmérője.

5.2. Maratási paraméterek meghatározása

A kalibráló lemezek segítségével meghatározott ideális nyomátmérőt megfelelő maratási paraméterek mellett lehet elérni. A paraméterek meghatározásához egy tesztsorozatot végeztem el. Ennek lényege, hogy különböző hőmérsékletű NaOH oldatokban eltérő ideig marattam nyomdetektorokat, majd meghatároztam a nyomátmérőt és a normál maratási sebességet. A NaOH oldat hőmérséklete 60, 70, 80 vagy 90°C volt, az ettől való eltérés maximálisan 1°C volt. A maratás időtartama 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 és 8 óra volt. Az oldat koncentrációját 6,25M értékben rögzítettem.

A maratási kísérletekhez használt nyomdetektorokat a maratás előtt ismert radon koncentrációjú (360 kBq m⁻³) térben besugároztam. A detektorokat ezt követően 10-es csoportokba osztottam és meghatároztam a maratás előtti együttes tömegüket egy analitikai mérleg segítségével. Ezt követően elvégeztem a maratást adott hőmérsékleten,

¹ A lézeres vizsgálatok a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék eszközeivel valósultak meg.

adott időtartamig. Végül desztillált vízzel, majd alkohollal eltávolítottam a detektorok felületéről az esetleges lúgmaradványokat és ismét meghatároztam a tömegüket. A mért értékek alapján meghatároztam az egy detektorra eső tömegkülönbséget, amelyből a normál maratási sebesség számítható a **12. egyenlet** alkalmazásával.

Az eredmények tükrében a 90°C-on maratott detektorokat vizsgáltam tovább. Ezekről a detektorokról pásztázó elektronmikroszkóppal (Scanning Electron Microscope, továbbiakban SEM) készültek felvételek². A felvételek alapján meghatároztam az egyes időtartamokhoz tartozó nyomátmérő értékeket. A rendszer nagy előnye, hogy jól elkülöníthetőek az eltérő morfológiai sajátosságokkal rendelkező nyomok. Hátránya, hogy rendkívül költségigényes eljárásnak tekinthető és kismértékben roncsolja a detektorok felületét a vizsgálat során.

Megvizsgáltam annak a lehetőségét, hogy a maratóoldatok többszöri felhasználása – az oldatba kerülő nyomdetektor anyag eredményeképpen - növeli-e a maratás sebességét, s ezzel együtt csökkenthető-e a maratás ideje.

Ennek igazolására „nyomdetektor-oldatot” készítettem: 80 db nyomdetektort tettem 200 ml 6,25M NaOH oldatba két hétre. Ezzel a módszerrel egy 3,83 g/L koncentrációjú nyomdetektor oldatot sikerült előállítanom. Ebből az oldatból összesen 8 különböző tömegben adtam frissen készített NaOH oldatokhoz, majd 80°C hőmérsékleten 4 órán keresztül végeztem a maratást.

² A SEM felvételek a Pannon Egyetem Anyagmérnöki Intézetében készültek.

5.3. Maratási kapacitás növelése

A nyomátmérő meghatározása mellett másik fontos feladat volt a maratási kapacitás megnövelése. A korábban alkalmazott maratórendszer (**13. ábra**) egyidejűleg legfeljebb 48 detektor maratását volt képes elvégezni. Ez a kapacitás a mikroszkópos kiértékelő rendszerhez megfelelő volt. Az új rendszer igényét azonban már nem tudja biztosítani, ezért egy új maratórendszert kellett összeállítani.



13. ábra: A korábban alkalmazott maratórendszer

A kapacitásnövelés mellett további problémát okozott, hogy a detektorokon egy felfogató lyukat kellett elhelyezni a rögzítési mód miatt, ami felére lecsökkentette az új rendszer által kiértékelhető terület nagyságát. A zsúfolt elrendezés miatt a maratóoldat nem volt képes megfelelően elkeveredni a detektorok között, így a maratás sebessége a térben inhomogén volt. Ennek következtében eltérő nyomátmérők alakultak ki, ami a manuális kiértékelésnél (szubjektivitás) kezelhető volt, de a szkennert alkalmazott automatikus kiértékelési módszernél már nem engedhető meg.

6. Kiértékelés

A kiértékelés fejlesztéséhez megvizsgáltam a mikroszkópos kiértékelő rendszert és feltártam a problémáit. Megvizsgáltam egy síkágys szkenner alkalmazhatóságát, egy arra épülő kiértékelő rendszer kidolgozásának lehetőségeit.

6.1. Mikroszkóp alapú kiértékelő rendszer

Az Intézetben eddig használt kiértékelő rendszer egy optikai mikroszkópon alapuló VIRGINIA morfometriai berendezés és programcsomag (**14. ábra**). A rendszert a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézetének korábbi munkatársai készítették. A programcsomag kétdimenziós felületek vizsgálatára készült, mellyel felületi hibákat, egyenetlenségeket vizsgáltak. A program lehetővé tette ezek méretének, alakjának és elhelyezkedésének, valamint egyéb geometriai jellemzőinek elemzését.

A rendszer főbb részei egy számítógép (2 MB RAM, TVGA super VGA grafikus meghajtó, FRG 2M frame grabber kártya, 3 csatornás léptetőmotor vezérlő kártya), x-y motoros léptetőasztallal szerelt optikai mikroszkóp, videókamera, VGA monitor, monokróm monitor, joystick és a MORFOLM kiértékelő program.



14. ábra: Az optikai mikroszkópos kiértékelő rendszer

A program első indításakor szükséges elvégezni a kalibrációt, melyhez egy, a csomaghoz kapcsolódó, sakktábla mintázatú kalibrációs maszkot használtam. A lemezt úgy tettem a mikroszkóp alá, hogy a négyzetek élei párhuzamosan helyezkedjenek el a video monitor horizontális letapogatási vonalával. A mikroszkóp pozícióját úgy állítottam be, hogy vertikális irányban egy fekete és egy fehér négyzet is megjelent a kijelzőn. Ezt követően

a CALIBRATION menüpontra kattintva a megfelelő területek kijelölése után a szoftver automatikusan elvégezte a szükséges beállításokat.

A kalibrációs során manuális beállítást igényel a letapogatni kívánt terület nagyságának megadása. Az ehhez kapcsolódó paramétereket a SURFACE-SCAN menüpontban értem el. A vizsgált terület egy 1,5 μm átmérőjű körben helyezkedik el. Ezen a területen belül a program 18 felvételt készít, melyek együttesen sem fedik le a kör területét. Egy képnek a mérete $262,86 \mu\text{m} \times 216,54 \mu\text{m} = 56919,70 \mu\text{m}^2$. Ez alapján a teljes vizsgált terület nagysága (18 képre vonatkoztatva): 1.025 mm^2 .

A kiértékeléshez a nyomdetektor felületét letisztítottam alkohollal, hogy eltávolítsam róla a zavaró hatású szennyeződések (por, maratószer maradék, stb.). Ezután a detektort egy tárgylemezre rögzítettem, majd a mikroszkóp alá helyeztem és elindítottam a MORFOLM programot. A SETUP-SURFACE menüpontban beállítottam az elemzés kezdő (\emptyset) és végpontját (H). Ezzel megadtam a kiértékelés során használt kör középpontját. Következő lépésként a MEASURE-MORPH STATISTICS menüpontban az ACQU & STAT gombra kattintottam. A program automatikusan elkészítette az első felvételt, amely megjelent a program aktív ablakában. A Tovább lehetőségre kattintva egyesével jelentek meg a felvételek, miközben a program automatikusan mozgatta a megfelelő pozícióba a tárgylemezre rögzített detektort. Az elkészült felvételeken a nyomok összeszámolását manuálisan végeztem. A megbízható kiértékelés érdekében egy detektor esetében legalább 10 különböző ponton történt meg a nyomszámok meghatározása.

Az Intézetben alkalmazott kiértékelő rendszer több tulajdonsága miatt is nehezen alkalmazhatóvá vált. Az egyik ilyen tulajdonsága, hogy korszerűtlen. Az alkalmazott operációs rendszer Windows 95, a program csak ezen képes megfelelően működni. Maga a rendszert alkotó eszközök is korszerűtlenek, meghibásodás esetén a javításuk nagyon bonyolult, az új eszközök (pl.: kamera, vezérlőegység, stb.) beszerzése nehezen megoldható. A másik problémája, hogy lassú, mivel a mikroszkópos kiértékelő rendszerrel a detektorok feldolgozása szinte teljesen manuális és a szoftver csak kevés lépést tud emberi beavatkozás nélkül elvégezni. A nyomok számának meghatározása teljesen manuális, ami főként a kiértékelés sebessége és a szubjektivitás miatt okoz problémát. Ezzel a módszerrel a maximálisan kiértékelhető detektorok száma (kellő gyakorlat mellett) óránként tíz.

A manuális kiértékelés és nyomszámolás miatt a folyamat rendkívül szubjektív. Ennek igazolására egy tesztet végeztem el az Intézet munkatársainak bevonásával. A radon és a toron kalibrációs kamrában besugároztam a különböző gyártmányú CR-39-es nyomdetektorokat, a radon kamra esetében kétféle, a toron esetében egyféle diffúziós kamrában. A besugárzás paramétereit a **7. táblázatban** láthatóak. Minden csoportban 10 detektor tartozott.

7. táblázat: Szubjektivitás teszt során történt besugárzások paramétereit

	CR-39 típusa	Diffúziós kamra típusa	Besugárzás helye	Radon/Toron expozíció [kBq/m³]
1	Baryotrak	NRPB	Radon kamra	1700
2	Baryotrak	Raduet	Radon kamra	1700
3	Tastrak	NRPB	Radon kamra	1750
4	Tastrak	Raduet	Radon kamra	1750
5	Baryotrak	Raduet	Toron kamra	2090
6	Tastrak	Raduet	Toron kamra	1750

A besugárzást követően a detektorokat a szokásos eljárással marattam, majd 5 személlyel, egymástól függetlenül a mikroszkópos rendszerrel kiértékeltem. Minden detektornál 10 különböző ponton történt a nyomszám meghatározása, ami a 10 detektor esetében 100 db nyomszámot jelent egy csoporton belül személyenként.

6.2. Szkenner alapú kiértékelő rendszer

Az új kiértékelő rendszer fejlesztése során felmerült annak a lehetősége, hogy ne egy optikai mikroszkóp, hanem egy nagyfelbontású szkennert legyen a rendszer alapja. Ennek vizsgálatához összeállítottam egy rendszert, amely két fő részből áll: egy nagyfelbontású szkennert és egy kiértékelő programot tartalmazó számítógépet. Az összeállítás során a fő célkitűzésem az volt, hogy a kialakított rendszer bárki számára hozzáférhető legyen, ezért olyan eszközöket válogattam össze, melyek könnyen beszerezhetőek.

A rendszer alapja egy nagyfelbontású, fotó szkennert (Canon Canoscan 9000F; 4800dpi), melyhez egy számítógépes munkaállomás is tartozik (Fujitsu CELSIUS W520; 16GB RAM). A munkaállomás megválasztásánál fontos szempont volt, hogy a szkennert által készített nagyméretű (~1GB/kép) felvételek is kezelhetőek legyenek.

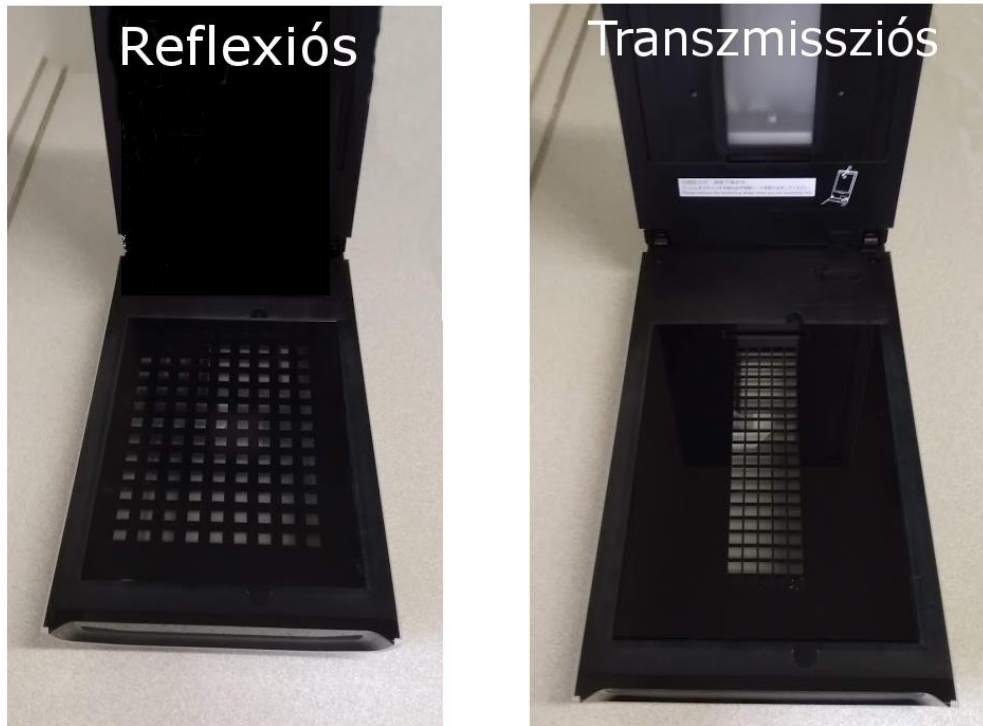
6.2.1. Szkennelési fázis beállításai

Első lépésben el kellett döntenem, hogy a szkennert által készített felvételek megfelelőek-e a kiértékeléshez. Ehhez megvizsgáltam és összehasonlítottam az alkalmazható szkennelési üzemmódokkal (reflexiós és transzmissziós) készített felvételeket.

A reflexiós üzemmód esetén a detektorokat alulról világítja meg a rendszer és a visszaverődő fény segítségével készíti el a felvételt. A transzmissziós üzemmód esetén a fény szintén alulról világítja át a detektorokat, viszont a letapogató fej a felső részen helyezkedik el, így a kettő együttes mozgásával készül el a felvétel.

A transzmissziós üzemmód esetében a szkennert kialakítása miatt csak egy adott sávba helyezhettem a detektorokat. Ehhez egy tartólemezt készítettem, amely a megfelelő pozícióban rögzíti a detektorokat. Ebben az esetben egyszerre 95 detektorról tudtam felvételt készíteni.

A reflexiós üzemmód esetében – bár a teljes lapfelületet használhattam – ebben az esetben is szükség van egy tartóra, melyben összesen 117 detektor fér el egyszerre. Ennek oka, hogy a képfeldolgozás elején a nagyméretű felvételtől kisebb képeket állít elő a program, mely képen egy-egy detektor látható. A daraboláshoz alkalmazott script pozíciók alapján keres, így a detektoroknak mindig azonos pontban kell elhelyezkedniük ahhoz, hogy felismerje őket. A két üzemmódnál használt tartók a **15. ábrán** láthatóak.



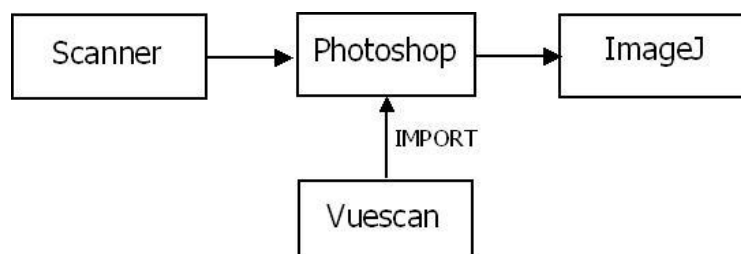
15. ábra: A reflexiós (balra) és a transzmissziós (jobbra) üzemmódok esetében alkalmazott detektortartók

6.2.2. Képelemző szoftver kiválasztása

Miután meggyőződtem arról, hogy a szkener által transzmissziós módban készített felvételek alkalmasak lehetnek a kiértékeléshez, két képelemző szoftvert (ImageJ és Image Analyser) teszteltem. Ezeket a szoftvereket korábban nem használták nyomok azonosítására, de sok más alkalmazási területen elterjedtek [*Eliceiri és Rueden, 2005; Gering és Atkinson, 2004*].

6.2.2.1. ImageJ

Az Intézetben készült első verzió esetében a kiértékelő rendszer felépítése a **16. ábrán** látható részekből épült fel.



16. ábra: Az ImageJ alkalmazása esetén felépülő kiértékelő rendszer

A képek elemzését és a nyomok felismerését az ImageJ szoftver tette lehetővé, amely egy nyílt forráskódú képelemző program. Felépítéséből adódóan könnyen hozzáilleszthető

más programokhoz és használható azokkal együtt. A fejlesztők lehetőséget adnak arra is, hogy a felhasználók rövid scripteket illesszenek bele. Számos területen alkalmazzák a mérnöki tudományokban, mivel számtalan elemzésre képes (méret meghatározása, távolság és szög mérése, statisztikai elemzések elvégzése, stb.) és a legtöbb képfarmátumot tudja értelmezni.

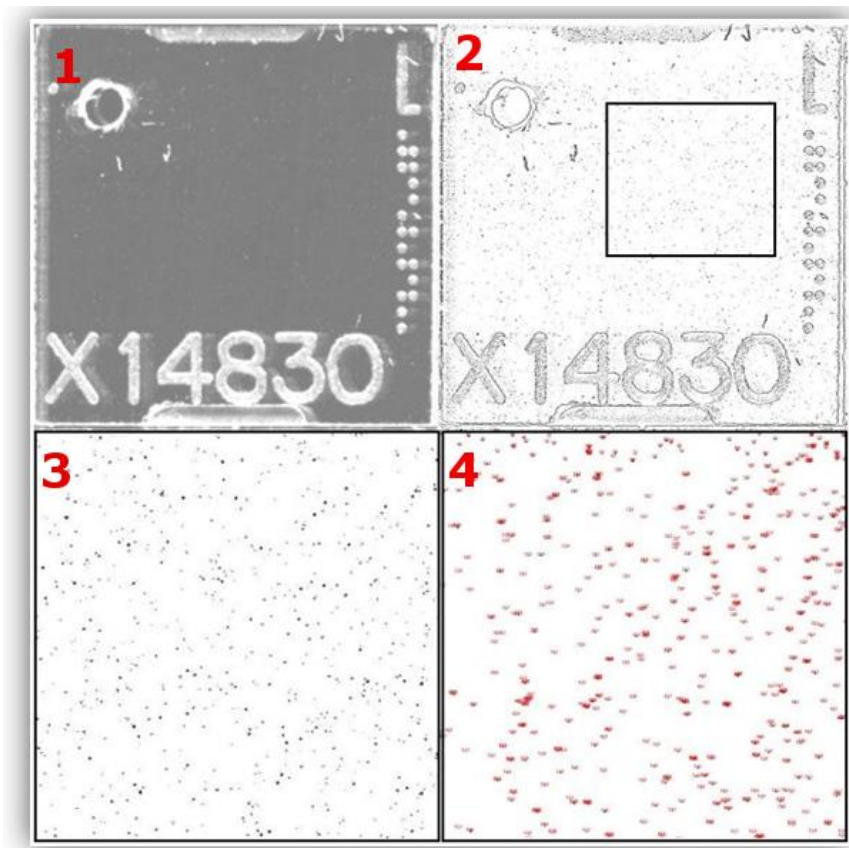
Az ImageJ alkalmazásakor szükség volt egy másik, képszerkesztő program alkalmazására. Az ImageJ által végzett előkészítési lépések nem voltak megfelelőek

Habár az ImageJ képes arra, hogy az elemzés előtt előkészítse a felvételeket, ebben az esetben mégis szükség volt egy képszerkesztő program alkalmazására is. Erre a feladatra az Adobe Systems cég Photoshop nevű programja lett kiválasztva. Ennek alkalmazásával egy előzetes tisztítási folyamatot (pl.: szűrők alkalmazása), valamint a felvétel kisebb részekre (egy képen egy detektor szerepel) darabolását tudtam elvégezni.

A kiértékelés lépései a következők:

1. Photoshop elindítása
2. A Vuescan által készített felvételek importálása
3. Kép előkészítése
4. ImageJ megnyitása, kép elemzése

Az ImageJ működése alapvetően három fő részre bontható: a szkennelt és feldarabolt képeket monokrómmá alakítja, majd kijelöli a vizsgált területet, majd végül azonosítja és megszámlálja a benne található nyomokat. A folyamat egyes lépései a **17. ábrán** láthatóak.



