

Retrospektív dozimetria nukleáris törvénytörési és baleseti alkalmazási lehetőségei

Doktori (PhD) értekezés

DOI: 10.18136/PE.2014.562

Pannon Egyetem

Kémiai és Környezettudományi Doktori Iskola

Készítette:

Mesterházy Dávid

okleveles környezetmérnök

Készült az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban

Témavezető:

Dr. Kovács András

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Sugárbiztonsági Laboratórium

Budapest

2014

Retrospektív dozimetria nukleáris törvényszéki és baleseti alkalmazási lehetőségei

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében
a Pannon Egyetem Kémiai és Környezettudományi
Doktori Iskolájához tartozóan.

Írta:
Mesterházy Dávid

Témavezető: Dr. Kovács András

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton%-ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: igen /nem

.....

(aláírás)

Bíráló neve:) igen /nem

.....

(aláírás)

Bíráló neve:) igen /nem

.....

(aláírás)

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

Veszprém/Keszthely,

.....
a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDHT elnöke

Tartalomjegyzék

I.	BEVEZETÉS	1
II.	CÉLKITŰZÉSEK.....	3
III.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
III.1	Dozimetria, sugárvédelem	4
III.1.1	Dózisfogalmak, dózismennyiségek és egységek	4
III.1.2	TLD és OSL anyagok dozimetriai követelményei	6
III.1.3	Sugárbalesetek és ezek emberi szervezetre gyakorolt hatásai	8
III.2	Retrospektív dozimetria.....	10
III.2.1	Retrospektív dozimetriai módszerek	13
III.2.2	Retrospektív dozimetriai célra alkalmas anyagok	16
III. 3	Lumineszcencia	17
III.3.1	Fluoreszcencia és foszforeszcencia	18
III.3.2	A sáv modell	19
III.3.3	Termolumineszcencia (TL).....	22
III.3.4	Optikailag stimulált lumineszcencia (OSL).....	27
IV.	KÍSÉRLETI RÉSZ	29
IV.1	Termolumineszcencia	29
IV.1.1	Mintaelőkészítés	31
IV.1.2	Az elvégzett kísérletek.....	34
IV.2	Optikailag stimulált lumineszcencia.....	35
IV.2.1	Mintaelőkészítés	36
IV.2.2	Az elvégzett kísérletek.....	37
V.	KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK.....	38
V.1	Környezeti anyagok TL vizsgálata	38
V.1.1.	Érzékenység	38
V.2	Elektronikai alkatrészek TL vizsgálata.....	43
V.2.1	Érzékenység	43
V.2.2	Dózisfüggés, linearitás.....	47
V.2.3	Fading (felejtés)	57
V.2.4	Reprodukálhatóság.....	60
V.2.5	Fényérzékenység.....	60
V.2.6	Előfűtés alkalmazása.....	63
V.2.7	A TL vizsgálatok áttekintő értékelése.....	66
V.3	Elektronikai alkatrészek OSL vizsgálata	67
VI.	A MÓDSZER GYAKORLATI ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE.....	71
VII.	ÖSSZEFOGLALÁS	72
VIII.	IRODALOMJEGYZÉK	75
IX.	A DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI.....	83
X.	THESES OF THE PHD DISSERTATION	84
XI.	ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE	85
	FÜGGELÉK	89

KIVONAT

A radioaktív anyagok békés célú felhasználása mellett balesetekre, környezeti katasztrófák és a lakosságot érintő terrortámadások következményeire is fel kell készülni.

A retrospektív (utólagos) dozimetria segítségével dózisbecslést végezhetünk olyan helyeken is, ahol az ionizáló sugárzás mérését előzetesen nem tervezték. A retrospektív módszerhez olyan anyagokra van szükség, amelyek az érintett baleseti helyszínen vagy az érintett lakosság közvetlen közelében voltak. A környezetünkben található számos anyag, köztük (dolomit, kalcit, homok) valamint bizonyos elektronikai alkatrészek (pl. SMD ellenállások) lumineszcencia tulajdonságaik révén alkalmazhatók erre a célra.

A termolumineszcencia (TL), valamint az optikailag stimulált lumineszcencia (OSL) dozimetriai célú felhasználása ismert és széleskörűen alkalmazott. Az utóbbi években e két módszer különösen fontossá vált a retrospektív dozimetriai felhasználást illetően.

Az elektronikai eszközökben található felületszerelt alkatrészek fő összetevője Al_2O_3 kerámia, ami ismert TL/OSL anyag. Vizsgálataim célja annak megállapítása volt, hogy a környezeti anyagok és az elektronikai alkatrészek alkalmasak-e egy baleset vagy katasztrófa következményeinek – elsősorban dózis-viszonyainak – feltárására.

Az alkatrészekon és környezeti mintákon végzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy azok alkalmasak lehetnek baleseti, valamint retrospektív dozimetriai célokra.

ABSTRACT

Besides the peaceful use of radioactive materials it is necessary to be prepared for the consequences of accidents and terror attacks, which could effect the population too.

By means of retrospective (post) dosimetry it is possible to estimate the dose in such places where the detection of radiation effect was not previously planned. For retrospective dosimetry materials from the affected area of the accident are needed. Environmental materials, samples from rock (dolomite, calcite, sand) and electronic components (e.g. SMD resistors) can be used for these purposes.

Thermoluminescence (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) are well-known and widely used methods in dosimetry. Recently these two methods have become very important in retrospective dosimetry.

The main component of the surface-mount devices (SMD parts) of electronic devices is Al_2O_3 ceramics, well-known for its TL/OSL properties. The aim of the investigations was to determine if these materials can be used for the estimation of the circumstances and consequences – especially dose – of an accident or disaster.

After the investigations it can be concluded that these samples can be used for accidental and retrospective dosimetry purposes.

RÉSUMÉ

En dehors de la paisible exploitation des matériaux nucléaires on doit se préparer aux catastrophes de l'environnement ou des attaques terroristes violents.

Rétrospective (postérieure) dosimetry fait possible l'évaluation de la dose dans les endroits où la mesure du rayonnement ionisant n'était pas construite. Pour la méthode rétrospective on mérite des matériaux qui étaient dans l'environnement de l'accident ou à proximité de la population. Dans notre environnement on peut trouver plusieurs matériaux, roches (comme dolomite, calcite, sable) et certaines pièces électroniques (par exemple SMD résistances) dont les caractéristiques les font propres pour cet objet.

L'application dosimétrique de la thermoluminescence (TL) et de la luminescence stimulée optiquement (OSL) est connue et largement utilisée. De nos jours ces deux méthodes sont devenues particulièrement importantes à l'égard de la dosimétrie rétrospective.

Le principal constituant des Composants Montés en Surface (CMS, Surface Mount Devices en anglais) est Al_2O_3 céramique qui est un très connu matériau dans TL/OSL luminescence. L'objectif de mes expériences était de déterminer si les matériaux de l'environnement et les pièces électroniques peuvent être utilisés pour l'évaluation des conséquences des catastrophes de l'environnement ou des attaques terroristes – exactement évaluation dosimétrique.

Selon les expériences des matériaux de l'environnement et les pièces électroniques on peut déclarer qu'ils peuvent être utilisés pour des objectifs accidentelle ou rétrospective dosimétrie.

I. BEVEZETÉS

A nukleáris anyagokkal, radioaktív készítményekkel vagy éppen atomenergetikával kapcsolatos balesetek és katasztrófák legnagyobb teherviselője általában a lakosság. Egy előre nem látható negatív kimenetelű esemény – baleset – vagy egy esetleges terrortámadás következtében a lakosság közvetlenül érintetté és a hatásnak kitetté válhat. Ebben az esetben a legnagyobb gondot az okozza a szakemberek számára, hogy a lakosok nem viseltek dózismérőt, hiszen az ionizáló sugárzás mérését előzetesen nem tervezték. Ennek megfelelően sem a radioaktív sugárzás mértékét, sem pedig a szennyezés súlyosságát vagy terjedését illetően nincs rendelkezésre álló információ. További probléma, hogy az érintett áldozatok inkorporációja illetve felületi szennyezettsége sem ismert, következésképpen az esetleg szükséges orvosi beavatkozás is nehezebben tervezhető.

Az utóbbi időben egyre nagyobb jelentőséget kap az imént említett katasztrófhelyzetekre történő felkészülés. Ez azt eredményezi, hogy a beavatkozást igénylő helyzet kialakulása esetén a szakemberek képesek hatékony és jól szervezett munkát végezni és tudásukat valamint tapasztalataikat a lakosság védelmére és megóvására fordítani. A sugárszennyezéssel járó balesetekre való felkészülés során a legnagyobb nehézséget az jelenti, hogy a kifejlesztett módszerek és eljárások a legritkább esetben ellenőrizhetők/vizsgálhatók valódi körülmények között. Minél több a rendelkezésre álló adat, annál nagyobb bizonyossággal hajtható végre egy utólagos becslés vagy hatásvizsgálat.

Egy ilyen típusú baleset után a lehető legrövidebb időn belül végre kell hajtani a vizsgálatot. A megoldandó feladat tehát az, hogy a sugárterhelés függvényében szelektálhatóak legyenek a személyek így elősegítve az orvosi beavatkozás megválasztását. Ez létfontosságú, hiszen amennyiben a károsodás súlyossága még mérsékelhető, az adott csoportnak akkor a legnagyobb a túlélési esélye, ha mihamarabb elsősegélyben részesül. Ebből következik a másik fontos kritérium, miszerint az utólag végzett vizsgálatnak a lehető legmegbízhatóbbnak kell lennie. A megbízhatóság módszerfüggő, így ennek teljesítése az adott eljárásra vonatkozó rész-kritériumok teljesítését jelenti.

Az ionizáló sugárzások detektálására számos módszer és berendezés együttese biztosít lehetőséget. Az egyik régóta ismert és számos más területen is alkalmazott jelenség a lumineszcencia. A termolumineszcencia és optikailag stimulált

lumineszcencia a régészeti kormeghatározásban szintúgy szerephez jut, mint a sugárvédelemben. A termolumineszcens dózismérők legnagyobb előnye az érzékenység és a reprodukálhatóság. Ma már a kereskedelmi forgalomban számos eltérő tulajdonságú termolumineszcens anyag kapható, amelyek más és más célra használhatók.

A megoldandó feladat szempontjából fontos megjegyezni, hogy a termolumineszcencia jelenségét először egy természetes ásvány vizsgálata során észlelték. E jelenség tehát természetes kőzeteknél is megfigyelhető, azaz környezetünkben több olyan anyag is található, ami melegítés (termolumineszcencia) vagy fényel történő gerjesztés (optikailag stimulált lumineszcencia) hatására fényt bocsát ki, a kibocsátott fény pedig az anyag által elnyelt sugárzással kapcsolatos mennyiséggel, annak dóziséval arányos.

Az utóbbi években több olyan kísérlet zajlott, amelynek célja valamilyen környezeti anyag utólagos dózisbecslésre való alkalmazhatóságának vizsgálata volt [1, 2]. Abban az esetben, amikor a sugárdózis utólagos becslését kívánjuk végrehajtani, retrospektív dozimetriáról beszélünk. A kísérletek végrehajtását és kivitelezését itt is nehezíti a valós – vagy várható – körülmények előzetes ismeretének hiánya.

A retrospektív dozimetria létjogosultságát már a hirosimai és nagaszaki atombomba támadások után, valamint a csernobili reaktorbalesetet követően végrehajtott vizsgálatok eredményessége is igazolta. Ezek során az épületek falában található téglá mintavételezésével és termolumineszcens fénykibocsátását felhasználva tudtak következtetni – mint utólag kiderült, meglepően jó pontossággal – a környezeti sugárzás-viszonyokra. A lumineszcencia jelenségek ilyen téren történő alkalmazása tehát ismert, azonban kevésbé kutatott terület.

II. CÉLKITŰZÉSEK

A doktori értekezés célja olyan anyagok és eszközök vizsgálata, amelyek adott esetben egy sugárbaesetet követően alkalmasak lehetnek utólagos sugárdózis becslésére. A rendelkezésre álló szakirodalom feltárását követően arra a következtetésre jutottam, hogy az utólagos dózisbecslést lehetővé tevő anyagok két nagyobb csoportját elkülönítve, de párhuzamosan célszerű vizsgálni.

A két nagyobb vizsgált csoport a környezeti anyagok és az elektronikai eszközökben található egyes alkatrészek. A két csoport egymás eredményeit kiegészítve, de akár külön-külön is alkalmas lehet utólagos dózisbecslésre. Ennek megfelelően céлом az volt, hogy az alkalmazott eljárások minél több, gyakorlati alkalmazást lehetővé tevő tulajdonságát megismerjem és optimális paramétereit meghatározzam. Ehhez a kiválasztott anyagok teljes dozimetriai jellemzésére volt szükség különös tekintettel arra, hogy egy nukleáris vagy radioaktív anyagokat érintő balesetet követően milyen feltételek mellett és milyen mértékben megbízhatóak a segítségükkel kapott adatok. A vizsgált anyagok nem mesterségesen előállított sugárzás detektorok, hanem olyan természetes és mesterséges anyagok, amelyek egyes detektorokhoz hasonló dozimetriai tulajdonságokkal rendelkeznek lehetővé téve ezáltal az őket ért sugárterhelés utólagos kimutatását, s így a személyi dózisok becslését.

Azt kívántam igazolni, hogy az általam választott módszer és a vizsgált anyagok komplex együttese lehetőséget biztosít arra, hogy a retrospektív dózisbecslés illetve dózisrekonstrukció kellő bizonyossággal elvégezhető legyen. Továbbá meg kívántam mutatni, hogy a módszer támasza lehet a világ bármely területén élő szakembereknek, amennyiben alkalmazására szükség van. A vizsgált anyagok és alkatrészek könnyű hozzáférhetősége biztosítja, hogy a módszer egyszerűen kivitelezhető és gyors legyen. A gyakorlati alkalmazás szempontjából igazolni kívántam, hogy a mobiltelefonokban és elektronikai eszközökben található egyes alkatrészek, valamint egyes, környezetünkben található anyagok alkalmasak utólagos dózisbecslésre.

III. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

III.1 Dozimetria, sugárvédelem

Az ionizáló sugárzások alkalmazása a biológiai szervezetekre gyakorolt káros hatása miatt megköveteli a hatást kiváltó sugárzás „mennyiségének”, dózisának ismeretét.

Az elnyelt dózis – definíciója szerint – az anyag által a sugárzásból elnyelt energiának és az adott anyag tömegének hányadosa. A dozimetria egyik feladata a sugárzások élő szervezetben kifejtett hatásának jellemzése és a hatást kiváltó dózis mennyiségének megadása. A szervezetben a sugárzás hatására elsőként fizikai, kémiai és biokémiai változások mennek végbe. Értelemszerűen ezek a biokémia változások okozzák a későbbi, szervezetet érintő biológiai változásokat is. Mivel a biológiai károsítás folyamata rendkívül bonyolult, így ennek megfelelően többféle dózismennyiség is használatos.

III.1.1 Dózisfogalmak, dózismennyiségek és egységek

Elnyelt dózis (D):

Bármely ionizáló sugárzásra vonatkozóan a besugárzott anyag térfogatelemében elnyelt energia és a térfogat tömegének hányadosát elnyelt dózisként nevezzük. Az elnyelt dózis (kis dózisok esetén nehezen) mérhető mennyiség, differenciális alakban:

$$D = \frac{dW_e}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dW_e}{dV}. \quad (1)$$

Az (1)-es egyenletben dW_e az elnyelt energia, dm a dV térfogatelem tömege, ρ pedig a sűrűsége. Az elnyelt dózis SI egysége a *gray*, jele Gy, és $1 \text{ Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Egyenérték dózis (H_T):

A sugárzás által okozott biológiai károsító hatás a sugárzás típusától és energiájától is függ. Ezt a tulajdonságot veszi figyelembe az egyenérték dózis (R sugárzásból T szerv vagy szövet egyenérték dózisa), amit definíciószerűen a (2) egyenlet fejez ki.

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}, \quad (2)$$

ahol: w_R a sugárzásra (fajtájára, minőségére, energiájára) jellemző súlytényező, $D_{T,R}$ pedig a T szövetben az R sugárzásból eredő elnyelt dózis. w_R értéke (dimenzió nélküli mennyiség) gamma-sugárzásra definíciószerűen 1, a többi sugárzási tényezőt

pedig ehhez viszonyítjuk. Többféle sugárzás esetén a károsító hatások számtani összegződését tételezzük fel, így a T szervekre vonatkozó egyenérték dózis a következőképpen adható meg:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} . \quad (3)$$

Az egyenérték dózis egysége szintén $J \cdot kg^{-1}$, az elnyelt dózistól eltérően azonban neve *sievert*, jele: Sv.

Effektív dózis (E):

Az emberi szervezet egészének károsodásához a különböző szervek eltérő mértékben járulnak hozzá. Az egész szervezetre vonatkozó, úgynevezett effektív dózis a szövetek egyenérték dózisainak súlyozott összege, azaz:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T . \quad (4)$$

A (4) egyenletben szereplő w_T az úgynevezett szöveti súlytényező, amelynek értéke 0.01 és 0.2 között lehet (szintén dimenzió nélküli egység), összegük 1. Egysége szintén *sievert*, jele Sv. A szöveti súlytényezők csak a sugárvédelmi gyakorlat tartományára (0.1 - \approx 500 mSv) vonatkoznak, ennek megfelelően determinisztikus hatásokhoz vezető nagyobb dózisok esetén használatuk nem javasolt. Nagyobb dózisok esetén javasolt az elnyelt dózis korrekciója a relatív biológiai hatékonysággal (RBE), ami a referencia sugárzástól és valamely ionizáló sugárzástól származó, ugyanazon biológiai hatást kiváltásához szükséges dózis hányadosa ($RBE=D_R/D_T$).

A sugárvédelmi gyakorlatban számos további dózisfogalom és dózismennyiség is ismert. Mivel a dolgozatban kizárólag a már említett és kifejtett dózisfogalmak szerepelnek, így a további fogalommagyarázattól és részletezéstől eltekintek. A dózismennyiségek összefoglaló táblázata a Függelék 1. mellékletében található.

A dozimetria számos ága ismert. Mind közül a legfontosabb a személyi dozimetria, de olyan más területeken is fontos szerepet kap, mint az orvosi diagnosztika, az ipari alkalmazások vagy akár a környezetvédelem.

A sugárzás és az anyag kölcsönhatása során bekövetkező változás az anyag közelébe helyezett detektorokkal mérhető. Az ionizáló sugárzásokra érzékeny detektorok sokfélék lehetnek és többféleképpen csoportosíthatóak.

A teljesség igénye nélkül egy csoportosítási lehetőség a következő:

- szcintillációs detektorok;
- gázionizációs detektorok (ionizációs kamra, proporcionális számláló, Geiger-Müller (GM) számláló);
- félvezető detektorok;
- szilárdtest nyomdetektorok;
- termolumineszcencia (TLD), optikailag stimulált lumineszcencia (OSL) vagy radiofotolumineszcencia elvén működő detektorok [3].