17. ábra: ImageJ kiértékelés lépései (1. monokrómmá alakítás, 2. vizsgált terület kijelölése, 3. objektumok megkeresése, 4. nyomok azonosítása és összeszámlálása) [Bátor et al., 2015]

6.2.2.2. Image Analyser (IMAN)

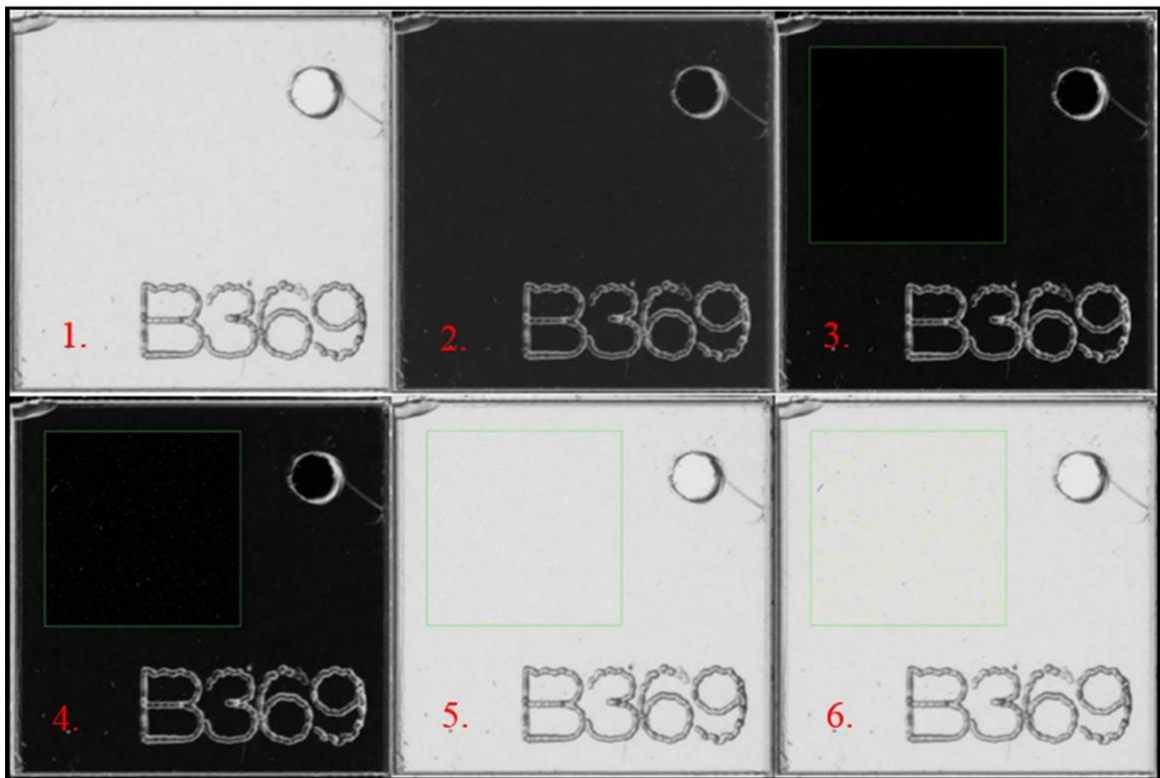
A másik vizsgált szoftver egy olyan program volt, amely a nyomok alakján kívül az egyéb morfológiai paramétereket is képes elemezni és ezáltal a megtalált objektumokat csoportosítani. A választásom az Image Analyser (IMAN) programcsomagjára esett, amely az MTA EK MFA³ Intézetében került kifejlesztésre. A szoftver nagy előnye, hogy rendelkezik saját, megfelelő képfeldolgozó funkcióval (szűrők alkalmazása, színrendszerek, felbontások közötti váltás, stb.), így kiegészítő program (ld. Photoshop az ImageJ esetében) alkalmazására nem volt szükség. Másrészt alkalmas objektumok azonosítása mellett azoknak az osztályozására különböző szempontok alapján. Ezzel a funkcióval pedig alkalmas nemcsak a nyomok és egyéb zavaró objektumok elkülönítésre, hanem az egymást átfedő objektumok elválasztására is. Bár a jelenlegi fejlesztés során a kiértékelő rendszer alapjául egy szkennert választottam, az IMAN egy gyakorlatilag teljesen automata rendszer kiépítésre is alkalmas, mivel tartalmaz egy kamerát és

³ MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, korábban KFKI MFA

mikroszkóp vezérlő funkcióval is rendelkezik, vagyis saját maga is képes elkészíteni a felvételt.

Ahogy korábban már megemlítésre került, az IMAN esetében nem szükséges egy külön képfeldolgozó szoftver alkalmazása. A képfeldolgozás és értékelés lépései – melyek a **18. ábrán** láthatóak – a következők:

1. eredeti kép elkészítése
2. inverz kép készítése
3. kontraszt növelése
4. a vizsgált terület kijelölése
5. szűrés
6. nyomok osztályozása



18. ábra: Az IMAN kiértékelési folyamata [Bátor et al., 2015]

Az IMAN objektumosztályozó funkciója előre definiált paraméterek alapján végzi el a folyamatot, mely paraméterek a

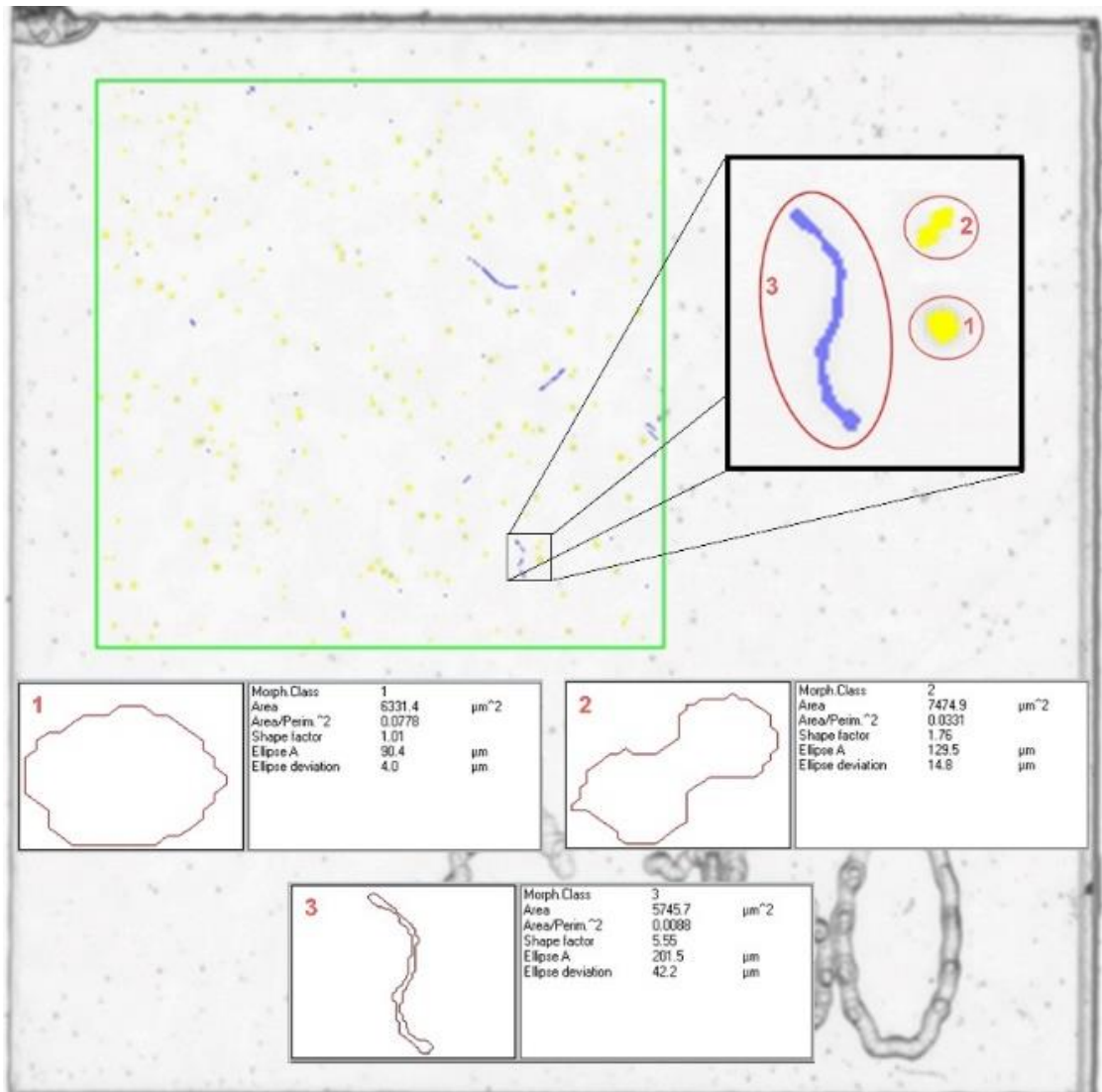
- terület
- terület/kerület² aránya
- ellipszis nagytengelye

- ellipszis elhajlása
- alaktényező.

Az IMAN alkalmazásának kezdetén meg kellett határoznom a morfológiai osztályozás alapjait. Vagyis meg kellett adnom, hogy az egyes morfológiai osztályokba milyen tulajdonságú objektumok kerüljenek. Ehhez már maradt detektorokról készítettem felvételeket és megkerestem az összes objektumot. Ezt követően párhuzamosan vizsgáltam a detektorról készített felvételt és a mikroszkóp által adott képet. Szétválogattam az objektumokat 3 morfológiai osztályba. Az első osztályba az alfa-sugárzás okozta nyomok kerültek. A második osztályba azokat a nyomokat soroltam, amelyek egymást átlapolva keletkeztek. A harmadik osztályba pedig az objektumként azonosított egyéb szennyeződések vagy sérülések a detektor felületén.

Az általam megadott, ún. referencianyomok alapján az egyes osztályokban minden paraméterhez rendelt egy tartományt. Az ismeretlen objektumok esetében a tartományok alapján sorolja be őket az egyes osztályokba.

Az osztályozáshoz kapcsolódó példa a **19. ábrán** látható.



19. ábra: Nyomok morfológiai osztályokba sorolása az Image Analyser segítségével [Csordás et al., 2016]

6.2.3. Vizsgált felület nagyságának meghatározása

Az Intézetben alkalmazott diffúziós kamrákba a nyomdetektorok Bluetech ragasztóval lettek rögzítve. A detektorok kiértékelése és a vizsgált felület meghatározása szempontjából nagyon fontos, hogy a ragasztó megfelelő védelmet nyújtott-e a nyomdetektor egyik oldalának, vagy mindkét felét elérhette az alfa-sugárzás.

Ennek megállapítása érdekében két teszt sorozatot végeztem el. Egy magas (170 kBq h m^{-3}) és egy alacsonyabb (100 kBq h m^{-3}) radonexpozíciónak tettem ki nyomdetektorokat. Mindkét szinten volt 10 detektor, melynek egyik oldalát sem védtem, 10 detektornak az egyik felét alacsony radonáteresztő képességű fóliával borítottam, míg 10 detektornak Bluetech ragasztóval védtem az egyik oldalát. A besugárzást követően marattam, majd a kiértékelő rendszerrel kiértékeltem a detektorokat.

6.2.4. Ismételhetőségi vizsgálatok

Az új rendszer tesztelése során vizsgáltam a többszörös kiértékelések során kapott eltéréseket. Ehhez 460 db korábban kihelyezett, majd maratott és kiértékelt nyomdetektort használtam. A detektorokat bepakoltam a tartóba, majd 10-szer egymás után felvételt készítettem. Minden egyes felvételt kiértékeltem mind a kisebb, mind pedig a nagyobb vizsgált terület alkalmazásával. Ezt követően a detektorokat kivettem a tartóból és a korábbtól eltérő pozícióba helyeztem vissza, majd ismét elvégeztem a 10-szeres szkennelést és dupla kiértékelést. A detektorokat összesen 10 különböző pozícióba helyeztem el.

IV. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

7. Nyomdetektorok

A két CR-39 nyomdetektor típus vizsgálata során kapott eredményeket és az ezekből levonható következtetéseket, javaslatokat az alábbiakban mutatom be.

7.1. Háttér meghatározása

A **20. ábrán** látható az egy éves időtartamú mérés sorozat eredményei.



20. ábra: A két CR-39 gyártmány esetén kapott háttérnyomsűrűségek az egy éves mérési periódus alatt

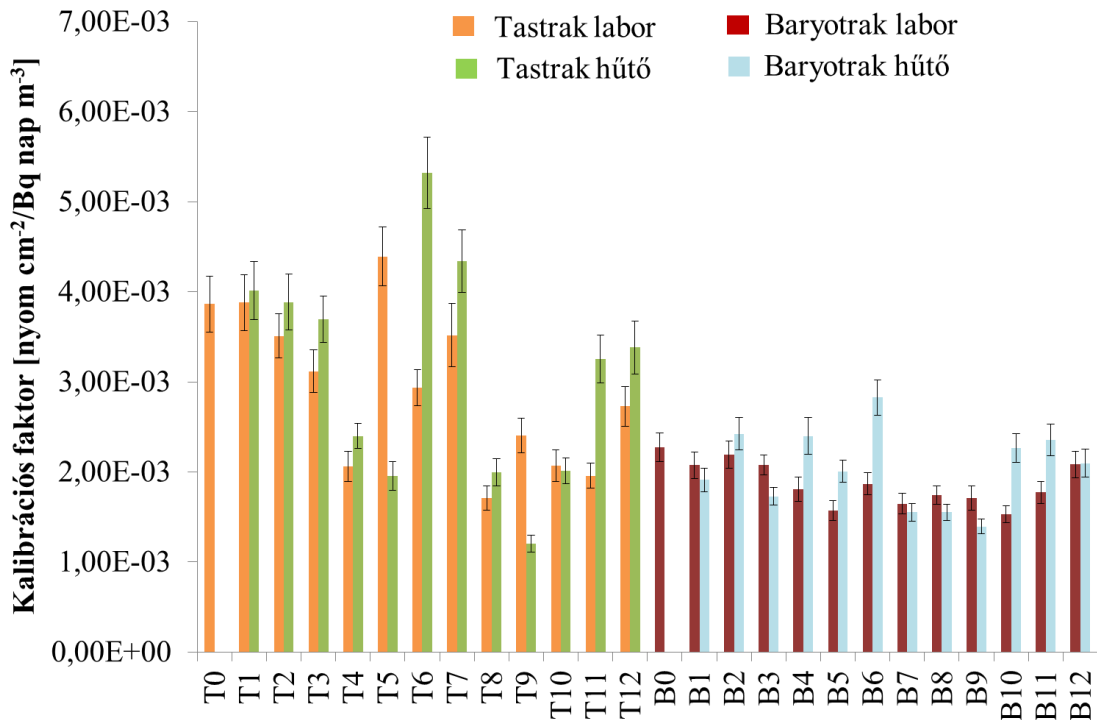
A Tastrak detektorok ($0,8-4 \text{ nyom cm}^{-2}$) esetében a háttér jóval magasabb volt, mint a Baryotrac típusú ($0-1,5 \text{ nyom cm}^{-2}$) detektoroknál mérhető. Ez a különbség az átlagok esetében 37%. A tárolás hőmérséklete és a háttér nyomszám változása között tendenciát nem figyeltem meg. Néhány eset kivételével a két hőmérsékleten (ugyanabban a hónapban) tárolt detektorok háttéré között szignifikáns különbség nem volt.

Általánosságban elmondható, hogy mindkét típusnál, mindkét hőmérséklet esetében az idő elteltével a háttér növekedése figyelhető meg. Ennek a növekedésnek a mértéke a Baryotrac detektorok esetében kisebb (15%), mint a Tastrak detektoroknál (40%).

A háttér nyomsűrűségének szempontjából a beltéri radon felmérésekhez alkalmazott monitorok alapjául a Baryotrak gyártmányt javaslom, mivel az alacsonyabb háttérérték alacsonyabb kimutatási határt jelent.

7.2. Nyomdetektor érzékenységének vizsgálata

A nyomdetektorok érzékenységének, valamint annak időbeli változásának leírására is szolgáló kalibrációs faktor értékeket a **21. ábrán** ábrázoltam.



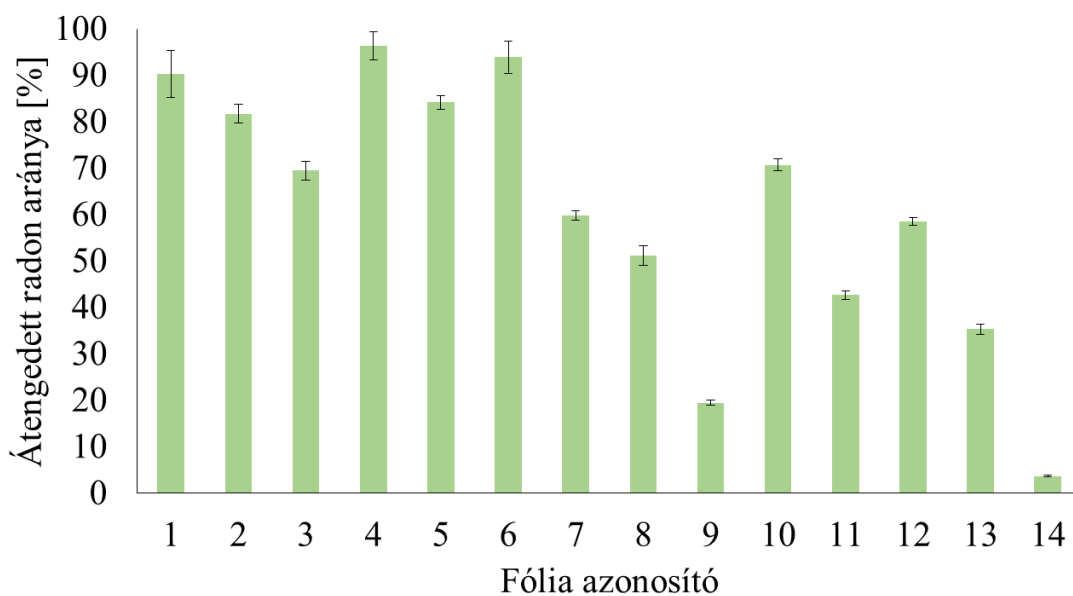
21. ábra: CR-39 detektorok kalibrációs faktorának változása egy éves időszakban

Az eredmények alapján elmondható, hogy a legtöbb esetben nincs szignifikáns különbség a hűtőben, valamint a szobahőmérsékleten tárolt detektorok kalibrációs faktorai között ugyanabban a hónapban. A hűtőben tárolt Tastrak detektorok esetében kapott kalibrációs faktorok átlag értéke $3,12 \times 10^{-3} \pm 1,21 \times 10^{-3}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3} , míg a szobahőmérsékleten tároltaké $2,86 \times 10^{-3} \pm 8,49 \times 10^{-4}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3} . Ugyanezek az értékek a Baryotrak detektorok esetében $2,04 \times 10^{-3} \pm 4,33 \times 10^{-4}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3} és $1,84 \times 10^{-3} \pm 2,20 \times 10^{-4}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3} . A faktorok alapján a Tastrak detektorok érzékenysége átlagosan 50%-kal nagyobb, viszont a szórásuk sokkal magasabb (35%). A Baryotrak detektorok kisebb érzékenységgel bírnak, de a kalibrációs faktor szórása jóval kisebb (15%).

Mindkét vizsgálatot figyelembe véve a Baryotrak detektort javaslom a további használatra az alacsonyabb háttér és a kalibrációs faktor kisebb ingadozása miatt. A vizsgált paraméterek változásai alapján az alkalmazott mérési eljárásban a háttér havonta, míg a kalibrációs faktor negyedévente történő meghatározását javaslom.

7.3. Fóliák radon átteresztő képességének vizsgálata

A fóliák radon átteresztő képességének jellemzésére meghatároztam, hogy a fóliákba csomagolt detektorokon mérhető nyomsűrűség hány százaléka a szabadon lévő detektoron mérthez képest. Ennek eredményét a **22. ábrán** mutatom be.



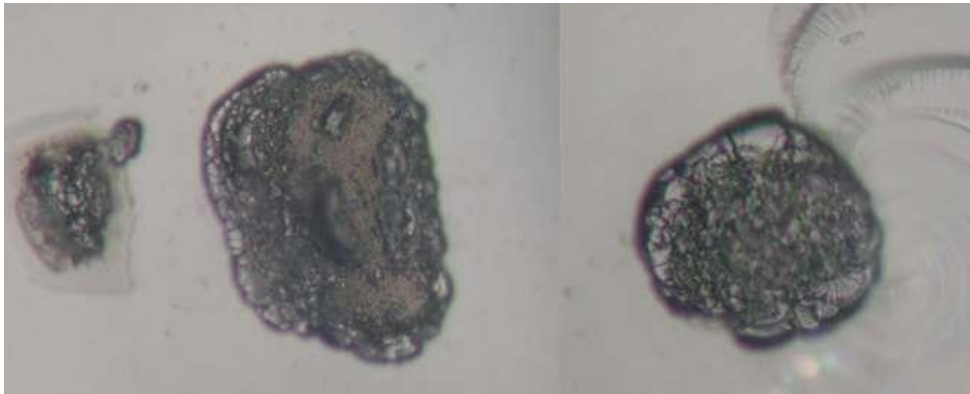
22. ábra: A vizsgált fóliák radon átteresztő képessége

Az ábrán jól látható, hogy a fóliák többsége nem felelt meg az elvárásoknak, hiszen a radon nagyobb részét átengedte. A két legkisebb értéket a 9 (16%) és a 14 (4%) sorszámú fóliák esetében kaptam. A végső választás a 14. sorszámot viselő fóliára esett, melynek anyaga polietilén volt. A legkisebb radon átteresztés mellett a gyártó az egyedi méretekben történő gyártást is vállalta.

8. Maratás

8.1. Optimális nyomátmérő tartomány meghatározása

A kipróbált excimer lézerek közül a KrF esetében a detektor felülete jelentős mértékben berepedezett. A sérülésről készült felvételek a **23. ábrán** láthatóak. A repedezés oka feltehetően a detektoranyag alacsony abszorpciója ezen a hullámhosszon.



23. ábra: A KrF lézerrel készített próbanyomok képe

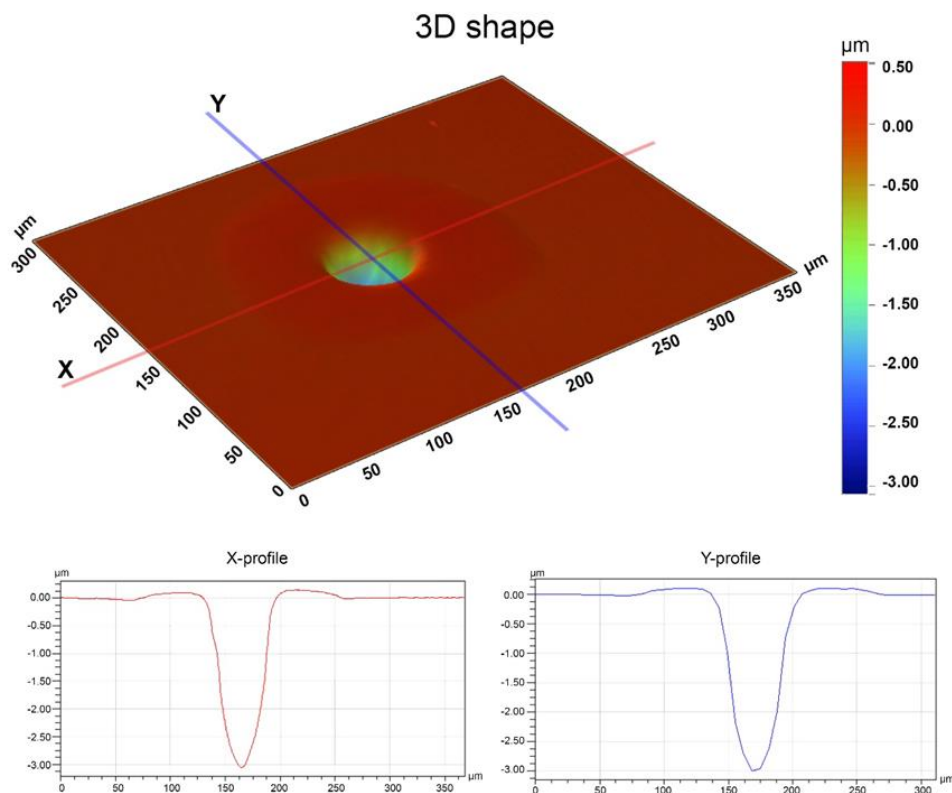
A CO₂ lézer alkalmazása során a kapott nyomok alakja megfelelő volt, a detektor felületén egyéb sérülést nem okozott a nyaláb. A nyomról készült optikai mikroszkópos felvétel a **24. ábrán** látható.



24. ábra: CO₂ lézerrel készült nyom optikai mikroszkópos felvétele

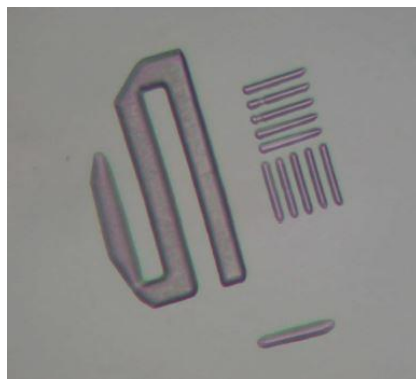
A lézernyaláb által keltett nyom profilja a **25. ábrán** szerepel. A felvett X és Y profilokon jól látható, hogy a detektor felülete felhólyagosodott a nyom széle mentén. A függőleges kitüremkedés eredményeképpen az anyag vízszintes irányban tágul, ami az átmérő növekedését okozza. Az eszköz segítségével az előre beállított átmérőnél 10%-kal nagyobb nyomot sikerült kialakítani, de ez a probléma könnyen megoldható és előre tervezhető. A profilok alapján az is megállapítható, hogy a keltett nyom alakja megfelelő. Hátránya viszont, hogy a legkisebb kialakítható nyom átmérője 50 μm , amely nagyobb,

mint az általam vizsgálni kívánt legkisebb átmérő (10 μm). Emiatt a CO₂ lézer alkalmazását elvettem.



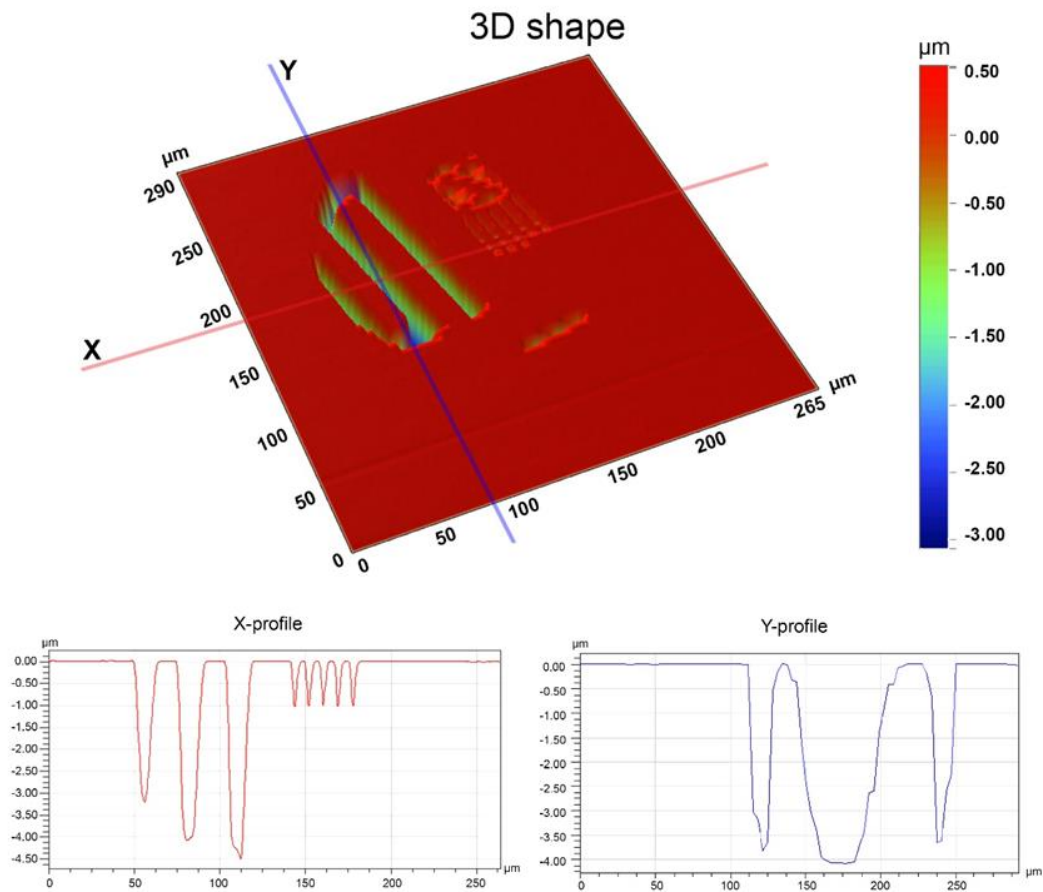
25. ábra: CO₂ lézernyaláb által létrehozott nyomok profilométeres felvétele [Csordás et al., 2016]

A kipróbált lézerek közül a harmadik típus az ArF excimer lézer. Ennek alkalmazásakor a detektor felületén a kívánt mintázat jelent meg a felhólyagosodás vagy egyéb jelenségek miatti méretnövekedés nélkül. Az elkészült próbajelölések optikai mikroszkópos képe a **26. ábrán** látható.



26. ábra: Az ArF lézerrel készített minta optikai mikroszkópos felvétele

Az ArF lézerrel készített mintázatokat is alávettem profilométeres vizsgálatnak, amelynek eredménye a **27. ábrán** látható.

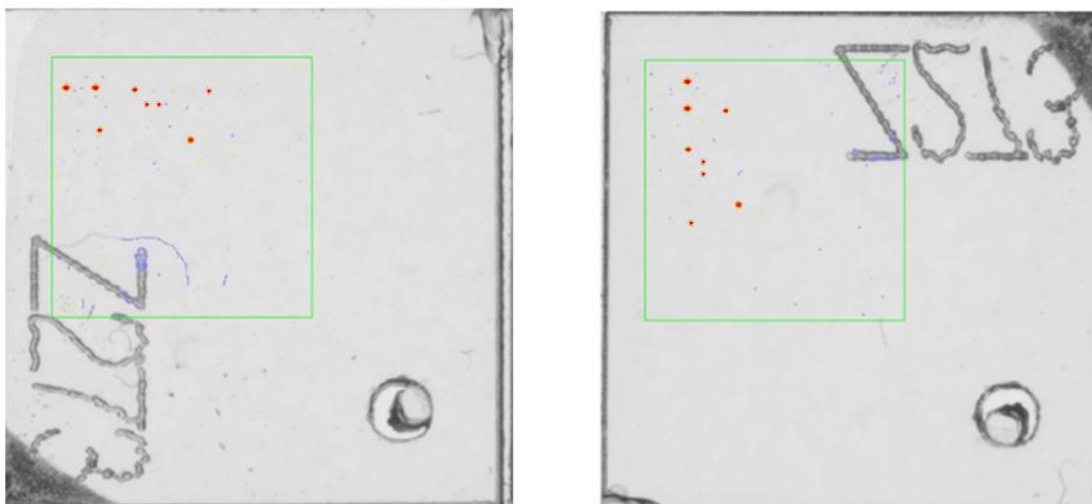


27. ábra: Az ArF lézerrel készített minta profilométeres elemzése

A profilométeres vizsgálat alapján elmondható, hogy a lézer nem okozott felhólyagosodást vagy egyéb sérülést az általam kívánt mintázaton kívül. A detektoron készült mintázat egyes elemei közel estek egymáshoz (5 μm távolságon belül), de jól látható a profilon, hogy ezek nem voltak egymásra hatással. Ennek a módszernek az alkalmazásával az előre megadott méretek nem változtak.

Összehasonlítva a három lézer által létrehozott próbaminták elemzésének eredményeit, a kalibráló lemezt az ArF excimer lézer segítségével készítettem el.

Az ArF lézer által létrehozott nyomokról készült felvételek a **28. ábrán** láthatóak.



28. ábra: A kalibráló lemezről készített felvételek felfelé (bal oldali kép) és lefelé (jobb oldali kép) fordított pozícióban

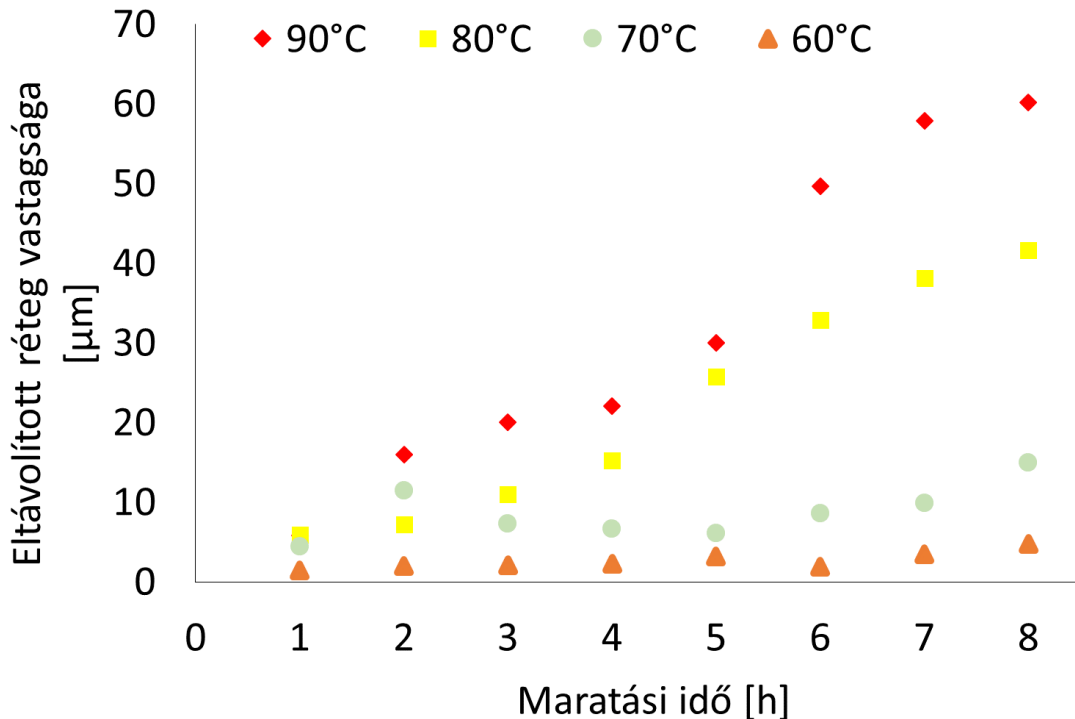
A felvételeken pirossal jelölt részek a szoftver által nyomként azonosított objektumok, míg késsel a megtalált, de nem nyomnak minősített alakzatok láthatóak. A többszöri kiértékelés alapján azt mondhatom, hogy a szoftver a $40\ \mu\text{m}$ alatti nyomokat nem volt képes megfelelően azonosítani. Ennek oka, hogy az általam alkalmazott felbontásban (4800 dpi) a nyomok körülhatárolása nem megfelelő és a kontraszt különbség sem elegendő ebben a mérettartományban. A nyomok megbízható azonosítása tehát a $40\ \mu\text{m}$ feletti tartományban elfogadható.

Az ideális nyomátmérő meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy nagy nyomsűrűség esetén a túl nagy átmérő a nyomok egybeolvadását okozná, ami a kiértékelést jelentősen megnehezítené. Ennek megakadályozása érdekében a nyomok maximális átmérőjét $60\ \mu\text{m}$ -nek választottam.

A másik fontos megállapítás a felvételek kiértékelését követően, hogy mindkét pozíció esetében ugyanazt az eredményt kaptam, vagyis a transzmissziós üzemmód miatt a szkener a detektor mindkét oldalát látja függetlenül attól, hogy milyen pozícióban helyeztem el a tartóban. Ez a megállapítás a kihelyezett detektorok esetében igencsak jelentős, mivel így a szkener által vizsgált terület a kétszeresére nő.

8.2. Maratási paraméterek meghatározása

A **29. ábrán** az eltávolított réteg vastagsága különböző hőmérséklet és maratási idő esetén.



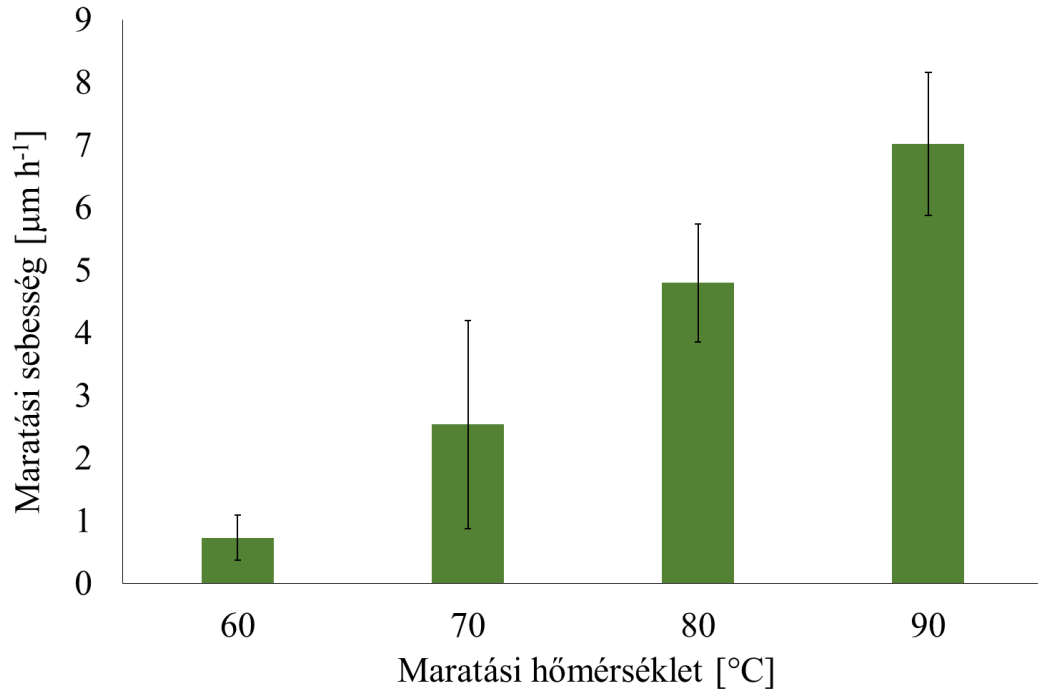
29. ábra: Az eltávolított réteg vastagsága a maratási idő függvényében a különböző hőmérsékleteken

Az ábra alapján látható, hogy az eltávolított rétegvastagság folyamatosan növekszik a maratási idő emelkedésével, ahogy az várható volt. A különböző hőmérsékletek között azonban jelentős különbségek vannak. Kisebb hőmérsékleteknél (60°C és 70°C) kisebb mértékű az emelkedés, míg a magasabb hőmérsékleteken jelentősebb.

A detektorok tömegének változása alapján meghatároztam a maratási sebességeket az egyes körülmények esetén a **12. egyenlet** alkalmazásával. A kapott értékeket a **30. ábrán** látható diagramon ábrázoltam. A normál maratási sebesség meghatározásához szükséges adatokat a **8. táblázat** tartalmazza.

8. táblázat: A maratási sebesség meghatározásához szükséges paraméterek

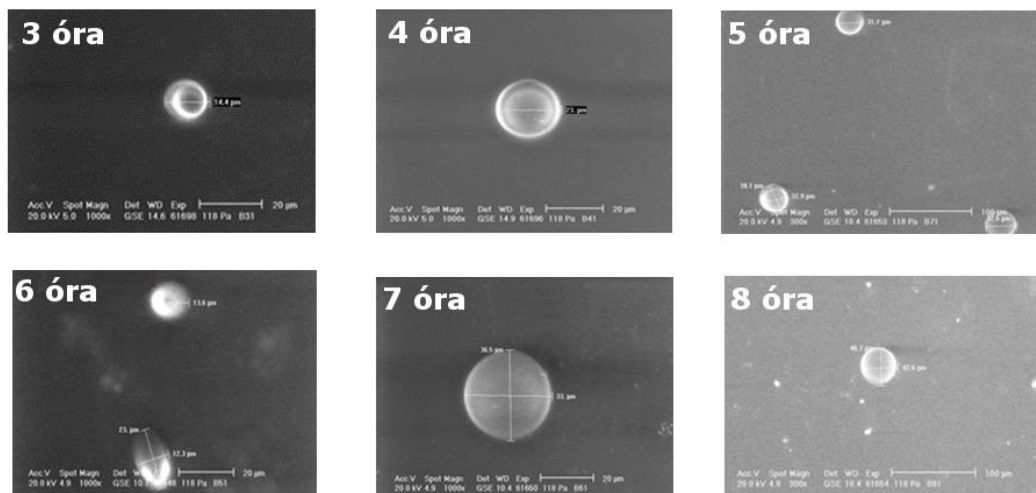
Paraméter	Értéke
Maratott detektor felülete (A)	1 cm ²
Detektoranyag sűrűsége (ρ)	1,31 g/cm ³



30. ábra: Maratási sebességek a hőmérséklet függvényében

Az eredmények alapján elmondható, hogy a legnagyobb maratási sebességet a 90°C-os oldat esetében kaptam. A két legmagasabb hőmérséklet esetén a maratási sebességek meghatározása kisebb mértékű szórást (<20%) mutat, mint a kisebb tartományok esetén (>50%).