III.1.2 TLD és OSL anyagok dozimetriai követelményei

A XX. század rohamos technológiai fejlődése lehetővé tette – a természetben fellelhető anyagokon túl – új, eddig ismeretlen anyagok tervezett előállítását, azok tulajdonságainak részletes és alapos megismerését. Ez természetesen érvényes a dozimetriai anyagokra is. Egy anyag csak abban az esetben tekinthető doziméternek, amennyiben e tulajdonságok alapján erre a célra alkalmas, tehát az előre felállított szigorú nemzetközi előírásoknak megfelelő követelményeket teljesíti.

A TLD és OSL doziméterekkel szemben támasztott alapvető elvárások a következők:

- széles dózistartomány, amelyben egyértelmű összefüggés van a lumineszcens intenzitás és az elnyelt dózis között,
- nagy érzékenység (nagy TL vagy OSL intenzitás egységnyi elnyelt dózis esetén),
- csekély energiafüggés (a válaszjel elnyelt energiával – dózissal – azonos mértékű függése),
- alacsony fading (hosszú idejű információtároló képesség),
- TLD dozimétereknél egyszerű kifűtési görbe,
- a lumineszcencia során kibocsátott fény hullámhossza a detektáló egység (fotoelektron-sokszorozó) érzékeny tartományába essék,
- optikailag stimulált lumineszcencia esetén a gerjesztő és emissziós fény hullámhossz tartománya jól elkülönüljön,
- az anyag legyen mechanikusan stabil, kémiaileg inert és sugárálló,
- személyi és orvosi dozimetria esetén legyen az anyag rendszáma szövet ekvivalens (testszövet effektív rendszáma 7.4) [4].

A lumineszcens módszeren alapuló doziméterek számos olyan kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, amelyek indokolják egyre növekvő szerepüket a személyi dozimetria területén is. A termolumineszcens doziméterek kedvező tulajdonságai:

- nagy érzékenység,
- könnyű kezelhetőség,
- egyszerű kiértékelés,
- egy részük neutron dozimetriai célra is alkalmas (^6Li - ^7Li),
- kis méret, jó térbeli felbontás,
- széles dózistartományban egyértelmű monoton összefüggés az intenzitás és a dózis között.

A kereskedelmi forgalomban kapható, széleskörűen alkalmazott TL doziméterek felhasználási területe valamint dozimetriai paraméterei az 1. táblázatban láthatók. A termolumineszcencia jelenségének és termolumineszcens doziméterek működésének részletesebb tárgyalása a *III.3.3* – as fejezetben található.

1. Táblázat: A leggyakrabban használt TL doziméterek főbb jellemzői [5]

Típus	Felhasználási terület	Fő csúcs (°C)	Méréstartomány	Fading (%)
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	környezeti dozimetria	190	1 μGy – 10 Gy	$<3\% \cdot \text{év}^{-1}$
$\text{LiF}:\text{Ti},\text{Mg}$	személyi dozimetria	200	10 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$\text{LiF}:\text{Mg},\text{Cu},\text{P}$	személyi és környezeti dozimetria	210	1 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$^6\text{LiF}:\text{Ti},\text{Mg}$	neutron dozimetria	200	10 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$^6\text{LiF}:\text{Mg},\text{Cu},\text{P}$	neutron dozimetria	210	1 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$^7\text{LiF}:\text{Ti},\text{Mg}$	β - és γ -sugárzás	200	10 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	környezeti dozimetria	220	1 μGy – 10 Gy	$<5\% \cdot \text{év}^{-1}$
$\text{CaF}_2:\text{Dy}$	környezeti dozimetria	215	0.1 μGy – 10 Gy	$>5\% \cdot \text{hó}^{-1}$

Az optikailag stimulált lumineszcenciát eredményező anyagoknak is számos olyan előnyük említhető, amely hozzájárult a módszer elterjedéséhez. Ilyen előnyös tulajdonságok a következők:

- nagy érzékenység,
- gyors és pontos kiértékelés,
- kis méret, jó térbeli felbontás,
- egyszerű kezelhetőség és mintaelőkészítés [5, 6].

III.1.3 Sugárbalesetek és ezek emberi szervezetre gyakorolt hatásai

A sugárbaleset olyan radioaktív anyagokkal vagy ionizáló sugárzást kibocsátó berendezések alkalmazásával kapcsolatos esemény, amely során a dolgozó személyzet és/vagy a veszélyeztetett terület közvetlen közelében élő vagy ott tartózkodó személyek (többi dolgozó, lakosság) a normális helyzetre érvényes dóziskorláton felüli dózist kapnak vagy kaphatnak. Azok a sugárbalesetek, amelyek nukleáris anyag előállítása, szállítása, felhasználása, kezelése során következnek be, a nukleáris balesetek csoportjába tartoznak. A tájékoztatás elősegítése érdekében a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség és a Nemzetközi Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet adott kérdésekkel foglalkozó részlege összeállított egy skálát, ez a „Nemzetközi Nukleáris Esemény Skála” vagy INES skála (1. ábra) [7, 8].



1. ábra: Nemzetközi Nukleáris Esemény Skála

A sugárbalesetek bekövetkezésekor elszenvedhető sugárkárosodásokat – a sugárzás biológiai hatásaira vonatkozó ismereteink alapján – alapvetően két fő csoportra oszthatjuk. Rákkeltő vagy genetikai (sztochasztikus) hatásról beszélünk abban az esetben, amikor az ionizáló sugárzás okozta károsodás természetét tekintve a sejtek DNS állományának megváltozásához köthető, és bekövetkezése nem biztosan, hanem adott valószínűséggel lejátszódó folyamat.

A másik csoport a szövetpusztító (determinisztikus) sugárhatás, amely esetén a sugárkárosodás – mely természetét tekintve számos szöveti sejt egyidejű pusztulását (nekrózisát) jelenti – egy adott sugárdózis (küszöbdózis) felett szinte bizonyosan bekövetkezik és a dózis növekedésével a hatás tovább súlyosbodik. A sugárbalesetek esetén rendszerint akut sugárbetegség alakul ki, hiszen viszonylag rövid idő alatt nagy sugárdózis érheti a szervezetet. A sugárbalesetek során az emberi szervezetet ért hatásokat az idő és a dózis függvényében a 2. táblázat tartalmazza. A determinisztikus hatást kiváltó sugárterhelések esetén az effektív dózis helyett az elnyelt dózis használata javasolt, ennek megfelelően az értékeket Gy egységben adjuk meg és [9].

2. Táblázat: Az akut sugárbetegségek tünetei az idő és dózis függvényében

Tünetek	Dózis (Gy)				
	1 - 2	2 - 6	6 - 10	10 – 15	> 50
Hányinger, hányás; Hányás valószínűsége	3 óra 1 Gy: 5 % 2 Gy: 50 %	2 óra 3 Gy: 100 %	1 óra 100 %	30 perc 100 %	< 30 perc 100 %
Vezető tüneteket okozó szervek	vérképző rendszer	vérképző rendszer	gyomor- és bélrendszer	gyomor- és bélrendszer	központi idegrendszer
Szervkárosodásra jellemző főbb tünetek	mérsékelt fehérvérsejtszámcsökkenés	súlyos fehérvérsejtszámcsökkenés, bevérzések, fertőzés 3 Gy felett	hasmenés, láz, elektrolit egyensúlyzavar	hasmenés, láz, elektrolit egyensúlyzavar	görcsök, remegés, elesettség
Sugárbetegség súlyossága	könnyű	közepes (2 – 4 Gy), súlyos (4 – 6 Gy)	rendkívül súlyos, halálos	rendkívül súlyos, halálos	rendkívül súlyos, halálos

Az élőlények sugárérzékenységének összehasonlítására szolgál a félhalálos dózis (LD: lethal dose) nevű mennyiség: LD_{50/30} azt a dózist jelenti, amekkora terhelés esetén a populáció 50 %-a 30 napon belül orvosi beavatkozás nélkül elpusztul. Az ember félhalálos egésztest dózisa 4 – 5 Gy, azonban a különböző szervrendszerek esetén más és más a károsodást előidéző küszöbdózis. A központi idegrendszer esetén ez 17 Gy, a gyomor és bél traktus esetén 4,3 Gy, míg a vérképző szervek a legérzékenyebbek, már 0,87 Gy esetén károsodnak. A 16/2000. (VI.8) EüM rendelet szerint sugársérült az a személy, aki „250 mSv effektív dózist meghaladó nem terápiás célú sugárterhelést, illetve a klinikai tünetek vagy a dózisbecslés alapján a bőrfelület egy részén 6 Gy-nél, a szemlencséiben 2 Gy-nél, vagy egyéb egyes szervekben 3 Gy-nél nagyobb sugárterhelést (elnyelt dózist) kapott, illetőleg ha ennek gyanúja fennáll...”. Ugyanígy 250 mSv a dóziskorlát az életmentésben résztvevő személy számára [10]. Az egyéni érzékenység szintén befolyásolja a hatás súlyosságát. A fentiek alapján egyértelmű, hogy a dózisrekonstrukció, a dózisadatoknak az esemény bekövetkezése utáni gyors és minél pontosabb megállapítása életbevágóan fontos a hatékony beavatkozás kialakítása végett [11].

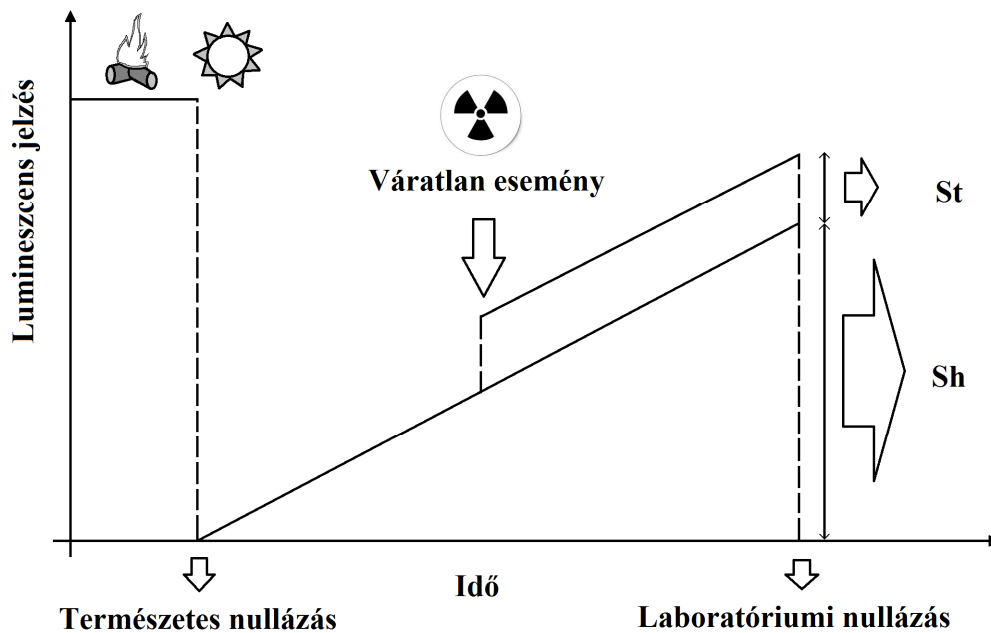
III.2 Retrospektív dozimetria

Az előző fejezetekben említett (részletesen a *III.3* fejezetben tárgyalt) lumineszcencia jelenségek közös jellemzője, hogy az adott anyag elektronszerkezetében létrejött változás viszonylag stabil, ennek megfelelően pedig az információ kinyerése lehetővé válik a besugárzás helyétől és idejétől függetlenül. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a két említett jelenség egyaránt felhasználható utólagos információszerzésre, céljainknak megfelelően ebben az esetben utólagos dózisbecslésre. A következő fejezetben a retrospektív dozimetria tárgyalása következik részletezve a lehetőségeket és korlátokat egyaránt.

A retrospektív dozimetria viszonylag újszerű fogalom, interdiszciplináris mivolta pedig tovább nehezíti egyértelmű definiálását. A Nemzetközi Sugárzási Mértékegység- és Mérésügyi Bizottság (ICRU) 2002-ben megjelent kiadványa tartalmaz egy definíciót, miszerint a retrospektív dozimetria:

„The estimation of a radiation dose received by an individual recently (within the last few weeks), historically (in the past) or chronically (over many years).” [12], azaz: az egyén közelmúltbeli, múltbeli vagy távoli múltban kapott sugárterhelésének (dózisának) becslése. A fogalom tehát igen tág, számos olyan eljárás ismert – és válik ismertté

napjainkban is – amely alkalmas lehet utólagos dózisbecslésre, vagy a dózisrekonstrukció valamely részfolyamatának elvégzésére illetve kiegészítésére. A természetes háttérnél magasabb szintű sugárzásnak történő kitettségnek több oka is lehet. A szándékos besugárzásokon (diagnosztika, sugárkezelés) kívül lehet egy baleset eredménye, de egy terrortámadás során használt fegyver (piszkos bomba – radiológiai diszperziós eszköz – vagy nukleáris fegyver) bevetésének következménye is [13, 14]. A retrospektív dozimetria elvi alapjait jól szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: A lumineszcens jel felépülésének és nullázásának folyamata a retrospektív dozimetria szempontjából

A környezetünkben található anyagokat és a személyes tárgyakat egyaránt éri a háttérsugárzás. A háttérsugárzás 85 %-a természetes eredetű, míg 15 %-a mesterséges eredetű. A sugárterhelés származhat külső vagy belső (radioizotópok belégzéséből, lenyeléséből) forrástól. A természetes eredetű sugárterhelés forrásai pedig a következő jellegzetes csoportokra oszthatók: kozmikus sugárzástól és földkérgi eredetű izotóptól származó sugárterhelés, illetve ezen belül nagysága miatt külön megkülönböztetjük a radontól származó sugárterhelést. A természetes háttérsugárzás népe sséggel súlyozott világátlaga $2.4 \text{ mSv} \cdot \text{év}^{-1}$, amely érték átlag, $1 \text{ mSv} \cdot \text{év}^{-1}$ és $10 \text{ mSv} \cdot \text{év}^{-1}$ között ingadozik.

A mintákban a lumineszcens jel folyamatosan épül az adott anyagra jellemzően egészen addig, míg több töltéshordozó nem képes csapdába fogódni és ezáltal nagyobb lumineszcens jelet produkálni.

A lumineszcens jel természetes módon is nullázódhat, tehát törlődhet. Ez bekövetkezhet magasabb hőmérsékletre történő felhevülés, vagy fénynek való kitettség (napsugárzás) hatására is. A jel ekkor nullázódik, és amint a gerjesztés megszűnik, a lumineszcens jel újra épülhet. Ekkor gyakorlatilag a háttérsugárzást (az adott helyre jellemzően) „méri” a minta egészen addig, amíg valami rendkívüli esemény nem történik. Amennyiben semmilyen rendkívüli esemény nem zavarta a csapdába fogott töltéshordozók mennyiségét, a kiértékeléskor az addig összegyűlt háttérsugárzás okozta változást tudjuk mérni. Ezt a 2. ábrán Sh-val jelöltem, ez a háttérsugárzásra eső hányad. A háttérsugárzás helyszíni ismeretéből pedig visszaszámolható az is, hogy bizonyosan nem történt-e rendkívüli esemény.

Abban az esetben, amennyiben a várt érték magasabb, mint a környezeti háttérsugárzás hatására keletkező válasz, tehát a lumineszcens jel nagyobb, mint vártuk, valamilyen nem várt esemény történt, amit a lumineszcens jel St többleteként jelöltem (2. ábra). Az esemény többletdózisa pedig a háttérsugárzás ismeretében megbecsülhető.

A retrospektív dozimetria egy sajátos és alapvető tulajdonsága a fordított és egyenkénti kalibráció. A szokásos dozimetriai mérések esetén a kalibráció elvégzése az első lépés, az ismeretlen minták mérése ezután következik. Retrospektív módszerek esetén azonban először a mérést kell elvégezni, kinyerve ezzel az összegyűjtött információt, hiszen a minta hevítése vagy optikai stimulációja törli is azt. A kalibrációt a mérést követően végezzük el, ráadásul minden mintán külön-külön, hiszen a minták tulajdonságai nagyon különbözőek lehetnek [15].

A dózisrekonstrukció elvégzésekor a már említett többlet sugárdózis természetesen hozzáadódik a háttér értékéhez, megnövelve azt. Matematikailag ez a többlet sugárdózis háttér értékkel való összegzését jelenti.

A lumineszcens módszerek egyik fontos alkalmazási lehetősége – a retrospektív dozimetriához szorosan kapcsolódóan – a tehát nukleáris törvényszéki (nuclear forensic) alkalmazás. Említésre került korábban, hogy egyes, a természetben található anyagok alkalmasak a háttér dózis meghatározására. Az építőanyagokat egy nukleáris baleset vagy egy csempészett radioaktív vagy nukleáris anyag tárolása következményeként többlet sugárterhelés éri [16]. Ennek a többlet dózissal, az épület korának és a természetes háttér dózissal az ismerete pedig lehetőséget biztosít arra, hogy a nem bejelentett tevékenység bizonyítható legyen.

III.2.1 Retrospektív dozimetriai módszerek

Ebben a fejezetben az utólagos dózisbecslés lehetséges módszereit mutatom be, szerteágazó mivoltukra tekintettel azonban részletezésükre nem térek ki. Az általam vizsgált terület, a TL/OSL módszer csak egy a sok lehetséges eljárás közül. A biológiai módszerek az egésztest dózist adják, illetve adhatják meg, míg a fizikai módszerek becslést adnak ugyanúgy egésztest dózisa vonatkozóan.

III.2.1.1 Citogenetikai módszerek

- Dicentrikus kromoszóma módszer
- Korai kromoszóma kondenzáció (Premature Chromosome Condensation)
- Mikronukleusz frekvencia elemzés
- Fluoreszcens in situ hibridizáció (FISH)

III.2.1.2 Genetikai módszerek

- Gén expresszió
- Egysejt elektroforézis (COMET módszer)
- Génmutációk

III.2.1.3 Hematológiai módszerek

- Vérsejtszámok változása

III.2.1.4 Immunológiai módszerek

- Fehérje biomarkerek

III.2.1.5 Fizikai módszerek

- Elektron Paramágneses Rezonancia (EPR)
- Lumineszcens módszerek (TL és OSL)
- Aktivációs módszerek

III.2.1.6 Számítási módszerek

- RADRUE (Realistic Analytical Dose Reconstruction with Uncertainty Estimation) számítástechnikai programmal végzett becslés
- Monte Carlo (MC) szimuláció alapján végzett dózisrekonstrukció

Ainsbury és munkatársai 2010-ben megjelent publikációjában egy részletes és áttekinthető táblázatban (3. táblázat) foglalták össze a retrospektív dozimetriai módszerek tulajdonságait és felhasználási területeit.

3. Táblázat: Retrospektív dozimetriai módszerek összehasonlítása [17]

	Besugárzás óta eltelt idő			Besugárzás			Idő (h) a minta beérkezésétől a dózisbecslésig	Dózistartomány (Gy) akut egésztest besugárzás	Elkülönítési használat	Automatikus analízis	Dózis bizonytalanság meghatározható	Standard eljárás
	Napok	Hónapok	Évek	Akut	Krónikus	Test egy része						
Dicentrikus kromoszóma módszer (teljes)	✓	✓	-	✓	✓	✓	55	0.1-5		✓	✓	ISO 19238
Dicentrikus kromoszóma módszer (elkülönítés)	✓	✓	-	✓	✓	-	52	0.5-5	✓	✓	✓	ISO 21243
Korai kromoszóma kondenzáció (fragmentumok)	✓	-	-	✓	-	✓	2 ^a	0.2-20	✓	folyamatban	folyamatban	folyamatban
Korai kromoszóma kondenzáció (gyűrűk)	✓	✓	-	✓	✓	-	40 ^b	1 to >20	✓	folyamatban		
Mikronukleusz frekvencia elemzés	✓	✓	-	✓	✓	-	75	0.2-4	✓	✓	✓	ISO előkészítése, kritériumok meghatározása
FISH módszer	✓	✓	✓	✓	✓	-	120	0.25-4		folyamatban	✓	
GPA (Glycophorin A)	-	✓	✓	✓	-	-	3	>1		✓		
HPRT (hypoxanthine-guanine-phosphoribosyl-transferase)	✓	✓	-	✓	-	-	400	>1				
Gén expresszió	✓	-	-	✓	-	-	4/36 ^c	>0.1	✓	✓		
EPR (fog/csont)	✓	✓	✓	✓	✓	-	1-48	>0.1			✓	ISO előkészítése
EPR (személyes tárgyak)	✓	-	-	✓	-	✓	1-48	>2	✓			
TL/OSL (tégla)	✓	✓	✓	✓	✓	-	<24	>0.03		✓	✓	
TL/OSL (személyes tárgyak)	✓	✓	-	✓		-	<1	>0.001	✓	✓		
Aktivációs analízis	✓	✓	✓	✓	✓	-	<24	>0.0001	✓	✓		
Hematológia	✓	-	-	✓	-	-	<1	>1	✓	✓		rutin mérések
γ-H2AX	✓	-	-	✓	-	✓	3	0.5 to >8	✓	✓		
CRP (C-reactive protein)	✓	-	-	✓	-	-	1	>1	✓	✓		rutin mérések
SA (serum amylase)	✓	-	-	✓	-	-	1	>1	✓	✓		rutin mérések
Számítástechnikai módszerek	✓	✓	✓	✓	✓	✓	<1	0 to ∞	✓	✓	✓	

A táblázatban tizenkilenc módszer paraméterei láthatóak, összesítve ezáltal a retrospektív dozimetria felhasználásának lehetőségeit, korlátait, előnyös és kevésbé kedvező tulajdonságait. Az általam vizsgált módszert is magába foglaló TL/OSL technika (személyes tárgyak vizsgálata) paramétereit kiemeltem.

A két lumineszcens technika egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy a baleset bekövetkezését követő viszonylag rövid időn belül (napok, esetleg hetek) kis dózisoktól már pontos eredményt kaphatunk. Emellett további előnye, hogy a tizenkilenc módszerből mindössze hét esetén van lehetőség a mérési bizonytalanság meghatározására, ezek egyike a TL/OSL technika a nem személyes tárgyak mérése esetén.

Az utóbbi években az elektron paramágneses rezonancia (EPR) technika lett a retrospektív dozimetria legfőbb támasza és egyúttal a legtöbbek által alkalmazott eljárás is. Hátránya azonban az igen magas költség, valamint a – retrospektív dozimetriai szempontból – korlátozott használhatóság. Az EPR technika legfőbb előnye, hogy kimagasló reprodukálhatóságot biztosít, így rutin dozimetriai feladatokra kiválóan alkalmazható. A TL/OSL technika egyértelmű előnye a széleskörű alkalmazhatóság. További alkalmazása lehet lumineszcens kormeghatározás vagy a különböző geológiai minták analitikai elemzése is. A TL/OSL módszer ennek megfelelően továbbra is igen fontos szerepet tölt be az utólagos dozimetriai módszerek között.

III.2.2 Retrospektív dozimetriai célra alkalmas anyagok

Az utólagos dózisbecslés elvégzését az teszi lehetővé, hogy vannak olyan anyagok a környezetünkben, amelyekben olyan fizikai változások zajlanak le ionizáló sugárzás hatására, amelyek később detektálhatók. A célnak megfelelő anyagokat három nagyobb csoportra bonthatjuk:

- **Környezeti anyagok:** olyan, a környezetben előforduló szervesetlen anyagokról van szó, amelyek a baleset vagy terrorcselekmény közvetlen környezetében találhatóak. A kövek, téglák, dolomit stb. olyan anyagok, amelyek ugyan helyspecifikus összetétellel bírhatnak – tehát mérésükhöz mindenképpen utólagos kalibráció szükséges – azonban a környezeti dózisviszonyok becsléséhez alkalmazhatóak. A téglából és cserepekből kivonható a kvarc (SiO_2), ami termolumineszcens módszert alkalmazva alkalmas utólagos dózisbecslésre. Ilyen alkalmazásra példa az atombomba bevetése Hiroshima és

Nagaszaki felett, ahol az utólagos dózisrekonstrukciót az épületek falában lévő téglákból kivont anyagok TL/OSL mérése tette lehetővé [18, 19].

- Személyes tárgyak: olyan eszközök, tárgyak és az őket alkotó anyagok, amelyek a későbbi „áldozatok” személyes tárgyai, ezáltal közvetlen közelükben – vagy akár a testükkel érintkezve – voltak a besugárzás ideje alatt, így közelítőleg megbecsülhető a személy által kapott sugárterhelés. Ilyenek lehetnek elektronikai eszközök kerámia alkatrészei, ellenállások, rezisztorok, USB alkatrészek vagy akár chip-kártyák [20, 21]. A legfrissebb kutatási eredmények alapján pedig ide sorolhatóak a mobiltelefonok üveg kijelzői is [22].
- Humán minták: az egyik ilyen lehetőség az exkrétumok vizsgálata, a másik pedig a fogászati kerámiák, porcelánok, részleges és teljes fogpótlások. Utóbbi esetén nem csupán a termolumineszcencia használható, mint módszer, de elektron paramágneses rezonancia (EPR) és a termikusan stimulált exo-elektron emisszió (TSSE) is [23, 24, 25].

Egy előre nem látható esemény bekövetkezését követően, miután a környezeti és személyi dózisok nem ismertek, több módszerre támaszkodó dózisrekonstrukció szükséges. Értelemszerű, hogy az alkalmazott berendezések vagy eljárások nem egyformán érzékenyek, azonban információ hiányában mindegyik fontossá válhat. Az ilyen események bekövetkezésekor emellett nagyon fontos az adott helyszínen mérhető háttérsugárzás (természetes háttér) minél pontosabb ismerete és feltérképezése is.

III. 3 Lumineszcencia

A lumineszcencia nem más, mint fénykibocsátási jelenség, amely nem azonos a magas hőmérsékleten kialakuló hőmérsékleti (feketetest) sugárzással. Utóbbi az izzás, előbbi pedig szigetelő és félvezető anyagokban előzetesen (gerjesztés során) eltárolt energia kisugárzása [26]. A gerjesztés – energiaközlés – függvényében számos különféle lumineszcencia jelenséget különböztethetünk meg, melyek összefoglalását a teljesség igénye nélkül a 4. táblázat szemlélteti [27].

4. Táblázat: Lumineszcencia jelenségek

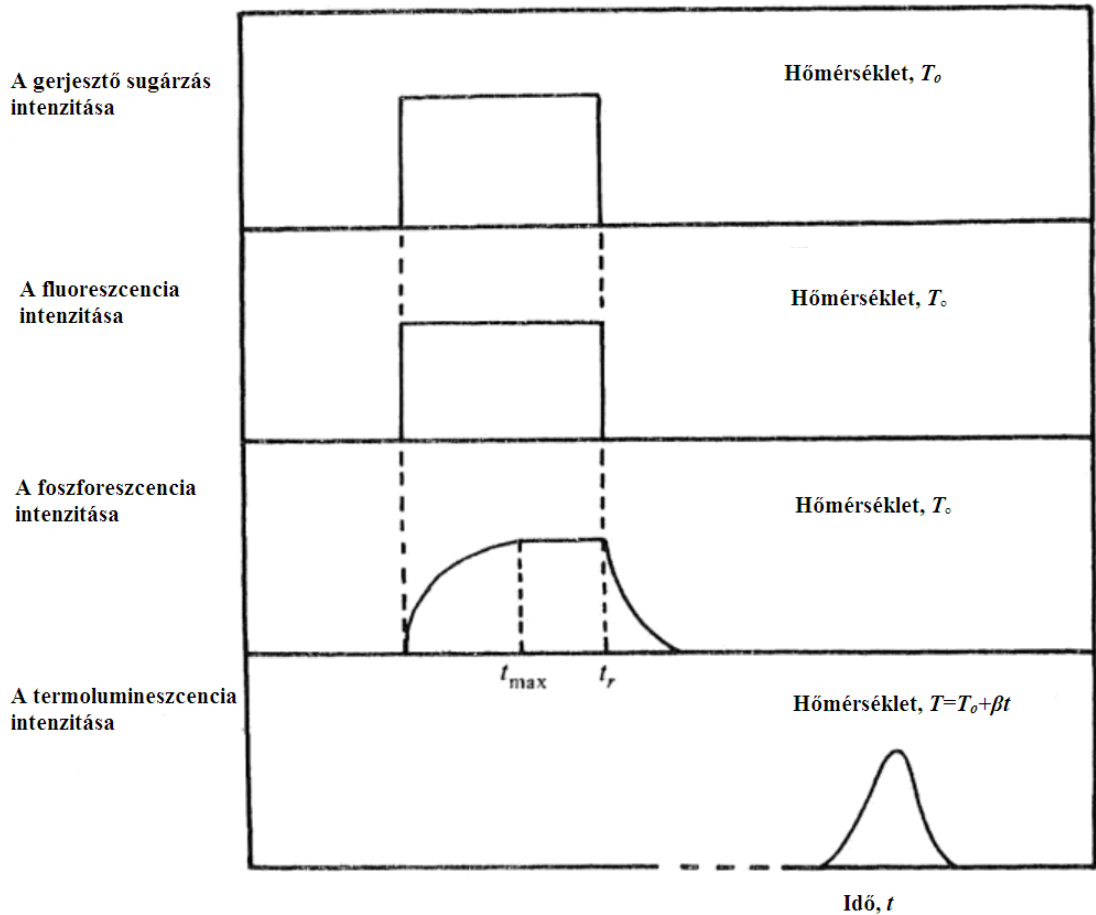
Lumineszcencia jelenség	Gerjesztés módja
Biolumineszcencia	biokémiai reakciók energiája [28]
Kemolumineszcencia	kémiai reakciók energiája [29]
Kristallolumineszcencia	kristályosodáskor történő fénykibocsátás [30]
Elektrolumineszcencia	elektromos mező vagy áram [31]
Katódlumineszcencia	Katódsugárzás [32]
Mechanolumineszcencia	mechanikai hatás [33]
Fraktolumineszcencia	kémiai kötések felszakadása [34]
Piezolumineszcencia	mechanikai nyomás [35]
Tribolumineszcencia	karcolás, dörzsölés vagy súrlódás [36]
Fotolumineszcencia	fotonok (fény, ionizáló sugárzás) [37]
Radiolumineszcencia	ionizáló sugárzás [38]
Termolumineszcencia	elektromágneses és ionizáló sugárzás [39]
Szonolumineszcencia	hang hatására folyadékokban [40]

A lumineszcencia jelenségek közös tulajdonsága, hogy a kiértékelés során fénykibocsátás zajlik. A lumineszcens fénykibocsátás jellemzői, intenzitása, spektrális eloszlása vagy a gerjesztés paramétereitől való függése alapján az anyag tulajdonságairól hasznos információkkal szolgálhat. Erre alapozva számos mérési eljárást és technikai/gyakorlati alkalmazást dolgoztak ki az évek során.

III.3.1 Fluoreszcencia és foszforeszcencia

A lumineszcencia jelenségek nem csupán a gerjesztés módja, hanem időbeni lefutásuk alapján is csoportosíthatóak. Abban az esetben, amikor a fénykibocsátás a gerjesztést követően 10^{-8} sec alatt bekövetkezik, fluoreszcenciáról beszélünk. Fluoreszcencia esetén a fénykibocsátás addig tart, amíg maga a gerjesztés. Ennek magyarázata, hogy a gerjesztett elektron akár közvetlenül, akár egy köztes állapoton keresztül gyorsan alapállapotba kerül. Amennyiben a fénykibocsátás a gerjesztés megszűnése után is megfigyelhető, úgy foszforeszcenciáról beszélünk. Ebben az esetben azonban a metastabil (nem egyensúlyi) állapotból az alapállapotba történő átmenet közvetlenül nem lehetséges. Következésképpen a metastabil állapotok csapdaként viselkednek, az elektron csak akkor szabadulhat, ha újabb energiaközlés (pl. hőközlés) történik. (A fluoreszcencia jelensége alapvetően független a hőmérséklettől, ezzel szemben a foszforeszcencia erős hőmérsékletfüggést mutat.) A csapdákból történő szabadulás tehát bizonyos ideig akadályozott. Amennyiben az energiaközlés a

hőmérséklet növelésével történik termolumineszcenciáról, amikor pedig optikai gerjesztés útján történik, úgy optikailag stimulált lumineszcenciáról beszélünk [41].



3. ábra: Az energiaelnyelés és fluoreszcencia, foszforeszcencia valamint termolumineszcencia emissziója közötti kapcsolat (T_0 : energiaközlés hőmérséklete; β : felfűtési sebesség; t_r : az energiaközlés időtartamának vége, a foszforeszcencia intenzitása ettől a ponttól csökken)

III.3.2 A sáv modell

A szilárd testek lumineszcens tulajdonságainak tárgyalása során a kiinduló pont minden esetben a sávmélet, mely szerint az elektronok úgynevezett megengedett energiasávokban tartózkodhatnak, amelyeket tiltott sávok választanak el egymástól (az elektronok itt tartózkodása nem megengedett). Tökéletes szigetelő és félvezető kristályban 0 K hőmérsékleten a sávok az úgynevezett vegyérték (valencia) sávig bezárólag be vannak töltve elektronokkal. A vegyérték- és vezetési sáv közötti tiltott sávot az angol szakirodalomban gap-nek nevezik. A vezetési sáv elektronjai nem kötődnek egyetlen atomhoz sem, így azok szabadon elmozdulhatnak a kristályban. Ahhoz, hogy egy vegyérték sávban lévő elektron a vezetési sávba kerüljön, a tiltott sáv

szélességével egyező energia szükséges. Ez alapján a kristályos anyagok a következők szerint csoportosíthatók.

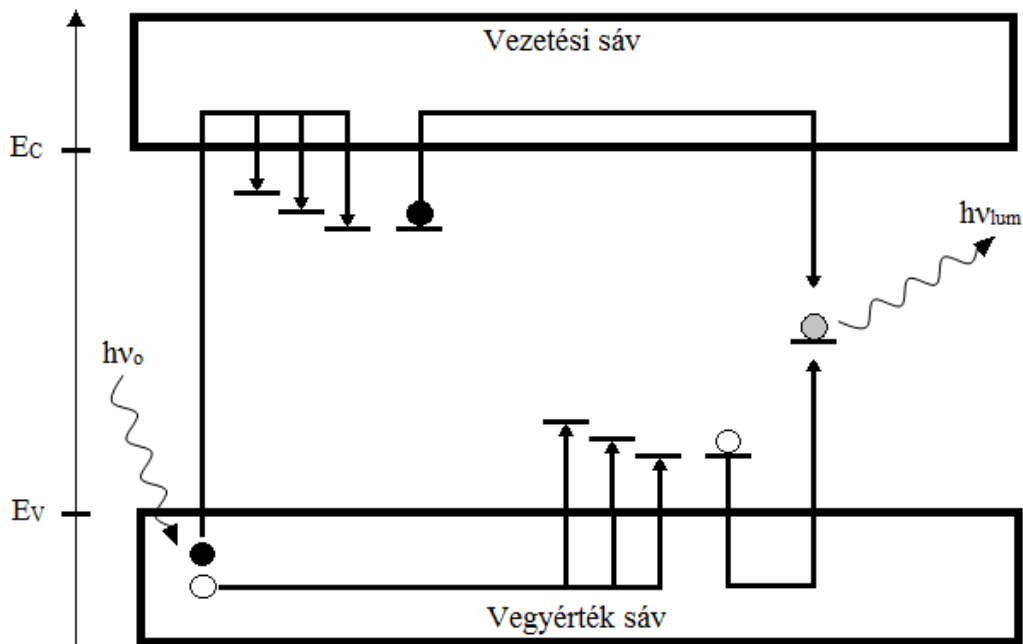
1. szigetelők: a tiltott sáv viszonylag széles (5-10 eV),
2. félvezetők: a tiltott sáv 5 eV-nál kisebb,
3. vezetők: a tiltott sáv elhanyagolhatóan keskeny, a vegyérték sáv és vezetési sáv át is fedhetnek. Az elektronok energiaközlés nélkül is elmozdulhatnak.

A szigetelők vezetési sávjában alig tartózkodnak elektronok, hiszen szobahőmérsékletű mozgási energiájuk sem elég a vezetési sávba való ugráshoz. Ahhoz, hogy az elektron ebben az esetben a vezetési sávba kerüljön, energiaközlés szükséges. A gerjesztés hatására az elektron a vezetési sávba ugrik, helyén pedig egy lyukat hagy a vegyérték sávban. Ideális szigetelő anyagok – kristályok – esetén az elektron igen rövid időt tölt a vezetési sávban, mielőtt a vegyérték sávba visszakerülve rekombinálna egy lyukkal. A többlet energia hővé alakul, illetve fény formájában kerül kisugárzásra.

Az előzőekben tárgyalt elmélet tökéletes kristályok esetén érvényes, a valóságban azonban az anyagok rácsai rengeteg torzulást, hibát tartalmaznak. A hibák részben az anyag belső (intrinsic) hibái, például egy hiányzó atom (vakancia), vagy, hogy az atom nem szabályosan helyezkedik el (intersticiális pozícióban van). Másrészt a valódi anyagok mindig tartalmaznak szennyezőket, ezek a külső (extrinsic) hibák okozói. A hibák lehetnek pontszerűek, vagy kiterjedtek, mint pl. diszlokációk.