A kapott eredményeket figyelembe véve a 90°C-os maratás esetében SEM vizsgálatnak vettem alá a detektorokat és határoztam meg az egyes időtartamok esetében a nyomok átmérőjét. A 31. ábrán a rendszer által készített felvételek láthatóak 3 és 8 óra között maratott detektorok esetében.



31. ábra: A 90°C-on, különböző időtartamig maratott detektorokról készült SEM felvételek

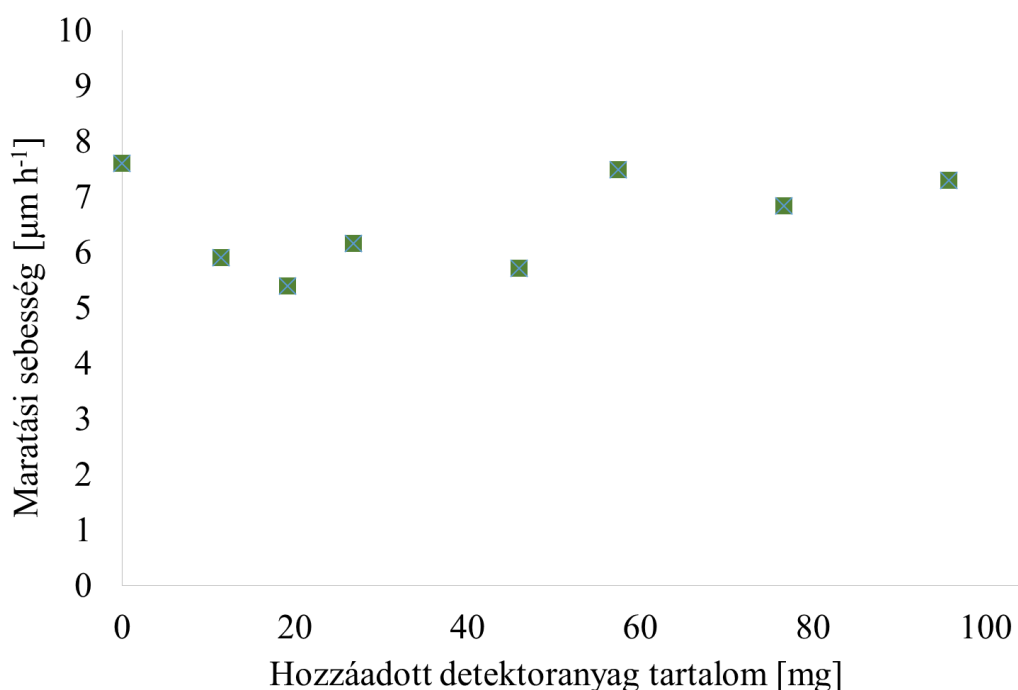
A vizsgálat során kapott átlagos nyomátmérő értékek a **9. táblázatban** találhatóak.

9. táblázat: A 90°C-on, különböző időtartamig maratott detektorokon mért átlagos nyomátmérők

Maratási idő	3 óra	4 óra	5 óra	6 óra	7 óra	8 óra
Nyomátmérő	14 μm	23 μm	28 μm	33 μm	38 μm	45 μm

Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az optimális nyomátmérő tartományt a 90°C-on történő, 8 óráig tartó maratás során érhetem el.

A maratóoldatok újrafelhasználásával kapcsolatos tesztből származó sebesség értékeket az **32. ábra** mutatja be.



32. ábra: Maratóoldatok újrafelhasználása

A kísérletek során nem tudtam kimutatni a hozzáadott detektoranyag maratási sebességre gyakorolt hatását. Ez alapján a maratóoldatok többször felhasználhatóak lehetnének, mivel a maratási sebesség nem változik. Egyéb paraméterek befolyásoló hatását azonban nem vizsgáltam, így a többszöri felhasználás előtt ezt mindenképpen szükséges megtenni.

A legfontosabb tényező a levegőből beoldódó CO_2 lehet, amely reakcióba lép a NaOH-dal, csökkentve annak mennyiségét. Ezen kívül megváltoztatja az oldat pH-ját is [Krauß és Rzehak, 2017; Yoo et al., 2013].

8.2. Maratási kapacitás növelése

A maratási kapacitásnövelés lehetőségeinek vizsgálata során kiindulási alapként a vízfürdők kialakítását tekintettem, melyek közül mind a kör, mind a téglalap alapúakat megvizsgáltam, hogy alkalmasak lehetnek-e maratóedényként. A körszimmetrikus fürdők esetében a detektorok elhelyezése nehézkes, és végső soron lényegesen kevesebb detektort fér el a téglalap alapúval szemben. A vízfürdő automata hőmérséklet szabályozó rendszerrel rendelkezik, de a szükséges folyamatos kevertetés biztosítását utólag kellett megoldanom. Ehhez a fürdő tetején egy lyukat vágtam, melyen keresztül bevezettem a keverőszárat. A kevertetés sebességének szabályozását is megoldottam fordulatszám-szabályzó beiktatásával. A detektorok maratása a vízfürdőben elhelyezett, különböző méretű kádakban történik. A detektorok rögzítésére két megoldást vizsgáltam az akasztós és rácsos elrendezést (**33. ábra**).



33. ábra: Nyomdetektor rögzítési megoldások

Az akasztós elrendezés esetén a 144 detektor behelyezése kétszer-háromszor hosszabb időt vett igénybe, mint a rácsos elrendezés esetében. Továbbá az akasztós módszer esetén a CR-39 lemezek sarkába lyuk fúrása szükséges, amely lépéstől a rácsos elrendezésnél eltekinthetünk, így a vizsgált terület nagysága megnövelhető.

Az új maratórendszerben két különböző méretű kád (**34. ábra**) alkalmazását építettem ki. A kisebb kádban egyidejűleg 120, míg a nagyobb kádban 480 detektor maratását lehet kivitelezni.



34. ábra: Az új maratórendszerben használható kádak 120 és 480 detektor maratására

Az új maratórendszer egy keverőből (3) és egy hozzá kapcsolódó fordulatszám-szabályozóból (1), egy hőmérséklet-szabályozóból (2) és a maratókádból (4) áll. (**35. ábra**)

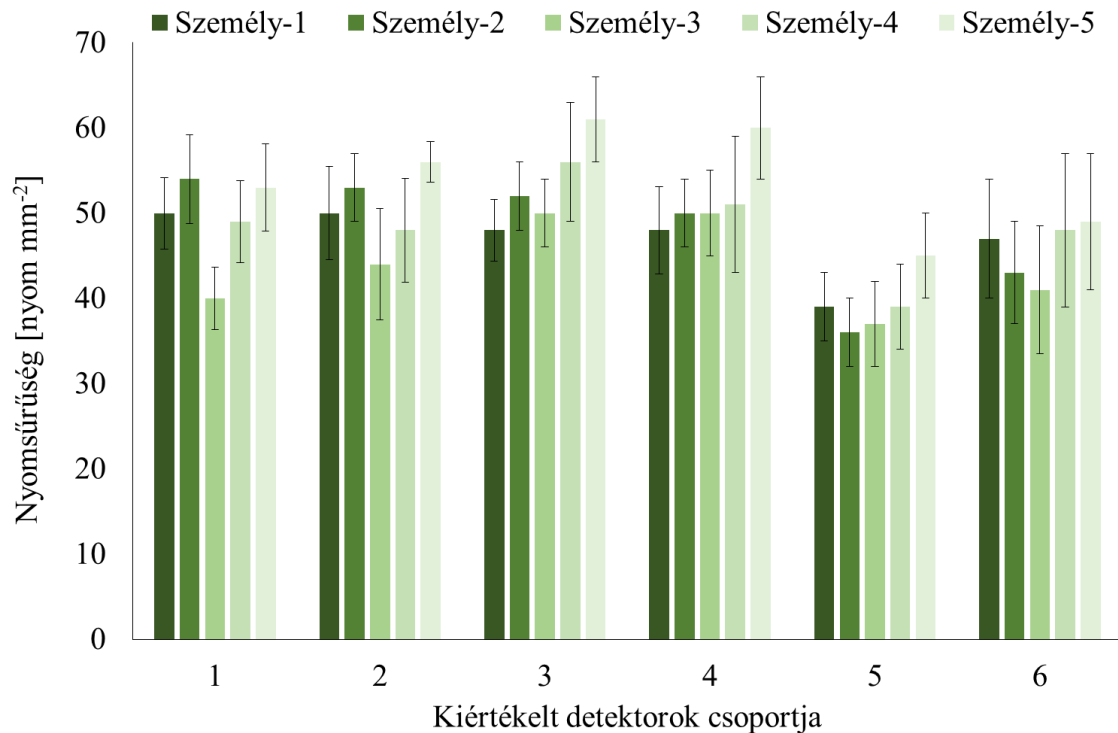


35. ábra: Az új maratórendszer (1-fordulatszám-szabályzó, 2-hőmérséklet-szabályzó, 3-keverőszár, 4-maratókád)

9. Kiértékelés

9.1. Mikroszkóp alapú kiértékelő rendszer

Mikroszkóp esetén végzett szubjektívitas teszt eredménye a **36. ábrán** látható. Ezen a 6 csoport esetében külön oszlopban ábrázoltam az adott személyekhez tartozó nyomosság értékeket. Ezeket az értékeket a kapott 100 nyomosság érték átlagolásával kaptam.



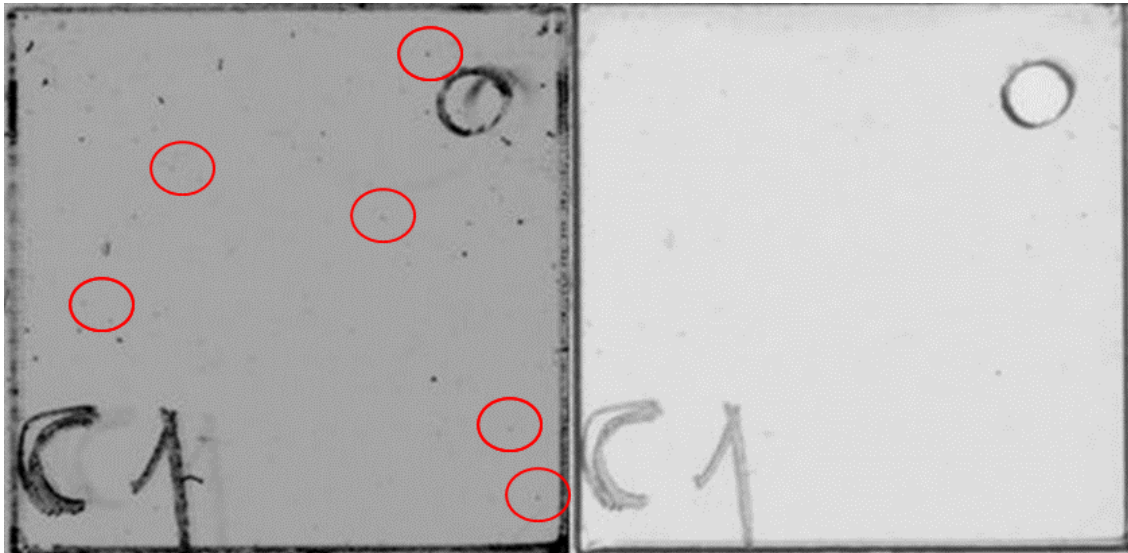
36. ábra: Mikroszkóp esetében végzett szubjektívitas teszt eredménye

Az ábra alapján elmondható, hogy mindegyik csoportban vannak kiugró értékek, melyek jelentős eltérést mutatnak a többi személyhez képest. Az egyes csoportokon belül vizsgáltam a legkisebb és legnagyobb nyomszám közötti különbséget, amely minden esetben 20%-nál magasabb volt, két csoport (1 és 9) esetében pedig a 30%-ot is meghaladta. A nagy eltérések mellett az is probléma, hogy a csoportokon belüli kiugrások nem mindig ugyanahhoz a személyhez kapcsolódnak, vagyis nem mindig ugyanaz a személy számolta a legkevesebb/legtöbb nyomot. A vizsgálat során megállapítottam, hogy kiértékelés során kapott eredmény függ a vizsgálatot végző személytől, tehát szubjektív a kiértékelés.

9.2. Szkenner alapú kiértékelő rendszer

9.2.1. A szkennelési üzemmód kiválasztása

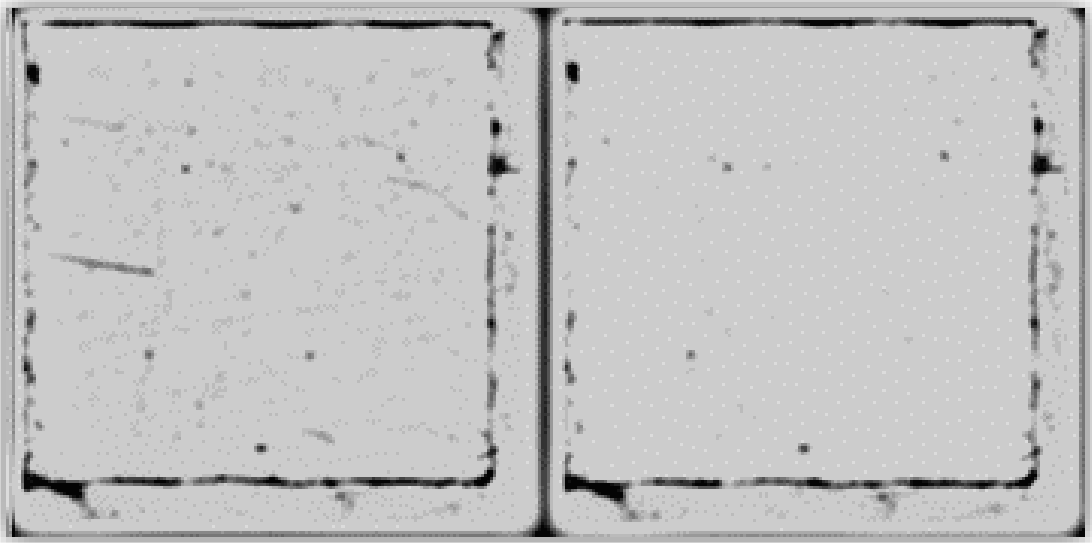
Egy teljesen új, nem besugárzott és nem maratott detektorról a különböző üzemmódokban készített felvételek a **37. ábrán** láthatóak.



37. ábra: Reflexiós (bal) és transzmissziós (jobb) üzemmódban készült képek [Bátor et al., 2015]

Jól megfigyelhető, hogy a reflexiós üzemmód esetében a felvételen sokkal több objektum található. Ennek oka, hogy ebben a módban – mivel a visszavert fényt detektáljuk – szükség van egy fekete árnyékolásra is. Ennél a felvételnél egy nanoszemcsés fekete festett üveglapot használtam a feladatra. Az üveglapon lévő szennyeződések miatt a felvételen egyéb objektumok is keletkeztek, melyeket az ábrán pirossal jelöltem. Ezek alakjukat és méretüket tekintve hasonlóak a számunkra hasznos nyomokhoz, így jelenlétük erősen befolyásolhatja a kiértékelés pontosságát.

A szennyeződések csökkentésének érdekében a festett lapot egy fekete hegesztő üvegre cseréltem. A két árnyékolási lehetőség összevetése a **38. ábrán** látható. Egyértelműen megfigyelhető, hogy a hegesztő üveggel készített kép esetében a zavaró objektumok jóval kisebb számban vannak jelen, így a kiértékelés pontosságát sem befolyásolják jelentősen.

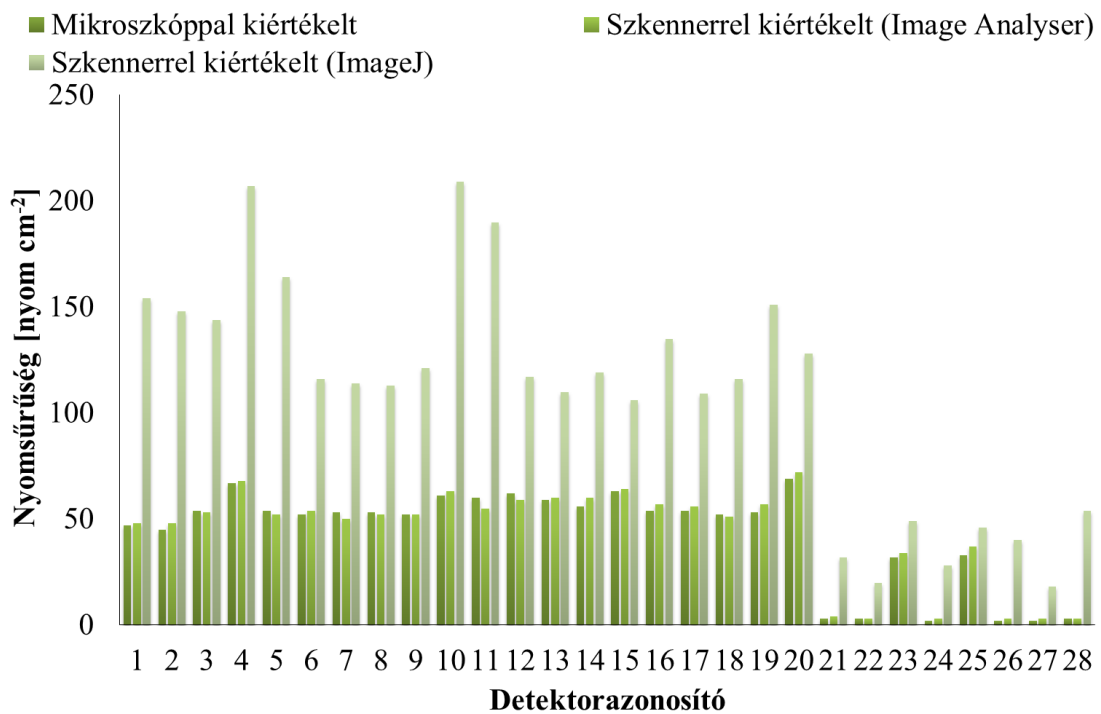


38. ábra: Különböző háttérrel reflexiós üzemmódban készült felvételek inverze (bal oldal: festett lap, jobb oldal: hegesztőüveg) [Bátor et al., 2015]

Bár sikerült lecsökkenteni az árnyékolás okozta zavaró hatást, a reflexiós üzemmód alkalmazása mégsem célszerű a detektorok kiértékelésénél, mert az így készült felvételeken sokszor megfigyelhetőek homályos, él nélküli foltok a fény visszaverődése miatt. Ez a jelenség jó látható a **37. ábrán** szereplő felvételen: a detektor azonosítójakétszeresen is szerepel- egy élesebb és egy homályos objektumként is. A képelemző és kiértékelő szoftver ezeket az objektumokat sokszor nem képes megtalálni, az elemzésük pedig igencsak nehézkes. Emiatt a reflexiós üzemmód alkalmazását elvettem és helyette a felvételeket transzmissziós módban készítettem el a továbbiakban. Ennél a lehetőségnél – a működéséből adódóan – nem keletkeznek homályos és életlen képek; a felvételeken lévő objektumok kontúrvonalai élesek és zavaró háttérnyomok megjelenésére sem kell számítani.

9.1.2. Képelemző szoftver kiválasztása

A két szóba jöhető képelemző szoftvernél elvégeztem egy összehasonlító elemzést. Ennek során 28 db, korábban már a mikroszkóppal kiértékelt nyomdetektort értékeltettem ki. Mindkét szoftver esetében a transzmissziós szkennelési üzemmódot alkalmaztam. A kapott nyomszámokat a mikroszkópos kiértékelés során kapott értékekkel vettem össze. Az elemzés eredményei a **39. ábrán** láthatóak.



39. ábra: A mikroszkópos kiértékelés és a két különböző szoftvert használó szkenneres elemzés összehasonlítása

Az eredmények alapján elmondható, hogy az ImageJ alkalmazása esetén jóval magasabb értékeket kaptam, mint a mikroszkóp esetében: átlagosan 4-szer nagyobb nyomsűrűségeket mértem. Kisebb nyomszámok esetén ez az eltérés akár 15-szörös is volt. Ennek oka feltehetőleg a megtalált objektumok nem megfelelő osztályozása. Emiatt sok esetben előfordul, hogy azokat is nyomnak tekinti, amelyek a valóságban nem azok.