A hibák, lokálisan megtörve a kristály periodicitását azt eredményezik, hogy olyan lehetséges energiaszintek alakulnak ki, amelyek a tiltott sávban vannak. Egyes hibahelyeken a töltéshordozók befogódhatnak, és ott hosszú ideig tartózkodhatnak, mivel onnan az alapállapotba (valencia sávba) a közvetlen átmenet nem megengedett (tiltott). Ezeket a hibahelyeket csapdáknak nevezzük (trap). Energiaközlés hatására a befogott töltéshordozó kiszabadulhat, ismét felkerülhet a vezetési sávba. Ez lehetővé teszi a szabad vándorlását, így pedig eljuthat egy olyan hibahely közelébe, amely egy „lyukat fogott csapdába”. Itt megtörténhet a rekombináció, ezért az ilyen hibahelyeket rekombinációs centrumoknak nevezük. A rekombináció során felszabaduló energia vagy sugárzás nélkül a rácsnak adódik át, vagy pedig lumineszcens emissziót eredményez. Ilyenkor lumineszcencia centrumról beszélünk. A csapdák és rekombinációs centrumok tulajdonságait a befogadó rács tulajdonságai (pl. szimmetria adatai) és a szennyezők jellemzői együtt határozzák meg. (Megjegyzendő, hogy amennyiben a csapda és a rekombinációs centrum fizikailag egymás közelében

helyezkednek el, a rekombináció a vezetési sávba ugrás nélkül is végbemehet. A hibahelyeket is tartalmazó anyagokat jellemző sáv modell vázlatát a 4. ábrán látható [25, 42].



4. ábra: Sáv modell

A csapdába fogott elektron (a 4. ábrán szürke színnel jelölve) tartózkodási ideje attól függ, milyen „mély” vagy éppen „sekély” az adott csapda. Termodinamikai megfontolások alapján a tartózkodási idő várható értéke:

$$\tau = s^{-1} \exp(E_m/kT), \quad (5)$$

ahol E_m a csapda mélysége energiában a vezetési sáv aljától mérve, k a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet, s pedig egy konstans.

A sekély csapdák (keskeny tiltott sáv) esetén a töltéshordozók már szobahőmérsékleten is akkora energiára tesznek szert, hogy képesek kiszabadulni és rekombinálnak bármilyen külső energiaközlés nélkül is. A mélyebb csapdába fogódott elektronok szobahőmérsékleten hosszú ideig ott tartózkodnak, így rekombinációjuk elenyésző, kiszabadításukhoz külső energiaközlés szükséges.

A jelenség mérés-technikai jelentőségét az adja, hogy az anyag által elnyelt energia – így az elnyelt dózis – széles tartományban arányos a csapdába befogott elektronok számával. A befogott elektronok kiszabadítása és a rekombináció során keletkező fény

intenzitásának mérése pedig lehetőséget biztosít az anyag által elnyelt dózis meghatározására.

III.3.3 Termolumineszcencia (TL)

A *III.3.1* fejezetben tárgyalt foszforeszcencia esetén a töltéshordozó hosszú ideig tartózkodhat metastabil állapotban. Ez az időtartam akár 10^{10} év is lehet, azonban a hőmérséklet emelésével a töltéshordozók kiszabadulása felgyorsítható. Ezt a jelenséget fedezte fel (gyémánt felmelegítve fényt bocsátott ki) és írta le Robert Boyle 1663-ban. A jelenség neve termikusan stimulált lumineszcencia, vagy röviden termolumineszcencia (TL) [43]. Számos természetes anyagnál, például kristályoknál tapasztalták, hogy melegítés hatására fényt bocsátottak ki, majd ez az emisszió egy idő után a további melegítés ellenére megszűnt. Később azt is felfedezték, hogy a jelenség ionizáló sugárzás alkalmazásával újra előidézhető. Az érdekességen túl a TL egy ideig nem vonzott különösebb érdeklődést.

A fellendülés 1945 után kezdődött, amikor Randall és Wilkins a szilárdtestek sáv szerkezetére alapuló modellt mutatott be a TL magyarázatára. Néhány év múlva, 1953-ban Daniels és szerzőtársai tollából megjelent az első közlemény a TL dozimetriai célú alkalmazásáról. A TL dozimetria azóta ismert és széleskörűen alkalmazott módszer a dózismérés számos területén, azonban legnagyobb gyakorlati jelentősége dozimetriai és kormeghatározási alkalmazásában rejlik [44, 45, 46]. A természetes anyagokat hamarosan felváltották a célorientáltan fejlesztett szintetikus anyagok, amelyek kereskedelmi forgalomban is kaphatóak. A TL dozimetria sikeres elterjedése olyan előnyös tulajdonságoknak köszönhető, mint a detektorok kis mérete, többszöri felhasználhatósága, könnyű kezelhetősége és egyes anyagok esetén kiemelkedően nagy érzékenység [47]. TL detektorokat alkalmaznak környezeti, technológiai, orvosi (diagnosztikai és terápiás) dozimetriában, de legelterjedtebben a személyi dozimetriában. A TL egy érdekes és egyúttal rendkívül fontos alkalmazási lehetősége a retrospektív dozimetria.

A termolumineszcencia – mint dózismérési eljárás – célja a folyamat során eltárolt energia meghatározása; két alapvető részfolyamat együtteseként értelmezhető. Az első lépésben az egyensúlyban lévő anyag külső energia elnyelődése (besugárzás) hatására – szétválasztott töltéseket (elektron, lyuk) tartalmazó – metastabil TL anyaggá alakul át. A második lépés során az eltárolt energia termikus stimuláció (hőközlés) eredményeként felszabadul, ennek egy része a kibocsátott fény (IR, látható vagy UV),

ami mérhető. Ez a szokásos, leggyakrabban alkalmazott kísérleti eljárás esetén úgy történik, hogy a mintát egyenletes felfűtési sebességgel hevítve detektáljuk a kibocsátott fény intenzitását egy, a detektor anyagára jellemző kiválasztott hullámhosszon. A mért fényintenzitást a hőmérséklet függvényében ábrázolva kapjuk a kifűtési görbét (glow curve). Ez a görbe a vizsgált hőmérséklet tartományban általában egy vagy több, szeparált vagy átlapoló csúcsból áll. Ha az első lépés során a létrehozott elektron-lyuk párok száma arányos az elnyelt energiával, és a második lépés során a rekombinációban keletkező fotonok száma arányos az elektron-lyuk párok számával, akkor a TL anyag alkalmas dózismérésre. A tapasztalat azt mutatja, hogy számos anyag esetében bizonyos dózishatárok között a fenti feltételek teljesülnek. A feladat tehát a stimuláció hatására kilépő fotonok megszámlálása. Ezt a gyakorlatban a kifűtési görbe csúcs alatti területének meghatározásával tudjuk megtenni.

A kifűtés (termikus stimuláció) során lejátszódó folyamatokat az alábbi egyszerűsített fenomenologikus modellel illusztráljuk. Az egyszerűség kedvéért egy típusú töltéscsapsdát és egy típusú lumineszcencia centrumot feltételezünk.

Legyen a besugárzás után:

n : a csapdába fogódott elektronok koncentrációja,

n_c : az elektronkoncentráció a vezetési sávban,

n_h : a lumineszcencia centrumokba befogódott lyukak koncentrációja,

N : a csapdahelyek koncentrációja,

A : a csapdába visszafogódás valószínűségi együtthatója,

A_r : az elektron-lyuk rekombinációjának valószínűsége a lumineszcencia centrumban,

I_{TL} : a TL emisszió intenzitásával arányos mennyiség,

E : csapdamélység,

s : frekvenciafaktor (E és s az úgynevezett Randall-Wilkins paraméterek).

A mozgó elektron modell esetében ez a leírás a következő differenciálegyenlet-rendszert eredményezi:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= -ns \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) + n_c(N-n)A \\ \frac{dn_c}{dt} &= ns \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) - n_c(N-n)A - n_c n_h A_r \\ I_{TL} &= -\frac{dn_h}{dt} = n_c n_h A_r \end{aligned} \quad (6.1)$$

Az egyenletek megoldása során általában azt feltételezzük, hogy $dn_c/dt \ll dn/dt$, továbbá, hogy $dn_h/dt \ll dn/dt$ és $n_c \ll n, n_h$, így $dn/dt = dn_h/dt$. A töltésemlegesség miatt $n_c + n = n_h$, de mivel feltettük, hogy $n_c \ll n, n_h$, írhatjuk, hogy $n = n_h$. Ezeket a feltételezéseket az egyenletrendszerre alkalmazva az átalakítások elvégzése után a következő egyenletet kapjuk:

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = \frac{ns \exp(-E/kT)}{1 + (N-n)A/nA_r} \quad (6.2)$$

Ha a rekombináció és a csapdába visszafogódás valószínűsége megegyezik, vagyis $A = A_r$, akkor a 6.2 egyenlet másodrendű kinetikájú folyamatot ír le:

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = \frac{n^2}{N} s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (6.3)$$

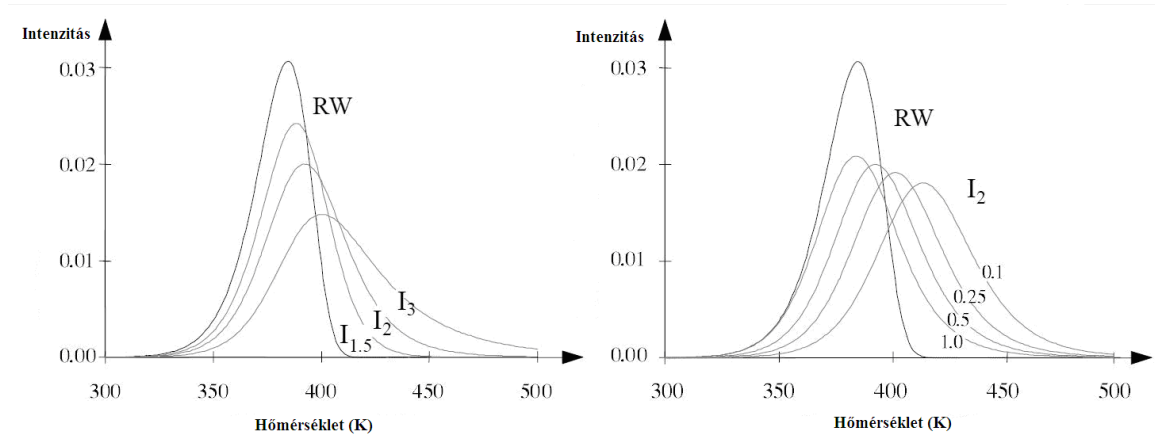
Ha azonban a visszafogódás esélye elhanyagolható, azaz $A = 0$, mert például erős a térbeli korreláció a csapdahelyek és a lumineszcencia centrumok között, a 6.2 egyenlet elsőrendű folyamat egyenletére vezet:

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = ns \exp(-E/kT) \quad (6.4)$$

A 6.3 és 6.4 egyenletekben n kitevője (vagyis 2 illetve 1) adja meg a folyamat kinetikájának rendjét. A 6.2 egyenletnek általában nincs kitüntetett rendje, a TL intenzitás n -függése a négyzetesnél gyengébb, a lineárisnál erősebb. Mégis hasznos bevezetni egy i effektív vagy általános kinetikai rend értéket, amelynek értéke folytonosan változhat 1 és 2 között:

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = n^i s \exp(-E/kT) \quad (6.5)$$

A 6.5 egyenlet $i = 2$ és $i = 1$ helyettesítéssel visszaadja a másodrendű és elsőrendű kinetikát. I_{TL} -t a hőmérséklet függvényében ábrázolva az 5. ábrán látható tipikus görbéket kapjuk.



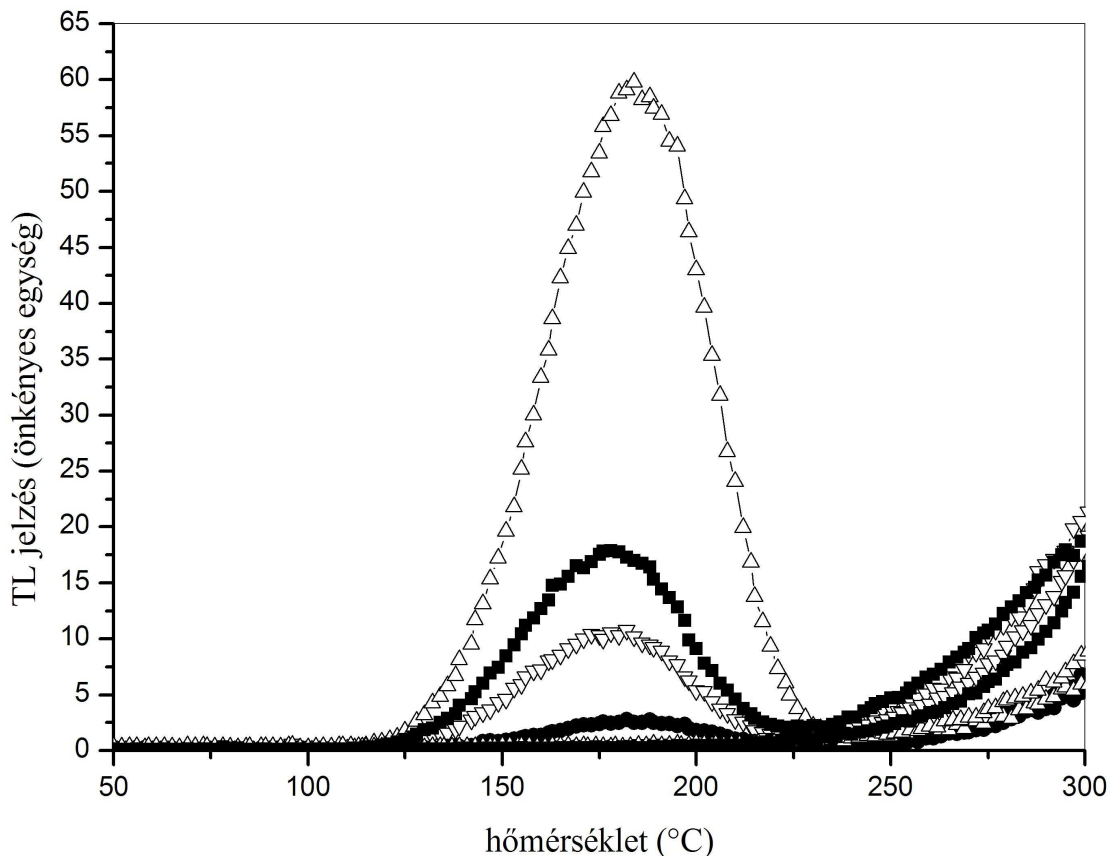
5. ábra: Termolumineszcens kifűtési görbék: RW – Randall-Wilkins elsőrendű kinetika, I_1 (1:1.5 és 3.0) – általános rendű kinetika és I_2 : Garlick-Gibson másodrendű kinetika ($n_0/N=0.25$ a bal oldali diagramon, $n_0/N=0.1, 0.5, 0.25$ és 1.0 a jobb oldali diagramon)

A valóságos anyagokban természetesen ennél összetettebbek a viszonyok. Általában többfajta csapdába is befogódhatnak a töltéshordozók és gyakran több féle rekombinációs centrum is jelen van az anyagban. Utóbbiak között lehetnek természetesen olyanok is, ahol a rekombináció során sugárzásmentes folyamatok viszik el a többlet energiát. Egymással versengő folyamatok zajlanak. A differenciálegyenlet-rendszer még a legegyszerűbb esetben is csak egyszerűsítő feltevések mellett oldható meg. Ezért érthető, hogy ma sem létezik olyan modell, ami megfelelően leírná a valódi anyagok összes TL tulajdonságát [48, 49].

A kifűtési görbe elemzése során láthatjuk, hogy egyes anyagoknál alacsony hőmérsékletű ($70\text{ °C} - 150\text{ °C}$) csúcsok is megjelennek, ha a mérést közvetlenül a besugárzás után végezzük el. Ha a besugárzás és a TL mérés között több óra, esetleg egy egész nap is eltelik, azt tapasztaljuk, hogy gyakorlatilag már csak 150 °C feletti csúcsok jelentkeznek. A hőmérséklet növekedésével ugyanis először a sekély csapdák ürülnek ki, ezek azonban már szobahőmérsékleten sem hosszú élettartamúak, ezért dozimetriai szempontból nincs szerepük. A $150\text{ °C} - 180\text{ °C}$ hőmérséklet feletti csúcsok

azonban már termikusan stabilnak tekinthetők, így ezek alkalmasak dozimetriai célokra is. Miután az összes töltéshordozó kiürült a csapdákból, a fényhozam erősen csökken. (A jelenségtől merőben eltérő izzás azonban ekkor újabb fényhozam emelkedést, háttérnövekedést okoz; ezt a fénydetektor elé helyezett megfelelő optikai szűrővel és tisztított N₂ mintatérbe történő bevezetésével csekély mértékben csökkenthetjük.)

Egy termolumineszcens kiértékelés során kapott kifűtési görbét szemléltet a 6. ábra.



6. ábra: Al₂O₃:C doziméter kifűtési görbéi 0.4, 0.6, 0.8 és 1.0 mGy gamma besugárzást követően

A 6. ábrán bemutatott orosz gyártmányú Al₂O₃:C doziméterek egyik jellemző és dozimetriai használhatóságukat alátámasztó tulajdonsága, hogy az alacsony hőmérsékleti csúcs intenzitása oly gyorsan csökken, hogy a méréskor már nem növeli a háttérrel és nem látszik a kiértékeléskor. Az ábrán jól megfigyelhető az is, hogy egy csúcsot kaptunk (maximális intenzitás 180 °C környékén), de a TL doziméterek kifűtési görbéi más típusú anyagok esetén ennél sokkal komplexebbek lehetnek [50].

A termolumineszcens dózismérők egyik legfontosabb jellemzője a fading, azaz felejtés, ami azt jelenti, hogy a csapdába befogódott töltéshordozók meddig maradnak

a csapdában: ez a sajátság alapvetően két dologtól függ. Az egyik a csapdák mélysége, azaz a kikerüléshez szükséges energia nagysága. Ez természetesen anyagfüggő, hiszen a csapdák mélysége a kristályszerkezet függvénye. A másik a hőmérséklet, hiszen magasabb hőmérsékleten nagyobb a kiszabadulás valószínűsége. A sekély csapdák gyorsabban ürülnek már alacsony, akár szobahőmérsékleten is, ennek pedig jelentős fading, azaz információvesztés az eredménye.