Az ImageJ további tesztelése során több probléma merült fel, melyek oka az volt, hogy a szoftver nem képes ehhez a feladathoz szükséges képelemzést elvégezni. Az első probléma, hogy bizonyos objektumokat tévesen nyomként azonosított. Ilyenek voltak a nyomhoz hasonló alakú, de világosabb színű, buborékszerű szennyeződések vagy a hosszabb karcolások, melyeket több, apró részre darabolva érzékelt és nyomként azonosított. Ezt a hibát a háttérrel történő korrigálás segítségével sem tudtam kiküszöbölni. Másrészt probléma volt a többszöri kiértékelések közötti eltérések. Többször elvégeztem ugyanannak a felvételnek a kiértékelését és azt tapasztaltam, hogy eltérések vannak a kapott nyomszámok között. A harmadik probléma az egymást átfedő, dupla, vagy akár többszörös nyomok. Ezeknek a száma a nyomok mennyiségének növekedésével nő, de ki nyomszámok esetében is jelen vannak. A szoftver nem volt képes arra, hogy ezeket a többszörös nyomokat elválassza, hanem egy objektumként kezelte őket. Ezen problémák alapján az ImageJ szoftver alkalmazását elvettem.

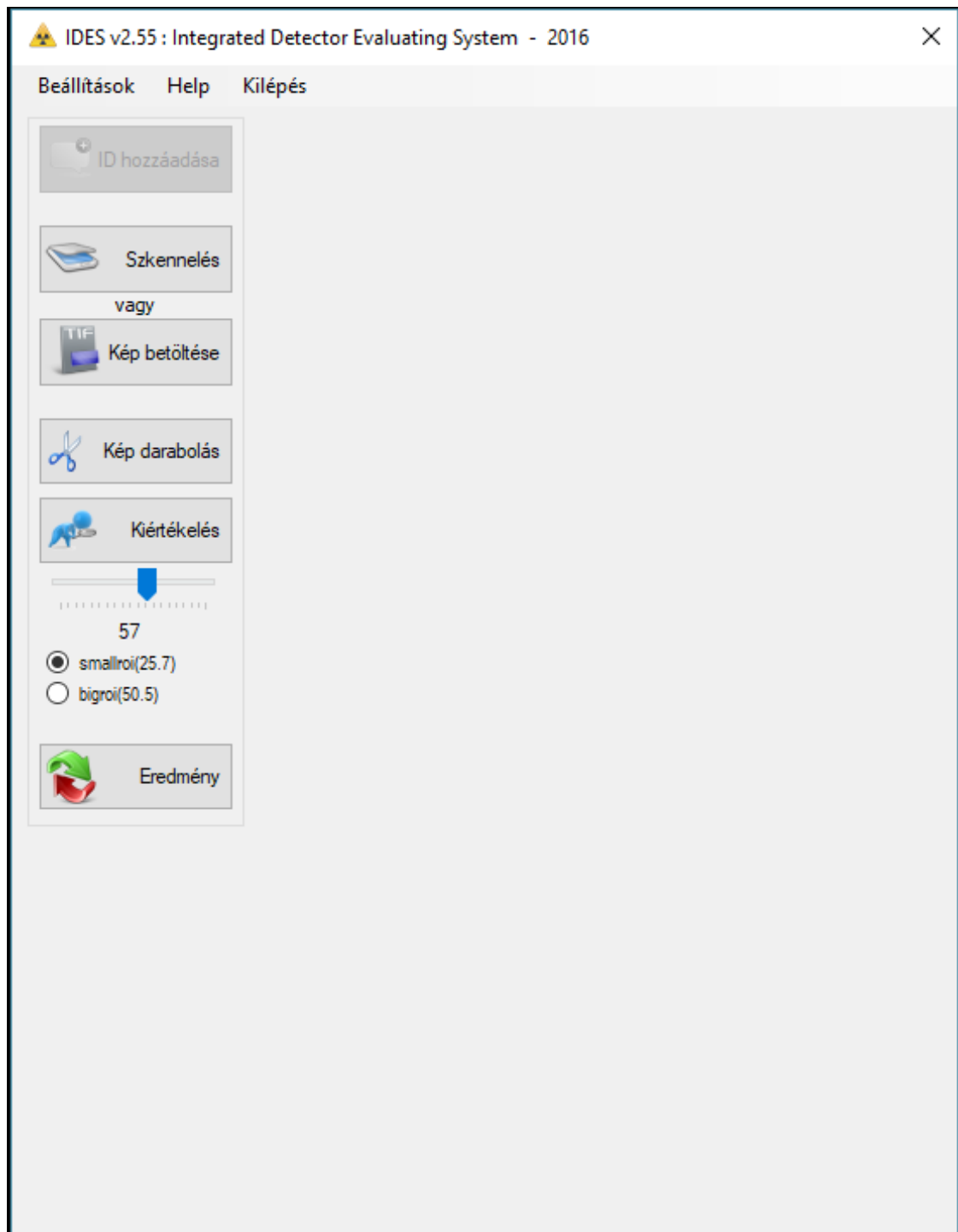
Ezzel szemben az IMAN és a mikroszkóp által kapott nyomszámok közel estek egymáshoz. A legnagyobb eltérések is 5% körül voltak. Ez alapján belátható, hogy az IMAN objektum osztályozását megfelelően állítottam be, és a szoftver jól alkalmazható egy komplett kiértékelési rendszer alapjaként.

9.3. Integrált detektor kiértékelő rendszer

A végső verzió elkészítésekor tehát a transzmissziós szkennelési üzemmódot használtam, míg a kiértékelést végző szoftvernek az IMAN programcsomagját választottam. A nyomdetektorok kiértékelésekor az alábbi lépéseken szükséges végighaladni.

1. Szkennelés
2. Darabolás
3. Értékelés, objektumok azonosítása és elemzése
4. Eredmények megadása, nyomok számának meghatározása

Kezdetben ezeket a lépéseket egymás után, manuálisan hajtottam végre. Ez a megoldás azonban számos hibalehetőséget rejtett magában, ezért meg kellett oldani a különböző, alkalmazott programok összekapcsolását. Ehhez egy olyan programot készítettem, mely automatikusan (egy gomb megnyomása után) végrehajtja ezeket a lépéseket. Ezzel a lépéssel kiküszöböltem a kiértékelő személye okozta bizonytalanságot. Ennek a programnak az Integrált Detektor Kiértékelő Rendszer angolul Integrated Detector Evaluating System (IDES) elnevezést adtam. A kiértékelő program munkablaka a **40. ábrán** látható.



40. ábra: Az IDES munkaablaka

A programban 6 feladat végrehajtását lehet elvégezni, melyeket az alábbiakban részletesen bemutatok.

ID hozzáadása

Ennek a gombnak a detektorok szkennelésekor van szerepe. A gombra kattintva lehetőség van a nyomdetektorok azonosítóit bevinni a gépbe. Az

azonosítókat a program az adott pozícióhoz rendeli és az eredmények megadásánál is ezeket használja. Ezáltal egyszerűvé válik az azonosítók és nyomszámok egymáshoz rendelése.

Szkennelés

Erre a gombra kattintva automatikusan elindul a VueScan alkalmazás, mely előre megadott paraméterekkel készíti el a felvételt. A kész felvételt egy előre kijelölt mappába menti egyedi azonosítóval ellátva (év-hónap-nap-óra-perc.tiff). A mentést követően a szkennelő program automatikusan bezárul.

Kép megnyitása

Lehetőség van korábban szkennelt, esetleg kiértékelte felvételek ismételt feldolgozására. Ebben az esetben nem szükséges az azonosítók ismételt bevitele, ez már a szkennelés előtt elmentésre került.

Darabolás

A darabolásra azért volt szükség, hogy az elkészült nagyméretű felvételeket kisebb méretű képek készüljenek és így egy képen már csak egy detektor legyen látható. Ennek célja a kiértékelés felgyorsítása, hiszen így az IMAN egy nagyjából 10 MB méretű képet tölt be és elemez, nem az eredeti felvételt, melynek mérete nagyjából 1 GB.

Kiértékelés

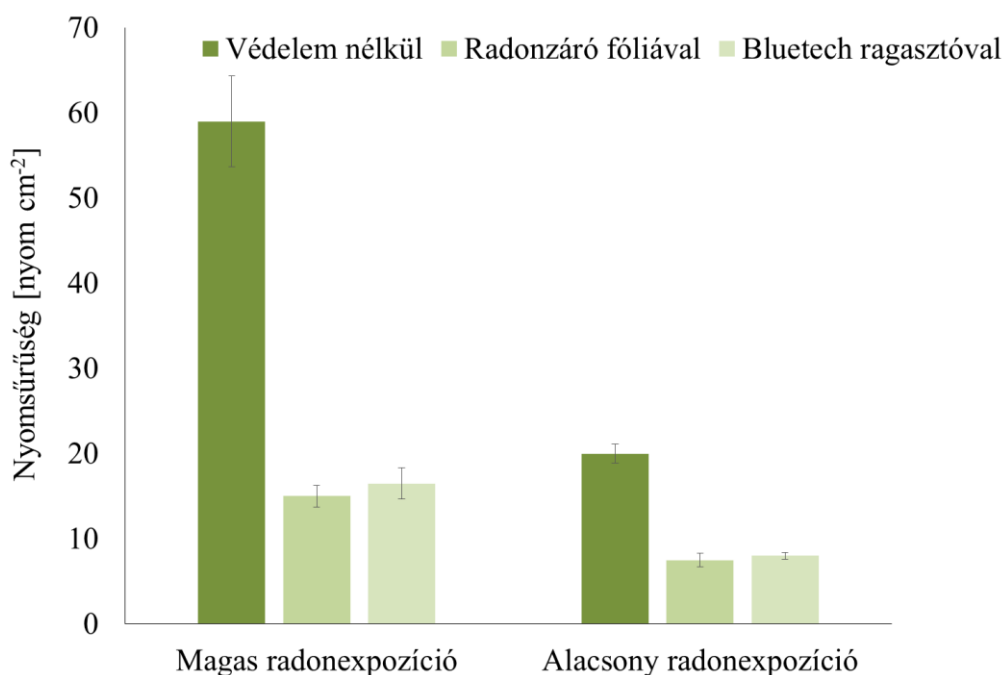
Ennél a lépésnél az IMAN szoftver elindulása történik meg a gomb megnyomása után. A kiértékelés során kiválaszthatjuk, hogy hány darab detektort szeretnénk elemeztetni. Ezt egy csúszka segítségével tudjuk megtenni, az értéket 1 és 95 között kiválasztva. A másik választási lehetőség a vizsgált terület nagysága (25,7 vagy 50,5 mm²). Erre azért van lehetőség, mert a korábban alkalmazott nyomdetektor maratási megoldás esetében egy lyukat kellett fúrni a detektor egyik sarkába, amely lyuk nem eshetett bele a vizsgált területbe. Az új, rácsos rögzítési mód miatt a lyukra már nincs szükség, ezért az újabb detektorok esetében a vizsgált terület nagyjából a kétszeresére növekedhetett. A régebbi detektorok újbóli kiértékelésének biztosításához viszont célszerű megadni a különböző opciókat.

Eredmények

Erre a lehetőségre kattintva egy általam készített rövid program az egyes detektorokhoz tartozó morfológiai osztályokban (egyes nyom, dupla nyom) összesíti a nyomok számát, majd egy táblázatban rögzíti az adott azonosítóhoz tartozó teljes nyomszámot.

9.3.1. Vizsgált felület nagyságának meghatározása

A vizsgált terület meghatározása érdekében elvégzett tesztorozat eredményei a **41. ábrán** láthatóak.



41. ábra: A vizsgált terület nagyságának meghatározásához végzett teszt eredménye

Az ábra alapján látható, hogy a védelemmel nem rendelkező detektorok mindkét esetben jóval nagyobb értéket mutattak, mint a védelemmel ellátott detektorok.

A két különböző védelem esetében hasonló nyomszámokat kaptunk: a magas expozíció esetén 9 %, míg az alacsony esetében 7 %-al nagyobb átlagértéket kaptunk a Bluetech ragasztós védelem esetében, mint a fóliával borított detektoroknál. Mivel a nyomdetektorok mérési hibája ennél magasabb is lehet, így a vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a védelem megfelelő, a korábban már kihelyezett, mikroszkóppal kiértékelt detektorok esetében a vizsgált terület nagysága 25,7 mm². Ez azt jelenti, hogy a Bluetech megfelelő védelmet biztosított: az alfa-részecskék nem érték el a detektor másik oldalát.

9.3.2. Ismételhetőségi vizsgálatok

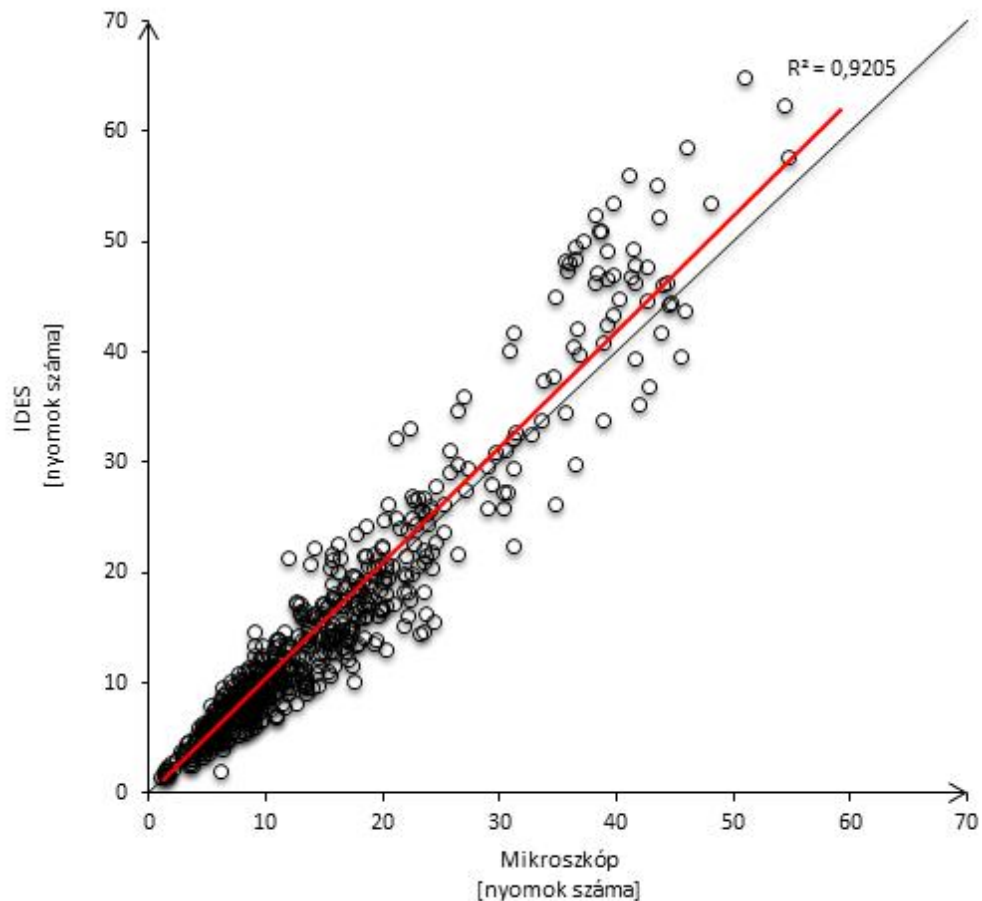
Az ismételhetőségi vizsgálatok során többféle tesztet is elvégeztem. Amikor a detektorokról adott pozícióban 10 felvételt készítettem és értékeltem ki ugyanolyan rendszerbeállítások mellett, a nyomszámok közötti eltérések 1% alatt maradtak, a legtöbb esetben ugyanazt az értéket kaptam.

A detektorokat 10 különböző pozícióban helyeztem el a tartóban és ezek között – ugyanolyan rendszerbeállítások mellett – legfeljebb 2%-os eltérést tapasztaltam.

Mindkét mérésorozatot elvégeztem a kisebb (25,7 mm²) és a nagyobb (50,5 mm²) vizsgált területre is. A kettő közötti különbségek az esetek 89%-ban 10% alatt maradtak, de a többi esetben akár a 30%-ot is elérték. A nagy különbség oka a detektor felületén lévő nyomok inhomogén eloszlása.

9.4. A régi (mikroszkópos) és új (szkenneres) nyomdetektor kiértékelő rendszer összehasonlítása

Miután elkészült az IMAN programon alapuló IDES kiértékelő rendszer egy újabb összevetés végeztem el. Ezen belül 563 db nyomdetektort értékeltem ki a mikroszkópos és az IDES-t használó szkenneres kiértékelő rendszerrel. Ennek a két rendszernek az összehasonlítása látható a **42. ábrán**.



42. ábra: A mikroszkópos és szkenneres kiértékelő rendszer (IDES) összevetése [Bátor et al., 2015]

A kapott eredmények alapján elmondható, hogy az új rendszer megfelelően működik, a mikroszkópos módszerhez hasonló eredményeket mutat. Ahogy az ábrán is látható a két rendszer által adott nyomszámok szoros korrelációt mutatnak ($R^2=0,9205$).

A kialakított új kiértékelési rendszernek számos előnye van az eddig alkalmazott optikai mikroszkópos módszerhez képest. A két módszer összehasonlítása a **10. táblázatban** látható.

10. táblázat: A két kiértékelő rendszer paramétereinek összehasonlítása

Paraméterek	Optikai mikroszkóp	Síkágys szkennner (IDES)
Detektorok száma egy kiértékelés során [db]	1	95
Egy detektor kiértékeléséhez szükséges idő [s]	576	18
Vizsgált terület [mm ²]	1,025	25,7/50,5

Ahogy az összehasonlításban is látható, az új rendszer sokkal gyorsabb, egyidejűleg sokkal több detektor értékelhető ki. Az automatizált kiértékelésnek köszönhetően a rendszerből eltűnt a kiértékelő személye által okozott bizonytalanság, valamint a vizsgált terület nagysága is jóval nagyobb, amivel a detektor felületén előforduló nyom inhomogenitásokból eredő bizonytalanság kiküszöbölhető.

V. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkámnak céljaként tűztem ki egy olyan kiértékelő rendszer megalkotását, amellyel egy törvényileg előírt, akkreditálható radon mérések elvégzését lehet elvégezni.

A munkám során megvizsgáltam a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetében régóta működő, mikroszkóp alapú rendszert. A régi módszer már elavult, régebbi technológiát alkalmaz, ezért az esetleges javítása vagy fejlesztése nem megoldható. Emellett az alacsony kiértékelési sebesség miatt nem alkalmas nagyszámú méréssorozatok feldolgozására.

Ezen okok következtében egy újfajta, modern kiértékelő rendszer telepítését terveztem meg. Ehhez – a kiértékelés mellett – a teljes méréstechnikát meg kellett vizsgálnom, ami a nyomdetektorok és a maratás körülményeinek vizsgálatát jelentette.

A nyomdetektorok vizsgálatokor kiválasztottam a számomra megfelelő típust (CR-39), majd ennek háttérét, valamint érzékenységét figyeltem meg egy éves időtartam alatt. Az eredményeket figyelembe véve kiválasztottam a CR-39 detektorok közül a Baryotrak gyártmányt.

A maratással kapcsolatosan meghatároztam az új kiértékelő rendszerhez optimális nyomátmérőt (40-60 μm), és ehhez állítottam be a maratás körülményeit (90°C, 8 óra, 6,25M NaOH). Ezen kívül megvizsgáltam a maratószer többszöri felhasználásának lehetőségét nyomdetektor, mint szerves komponens hozzáadásával. Az elvégzett kísérletekkel nem sikerült alátámasztanom, hogy a hozzáadott adalék növelné a maratás sebességét, viszont egyéb befolyásoló paraméterek hatásának ismerete nélkül nem javaslom az oldat többszöri használatát.

Az új kiértékelő rendszert egy szkenerre alapoztam, amelyhez különböző beállításokat (reflexiós és transzmissziós üzemmód), valamint a készített felvételek vizsgálatához több képelemző szoftver alkalmazhatóságát is kipróbáltam. A választható üzemmódok közül a transzmissziós bizonyult jobbnak: élesebb felvételek és kisebb háttérszennyezésű felvételek készítését tette lehetővé. A szoftverek közül a magyar fejlesztésű Image Analyzer (IMAN) alkalmazásával tudtam a korábbi, mikroszkópos módszerhez közel eső (5%-on belül) eredményeket kapni. Ehhez előzetesen manuálisan kellett beállítanom a program objektumosztályozásának alapjait.

Eredményeimet alapul véve kidolgoztam egy programot, amely automatikusan elvégzi a detektorok kiértékelését. Ennek a programnak az Integrált Detektor Kiértékelő Rendszer (IDES) elnevezést adtam.

Az új rendszer kiépítésével teljesítettem a célkitűzésben megfogalmazott elvárásokat és kialakítottam egy minőségbiztosítható és akkreditálható mérési módszert, amellyel nagy mintaszámú radon felmérés kivitelezése is megoldható.