III.3.4 Optikailag stimulált lumineszcencia (OSL)

A csapdába fogódott töltéshordozók kiürítésének egyik módja a hőmérsékleti stimuláció. Egy másik lehetőség, amikor a gerjesztést meghatározott hullámhosszúságú fényvel végezzük, ekkor beszélünk optikailag stimulált lumineszcenciáról. Az adott hullámhosszon válaszjelként kibocsátott fény keletkezésének oka ebben az esetben is a elektron-lyuk párok rekombinációja, amit az előzetesen elnyelt ionizáló sugárzás okozta energia elnyelése hozott létre. Ebből is következik, hogy a két jelenség nagyon hasonló, a legfőbb különbséget a gerjesztés módja jelenti [51]. Az egyik legfontosabb eltérés a TL-lel szemben az, hogy az optikai stimuláció állandó hőmérsékleten történik és ez gyakran szobahőmérséklet. Következésképpen a hőmérséklettől függő változások (lumineszcencia hatásfoka vagy anyagszerkezeti változások) nem nehezítik az eredmények kiértékelését. Bizonyos esetekben azonban optikai stimuláció esetén is szükség lehet a hőmérséklet emelésére, ennek oka pedig a háttér csökkentése a mérés elején, illetve a maradék információ törlése a mérés végén (lásd SMD ellenállások OSL mérése).

Az OSL mérések kivitelezése a gyakorlatban a következő módokon történhet:

- a. folyamatos OSL (CW-OSL); a mintát állandó intenzitású monokromatikus fényvel világítják meg, eközben egyidejűleg mérik a lumineszcens emissziót. A gerjesztő és emittált fény elválasztása végett optikai szűrők alkalmazása szükséges. Az eljárás során az OSL jelet a stimuláció kezdetétől a jel háttér értékre csökkenéséig mérik, így kapják a CW-OSL bomlási görbét. A jel alatti terület integrálja pedig arányos az elnyelt dózissal [52].
- b. lineárisan modulált OSL (LM-OSL); ebben az esetben a stimuláló fény intenzitása nem állandó, hanem relatív skálán 0-tól 1-ig adott időtartam alatt lineárisan növekszik. Az emittált fény intenzitása a kezdeti időszakban viszonylag alacsony, majd a gerjesztő fény intenzitását növelve maximális

értéket ér el. A gerjesztést folytatva azonban a csapdák kiürülése miatt az intenzitás csökken, aminek eredménye egy jól definiálható OSL csúcs [53, 54].

- c. pulzált OSL (POSL); az eljárás során a gerjesztő fény nem állandó intenzitással, hanem impulzusok formájában éri a mintát, és az eddigiektől eltérően a detektálás csak az impulzusok között történik. A gerjesztő és emittált fény szeparációja ebben az esetben nem szükséges, ellenben rövid fényimpulzusok kibocsátására alkalmas impulzus üzemre képes fényforrás szükséges [55, 56].

A termolumineszcencia és optikailag stimulált lumineszcencia jelensége ugyan nagyon hasonló, azonban a gerjesztés módja miatt különbség is van a kettő között. A termikus stimuláció gyakorlatilag minden esetben azonos energiájú, így a gerjesztés mindig ugyanolyan átmeneteken megy végbe. Optikai stimuláció esetén azonban a gerjesztés más és más lehet, ennek megfelelően pedig más átmenetek is lejátszódhatnak, mint termikus stimuláció esetén. Ennek köszönhető az, hogy nem csupán több környezeti anyag esetén lehet OSL jelet detektálni, mint TL esetén, hanem előbbi esetén sokkal szélesebb (akár nagyságrendekkel nagyobb) mérésstartomány érhető el.

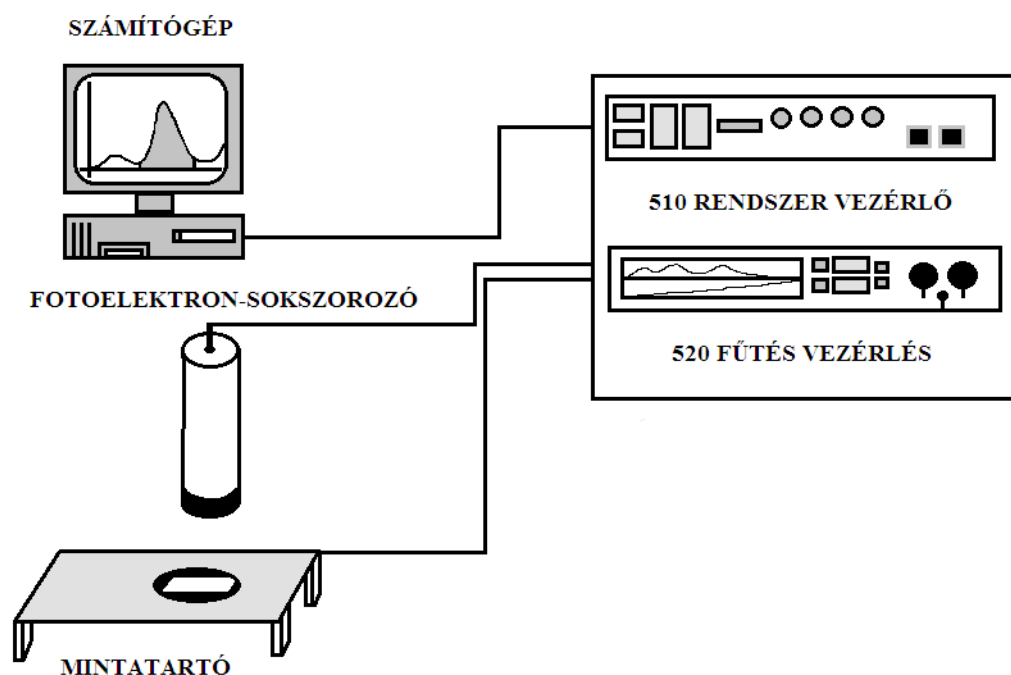
Megemlítendő továbbá az optikailag stimulált lumineszcencia egyik fontos alkalmazása, mégpedig az élelmiszer-besugárzottság ellenőrzésének lehetősége. A TL számos előnye ellenére szerves minták analizésére nem alkalmas a magas hőmérsékletre történő hevítés miatt. OSL esetén azonban ez nem szükségszerű, ahogy az élelmiszer ásványianyag-tartalmának eltávolítása sem (nem szükséges semmilyen kémiai vagy fizikai szétválasztás alkalmazása) [57].

IV. KÍSÉRLETI RÉSZ

A szakirodalmi háttér feltárását követően célszerűnek tartottam egy előzetes mérési terv kidolgozását. A mérési terv tartalmazta az összes – a retrospektív dozimetria témakörében elvégzendő – olyan kísérletet, amelynek célja a környezeti anyagok valamint az elektronikai alkatrészek alkalmasságának vizsgálata. A mérési terv a kapott eredményeket értékelve és felhasználva kiegészült több olyan mérési sorozattal, amelyek a kidolgozott eljárás hatékonyságának növelését célozták meg. A következő fejezet a vizsgálati módszerek leírását illetve a kísérletek és a vizsgált anyagok bemutatását tartalmazza.

IV.1 Termolumineszcencia

A termolumineszcens vizsgálatokat Daybreak TLD 501-es készülék segítségével hajtottam végre. A mérési elrendezést és a rendszer felépítését az 7. ábra mutatja.



7. ábra: A mérési elrendezés vázlata

A készülék három fő egységből áll. Az első egység a mintatartó, ami mintát melegítő tábla is egyben. Ehhez az egységhez nitrogén palack is köthető, így inert atmoszféra biztosítható a rendszerben, amennyiben ez szükséges. A mérési elrendezésből is látható, hogy az eszköz nyitott kivitelű, a minták behelyezése egyenként manuálisan történik. Ez gyakorlati szempontból azt jelenti, hogy minden egyes kifűtés után a minta szobahőmérsékletre történő visszahűlését követően helyezhető be a következő minta.

Az egységhez tartozik továbbá egy fotoelektron-sokszorozó, amelynek belépő ablaka kvarcüveg. Ennek, valamint a nagyfelületű fotokatódnak, a nagy dinódaerősítésnek, valamint a fotonszámláló kialakításának köszönhetően a berendezés rendkívül érzékeny és csekély fényhozambeli különbségek is kimutathatóak. Az új minta behelyezését követően a fotoelektron-sokszorozót a minta körül kialakított illesztésbe helyezzük, így biztosítható a fény kizárása. A második egység tartalmazza a DAYBREAK rendszer elektronikai elemeit. Az 510-es egység a SYSTEM CONTROL, itt kapcsolható be és ki a berendezés, állítható be a vákuum (nitrogén atmoszféra esetén) valamint a nagyfeszültség. Az 520-as egység a TL OVEN CONTROL, ami a minta termikus stimulációját szabályozza. Itt tudjuk beállítani a véghőmérsékletet illetve a felfűtési sebességet. A két DAYBREAK egységet egy PIC-en alapuló készülék soros porton keresztül kapcsolja egy személyi számítógéphez. Ezek képezik a számítógépen futó adatgyűjtő és mérésvezérlő szoftverrel a harmadik egységet.

A termolumineszcens mérőrendszerek kétféle elven működhetnek. Az egyik az úgynevezett töltésintegráló üzemmód. Ilyenkor a fotoelektron-sokszorozó kimenetén megjelenő áramot egy időállandóval integráljuk (kisimítjuk) és érzékeny árammérővel mérjük. A hátrányt ebben az esetben az jelenti, hogy a fotoelektron-sokszorozó kimenetén beeső fény hiányában is kialakul áram (sötétáram) és ez korlátozza a legkisebb mérhető fény nagyságát. A fotonszámláló üzemmód során – ilyen a DAYBREAK készülék – viszont minden egyes beérkező foton megszámlálásra kerül. Ez a módszer a kimeneten megjelenő impulzusok amplitúdójának megkülönböztetésével lehetővé teszi a nem a fotokatódról kiinduló jelek megkülönböztetését és így kizárását a számlálásából. Fotonszámláló üzemmód esetén tehát az érzékenység nagyobb az előzőekben ismertetett integrális módszerhez képest.

A rendszert üzemeltető és kontrolláló szoftvert Intézetünkben fejlesztették ki. A program a felfűtési sebesség beállításán kívül minden más paraméter elektronikus állítását lehetővé teszi, így a mérések kivitelezése jelentősen gyorsítható. A beállítások elvégzése (véghőmérséklet, név, mentési hely stb.) után a mérések indítása majd pedig a háttér mérés indítása is a program segítségével történik. A mérések elvégzését követően minden esetben sor került a háttér mérésre is. Ez termolumineszcens anyagok esetén úgy történik, hogy a kifűtési görbe felvétele után az anyag szobahőmérsékletre történő visszahűlését követően a mérést újraindítottam és felvettem a háttér görbét. A kifűtési görbéket minden esetben korrigáljuk a háttér értékkel. A görbék kiértékelése során a jel

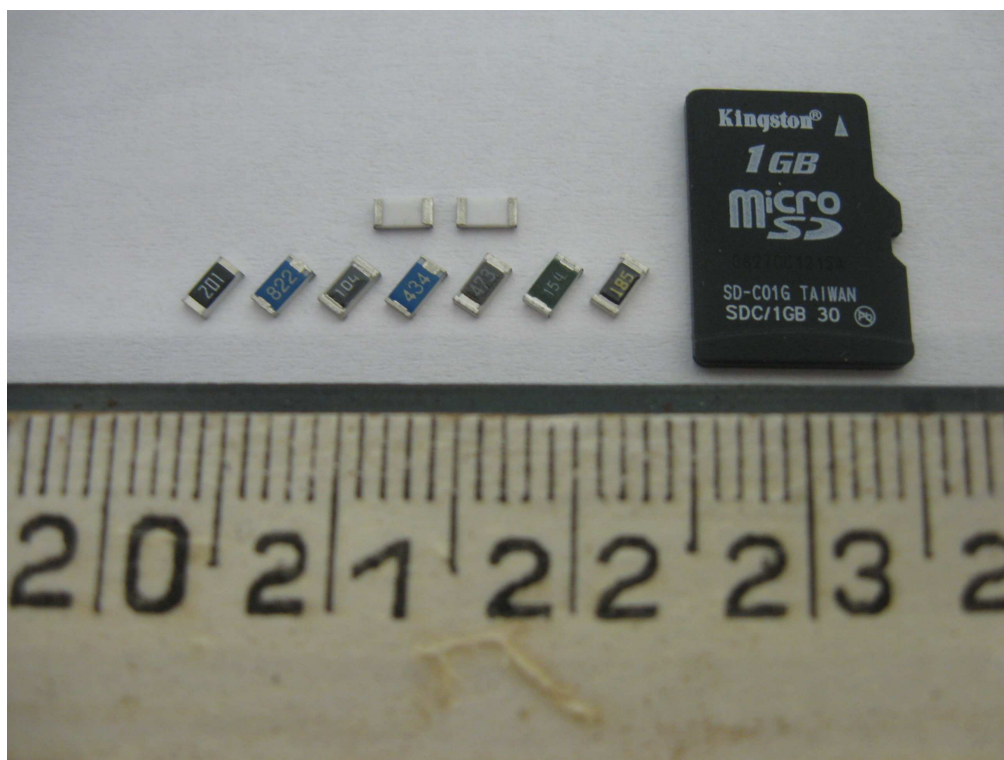
alatti területet a szoftver a csúcsok kezdő és végpontjának manuális beállítását követően megadja.

IV.1.1 Mintaelőkészítés

A vizsgált minták kereskedelmi forgalomban kapható elektronikai alkatrészek valamint környezetben található anyagok voltak. Ilyen környezetünkben fellelhető anyagok a konyhasó (NaCl), kalcit vagy akár a dolomit [58]. Utóbbi kettő a kalcitcsoport két képviselője, amelyek képlete: CaCO_3 (kalcit) és $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit). Ezek az anyagok mutatnak lumineszcencia jelenségeket, azonban retrospektív dozimetriai célú felhasználási lehetőségük még nem vizsgált terület [59, 60]. Az anyagok utólagos dozimetriai vizsgálata során semmilyen fizikai és/vagy kémiai előkészítő eljárást nem alkalmaztam. Az összehasonlíthatóság érdekében minden esetben ismert és kontrollált tömegű mintát (0.5 g) mértem a mintatartókba. A környezeti minták TL vizsgálata esetén a maximális hőmérsékletet előzetes vizsgálatok után $400\text{ }^\circ\text{C}$ -on rögzítettem és $4\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{sec}^{-1}$ felfűtési sebességet alkalmaztam.

A másik nagy csoport az elektronikai eszközökben található alkatrészek. Ilyen alkatrészek találhatóak többek között az asztali és hordozható számítógépekben, MP3 és MP4 lejátszó készülékekben, és ami gyakorlati szempontból a legfontosabb, a mobiltelefonokban. A mobiltelefonok jelentős szerephez juthatnak retrospektív dozimetriai felhasználhatóság tekintetében, hiszen amellett, hogy szinte minden személynél található és az emberi testhez közel helyezkedik el. Ennek megfelelően az általa vagy bármely része által szolgáltatott információ az áldozatot ért dóziszról és nem a környezeti dózisviszonyokról ad felvilágosítást.

Ezek az úgynevezett SMD (surface-mount devices) felületszerelt alkatrészek anyaga kerámia, két végükön elektromos érintkező felülettel és egyik oldalukon fedő festékréteggel. A festékrétegen minden esetben egy jelzés található, ami megadja az adott alkatrész legfőbb elektronikai tulajdonságát, például SMD ellenállások esetén az ellenállás értékét Ω -ban kifejezve. Fontos megjegyeznünk, hogy a felületen feltüntetett ellenállás értéke az alkatrészek azonosítására szolgál, a vizsgálatokra és az elért eredményekre nincs befolyással. Az ilyen típusú alkatrészek közös tulajdonsága, hogy legfőbb összetevőjük (90-95 %) Al_2O_3 kerámia. A fennmaradó néhány százalék valamilyen szennyező, aminek a későbbiekben gyakorlati jelentősége lehet. Az SMD alkatrészek a 8. ábrán láthatóak.



8. ábra: SMD alkatrészek különböző típusai

A termolumineszcencia tárgyalásakor részletesen kitértem a TL doziméterek tulajdonságaira, és említésre került a TL anyagok érzékenysége is. Az érzékenység a termolumineszcens doziméterek esetén az egységnyi elnyelt energia (elnyelt dózis) esetén kapott TL jelzést jelenti. Mivel ez az érzékenység az előbbieket értelmében nem csak az adott anyag, hanem a berendezés tulajdonságaitól (felfűtési sebesség, optikai szűrő(k), kiértékelési módszer stb.) is függ, így ennek abszolút megadása nehéz. A TL anyagok esetén ezért definiálásra került a relatív érzékenység, ami az adott anyag érzékenységének és a TLD-100 (LiF:Mg,Ti) érzékenységének hányadosa. Értelemszerűen a TLD-100 érzékenysége tehát 1, ehhez viszonyítva például a $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ érzékenysége pedig 10 [61].

A III.3.3 fejezetben került szintén említésre, hogy az Al_2O_3 ismert TL anyag, hiszen ez képezi többek között az orosz gyártmányú $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ doziméterek alapanyagát, ami kiemelkedő érzékenysége miatt vált széleskörűen alkalmazottá. Az $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ egykristály doziméterek érzékenysége 40-60 a referenciaanyagként tekintett TLD-100 (LiF:Mg,Ti) kereskedelmi forgalomban kapható, széleskörűen használt doziméterekhez képest [62]. Ezek alapján pedig arra a következtetésre jutottam, hogy az ilyen alkatrészek termolumineszcens válasza számunkra kedvező és informatív lehet. Az

Al_2O_3 doziméterek emellett baleseti és reaktor (technológiai) dozimetriában is használhatóak megfelelő szennyezők bevitele esetén, mint például a Mg vagy Y [63].

Kilenc, kereskedelmi forgalomban kapható elektronikai eszközökben található SMD ellenálláson végeztem el kísérleteket, hogy széles spektrumú, átfogó eredményeket kapjak. Az alkatrészek gyári adatlapja a Függelék részét képezi. A vizsgálatok tárgyát képező ellenállásokat az 5. táblázat tartalmazza. A vizsgált SMD alkatrészek eredményeinek tárgyalásakor a sorszámukkal jelöltem őket hangsúlyozva, hogy az ellenállások értékei kizárólag azonosítási célt szolgálnak.

5. Táblázat: A vizsgált SMD alkatrészek típusai

Sorszám	Típus
1.	200 Ω
2.	8200 Ω
3.	47 k Ω
4.	100 k Ω
5.	150 k Ω
6.	430 k Ω
7.	560 k Ω
8.	820 k Ω
9.	1,8 M Ω

A retrospektív dozimetriai célra felhasználni kívánt elektronikai alkatrészek mintaelőkészítése esetén mindvégig arra törekedtem, hogy a körülmények a lehető legjobban hasonlítsanak a valós, későbbi mérési körülményekre. Ennek megfelelően semmilyen kémiai és más (pl. fizikai) kezelést nem alkalmaztam. A gyakorlati alkalmazást nehezítő tényező (az ellenállások mobiltelefonból történő kiserelése során), hogy az alkatrészt nem tehetjük ki közvetlen vagy közvetett hőhatásnak, hiszen akkor az információ egy része (vagy akár az egésze) törlődhet. A mintákat fényzáró mintatartóba téve tároltam és szállítottam, azonban a műveletek során – szintén gyakorlati okokból, az egyszerűbb felhasználhatóságot szem előtt tartva – nem zártam el sem fény sem egyéb hatástól. Amennyiben az alkatrészekből ilyen körülmények között is kinyerhető az információ, úgy nem szükséges az ilyen jellegű óvatosság,

illetve nem nehezíti meg a mintaelőkészítést. Minden egyes minta egy elő hőkezelésen esett át, amit 30 percig 300 °C-on történő hevítéssel végeztem. Ez azért szükséges, hogy az alkatrészek egymáshoz képest összehasonlíthatóak legyenek. A mintákat az Al₂O₃ - ra vonatkozó irodalmi adatok és előzetes méréseim alapján 300 °C véghőmérsékletig hevítettem 4 °C · sec⁻¹ felfűtési sebesség mellett.

IV.1.2 Az elvégzett kísérletek

A kísérletek megtervezése és kivitelezése előtt fel kellett állítanom egy kritérium-rendszert, ami alapján a mérések elvégezhetőek és értékelhetőek. A kritérium minden esetben az volt, hogy a valóságot mindinkább reálisan szimuláló környezeti feltételek mellett végezzem el a kísérleteket. Ennek megfelelően az SMD minták besugárzását egy ⁹⁰Sr - es forrást tartalmazó STUDSVIK 6527 B referencia besugárzó berendezéssel végeztem el. A környezeti minták nagyobb dózisú besugárzását az Izotóp Intézet Kft. SLL-01 típusú ⁶⁰Co forrást tartalmazó gamma besugárzójában végeztük el. A referencia besugárzást azonnali kiértékelés követte, a kiértékelések után pedig minden esetben háttérmérés következett. A háttér-érték mérési görbéből történő levonása lehetővé tette a kiértékelést igen kis dózisok esetén relatíve nagy bizonyossággal.

Vizsgáltam mind a környezeti anyagok, mind pedig az SMD ellenállások esetén a minták érzékenységét, a dózistartományt, valamint a fadinget. A fading (vagy felejtés) nem más, mint a lumineszcens jel csökkenése, amely két okból adódhat: az egyik a hőmérsékleti felejtés (amikor a csapdába fogódott töltéshordozók már szobahőmérsékleten is elég energiához jutnak ahhoz, hogy kiszabadulhassanak), a másik pedig a nem hőmérsékleti felejtés (alacsony hőmérsékleten tárolt anyag esetén is megjelenik).

A kísérletek végrehajtását követően pedig kiszámítottam és megadtam a reprodukálhatóságot.

IV.1.2.1 Reprodukálhatóság

Az egyik legfontosabb kritérium bármilyen típusú mérésről is legyen szó, hogy az adott mérés illetve kiértékelés reprodukálható, megismételhető legyen. Ehhez kellően nagyszámú mérést kell ugyanolyan paraméterek mellett elvégezni, így a szórás, a mérés hibája és ismételhetősége számítható.

Az egymástól független mérési eredmények definíciószerűen:

$$y = x_1; x_2; x_3 \dots x_i \tag{7}$$

ahol: $x_1; x_2; x_3 \dots x$ mérési eredmények, y pedig a mérési eredmények halmaza, amelyben összesen N darab eredmény található. A várható érték (közéérték) közelítését a (8) egyenlet mutatja:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (8)$$

ahol: N a mérési eredmények száma, \bar{x} pedig a várható érték. A szórás (standard deviáció) a következő kifejezéssel adható meg:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (9)$$

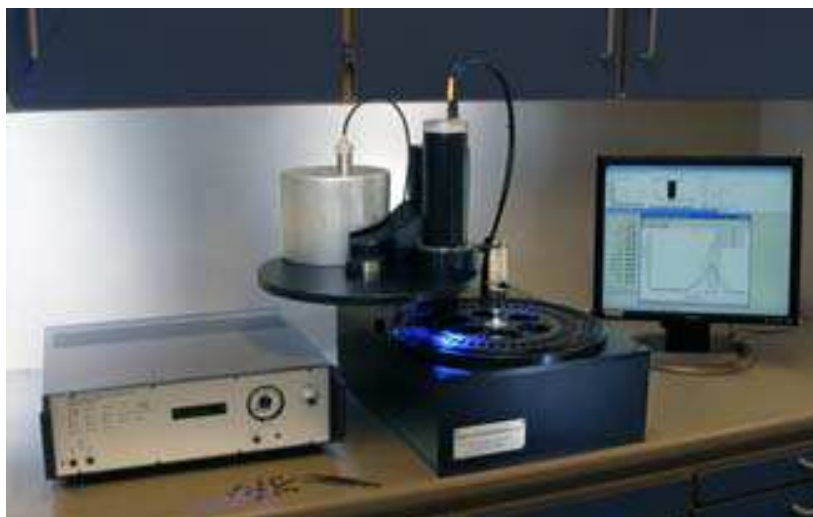
ahol: $s(x_i)$ a szórás mértéke. Megadása gyakran nem ebben a formában történik, sokkal elterjedtebb a relatív standard deviáció feltüntetése. Ennek kiszámítása a (10) egyenlet segítségével történik, miszerint:

$$u = \frac{s(x_i)}{\bar{x}} \cdot 100(\%), \quad (10)$$

ahol: u a relatív szórás %-ban kifejezett értéke. A gyakorlatban ennek a százalékban kifejezett értéknek a megadása által becsülhető a mérések megbízhatósága illetve bizonytalansága [64, 65].

IV.2 Optikailag stimulált lumineszcencia

Az optikailag stimulált lumineszcencia vizsgálatok végrehajtásában Thamóné Dr. Bozsó Edit volt a segítségemre a Magyar Állami Földtani Intézetben. Az OSL berendezés a MÁFI laboratóriumában található, a méréseket itt végeztük el. A használt berendezés egy Risø TL/OSL-DA-20 készülék, amit egy, a készülékhez csatlakoztatott számítógépen futtatott szoftver irányít. A berendezés a 9. ábrán látható.



9. ábra: Risø TL/OSL-DA-20 berendezés

A berendezés 4 főbb egységből áll, ezek a következők:

- fény detektálása (fotoelektron-sokszorozó): EMI 9235 QA típusú bialkali fotomultiplier, maximális detektálási határfok 300 nm és 400 nm között, a gerjesztő fény beszóródása ellen három különböző szűrő alkalmazható;
- fűtőegység (a minták hőmérsékleti stimulációjához TL esetén): a minta felfűtését és mérési pozícióba emelését végzi, $0.1 \text{ K} \cdot \text{sec}^{-1}$ és $10 \text{ K} \cdot \text{sec}^{-1}$ felfűtési sebességet lehetővé téve egészen $700 \text{ }^\circ\text{C}$ maximális hőmérsékletig;
- optikai gerjesztő (stimuláló) egység: összesen 49 darab LED fényforrás található a készülékben, ebből 21 IR LED (870 nm-es emisszióval), 28 darab pedig kék LED (470 nm-es emisszióval és 20 nm-es félértékszélességgel);
- besugárzás: a Risø TL/OSL-DA-20 készülék rendelkezik egy beépített $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ béta-sugárzó forrással, aminek aktivitása $1,48 \text{ GBq}$.

A berendezés alapkiépítésben képes CW-OSL (lásd *III.3.4 a*) és LM-OSL (lásd *III.3.4 b*) mérések elvégzésére, egy külön a berendezés tartozékát képező eszköz segítségével pedig POSL (lásd *III.3.4 c*) mérések elvégzése is lehetővé válik.

IV.2.1 Mintaelőkészítés

A környezeti anyagok és az SMD alkatrészek mintaelőkészítése során azokat szilikon ragasztóanyaggal a berendezés mintabeviteli egységének mintatartójába illeszthető tálkához rögzítjük. A környezeti anyagok esetén mindig azonos tömegű minta tálkára helyezése szükséges az eredmények összevethetőségének biztosítása végett. A minták további előkészítést nem igényelnek. A berendezés beállítása után a mérések előre meghatározott programok alapján kerülnek végrehajtásra.

IV.2.2 Az elvégzett kísérletek

Az optikailag stimulált lumineszcenciás vizsgálatok elvégzése során a legfontosabb az optimális mérési paraméterek megadása. Olyan anyagok OSL mérésekor, amelyek esetén nincsenek konkrét mérési tapasztalatok a mérési körülményeket illetően, a mérendő minta előre meghatározott teszt dózis után különböző előfűtési hőmérsékletek mellett kerül kiértékelésre. A kiértékeléskor az előfűtési hőmérséklettől függően a teszt dózistól elérő dózisokat kapunk. A további mérések esetén pedig azt az előfűtési hőmérsékletet kell alkalmazni, amely esetén a teszt és mért dózis közötti eltérés a legkisebb. Ezen az előfűtési hőmérsékleten biztosítható a mérések reprodukálhatósága.

Az ideális előfűtési hőmérséklet megadását követően lehetőség nyílt egy SMD ellenállás 0 – 98 Gy dózistartományban történő OSL kiértékelésére.

V. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

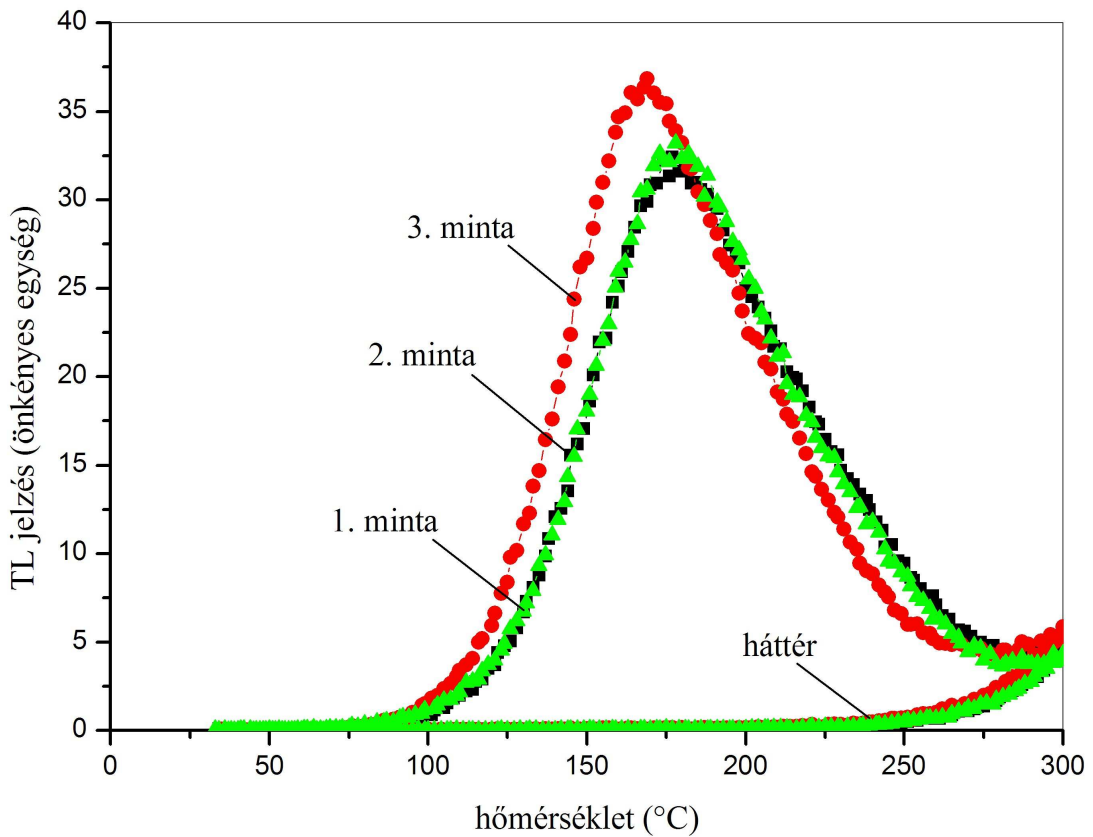
V.1 Környezeti anyagok TL vizsgálata

Az *V.1* fejezetben a környezeti anyagok érzékenységének vizsgálatakor kapott eredményeket ismertetem. A környezeti anyagok vizsgálatát konyhasó, dolomit és mészkő mintákon végeztem, így a következőkben ezen eredmények tárgyalása következik.

V.1.1. Érzékenység

Olyan anyagok esetén, amikor az adott anyag TL tulajdonságai ismeretlenek, előzetes méréseket célszerű végrehajtani. Az előzetes mérések végrehajtásakor szintén ügyelni kell arra, hogy – sikeres tesztmérés esetén – a beállított paraméterek és körülmények egyezzenek a későbbi mérésekkel. A környezeti minták esetén irodalmi adatok alapján – érzékenységüket figyelembe véve – nagyobb dózisú besugárzást tartottam célszerűnek, ennek megfelelően 5 Gy dózis (körülbelül az ember félhalálos dózisa) után vizsgáltam az anyagok TL jelzését.

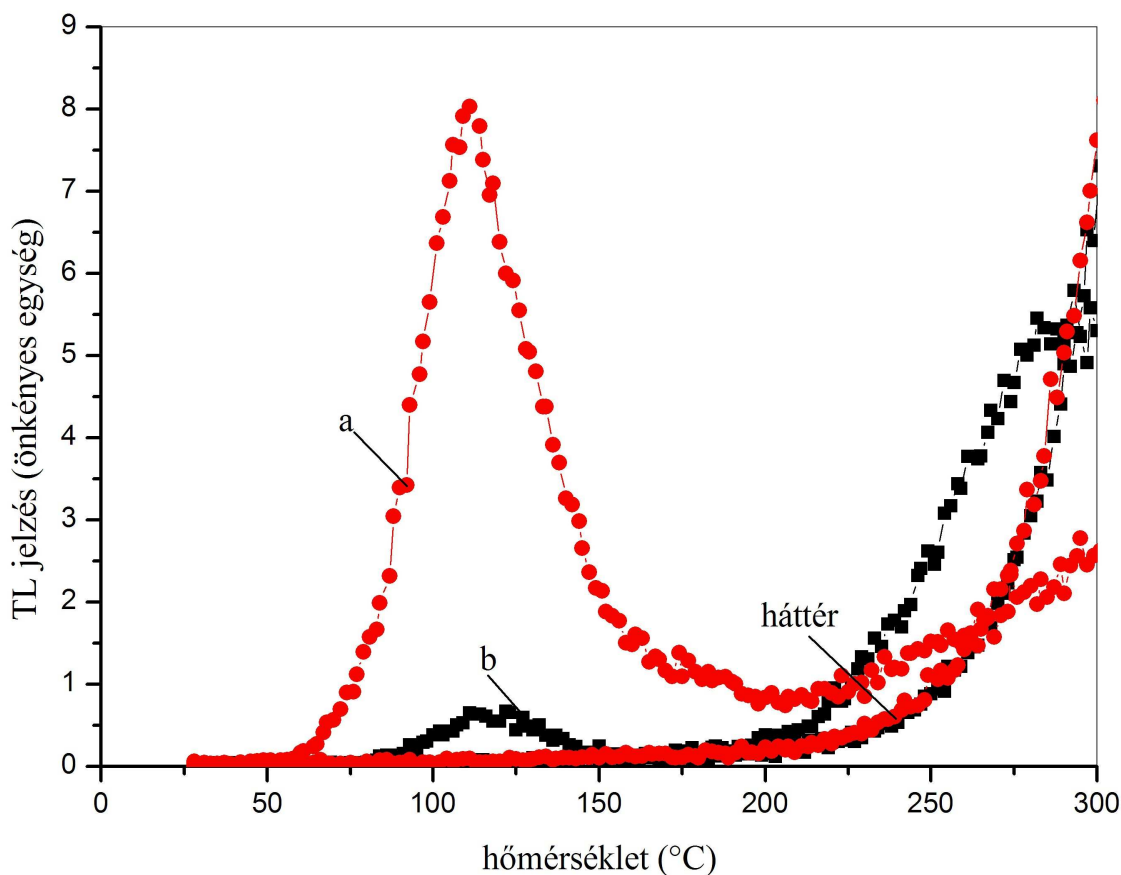
A konyhasó por minta esetén ugyanabból az anyagból vett három (1., 2. és 3. minta sorszámmal) azonos tömegű mintát (0.5 g) mértem be és az 5 Gy dózisú besugárzás után végeztem el a TL kiértékelést. Az eredmény a 10. ábrán látható.



10. ábra: NaCl kifűtési görbéi 5 Gy dózis és három azonos tömegű minta esetén

A diagramon látható, hogy a közönséges konyhasó értékelhető TL jelzést adott 5 Gy dózis esetén. A kifűtési görbe ezen hőmérséklet tartományban egy csúcsot adott, ami igen nagy érzékenységgel párosult. A csúcs 180 °C körül jelentkezik, ami kedvező, hiszen minél magasabb hőmérsékletű a csúcs, annál kisebb fading-gel kell számolnunk. A három külön-külön bemért NaCl minta azonos körülmények közti kiértékelése azt mutatta, hogy a köztük lévő eltérés kevesebb, mint 5 % (SD %). Megállapítható, hogy a NaCl besugárzás utáni TL jelzése megfelelően nagy, és az anyagot további vizsgálatoknak célszerű alávetni. A konyhasó esetén érdemesnek tartottam a fading tulajdonságait megvizsgálni.

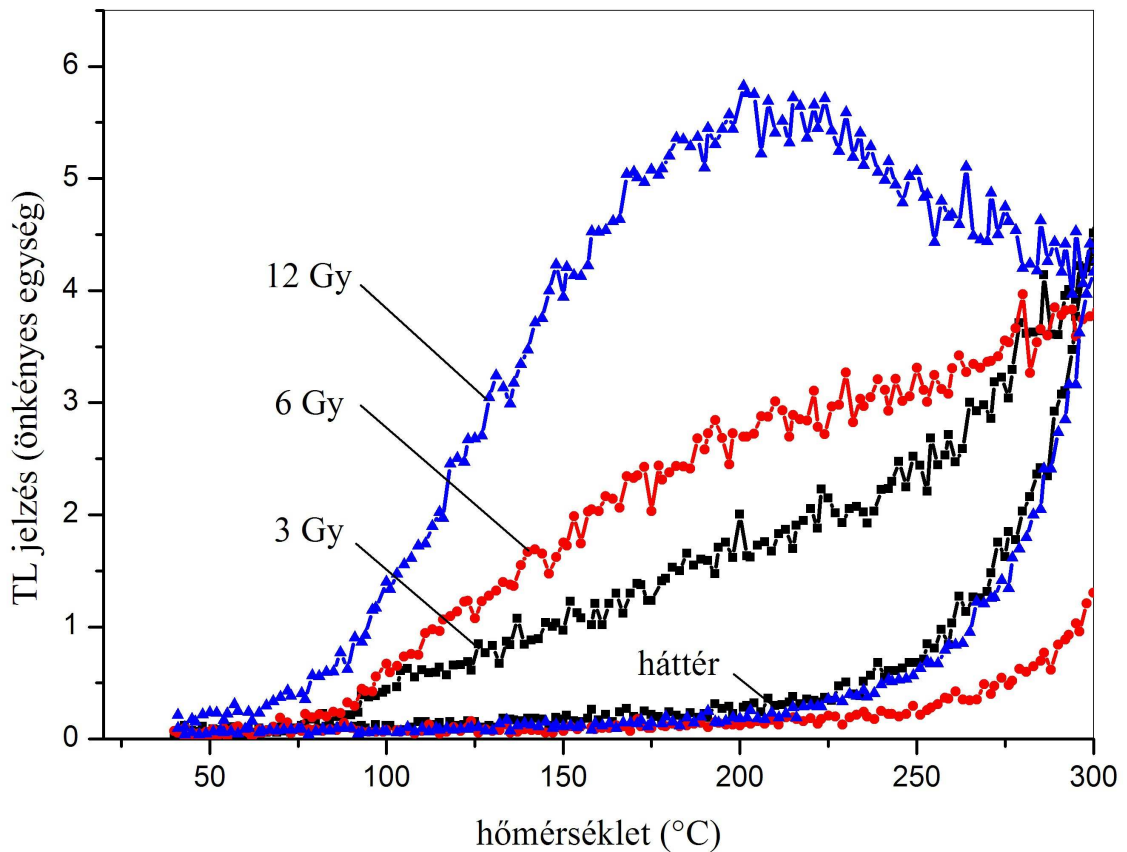
Ennek meghatározása céljából 90 mGy besugárzású dózist követően mértem a TL intenzitást azonnal és 24 óra elteltével. Az eredmény a 11. ábrán látható.