TÉZISPONTOK

I. TÉZIS

A nagyszámú mérés kivitelezéséhez és a szigorúbb referenciaérték miatt alacsony háttérű és megbízható nyomdetektorok szükségesek. Ennek érdekében megvizsgáltam a Baryotrak és Tastrak gyártmányú CR-39 nyomdetektorok háttérének és érzékenységének változását egy év alatt. Megállapítottam, hogy a Baryotrak gyártmányú detektor esetében kisebb háttér nyomsűrűség ($0 - 1,5$ nyom cm^{-2}) mérhető, mint a Tastrak detektorok ($0,8 - 4$ nyom cm^{-2}) esetében. Ez a különbség az átlagok esetében 37%.

Megállapítottam, hogy a Tastrak detektorok esetében az érzékenység átlagosan nagyobb, de a kalibrációs faktor értékének szórása nagyobb ($1,2 \times 10^{-3} - 5,3 \times 10^{-3}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3}), mint a másik típus ($1,4 \times 10^{-3} - 2,8 \times 10^{-3}$ nyom cm^{-2}/Bq nap m^{-3}) esetében. A kalibrációs faktor időbeli változásában tendenciát nem figyeltem meg, a háttér esetében viszont növekedést tapasztaltam: ennek mértéke a Baryotrak esetében 15%, míg a Tastrak detektoroknál 40%.

A tárolás hőmérséklete és a háttér valamint a kalibrációs faktor változása között tendenciát nem tudtam kimutatni. Az eredményeket összegezve a mérési eljáráshoz a Baryotrak detektor alkalmazását javaslom az alacsonyabb háttér és a kalibrációs faktor kisebb szórása miatt.

II. TÉZIS

A meglevő maratási rendszer felülvizsgálata után kidolgoztam egy új, könnyen minőségbiztosítható maratási eljárást.

- A. Az optimális nyomátmérő tartomány meghatározásához szükséges kalibráló lemez készítéséhez ArF excimer lézert alkalmaztam. Előzetesen profilométeres vizsgálat segítségével igazoltam, hogy az ArF lézerrel készített jelölések megfelelő minőségűek: nincs felhólyagosodás vagy méretnövekedés.
- B. A kalibráló lemez segítségével meghatároztam, hogy a tervezett kiértékelő rendszer számára az optimális nyomátmérő tartomány $40-60 \mu\text{m}$. Meghatároztam, hogy a megfelelő tartomány eléréséhez a detektorokat $6,25\text{M}$ NaOH oldatban 90°C -on 8 óráig szükséges maratni. Az oldatok többszöri felhasználására végzett vizsgálatok során megállapítottam, hogy a kioldódó detektoranyag nem befolyásolja a maratás

sebességét, viszont egyéb tényezők (pl: beoldódó CO₂) befolyásoló hatása miatt nem javaslom a többszöri felhasználást.

- C. A maratási paraméterek optimalizálása mellett a maratási kapacitás növelése is szükséges volt. Ehhez egy speciális termosztáttal és szabályozható fordulatszámú kevertetővel felszerelt rendszert dolgoztam ki, amely egyidejűleg akár 480 detektor maratását is képes elvégezni.

III. TÉZIS

Megvizsgáltam egy szkener alapú kiértékelő rendszer alkalmazhatóságát és összevettem a szkener által alkalmazható két üzemmódot (reflexiós és transzmissziós). Megállapítottam, hogy a transzmissziós üzemmód esetében a felvételek élesebbek, kevesebb zavaró szennyeződés látható, így ennek használata mellett döntöttem. Megvizsgáltam két képelemző szoftver (ImageJ, Image Analyser) alkalmazhatóságát. Megállapítottam, hogy az ImageJ esetében a korábban alkalmazott, mikroszkópos rendszerhez képest átlagosan 4-szer nagyobb nyomsűrűségeket kaptam, ami szélsőséges esetben 15-szörös különbséget is elért. Az Image Analyser esetében az eltérések maximum 5%-osak voltak, ami igazolta, hogy a morfológiai osztályozás megfelelően van beállítva.

IV. TÉZIS

A transzmissziós üzemmódot és az Image Analyser szoftvert alkalmazva összeállítottam az Integrált Detektor Kiértékelő Rendszert (angolul: Integrated Detector Evaluating System, röviden: IDES). A rendszer négy lépésen keresztül (szkennelés, darabolás, értékelés, nyomok összegzése), automatikusan végzi el a detektorok kiértékelését. Az ismételtelhetőségi vizsgálatok során megállapítottam, hogy ugyanazon rendszerbeállítások (ugyanakkora vizsgált terület) mellett, ugyanabban a pozícióban történő többszöri kiértékelés esetén a szórás 1%-nál kisebb, az eltérő pozíciókban történő kiértékelés esetén a szórás maximum 2 %. A kis (25,7 mm²) és nagy (50,5 mm²) vizsgált területek esetén ugyanazon a detektoron végzett kiértékelések – a nyomok inhomogén eloszlása miatt – a kapott nyomsűrűség értékek akár a 30%-ban is eltérhetnek.

THESIS STATEMENTS

I. THESIS

To serve the prescribed indoor radon survey and stricter reference level reliable track detectors with low background is necessary. Therefore two different types of CR-39 track detectors (Baryotrak and Tastrak) was investigated from the aspects of background and sensitivity for radon during one year period. The Baryotrak detector's background track density ($0 - 1.5 \text{ track cm}^{-2}$) is lower than the Tastrak detectors' track density ($0.8 - 4 \text{ track cm}^{-2}$). The difference between the average values is 37 %.

It was determined that the sensitivity for radon of the Tastrak detectors is higher, but the deviation of the calibration factor is much higher ($1.2 \times 10^{-3} - 5.3 \times 10^{-3} \text{ track cm}^{-2}/\text{Bq day m}^{-3}$) than in case of the Baryotrak detectors ($1.4 \times 10^{-3} - 2.8 \times 10^{-3} \text{ track cm}^{-2}/\text{Bq day m}^{-3}$). Any tendency in the fluctuation of the calibration factor was not observed, but the background track density is increased: this rate was 15% in case of Baryotrak detectors, and 40% for Tastrak detectors. Any tendency between the temperature of the storage and the changes of the background track density or calibration factor was not observed. Based on the results the Baryotrak detectors are recommended for the measurement procedure because of the lower background and smaller calibration factor's deviation.

II. THESIS

After the systematic review of the etching system a new, quality guaranteed etching method was developed.

- A. The calibration sheet for the determination of the optimal track diameter range was prepared by ArF excimer laser. It was certified by profilometer technique that the marks on the detector's surface by the ArF laser was acceptable: there was no changes in the detector's material.
- B. The optimal track diameter range for the new system is 40-60 μm . New etching conditions for this range was determined: 6.25M NaOH, 90°C and 8 hours. The possibility of the reuse of the etching solution was investigated. It was observed that the etching velocity was not influenced by the concentration of the etching products in the solution, but the reuse of the solution is not recommended because of other disturbing parameters (e.g. absorbed CO_2).

- C. Increase the etching capacity was necessary for the new procedure. The new system consists a special thermostat, a mixer with speed controller and an etching tank for at most 480 detectors.

III. THESIS

The result of track density analyses was influenced by the person who did the evaluation with the microscope system. The difference between the track densities was at most 30 % among evaluators.

The application of a scanner based evaluation system was investigated. Transmissive and reflective operation modes were compared. Transmissive mode was selected because of its better image quality and less contamination on the image.

For the new evaluation system two image analyser software (ImageJ and Image Analyser-IMAN) were investigated and compared with the previous microscope system. In case of ImageJ software the track density was much higher (usually four times, but at most 15 times) than in case of the microscope method. The difference between the IMAN and microscope was at most 5%. Based on the comparison's result the IMAN software was selected, which was modified in the part of morphological classification.

IV. THESIS

A new scanner based evaluation system was developed, which is called IDES (Integrated Detector Evaluating System). The system does the detector evaluation automatically in 4 steps: Scanning, Image cutting, Evaluation, Results.

During the repeatability tests it was determined that the deviation was below 1%, when the detectors stay at the same position with using the same system settings (the same investigated area). It was at most 2%, when the detectors was at other position with using the same system settings (the same investigated area). When the investigated area was changed (25.7 mm² or 50.5 mm²) the difference between the track densities at most 30% because of the tracks inhomogeneity on the surface.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- 16/2000.** (VI. 8.) EüM rendelet az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról
- 487/2015.** (XII. 30.) Korm. Rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről
- 1862/2017.** (XI. 29.) Korm. Határozat a Nemzeti Radon Cselekvési Terv végrehajtását szolgáló intézkedésekről
- 1996. évi CXVI. törvény** az atomenergiáról
- Abbady, A.,** Abbady, A.G.E., Michel, R. (2004) *Indoor radon measurement with the Lucas cell technique.* Applied Radiation and Isotopes, 61, 1469-1475.
- Abu-Jarad, F.,** Islam, M.A., Abu-Abdoun, I., Khan, M.A. (1991) *Ultraviolet and laser irradiation effects on various batches of CR-39.* Nuclear Track and Radiation Measurements, 19, 135-138.
- Abu-Jarad, F.,** El Hadidy, M., Al-Jarallah, M.I. (1997) *The use of nuclear track detectors as an environmental solar ultraviolet radiation dosimeter.* Radiation Measurements, 28, 409-412.
- Adams, J.H.** (1980) *Automated track measurements in CR-39.* Nuclear Tracks, 4, 67-76.
- Ashry, A.H.,** Abdalla, A.M., Rammah, Y.S., Eisa, M., Ashraf, O. (2014) *The use of CH₃OH additive to NaOH for etching alpha particle tracks in a CR-39 plastic nuclear track detector.* Radiation Physics and Chemistry, 101, 41-45.
- Awad, E.M.,** El-Samman, H.M. (1999) *Activation energy of etching for CR-39 as a function of linear energy transfer of the incident particles.* Radiation Measurements, 31, 109-114.
- Barillon, R.,** Fromm, M., Chambaudet, A., Marah, H., Sabir, A. (1997) *Track etch velocity study in a radon detector (LR115, cellulose nitrate).* Radiation Measurements, 28, 619-628.
- Bátor, G.,** Csordás, A., Horváth, D., Kovács, T. (2015) *A comparison of a track shape analysis-based automated slide scanner system with traditional methods.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 306(1), 333-339.
- Bedogni, R.** (2003) *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.
- BEIR IV** (1988) *"Health Effects of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters", Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council, National Academy Press, Washington.*

- Benton, E.V.**, Henke, R.P., Peterson, D.D. (1977) *Plastic nuclear track detector measurements of high-LET particle radiation on Apollo, Skylab and ASTP space missions*. Nuclear Track Detection, 1, 27-32.
- Billon, S.**, Morin, A., Caer, S., Baysson, H., Gambard, J.P., Backe, J.C., Rannou, A., Tirmarche, M., Laurier, D. (2005) *French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays*. Radiation Protection Dosimetry, 113(3), 314-320.
- Bohicchio, F.**, Campos-Venuti, G., Piermattei, S., Nuccetelli, C., Risica, S., Tommasino, L., Torri, G., Magnoni, M., Agnesod, G., Sgorbati, G., Bonomi, M., Minach, L., Trotti, F., Malisan, M.R., Maggiolo, S., Gaidolfi, L., Giannardi, C., Rongoni, A., Lombardi, M., Cherubini, G., D'Ostilio, S., Cristofaro, C., Pugliese, M., Martucci, V., Crispino, A., Cuzzocrea, P., Sansone Santamaria, A., Cappai, M. (2005) *Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions*. Radiation Measurements, 40, 686-694.
- Bódizs D.** (2006) *Atommagasugárzások mérés technikái*, Typotex Kiadó, Budapest
- Boukhair, A.**, Haessler, A., Adloff, J.C., Nourreddine, A. (2000) *New code for digital imaging system for track measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 160, 550-555.
- Calamosca, M.**, Penzo, S. (2008) *Are ageing and fading really a problem for the quality of the passive radon measurements?* Radiation Measurements, 43, 422-426.
- Caresana, M.**, Ferrarini, M., Garlati, L., Parravicini, A. (2010) *About ageing and fading of CR-39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices*. Radiation Measurements, 45, 183-189.
- Caresana, M.**, Ferrarini, M., Garlati, L., Parravicini, A. (2011) *Further studies on ageing and fading of CR-39 PADC track detectors used as air radon concentration measurement devices*. Radiation Measurements, 46, 1160-1167.
- Cartwright, B.G.**, Shirk, E.K. (1978) *A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution*. Nuclear Instruments and Methods, 153, 457-460.
- Catalano, R.**, Immè, G., Mangano, G., Morelli, D., Reosselli Tazzer, A. (2012) *Indoor radon survey in Eastern Sicily*. Radiation Measurements, 47, 105-110.
- Cecchini, S.**, Giacomelli, G., Giorgini, M., Patrizii, L., Serra, P. (2001) *New calibrations and time stability of the response of the INTERCAST CR-39*. Radiation Measurements, 34, 55-59.
- Charvat, J.**, Spurny, F. (1988) *Optimization of etching characteristics for cellulose nitrate and CR-39 track detectors*. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 14(4), 447-449.
- Ciolini, R.**, Mazed, D. (2010) *Indoor radon concentration in geothermal areas of central Italy*. Journal of Environmental Radioactivity, 101, 712-716.
- Clark, D.T.**, Stephenson, P.J. (1982) *An ESCA study of the surface chemistry of cellulose nitrates and double based propellants, with particular reference to their degradation in ultra-violet light*. Polymer Degradation and Stability, 4, 185-193.

- Clouvas, A.,** Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M. (2007) *Pilot study of indoor radon in Greek workplaces*. Radiation Protection Dosimetry, 124(2), 68-74.
- Clouvas, A.,** Xanthos, S., Takoudis, G. (2011) *Indoor radon levels in Greek schools*. Journal of Environmental Radioactivity, 102, 881-885.
- Cothorn, C.R.,** Smith, J.E. (1987) *Environmental radon*. Environmental Science Research, Series Volume 35, Springer Press, New York.
- Cucos, A.,** Cosma, C., Dicu, T., Begy, R., Moldovan, M., Papp, B., Nita, D., Burghele, B., Sainz, C. (2012) *Thorough investigations on indoor radon in Baita radon-prone area (Romania)*. Science of the Total Environment, 431, 78-83.
- Cucos, A.,** Papp, B., Dicu, T., Moldovan, M., Burghele, B.D., Moraru, I.T., Tenter, A., Cosma, C. (2017) *Residential, soil and water radon surveys in north-western part of Romania*. Journal of Environmental Radioactivity, 166, 412-416.
- Csordás, A.,** Bátor, G., Horváth, D., Somlai, J., Kovács, T. (2016) *Validation of the scanner based radon track detector evaluation system*. Radiation Measurements, 87, 1-7.
- Dajkó, G.** (1991) *Etching characteristics of a CR-39 track detector at room temperature in different etching solutions*. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 18(3), 297-300.
- Darby, S.,** Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruostenoja, E., Schaffrath Rosario, A., Tirmarche, M., Tomasek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E., Doll, R. (2005) *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. British Medical Journal 2005; 330-223
- Ditlov, V.A.,** Awad, E.M., Fromm, M., Hermsdorf, D. (2005) *The Bragg-peak studies in CR-39 SSNTD on the basis of many-hit model for track etch rates*. Radiation Measurements, 40, 249-254.
- Dolleiser, M.,** Hashemi-Nezhad, S.R. (2002) *A fully automated optical microscope for analysis of particle tracks in solids*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 198, 98-107.
- Dowdall, A.,** Murphy, P., Pollard, D., Fenton, D. (2017) *Update of Ireland's national average indoor radon concentration – Application of a new survey protocol*. Journal of Environmental Radioactivity, 169-170, 1-8.
- Durrani, S.A.** (1982) *The use of solid-state nuclear track detectors in radiation dosimetry, medicine and biology*. Nuclear Tracks, 6(4), 209-228.
- Durrani, S.A.,** Bull, R.K. (1987) *Solid state nuclear track detection: Principles, methods and applications*. Pergamon Press, ISBN 0-08-020605-0

- Durrani, S.A.** (1991) *The effect of irradiation temperature on the response of track recording crystalline and polymeric media: A brief review.* Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19(1-4), 61-70.
- Durrani, S.A.** (2001) *Nuclear tracks: A success story of the 20th century.* Radiation Measurements, 34, 5-13.
- Eliceiri, K.W.,** Rueden, C. (2005) *Tools for visualizing multidimensional images from living specimens.* Photochemistry and Photobiology, 81, 1116-1122.
- Enkelmann, E.,** Ehlers, T.A., Buck, G., Schatz, A.K. (2012) *Advantages and challenges of automated apatite fission track counting.* Chemical Geology, 322-323, 278-289.
- EU BSS (2013)** Council Directive 2013/29/EURATOM of 5 December 2013, *Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation.*
- Fazal-ur-Rehman,** Abu-Jarad, F., Al-Jarallah, M.I., Farhat, M. (2001) *Comparison and limitations of three different bulk etch rate measurement methods used for gamma irradiated PM-355 detectors.* Radiation Measurements, 34, 617-623.
- Fairchild, R.,** Tjong, L., Wright, T. (2011) *Automating radon solid state track detector measurements.* Radiation Measurements, 46, 1773-1777.
- Fehér, I.,** Deme, S. (2010) *Sugárvédelem.* Eötvös Kiadó, Budapest
- Fennell, S.G.,** Mackin, G.M., Madden, J.S., McGarry, A.T., Duffy, J.T., O'Colmáin, M., Colgan, P.A., Pollard, D. (2002) *Radon in Dwellings, The Irish National Radon Survey.* Radiological Protection Institute of Ireland, Dublin.
- Fews, A.P.** (1992) *Fully automated image analysis of etched tracks in CR-39.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 71, 465-478.
- Fiechtner-Scharrer, A.,** Mayer, S., Boschung, M., Whitelaw, A. (2011) *Influence of variation of etching conditions on the sensitivity of PADC detectors with a new evaluation method.* Radiation Protection Dosimetry, 144(1-4), 150-154.
- Fleischer, R.L.,** Price, P.B., Walker, R.M. (1965) *Ion explosion spike mechanism for formation of charged particle tracks in solids.* Journal of Applied Physics, 36 (11) 3645-3652.
- Fleischer, R.L.,** Price, P.B., Walker, R.M., Maurette, M. (1967) *Origins of fossil charged-particle tracks in meteorites.* Journal of Geophysical Research, 72(1), 331-353.
- Fleischer, R.L.,** Price, P.B., Walker, R.M., Maurette, M., Morgan, G. (1967b) *Tracks of heavy primary cosmic rays in meteorites.* Journal of Geophysical Research, 72(1), 355-366.
- Fleischer, R.L.,** Price, P.B., Walker, R.M., Walker, R.M. (1975) *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications.* University of California Press

- Forkapic, S.**, Bikit, I., Conkic, Lj., Veskovic, M., Slivka, J., Krmar, M., Zikic-Todorovic, N., Varga, E., Mrda, D. (2006) *Methods of radon measurement*. Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology, 4(1), 1-10.
- Fowler, A.H.K.**, Munro, H.S. (1985) *ESCA studies of the thermal and X-ray induced degradation of cellulose nitrates*. Polymer Degradation and Stability, 11, 287-296.
- Friedmann, H.**, Zimprich, P., Atzmüller, C., Hofmann, W., Letner, H., Steinhausler, F., Hamernik, E., Maringer, F.J., Mossbauer, L., Kaineder, H., Nadschlager, E., Sperker, S., Karacson, P., Karg, V., Kralik, C., Pock, K., Schönhofer, F., Breitenhuber, L., Kindl, P., Oberlercher, G., Seiberl, W., Stadtmann, H., Steger, F., Tschurlovits, M. (1996) *The Austrian radon project*. Environment International, 22, 677-686.
- Fromm, M.**, Membrey, F., Chambaudet, A., Saouli, R., El-Rahamany, A. (1991) *A study of CR-39 bulk etch properties under various temperature and concentration conditions to modelize the dissolution rate*. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19, 169-170.
- Gering, E.**, Atkinson, C.T. (2004) *A rapid method for counting nucleated erythrocytes on stained blood smears by digital image analysis*. Journal of Parasitology, 90(4), 879-881.
- Gervino, G.**, Bonetti, R., Cigolini, C., Marino, C., Prati, P., Pruiti, L. (2004) *Environmental radon monitoring: comparing drawbacks and performances of charcoal canisters, alpha-track and E-PERM detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 518, 452-455.
- Ghosh, D.**, Deb, A., Sengupta, R. (2009) *Anomalous radon emission as precursor of earthquake*. Journal of Applied Geophysics, 69, 67-81.
- Gold, R.**, Armani, R.J., Roberts, J.H. (1968) *Absolute fission-rate measurements with solid-state track recorders*. Nuclear Science and Engineering, 34, 13-32.
- Gold, R.**, Robert, J.H., Preston, C.C., McNeece, J.P., Ruddy, F.H. (1984) *The status of automated nuclear scanning systems*. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 8(1-4), 187-197.
- Green, B.M.R.**, Brown, L., Cliff, K.D., Driscoll, C.M.H., Miles, J.C.H., Wrixon, A.D. (1985) *Surveys of natural radiation exposure in UK dwellings with passive and active measurement techniques*. The Science of the Total Environment, 45, 459-466.
- Green, B.M.R.**, Lavey, L. (2005) *The new radon programme in England*. Radioactivity in the Environment, 7, 779-787.
- Green, P.F.**, Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W., Lovering, J.F. (1989) *Apatite fission-track analysis as a paleotemperature indicator for hydrocarbon exploration*. Thermal History of Sedimentary Basins, 181-195. (Conference proceedings)