11. ábra: NaCl TL kifűtési görbéje 90 mGy besugárzást követően (a) besugárzás után azonnal, (b) 24 óra elteltével kiértékelve

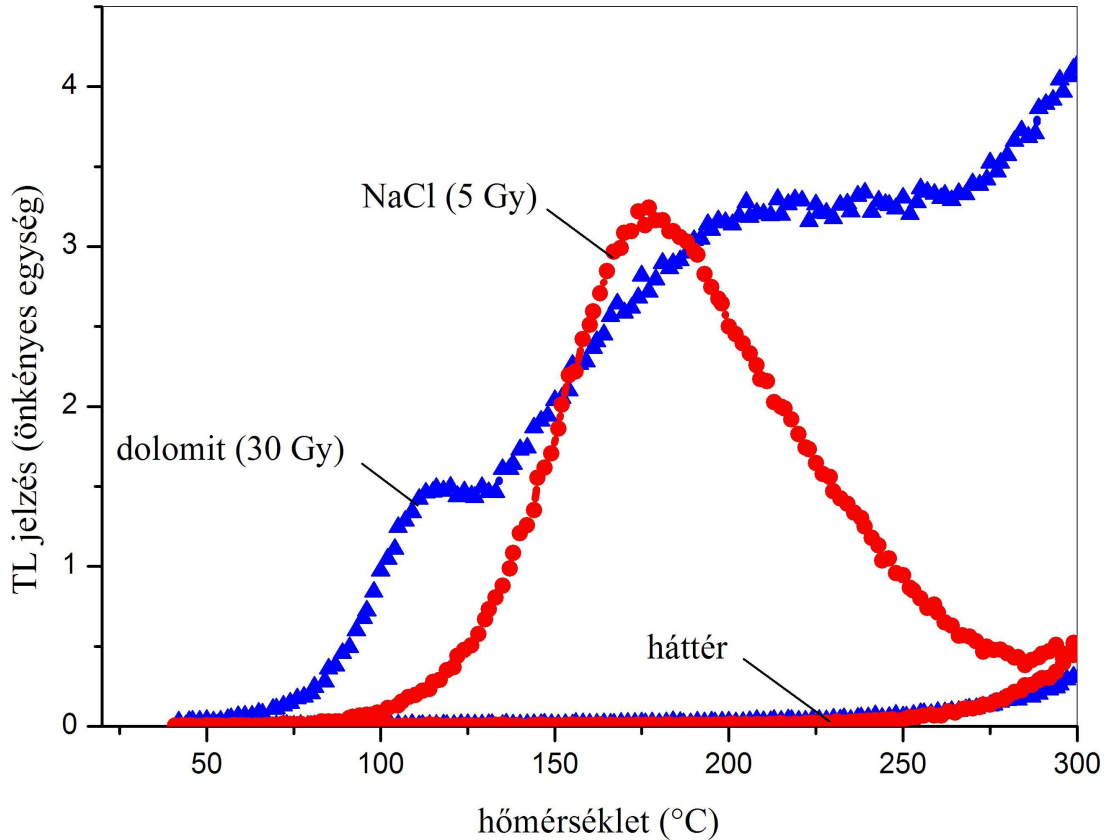
Előzetes várakozásaimnak megfelelően a konyhasó fényérzékeny [66], a mintát 24 óra időtartamra szabadon hagyva kiértékeléskor a kiindulási intenzitás alig 8 %-át mértem. Megállapítható, hogy ugyan a kifűtési görbe jellegét tekintve a konyhasó ideális anyag utólagos dózisbecslés elvégzésére, azonban ilyen jelentős fading esetén alkalmazása során a csökkenés mértékét figyelembe kell venni és korrigálni kell az értékével.

A konyhasó mellett több olyan anyag található környezetünkben, amelyet előzetes tanulmányozás után érdemesnek találtam lumineszcens vizsgálatok elvégzésére. Ennek eredményeképpen a következő kiválasztott anyag a dolomit [67,68], azaz $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Dolomit esetén nagyobb dózisu besugárzást tartottam célszerűnek – az érzékenység megállapítása végett – így az alkalmazott dózisok a következők voltak: 3 Gy, 6 Gy és 12 Gy. Az eredmény a 12. ábrán látható.



12. ábra: Dolomit por TL kifutási görbéi 3 Gy, 6 Gy és 12 Gy dózissal történő besugárzást követően

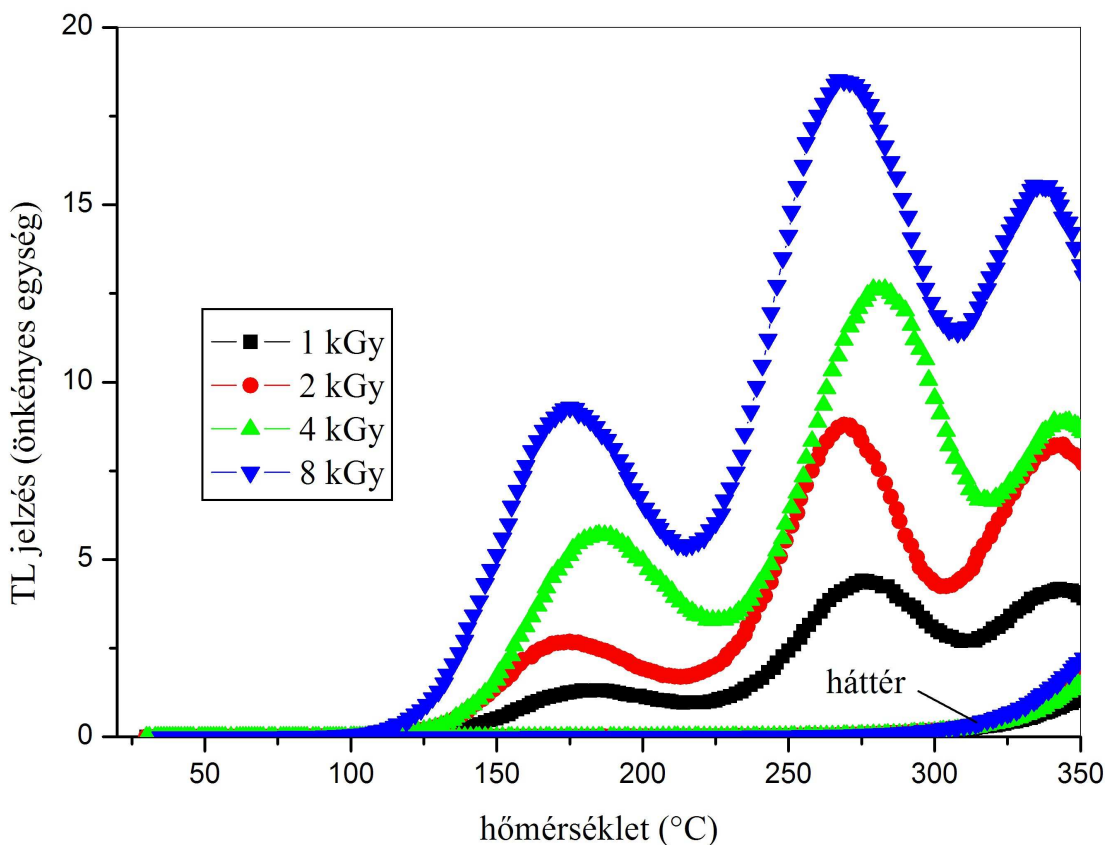
A dolomit por érzékenysége nem olyan nagy, mint konyhasó esetén, azonban nagyobb dózist alkalmazva a kifutási görbe jellege kedvezőbbé válik. A háttér értékétől ugyan már 3 Gy dózist követően is jól elkülönülő jelzést kapunk, azonban a termolumineszcens dózismérőkre jellemző görbék alakja (jól elkülöníthető csúcs vagy csúcsok) csak megfelelően magas dózisok esetén tapasztalható. Az eddig bemutatásra került két környezeti anyag érzékenységének összehasonlítása érdekében a 13. ábrán feltüntettem a két anyag kifutási görbéit egy diagramon, a dolomit mintánál 30 Gy dózist alkalmazva.



13. ábra: Dolomit por és NaCl TL kifütési görbéi 30 Gy (dolomit) és 5 Gy (NaCl) dózissal történő besugárzást követően

A két említett környezeti anyag érzékenysége nem különbözik nagyságrendekkel egymástól, ennek köszönhetően egy diagramon ábrázolható a két anyag TL kifütési görbéje. Megállapítható, hogy a NaCl érzékenyebb termolumineszcens kiértékelés esetén, mint a dolomit és kifütési görbéjének jellege is kedvezőbb a kiértékelés szempontjából.

A harmadik környezeti anyag, amelyet retrospektív dozimetriai célú felhasználásra alkalmasnak találtam, a mészkő. A mészkő legalább 90 % CaCO_3 -ot tartalmaz, de egyik összetevője például maga az előbbieken vizsgált dolomit is [69]. Négy mészkő mintát vizsgáltam 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy és 8 kGy dózissal történő besugárzást követően. Az eredmény a 14. ábrán látható.



14. ábra: Mészke minták TL kifűtési görbéi 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy és 8 kGy dózissal történő besugárzást követően

A diagram jól szemlélteti, hogy a mészke kifűtési görbéin több csúcs látható az eddigi környezeti anyagoktól eltérően. Megállapítható továbbá az is, hogy ugyan a mérést 350 °C véghőmérsékleten befejeztem, a minta továbbra is a háttértől jelentősen különböző TL intenzitást mutat, ennek megfelelően a jövőben a mészke kiértékelésekor a hőmérsékletet tovább célszerű emelni.

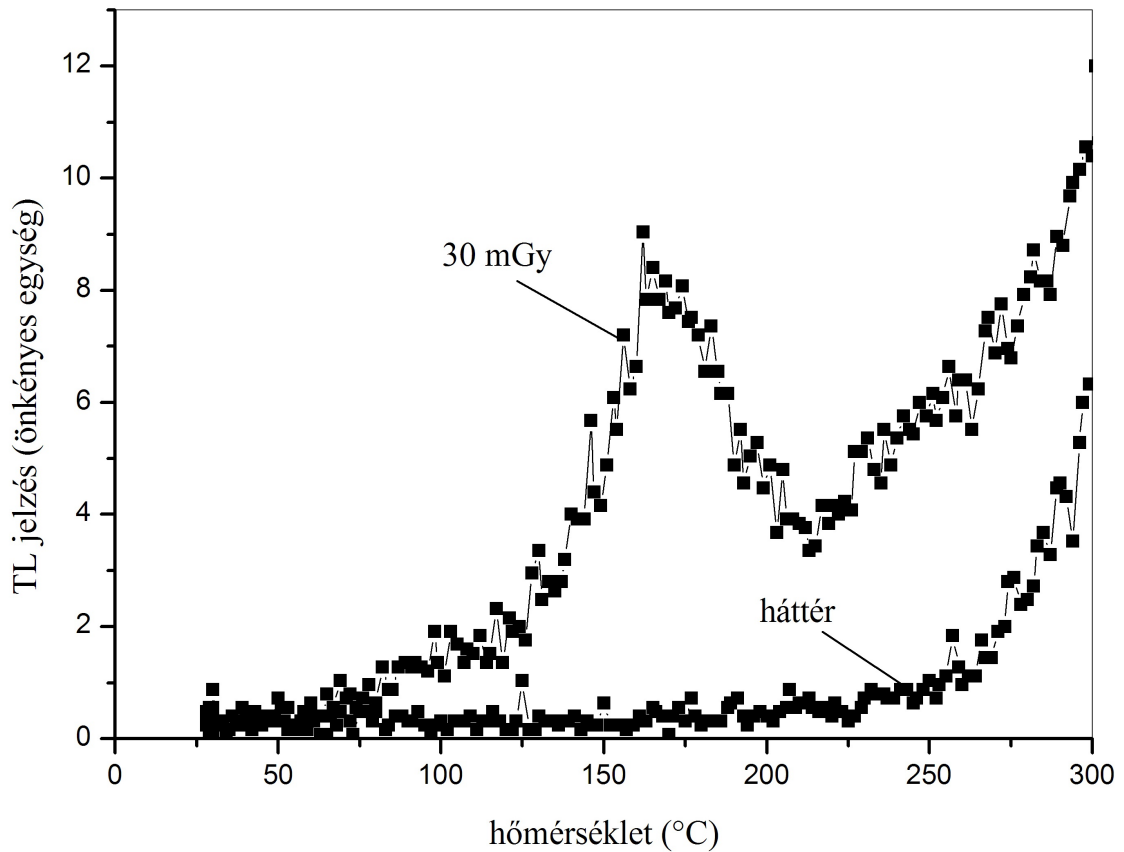
V.2 Elektronikai alkatrészek TL vizsgálata

A kísérletek második része az elektronikai alkatrészek vizsgálata volt. Az SMD alkatrészek közül előzetes méréseket végeztem annak megállapítása érdekében, hogy mely alkatrészekkel érdemes a célkitűzések tükrében részletesebben foglalkozni. Ezen eredmények alapján az SMD tranzisztorok és oszcillátorok nem bizonyultak kellőképpen érzékenyek, ezért szorítottam az SMD ellenállások vizsgálatára.

V.2.1 Érzékenység

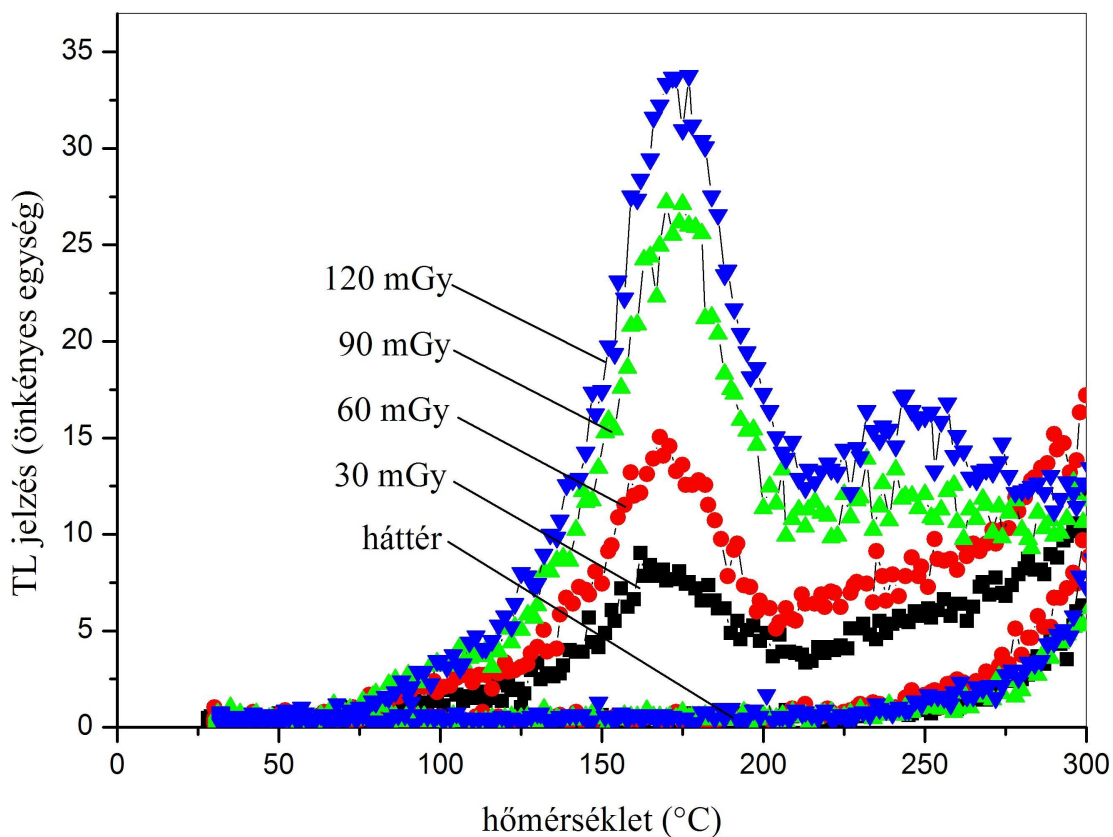
A kilenc különböző ellenállásból véletlenszerűen kettőt (a jelzésük 8. és 9.) kiválasztva próbaméréseket végeztem annak megállapítása végett, hogy besugárzást

követően értékelhető TL jelzés nyerhető-e a minták kiértékelésekor. A 9. SMD ellenállás ellenállás 30 mGy dózisú besugárzása utáni kifütési görbéje a 15. ábrán látható.