- Hámori, K.**, Tóth, E., Lénárd, P., Köteles, G., Losonci, A., Minda, M. (2006) *Evaluation of indoor radon measurements in Hungary*. Journal of Environmental Radioactivity, 88, 189-198.
- Hashemi-Nezhad, S.R.**, Dolleiser, M. (1997) *A computer controlled optical microscope for three dimensional track analysis*. Radiation Measurements, 28(1-6), 839-844.
- Henke, R.**, Ogura, K., Benton, V. (1986) *Standard method for measurement of bulk etch in CR-39*. Nuclear Tracks, 12(1-6), 307-310.
- Hermisdorf, D.**, Hunger, M., Starke, S., Weickert, F. (2007) *Measurement of bulk etch rates for poly-allyl-diglycol carbonate (PADC) and cellulose nitrate in a broad range of concentration and temperature of NaOH etching solution*. Radiation Measurements, 42, 1-7.
- Ho, J.P.Y.**, Yip, C.W.Y., Koo, V.S.Y., Nikezic, D., Yu, K.N. (2002) *Measurement of bulk etch rate of LR115 detector with atomic force microscopy*. Radiation Measurements, 35, 571-573.
- Ho, J.P.Y.**, Yip, C.W.Y., Nikezic, D., Yu, K.N. (2003) *Effects of stirring on the bulk etch rate of CR-39 detector*. Radiation Measurements, 36, 141-143.
- Hülber, E.** (2009) *Overview of PADC nuclear track readers. Recent trends and solutions*. Radiation Measurements, 44, 821-825.
- IAEA IBSS** (2014) *IAEA Safety Standards Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, Vienna
- Ibrahimi, Z.F.**, Miles, J.C.H. (2008) *Performance review of a slide scanner based automated counting system for PADC radon detectors*. Radiation Measurements, 43, 395-400.
- ICRP-65** (1993) ICRP Publication 65: *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. Annals of the ICRP Volume 23/2.
- ICRP-126** (2014) ICRP Publication 126: *Radiological protection against radon exposure*. Annals of the ICRP Volume 43/3.
- ICRP-137** (2017) ICRP Publication 137: *Occupational intakes of radionuclides: Part 3*. Annals of the ICRP Volume 46/(3/4).
- Khan, H.A.**, Qureshi, I.E. (1999) *SSNTD applications in science and technology-a brief review*. Radiation Measurements, 31, 25-36.
- Kocsis, Zs.**, Dwivedi, K.K., Brandt, R. (1997) *Studies on the track formation mechanism of the heavy ions in CR-39*. Radiation Measurements, 28, 177-180.
- Kovács, T.** (2010) *Thoron measurements in Hungary*. Radiation Protection Dosimetry, 141(4), 328-334.
- Kratschmer, W.** (1977) *Lunar and meteoritic mineral track detectors and the composition of the galactic cosmic radiation*. Nuclear Instruments and Methods, 147, 205-209.

- Krauß, M., Rzehak, R.** (2017) *Reactive absorption of CO₂ in NaOH: Detailed study of enhancement factor models*. Chemical Engineering Science, 166, 193-209.
- Krewski, D., Lubin, J.H., Zielinski, J.M., Alavanja, M., Catalan, V.S., Field, R.W., Klotz, J.B., Létourneau, E.G., Lynch, C.F., Lyon, J.I., Sandler, D.P., Schoenberg, J.B., Steck, D.J., Stolwijk, J.A., Weinberg, C., Wilcox, H.B.** (2005) *Residential radon and risk of lung cancer: A combined analysis of 7 North American case-control studies*. Epidemiology, 16 (2), 137-145.
- L'Annunziata, M.F.** (2012) *Handbook of Radioactivity Analysis*. Academic Press, ISBN: 978-0-12-384873-4
- Leonardi, F., Caresana, M., D'Alessandro, M., Mishra, R., Tonnarini, S., Trevisi, R., Veschetti, M.** (2009) *An extended study of the etching characteristics of CR-39 detectors*. Radiation Measurements, 44, 787-790.
- Limoto, T., Tokonami, S., Morishita, Y., Kosako, T.** (2004) *Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments*. Journal of Environmental Radioactivity, 78, 69-76.
- Lopez, A., Gutierrez, L., Razo, A., Balcazar, M.** (1987) *Radon mapping for locating geothermal energy sources*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 255, 426-429.
- López-Abente, G., Nunez, O., Fernández-Navarro, P., Barros-Dios, J.M., Martín-Méndez, I., Bel-Lan, A., Locutura, J., Quindós, L., Sainz, C., Ruano-Ravina, A.** (2018) *Residential radon and cancer mortality in Galicia, Spain*. Science of the Total Environment, 610-611, 1125-1132.
- Mamatkulov, K.Z., Ambrozova, I., Artemenkov, D.A., Bradnova, V., Kamanin, D.V., Kattabekov, R.R., Majling, L., Marey, A., ploc, O., Rusakova, V.V., Stanoeva, R., Turek, K., Zaitsev, A.A., Zarubin, P.I., Zarubina, I.G.** (2016) *Recent applications of nuclear track emulsion*. EPJ Web of Conferences 117, 10010 DOI:10.1051/epjconf/201611710010.
- Marcinowski, F.** (1992) *Nationwide survey of residential radon levels in the US*. Radiation Protection Dosimetry, Volume 45(1-4), 419-424.
- Marcinowski, F., Lucas, R.M., Yeager, W.M.** (1994) *National and regional distributions of airborne radon concentrations in US homes*. Health Physics, 66(6), 699-706.
- Matiullah, Rehman, S., Rehman, S., Mati, N., Ahmad, S.** (2005) *Some more new etchants for CR-39 detector*. Radiation Measurements, 39, 551-555.
- Matiullah, Rehman, S., Rehman, S., Zaman, W.** (2005b) *Discovery of new etchants for CR-39 detector*. Radiation Measurements 39, 337-343.
- Mishra, R., Tripathy, S.P., Dwivedi, K.K., Khathing, D.T., Ghosh, S., Müller, M., Fink, D.** (2001) *Modification in etching characteristics and surface topography of some electron irradiated polymers*. Radiation Measurements, 34, 95-98

- Moore, M.E.**, Gepford, H.J., Hermes, R.E., Hertel, N.E., Devine, R.T. (2002) *Laser illuminated etched track scattering (LITES) dosimetry system*. Radiation Protection Dosimetry, 101, 43-45.
- Moore, M.E.**, Gepford, H.J., Hoffman, J.M., McKeever, R.J., Devine, R.T. (2006) *Operational specifications of the laser illuminated track etch scattering dosemeter reader*. Radiation Protection Dosimetry, 120, 466-469
- Müllerova, M.**, Kozak, K., Kovács, T., Csordás, A., Grzadziel, D., Holy, K., Mazur, J., Moravcsík, A., Neznal, M., Neznal, M., Smetanova, I. (2014) *Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries*. Radiation Protection Dosimetry, 160(1-3), 210-213.
- Müllerova, M.**, Kozak, K., Kovács, T., Smetanova, I., Csordás, A., Grzadziel, D., Holy, K., Mazur, J., Moravcsík, A., Neznal, M., Neznal, M. (2016) *Indoor radon survey in Visegrad countries*. Applied Radiation and Isotopes, 110, 124-128.
- Müllerova, M.**, Mazur, J., Csordás, A., Grzadziel, D., Holy, K., Kovács, T., Kozak, K., Kurekova, P., Nagy, E., Neznal, M., Smetanova, I. (2017) *Preliminary results of radon survey in the kindergartens of V4 countries*. Radiation Protection Dosimetry, 177(1-2), 95-98.
- Nagy, L.Gy.** (1983) *Radiokémia és izotóptechnika*, Műegyetemi Kiadó, Budapest
- NRC: National Research Council** (1999) *Risk assessment of radon in drinking water*. National Academy Press, Washington, D.C.
- NCRP: National Council on Radiation Protection and Measurements** (1989) *Guidance on radiation received in space activities*. NCRP Report No.98.
- Ng, F.M.F.**, Yip, C.W.Y., Ho, J.P.Y., Nikezic, D., Yu, K.N. (2004) *Non-destructive measurement of active-layer thickness of LR 115 SSNTD*. Radiation Measurements, 38, 1-3.
- Nguyen, X.T.**, Trinh, T.D. (1995) *Structure effect in response function of CR-39 detector*. Radiation Measurements, 25, 185-187.
- Nikezic, D.**, Janicijevic, A. (2002) *Bulk etching rate of LR115 detectors*. Applied Radiation and Isotopes, 57, 275-278.
- Nikezic, D.**, Yu, K.N. (2003) *Three-dimensional analytical determination of the track parameters: over-etched tracks*. Radiation Measurements, 37, 39-45.
- Nikezic, D.**, Yu, K.N. (2003b) *Calculations of track parameters and plots of track openings and wall profiles in CR39 detector*. Radiation Measurements, 37, 595-601.
- Nikezic, D.**, Yu, K.N. (2004) *Formation and growth of tracks in nuclear track materials*. Materials Science and Engineering, 46, 51-123.
- Nikezic, D.**, Yu, K.N. (2008) *Computer program TRACK_VISION for simulating optical appearance of etched tracks in CR-39 nuclear track detectors*. Computer Physics Communications, 178, 591-595

- Niki, I.** (1996) *The radon concentration and absorbed dose rate in Hungarian dwellings.* Radiation Protection Dosimetry, 67(3), 225-228.
- Nikolopoulos, D.,** Louizi, A., Koukouliou, V., Serefoglou, A., Georgiou, E., Ntalles, K., Proukakis, C. (2002) *Radon survey in Greece – risk assessment.* Journal of Environmental Radioactivity, 63, 173-186.
- Oikawa, S.,** Kanno, N., Sanada, T., Abukawa, J., Higuchi, H. (2006) *A survey of indoor workplace radon concentration in Japan.* Journal of Environmental Radioactivity, 87, 239-245.
- Palmino, F.,** Klein, D., Labrune, J.C. (1999) *Observation of nuclear track in organic material by atomic force microscopy in real time during etching.* Radiation Measurements, 31, 209-212.
- Pandey, A.K.,** Kalsi, P.C., Iyer, R.H. (1998) *Effects of high intensity ultrasound in chemical etching of particle tracks in solid state nuclear track detectors.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 134, 393-399.
- Papastefanou, C.,** Stoulos, S., Manolopoulou, M., Ioannidou, A., Charalambous, S. (1994) *Indoor radon concentrations in Greek apartment dwellings,* Health Physics, 66(3), 270-273.
- Perelygin, V.P.,** Stetsenki, S.G., Pellas, P., Lhagvasuren, D., Otgonsuren, O., Jaupi, B. (1977) *Long-term averaged abundances of VVH cosmic ray nuclei from studies of olivines from Marjalahti meteorite.* Nuclear Track Detection, 1, 199-205.
- Perron, C.,** Bourot-Denise, M. (1988) *Influence of temperature on track registration in olivine.* Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 15, 45-46.
- Planinic, J.,** Radolic, V., Vukovic, B. (2004) *Radon as an earthquake precursor.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 530, 568-574.
- Prasher, S.,** Singh, S. (2003) *The effect of infrared radiation on etching characteristics of CR-39 plastic track recorder.* Radiation Measurements, 36, 105-106.
- Prelas, M.,** Boraas, M., De La Torre Aguilar, F., Seelig J.-D., Tchakoua Tchouaso, M., Wisniewski D. (2016) *Nuclear Batteries and Radioisotopes.* Springer International Publishing
- Price, P.B.,** Walker, R.M. (1963) *Fossil tracks of charged particles in mica and the age of minerals.* Journal of Geophysical Research, 68(16) 4847-4862.
- Price, P.B.,** Krischer, W. (1985) *Semi-automated, three-dimensional measurement of etched tracks in solid-state nuclear track detectors.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 234, 157-167.
- Qureshi, A.A.,** Mehmood, K., Karim, T., Jamil K., Khan, H.A. (1995) *Use of mica in fission track dating.* Radiation Measurements, 25, 519-520
- Rana, M.A.,** Qureshi, I.E. (2002) *Studies of CR-39 etch rates.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 198, 129-134.

- Sahoo, G.S.**, Tripathy, S.P., Sharma, S.D., Bandyopadhyay, T. (2015) *Effect of etchant concentration on microwave induced chemical etching (MICE) of CR-39 detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 800, 51-56.
- Sainz, C.**, Dinu, A., Dicu, T., Szcsvai, K., Cosma, C., Quindós, L.S. (2009) *Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radon-prone areas, Stei (romania) and Torrelodones (Spain)*. Science of Total Environment, 407, 4452-4460.
- Sanada, T.**, Fujimoto, K., Miyano, K., Doi, M., Tokonami, S., Uesugi, M., Takata, Y. (1999) *Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan*. Journal of Environmental Radioactivity, 45, 129-137.
- Sarrou, I.**, Pashalidis, I. (2003) *Radon levels in Cyprus*. Journal of Environmental Radioactivity, 68, 269-277.
- Schauries, D.**, Lang, M., Pakarinen, O.H., Botis, S., Afra, B., Rodriguez, M.D., Djurabekova, F., Nordlund, K., Severin, D., Bender, M., Li, W.X., Trautmann, C., Ewing, R.C., Kirby, N., Kluth, P. (2013) *Temperature dependence of ion track formation in quartz and apatite*. Journal of Applied Crystallography, 46, 1558-1563.
- Schwartz, K.**, Benyagoub, A., Toulemonde, M., Trautmann, C. (2001) *Effect of temperature on track formation by energetic heavy ions in lithium fluoride*. Radiation Effects and Defects in Solids, 155(1), 127-131.
- Sharma, S.L.**, Pal, T., Rao, V.V., Enge, W. (1991) *Effect of gamma irradiation on bulk etch rate of CR-39*. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 18(4), 385-389.
- Siems, M.**, Freyer, K., Treutler, H.-C., Jönsson, G., Enge, W. (2001) *Experimental study on the aging process of the LR 115 cellulose nitrate radon detector*. Radiation Measurements, 34, 81-84.
- Silk, E.C.H.**, Barnes, R.S., Harwell, A.E.R.E. (1959) *Examination of fission fragment tracks with an electron microscope*, Philosophical Magazine, 44(4), 970-972.
- Singh, J.**, Singh, S., Virk, H.S. (1988) *Etching studies of CR-39 plastic track recorder*. Nuclear Tracks and Radiation Measurement, 15, 187-190.
- Sinha, D.**, Ghosh, S., Srivastava, A., Dedgaonkar, V.G., Dwivedi, K.K. (1997) *Effect of gamma rays on PADC detectors*. Radiation Measurements, 28, 145-148.
- Smetsers, R.C.G.M.**, Blaauboer, R.O., Dekkers, S.A.J. (2016) *Ingredients for a Dutch radon action plan, based on a national survey in more than 2500 dwellings*. Journal of Environmental Radioactivity, 165, 93-102.
- Smetsers, R.C.G.M.**, Blaauboer, R.O., Dekkers, F., Slaper, H. (2018) *Radon and thoron progeny in Dutch dwellings*. Radiation Protection Dosimetry, DOI: 10.1093/rpd/ncy093
- Sohrabi, M.**, Soltani, Z. (2016) *Efficient alpha particle detection by CR-39 applying 50 Hz-HV electrochemical etching method*. Radiation Measurements, 92, 80-85.

- Somogyi, G., Szalay, S.A.** (1973) *Track-diameter kinetics in dielectric track detectors*. Nuclear Instruments and Methods, 109, 211-232.
- Somogyi, Gy., Nikl, I., Csige, I., Hunyadi, I.** (1989) *Radon aktivitáskoncentrációjának mérése és a belégzésből eredő sugárterhelés meghatározása hazai lakások légterében*. Izotóptechnika, diagnosztika, 32(4), 177-183
- Spurny, F., Turek, K.** (1977) *Neutron dosimetry with solid state nuclear track detectors*. Nuclear Track Detection, 1, 189-197.
- Spurny F.** (2001) *Radiation doses at high altitudes and during space flights*. Radiation Physics and Chemistry, 61,301–307.
- Steele, J.D., Bhakta, J.R., Tanner, R.J., Bartlett, D.T.** (1999) *Development of a reader for track etch detectors based on a commercially available slide scanner*. Radiation Measurements, 31, 179-184.
- Strand, T., Jensen, C.L., Anestad, K., Ruden, L., Ramberg, G.B.** (2005) *High radon areas in Norway*. International Congress Series, 1276, 212-214.
- Szeiler, G., Somlai, J., Ishikawa, T., Omori, Y., Mishra, R., Sapra, B.K., Mayya, Y.S., Tokonami, S., Csordás, A., Kovács, T.** (2012) *Preliminary results from an indoor radon thoron survey in Hungary*. Radiation Protection Dosimetry, 152, 243-246.
- Tomasek, L., Müller, T., Kunz, E., Heribanová, A., Matzner, J., Placek, V., Burian, I., Holecek, J.** (2002) *Czech residential radon study*. International Congress Series, 1225, 239-245.
- Toulemonde, M., Dufour, Ch., Meftah, A., Paumier, E.** (2000) *Transient thermal processes in heavy ion irradiation of crystalline inorganic insulators*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 166-167, 903-912.
- Tripathy, S.P., Mishra, R., Dwivedi, K.K., Khathing, D.T., Ghosh, S., Fink, D.** (2003) *Proton dose-dependent modification in track etching response in some polymers*. Radiation Measurements, 36, 107-110.
- Tripathy, S.P., Kolekar, R.V., Sunil, C., Sarkar, P.K., Dwivedi, K.K., Sharma, D.N.** (2010) *Microwave-induced chemical etching (MCE): A fast etching technique for the solid polymeric track detectors (SPTD)*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 612, 421-426.
- Tsankov, L., Pressyanov, D., Mitev, K., Georgiev, S., Dimitrova, I.** (2005) *Automatic counting of chemically etched tracks by means of a computer scanner*. Radiation Measurements, 39, 557-559.
- Tse, K.C.C., Nikezic, D., Yu, K.N.** (2007) *Comparative studies of etching mechanisms of CR-39 in NaOH/H₂O and NaOH/ethanol*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 263, 300-305.
- UNSCEAR (2000)** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations, New York

- UNSCEAR (2006)** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations, New York
- UNSCEAR (2008)** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations, New York
- Vazquez-Lopez, C.,** Fragoso, R., Golzarri, J.I., Castillo-Mejía, F., Fujii, M., Espinosa, G. (2001) *The atomic force microscope as a fine tool for nuclear track studies*. Radiation Measurements, 34, 189-191.
- Venoso, G.,** De Cicco, F., Flores, B., Gialanella, L., Pugliese, M., Roca, V., Sabbarese, C. (2009) *Radon concentrations in schools of the Neapolitan area*. Radiation Measurements, 44, 127-130.
- Vukotic, P.,** Antovic, N., Djurovic, A., Zekic, R., Svrkota, N., Andjelic, T., Svrkota, R., Mrdak, R., Bjelica, N., Djurovic, T., Dlabac, A., Bogicevic, M. (2018) *Radon survey in Montenegro – A base to set national radon reference and “urgent action” level*. Journal of Environmental Radioactivity. In Press, Corrected Proof.
- Vukovic, J.B.,** Antanasijevic, R. (1995) *Scanning probe microscopy (tunneling, atomic force, confocal and acoustic) in particle track detectors*. Radiation Measurements, 25, 745-748.
- Wagner, G.A.,** Reimer, G.M., Carpenter, B.S., Faul, H., Van der Linden, R., Gijbels, R. (1975) *The spontaneous fission rate of U-238 and fission track dating*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 39, 1279-1286.
- WHO (2009)** World Health Organization: *Handbook on indoor radon: a public health perspective*. ISBN 978 92 4 154767 3
- Yadav, J.S.,** Sharma, A.P., Flerov, G.N., Perelygin, V.P., Stetsenki, S.G., Pellas, P., Perron, C., Antanasijevich, R., Jakupi, B., Todorovich, Y. (1983) *A search for superheavy nuclei tracks in extraterrestrial olivine crystals*. Pramana, 20(4), 287-292.
- Yamauchi, T.,** Taniguchi, T., Oda, K., Ikeda, T., Honda, Y., Tagawa, S. (1999) *Dose-rate effects on the bulk etch-rate of CR-39 track detector exposed to low-LET radiations*. Radiation Measurements, 31, 121-126.
- Yasuda, N.,** Yamamoto, M., Amemiya, K., Takhashi, H., Kyan, A., Ogura, K. (1999) *Track sensitivity and the surface roughness measurements of CR-39 with atomic force microscope*. Radiation Measurements, 31, 203-208.
- Yasuda, T.,** Ichijo, H., Oda, K., Doerschel, B., Hermsdorf, D., Kadner, K., Vaginay, F., Fromm, M., Chambaudet, A. (2001) *Inter-comparison of geometrical track parameters and depth dependent track etch rates measured for Li-7 ions in two types of CR-39*. Radiation Measurements, 34, 37-43.

- Yasuda, N.**, Namiki, K., Honma, Y., Umeshima, Y., Marumo, Y., Ishii, H., Benton, E.R. (2005) *Development of a high speed imaging microscope and new software for nuclear track detector analysis*. Radiation Measurements, 40, 311-315.
- Yip, C.W.Y.**, Ho, J.P.Y, Nikezic, D., Yu, K.N. (2003) *Study of inhomogeneity in thickness of LR 115 detector with SEM and Form Talysurf*. Radiation Measurements, 36, 245-248.
- Yip, C.W.Y.**, Ho, J.P.Y., Koo, V.S.Y., Nikezic, D., Yu, K.N. (2003b) *Effects of stirring on the bulk etch rate of LR 115 detector*. Radiation Measurements, 37,197-200.
- Yoo, M.**, Han, S.J., Wee, J.H. (2013) *Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution*. Journal of Environmental Manaement, 114, 512-519.
- Young, D.A.** (1958) *Etching of radiation damage in lithium fluoride*. Nature, 182, 375-377.
- Zhukovsky, M.**, Yarmoshenko, I., Kiselev, S. (2012) *Combination of geological data and radon survey results for radon mapping*. Journal of Environmental Radioactivity, 112, 1-3.

PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG

Az értekezés témájával kapcsolatos publikációk

Cikkek (3)

1. G. Bátor, A. Csordás, D. Horváth, J. Somlai, T. Kovács: **A comparison of a track shape analysis-based automated slide scanner system with traditional methods**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 306(1), 333-339, 2015.
2. A. Csordás, G. Bátor, D. Horváth, J. Somlai, T. Kovács: **Validation of the scanner based radon track detector evaluation system**. Radiation Measurements, 87, 1-7, 2016.
3. M. Müllerova, J. Mazur, A. Csordás, D. Grzadziel, K. Holy, T. Kovács, K. Kozak, P. Kureková, E. Nagy, M. Neznal, I. Smetanová: **Preliminary results of radon survey in the kindergartens of V4 countries**, Radiation Protection Dosimetry, 177(1-2), 95-98, 2017.

Konferencia kiadványok (3)

1. G. Bátor, A. Csordás, D. Horváth, T. Kovács: **Application of new image analyzer software in the scanner based nuclear track detector evaluation method**, VII. Magyar Radon Fórum, 2013. május 15-16. Veszprém
2. G. Bátor, A. Csordás, D. Horváth, J. Somlai, T. Kovács: **Comparing track shape analysis-based automated slide scanner system with traditional method**, Second East European Radon Symposium, 2014. május 28-31. Nis, Serbia
3. A. Csordás, K. Zs. Szabó, Z. Sas, T. Kovács: **Preliminary results of indoor radon and thoron survey in Hungarian kindergartens**. V. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2016. május 17-20. Veszprém.

Egyéb publikációk

Cikkek (12)

1. J. Jónás, J. Somlai, A. Csordás, E. Tóth-Bodrogi, T. Kovács: **Radiological survey of the covered and uncovered drilling mud depository**, Journal of Environmental Radioactivity, 188, 30-37, 2018.
2. A. Shahrokhi, T. Vigh, Cs. Németh, A. Csordás, T. Kovács: **Radon measurements and dose estimate of workers in a manganese ore mine**, Applied Radiation and Isotopes, 124, 32-37, 2017.
3. M. Müllerova, J. Mazur, P. Blahusiak, D. Grzadziel, K. Holy, T. Kovács, K. Kozak, A. Csordás, M. Neznal, M. Neznal, A. Shahrokhi: **Indoor radon activity concentration in thermal spas: the comparison of three types of passive radon detectors**, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 310, 1077-1084, 2016.
4. F. Fábíán, A. Csordás, Z. Sas, T. Kovács: **Preparation of a radon-free thoron source for a thoron calibration chamber**, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 311(2), 1169-1175, 2017.
5. M. Müllerova, K. Kozak, T. Kovács, I. Smetanová, A. Csordás, D. Grzadziel, K. Holy, J. Mazur, A. Moravcsik, M. Neznal, M. Neznal: **Indoor radon survey in Visegrad countries**. Applied Radiation and Isotopes, 110, 124-128, 2016.
6. A. Sharokhi, E. Nagy, A. Csordás, J. Somlai, T. Kovács: **Distribution of indoor radon concentrations between selected Hungarian thermal baths**. Nukleonika, DOI10.1515/nuka-2016-0055. 2016.
7. A. Csordás, F. Fábíán, M. Horváth, M. Hegedűs, J. Somlai, T. Kovács: **Preparation and characterisation of ceramic-based thoron sources for thoron calibration chamber**, Radiation Protection Dosimetry, 167 (1-3), 151-154, 2015. IF: 0.913
8. J. Somlai, A. Csordás, Z. Sas, A. Kopek, T. Kovács: **Radiation Exposure Problems of Tourist Cave Workers Originating from Radon in Relation to the New IAEA BSS and ICRP Recommendations**. Radiation Emergency Medicine, Vol. 4 (2), 53-57, 2015.
9. F. Fábíán, A. Csordás, A. Shahrokhi, J. Somlai, T. Kovács: **Calibration of CR-39-based thoron progeny device**, Radiation Protection Dosimetry, 160 (1-3), 169-172, 2014. IF: 0.86

10. M. Müllerova, K. Kozak, T. Kovács, A. Csordás, D. Grzadziel, K. Holy, J. Mazur, A. Moravcsik, M. Neznal, M. Neznal, I. Smetanová: **Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries**, Radiation Protection Dosimetry, 160 (1-3), 210-213, 2014. IF: 0.86
11. T. Kovács, Z. Sas, V. Jobbágy, A. Csordás, G. Szeiler, J. Somlai: **Radiological aspects of red mud disaster in Hungary**. Acta Geophysica, 61 (4), 1026-1037, 2013. IF: 1.365
12. G. Szeiler, J. Somlai, T. Ishikawa, Y. Omori, R. Mishra, B. K. Sapra, Y. S. Mayya, S. Tokonami, A. Csordás, T. Kovács: **Preliminary results from an indoor radon thoron survey in Hungary**. Radiation Protection Dosimetry, 152 (1-3), 243-246, 2012. IF: 0.909
13. B. Máté, A. Csordás, M. Horváth, J. Somlai, T. Kovács: **Pb(Po)-210 concentration of tobacco samples grown in the vicinity of a remedied uranium mine**. Radioprotection, Hamilton, Canada, ISBN: 978-2-7598-0708-6, Vol. 46(6) S161-S165, 2011. IF:1.000

Konferencia kiadványok (44)

1. T. Kovács, A. Shahrokhi, D. Kikaj, J. Vaupotic, A. Csordás, T. Vígh: **Radon and mitigation possibilities and health risk assessment based on the new ICRP recommendations in the Manganese Mine**, 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, 2018. szeptember 24-27, Hirosaki, Japán
2. A. Shahrokhi, E. Tóth-Bodrogi, T. Kovács, A. Csordás: **Radiological characterization of building materials using in the high natural-radiation background area of Mahallat, Iran**, 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, 2018. szeptember 24-27, Hirosaki, Japán
3. A. Csordás, R. Katona, E. Tóth-Bodrogi, G. Bátor, T. Kovács: **Radon measurements in the water and air of a planned thermal bath complex in China**, 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, 2018. szeptember 24-27, Hirosaki, Japán
4. A. Csordás, D. Kikaj, N. Kávási, J. Vaupotic, I. Kobal, T. Kovács: **Radon progeny measurement and dose estimation in Hungarian workplaces**, 9th

- International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, 2018. szeptember 24-27, Hirosaki, Japán
5. E. Tóth-Bodrogi, A. Csordás, J. Somlai, T. Kovács: **Review of the effect of fossil energy resources for human radiation exposure in Hungary**, 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, 2018. szeptember 24-27, Hirosaki, Japán
 6. K. Nagy, A. Csordás, T. Kovács: **Radon measurements for the planned thermal bath complex in chungqing (Ba'nan) region, China**, 2018. május 22-25, Veszprém
 7. E. Tóth-Bodrogi, A. Csordás, T. Kovács: **Radiological characterization of mosses in Western part of Hungary**, VI. Terrestrial radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2018. május 22-25, Veszprém.
 8. T. Kovács, Cs. Németh, A. Csordás, I. Lawson, R. Ford: **Two years long integrated radon and thoron measurements at snolab underground facilities**. TEERAS 2017-Third East European Radon Symposium, 2017. május 15-19. Szófia, Bulgária
 9. T. Kovács, A. Csordas, J. Somlai, T. Vigh: **The origin of the radon at the Manganese mine - ten years of radon measurements in the mine waters**. TEERAS 2017-Third East European Radon Symposium, 2017. május 15-19. Szófia, Bulgária
 10. Cs. Németh, T. Kovács, A. Csordás, I. Lawson, R. Ford: **Radon survey at SNOLAB (Canada)**. V. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2016. május 17-20. Veszprém.
 11. F. Fábrián, A. Csordás, T. Kovács: **Development of calibration protocol for CR-39 based SSNTDs used for thoron calibration measurements**. V. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2016. május 17-20. Veszprém.
 12. A. Csordás, E. Tóth-Bodrogi, J. Somlai, T. Kovács: **Measurement techniques of radon and thoron exhalation rate from building materials and the exhalation rates affecting parameters**. V. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2016. május 17-20. Veszprém.

13. M. Bahtijari, G. Nafezi, D. Kikaj, A. Csordás, G. Hodoll, S. Kadiri T.: **Radon concentration in thermal water of Kosovo's spa**. V. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2016. május 17-20. Veszprém.
14. J. Somlai, Z. Sas, A. Csordás, M. Hegedűs, T. Kovács: **Radon dose problems and solutions for mitigation in case of show cave of Tapolca (Hungary) following the recommended reference level**, 2nd International Conference „Radon in Environment 2015”, 2015. május 25-29. Krakkó, Lengyelország.
15. Cs. Németh, A. Csordás, I. Lawson, R. Ford, T. Kovács: **Preliminary results of integrated radon and thoron measurements at SNOLAB underground facilities**, 2nd International Conference „Radon in Environment 2015”, 2015. május 25-29. Krakkó, Lengyelország.
16. A. Shahrokhi, E. Nagy, A. Csordás, J. Somlai, T. Kovács: **Indoor radon levels in Hungarian thermal spas**, 2nd International Conference „Radon in Environment 2015”, 2015. május 25-29. Krakkó, Lengyelország.
17. A. Csordás, P. Kolarz, T. Kovács: **New approach to measurements of thoron concentration in calibration chamber**, MARC X. Methods & Applications of Radioanalytical Chemistry, 2015. április 12-17. Kailua-Kona, Hawaii, USA
18. Hegedűs M., Somlai J., Kovács T., Horváth M., Csordás A.: **NORM anyagokból való kioldódási vizsgálatok a vörösiszap példáján**, PhD hallgatók anyagtudományi napja XIV., 2014. november 24. Veszprém
19. Horváth M., Csordás A., Hegedűs M., Kovács T.: **Radionuklidok feldúsulása ipari termékekben és melléktermékekben és azok környezeti hatásai**, PhD hallgatók anyagtudományi napja XIV., 2014. november 24. Veszprém
20. Csordás A., Horváth M., Hegedűs M., Kovács T.: **Kerámia alapú toron források készítése és minősítése**, PhD hallgatók anyagtudományi napja XIV., 2014. november 24. Veszprém
21. G. Bátor, F. Fábrián, E. Tóth-Bodrogi, A. Csordás, J. Somlai, T. Kovács: **Intercomparison of calibrated CR-39 track thoron progeny detectors by active thoron devices under on-site circumstances**. The 9th International Symposium on the Natural Radioation Environment (NRE-IX), 2014. szeptember 22-26. Hirosaki, Japán
22. A. Csordás, F. Fábrián, M. Horváth, M. Hegedűs, J. Somlai, T. Kovács: **Preparation and characterization of ceramic based thoron sources for thoron**

- calibration chamber.** The 9th International Symposium on the Natural Radioation Environment (NRE-IX), 2014. szeptember 22-26. Hirosaki, Japán
23. A. Csordás, F. Fábíán, J. Somlai, T. Kovács: **Improvement of thoron calibration chamber at the Institute of Radiochemistry and Radioecology of University of Pannonia**, Second East European Radon Symposium, 2014. május 28-31. Nis, Serbia
 24. D. Hegedűs, Á. Horváth, Á. Freiler, K. Török, A. Csordás, T. Kovács: **Mapping of alpha decaying radionuclides of a thin section of rock samples**, IV. Terrestrial radioisotopes in environment international conference on environmental protection, 2014. május 21-23. Veszprém
 25. F. Fábíán, A. Csordás, M. Hegedűs, T. Kovács, J. Somlai: **Toronforrások készítése toron kalibrációs kamrához.** Őszi Radiokémiai Napok, 2013. október 16-18. Eger
 26. M. Müllerova, K. Kozak, T. Kovács, A. Csordás, D. Grzadziel, K. Holy, J. Mazur, A. Moravcsik, M. Neznal, M. Neznal, I. Smetanova: **Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries.** 7th Conference on Protection against Radon at Home and at Work, 2013. szeptember 2-6. Prága, Csehország
 27. A. Csordás, F. Fábíán, A. Shahrokhi, J. Somlai, T. Kovács: **Calibration of CR-39-based thoron progeny device**, 7th Conference on Protection against Radon at Home and at Work, 2013. szeptember 2-6. Prága, Csehország
 28. A. Csordás, F. Fábíán, J. Somlai, T. Kovács: **Radon és toron mérő nyomdetektorok nemzetközi összemérésére való felkészülés és részvétel.** "Környezetbarát anyagok és technológiák" Konferencia és 56. Magyar Spektrokémiai Vándorgyűlés, 2013. július 1-3. Veszprém
 29. J. Somlai, T. Ishikawa, Y. Omori, R. Mishra, B. K. Sapra, Y. S. Mayya, S. Tokonami, A. Csordás, T. Kovács: **Indoor radon and thoron survey in Hungary.** VII. Magyar Radon Fórum, 2013. május 15-16. Veszprém
 30. A. Csordás, T. Kovács, M. Neznal, M. Neznal, K. Holy, M. Mullerova, J. Mazur, K. Kozak: **Status report of indoor Rn/Tn survey in V4 countries**, VII. Magyar Radon Fórum, 2013. május 15-16. Veszprém
 31. F. Fábíán, A. Csordás, A. Shahrokhi, Y. Omori, J. Somlai, T. Kovács: **Intercomparison of thoron measuring devices in the RRI thoron calibration chamber**, VII. Magyar Radon Fórum, 2013. május 15-16. Veszprém

32. A. Csordás, T. Kovács, F. Fábrián, J. Jónás: **Preliminary results from an indoor radon thoron survey in V4 countries**. 11th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, 2012. szeptember 18-20. Prága, Csehország
33. T. Kovács, A. Csordás, J. Somlai: **Indoor thoron measurements in Hungary**. First East European Radon Symposium (FERAS), 2012. szeptember 2-5. Cluj-Napoca, Románia
34. R. Kardos, B. Máté, M. Horváth, A. Csordás, Cs. Gyöngyösi, T. Kovács: **Survey of uranium in spring waters from Budapest, Bataapáti waters (industrial area) and Torna stream (disaster affected surface waters) III**. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2012. május 16-18. Veszprém
35. F. Fábrián, R. Kardos, A. Csordás, M. Horváth, T. Kovács: **Determination of uranium in human urine samples using high-resolution alpha spectrometry**. III. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2012. május 16-18. Veszprém
36. M. Horváth, A. Csordás, B. Máté, F. Fábrián, R. Kardos, M. Vince, Cs. Németh, T. Kovács: **Po-210/Pb-210 equilibrium measurements in tobacco samples**. III. Terrestrial Radioisotopes in Environment International Conference on Environmental Protection, 2012. május 16-18. Veszprém
37. J. Somlai, T. Ishikawa, Y. Omori, R. Mishra, B.K. Sapra, Y.S. Mayya, S. Tokonami, A. Csordás, T. Kovács **Preliminary results from an indoor radon thoron survey in Hungary**. NARE 2012 — International Symposium on the Natural Radiation Exposures and Low Dose Radiation, 2012. február 29 – március 2. Hirosaki, Japan
38. B. Máté, M. Horváth, A. Csordás, J. Somlai, T. Kovács: **Pb(Po)-210 levels of tobacco samples at remedied uranium mine**. Environment-Research, Protection and Management Conference, 2011. november 11-12. Cluj-Napoca, Romania
39. B. Máté, A. Csordás, M. Horváth, J. Somlai, T. Kovács **Pb(Po)-210 concentration of tobacco samples grown in the vicinity of a remedied uranium mine**. Internatioanl Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity Environment & Nuclear Renaissance, 2011. június 19-24. Hamilton, Canada

40. T. Kovács, B. Máté, A. Csordás, J. Somlai: **Development a low level radon measurement system based on pulse shape discriminating NDI detector**. VI. Magyar Radon Fórum, 2011. május 16-17. Veszprém
41. M. Horváth, A. Csordás, B. Máté, J. Somlai, T. Kovács: **Dohánynövény alkalmazása remediált uránbánya területek vizsgálatában**. II. Földkérgi Radioizotópok a Környezetünkben, 2010. május 12. Veszprém
42. A. Csordás, M. Horváth, B. Máté, J. Somlai, T. Kovács: **A Déli-Bakonyból származó ehető gombafajok Po-210 koncentrációjának meghatározása**. II. Földkérgi Radioizotópok a Környezetünkben, 2010. május 12. Veszprém.
43. T. Kovács, J. Somlai, B. Máté, M. Horváth, A. Csordás: **Növény-és gombaminták ^{210}Po és ^{210}Pb koncentrációjának meghatározása alfa-spektrometriai módszerrel**. MTA tudományos ülése, 2011. május 4. MTA székház, Budapest
44. B. Máté, A. Csordás, M. Horváth, J. Somlai, T. Kovács: **Remediált uránbánya környéki természetett dohányminták Po-210 koncentrációja**. Őszi Radiokémiai Napok, 2010. október 20-22. Keszthely

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézet valamennyi munkatársának, akik az Intézetben töltött éveim során segítséget nyújtottak. Borinak és Zolinak, akik segítettek a kezdeti bizonytalanságok leküzdésében és elindítottak az úton. Hallgatótársaimnak, Ferinek, Jácintnak, Dávidnak, Mikinek, Ricsinek, Aminnak, Másinak, akivel nagyon-nagyon sok közös labormunka köt össze és Gergőnek a sok-sok ötletelést, aminek segítségével ez a dolgozat is született. Köszönöm Somának és Ditkének a kutatásaim során nyújtott támogatást és sok biztató szót. És végül külön köszönöm a támogatást témavezetőmnek, Kovács Tibornak, akitől nagyon sok mindent tanulhattam az Intézetben eltöltött közel 10 évem alatt.

Külön köszönöm a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék dolgozóinak, hogy segítséget nyújtottak és rendelkezésemre álltak a lézeres vizsgálatok során, valamint a Pannon Egyetem Anyagmérnöki Intézet munkatársainak az elektronmikroszkópos felvételek elkészítését.

A szakmai támogatás mellett szeretnék köszönetet mondani a családomnak és barátaimnak, akik a hosszú évek során mindig mellettem álltak és támogattak.

És végül, de nem utolsósorban köszönöm páromnak, Gábornak, aki az elmúlt évek során mellettem volt, támogatott a legnehezebb pillanatokban is és sokszor segített átlendülni a problémákon. Nélküled nem sikerült volna. Köszönöm!