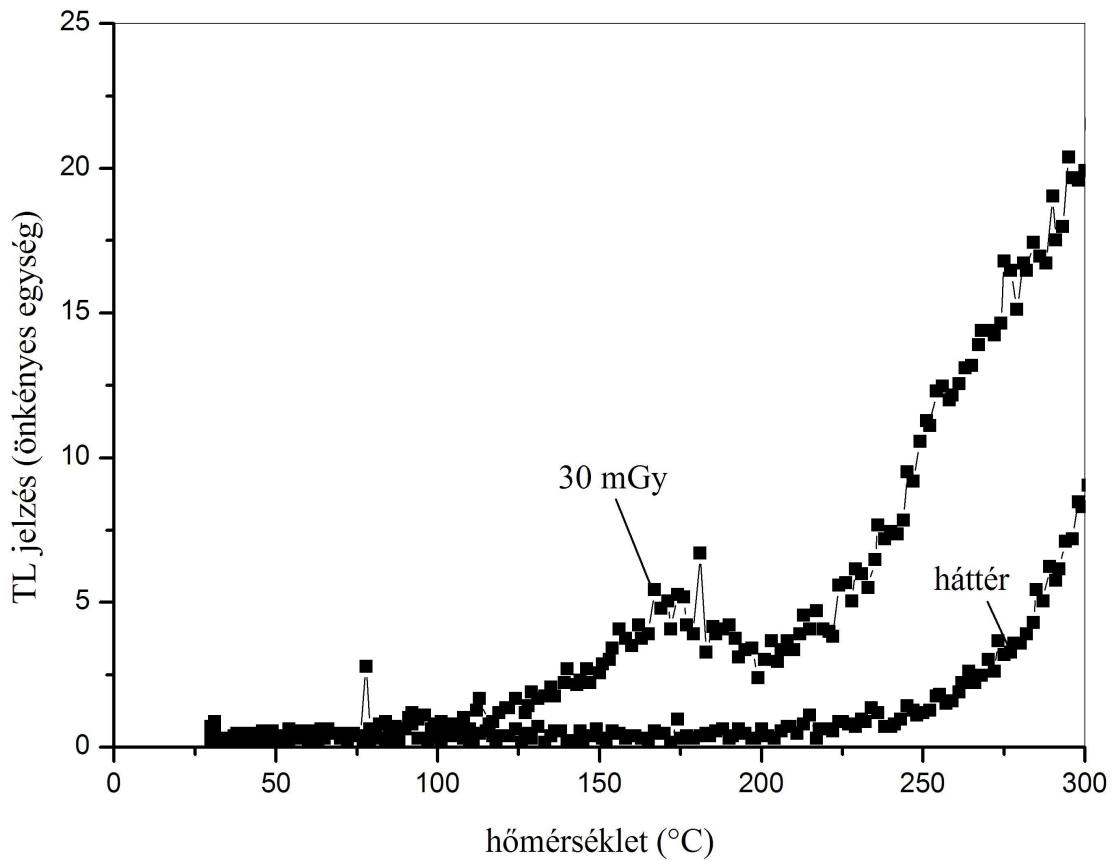
15. ábra: A 9. SMD ellenállás kifütési görbéje 30 mGy dózis esetén

A kifütési görbén nagyon jól megfigyelhető, hogy a magas Al_2O_3 tartalom miatt a görbe meglehetősen hasonlít az irodalomban széleskörűen tárgyalt és az értekezésben már eddig is említett orosz gyártmányú Al_2O_3 doziméterek kifütési görbéihez. Az érzékenység még ilyen alacsony dózis esetén is megfelelő, így a vizsgálatokat ezen ellenállások esetén tovább folytattam. A kimutatási határ ebben az esetben körülbelül 10 mGy-nek adódott, ami rendkívül kedvezőnek mondható egy alapvetően nem dozimetriai célra gyártott anyag kiértékelésekor. A kísérleteket megismételtem 30 mGy, 60 mGy, 90 mGy és 120 mGy dózisok esetén, melyeknek eredménye a 16. ábrán látható.



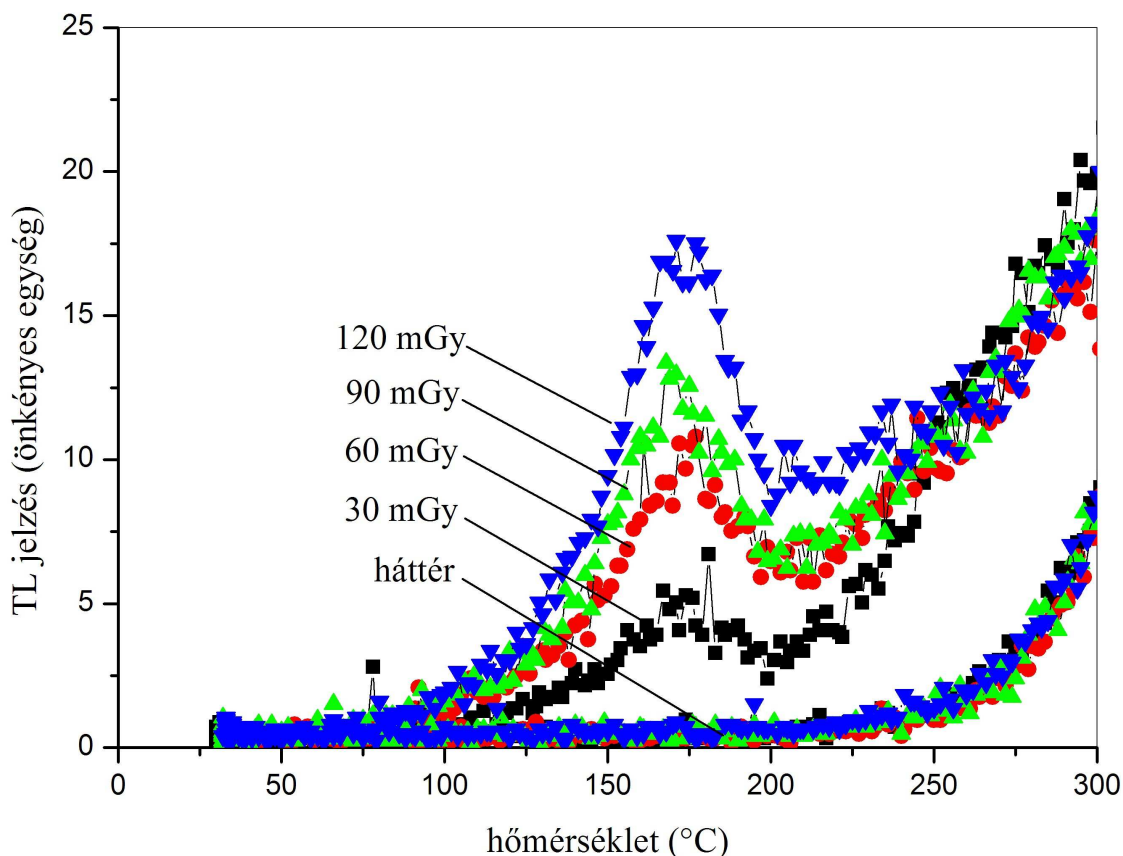
16. ábra: A 9. SMD ellenállás kifűtési görbéi 30 mGy, 60 mGy, 90 mGy és 120 mGy dózis esetén

A kifűtési görbék alapján megállapítható, hogy a növekvő dózis növekvő TL jelzéssel párosul. A csúcs alatti terület a növekvő dózissal együtt növekszik, ennek mértéke pedig a 28. ábrán látható részletesen. A második kiválasztott minta a 8. SMD ellenállás volt. A teszt dózis ebben az esetben is 30 mGy volt, az eredmény a 17. ábrán látható.



17. ábra: A 8. SMD ellenállás kifűtési görbéje 30 mGy dózis esetén

A 8. SMD ellenállás a 9. SMD ellenálláséhoz nagyon hasonló kifűtési görbét mutat, azonban azonos dózis esetén alacsonyabb csúcsterületet kaptam. Következésképpen utóbbi SMD ellenállás (8.) érzékenysége elmarad a 9. SMD ellenálláséhoz képest. A TL intenzitás alacsonyabb, mint az előző esetben, de egy jól elhatárolható, könnyedén kiértékelhető csúcsot kaptam. Ennek megfelelően itt is megismételtem a kísérletet a 30 mGy, 60 mGy, 90 mGy és 120 mGy dózis esetén: az eredmény a 18. ábrán látható.



18. ábra: A 8. SMD ellenállás kifutási görbéi 30 mGy, 60 mGy, 90 mGy és 120 mGy dózis esetén

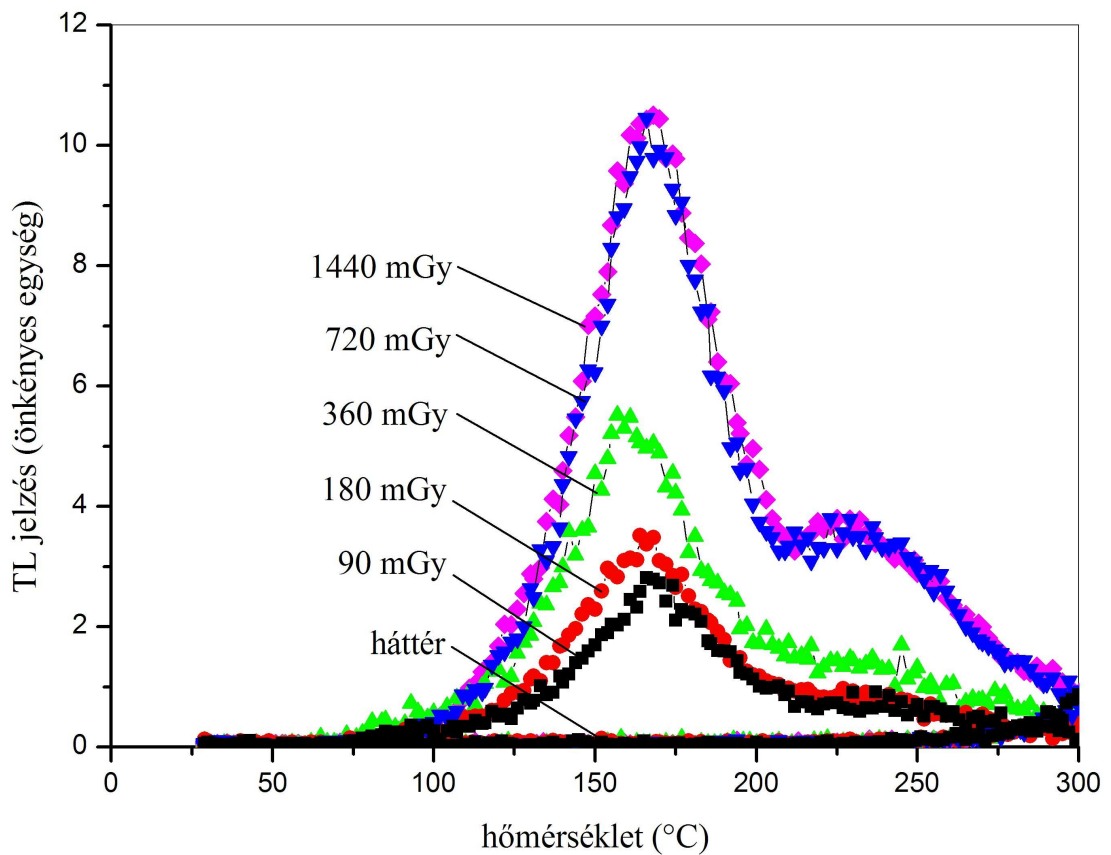
Az eredmény nagyon hasonlít az előzőekben tárgyaltakhoz, azonban kis különbségek felfedezhetőek. Ahogy 30 mGy dózis esetén, a nagyobb dózisoknál is alacsonyabb az érzékenység a 9. SMD ellenálláshoz viszonyítva. Ez a csökkenés nem számottevő, hiszen a diagramon feltüntetett háttér értéktől így is elkülöníthető, könnyen értékelhető csúcsokat kaptam.

Az érzékenység vizsgálata alátámasztotta azt a feltevést, miszerint az SMD ellenállások TL jelzése kellően nagy, megfelel a további kísérletek elvégzéséhez.

V.2.2 Dózisfüggés, linearitás

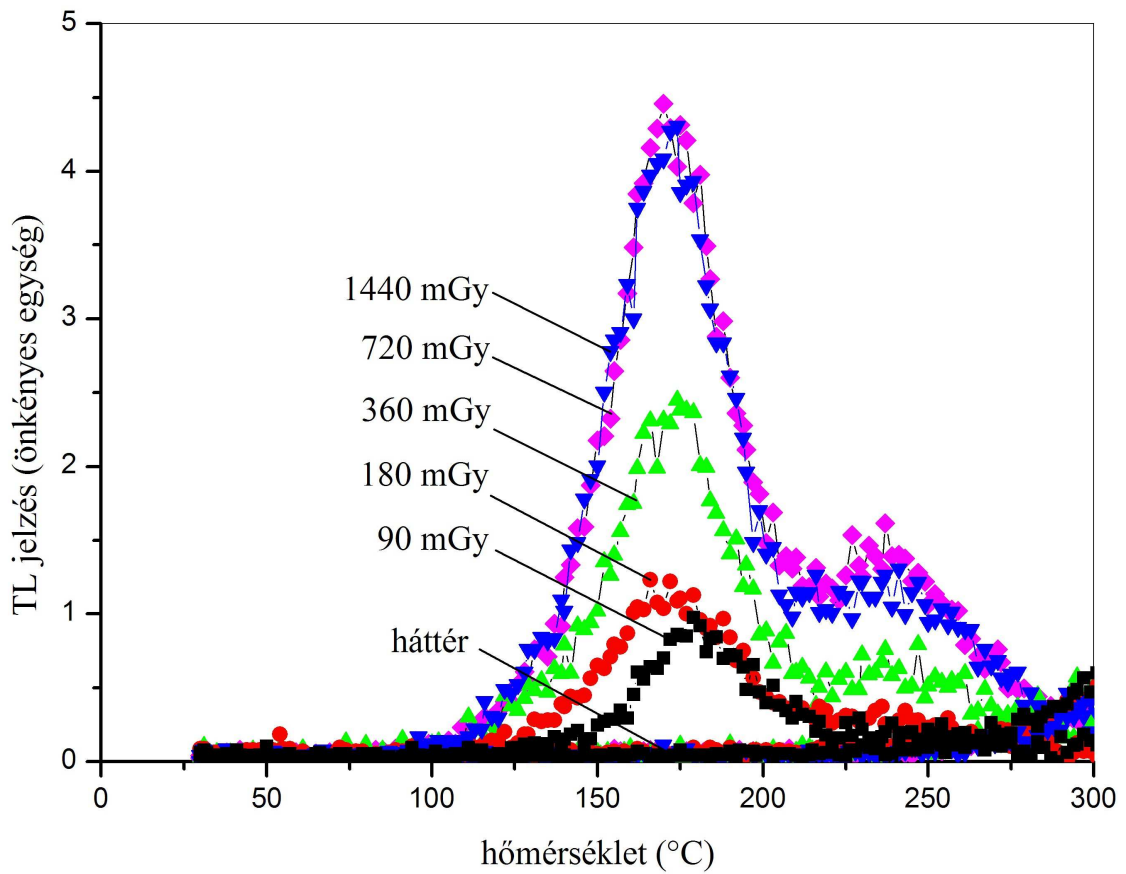
Az előző fejezetben ismertetett kedvező eredmények hatására a dózistartomány szélesítését tűztem ki célul annak kiderítése végett, hogy az SMD ellenállások milyen lumineszcencia tulajdonságokat mutatnak. A kísérleteket a már említett kilenc kereskedelmi forgalomban kapható SMD ellenálláson végeztem el (5. táblázat). Fontosnak tartottam megvizsgálni azt, hogy az adott SMD alkatrész dózis-válasza milyen összefüggést mutat nagyobb dózisok esetén. Mivel a retrospektív dozimetria célja utólagos dózisbecslés (az anyag által elnyelt dózis mérhető, a személyi dózis ezáltal becsülhető), a lehető vagy általunk elérhető legszélesebb dózistartományt

célszerű vizsgálni. Az SMD ellenállásokat ennek megfelelően 90 mGy és 1440 mGy dózis közötti tartományban tanulmányoztam. A felvett kifűtési görbék a 19 – 27. ábrákon láthatóak.



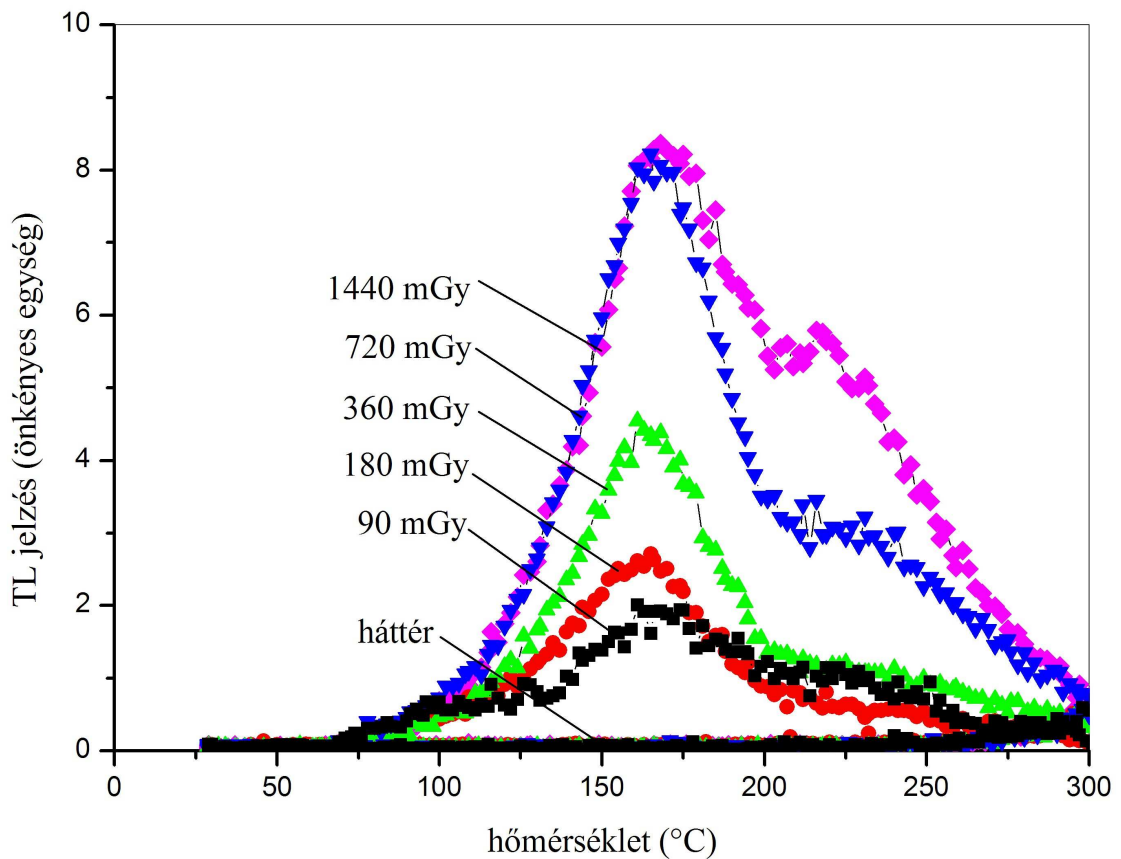
19. ábra: Az 1. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 1. SMD ellenállás kifűtési görbéit elemezve megállapítható, hogy jellegük rendkívül kedvező, hiszen egy fő és egy mellécsúcsot látunk, utóbbi azonban nem befolyásolja az alacsonyabb hőmérsékletű csúcs eredményeit. Az alacsonyabb hőmérsékletű csúcs 120 °C környékén kezdődik, maximumát 160 °C – 180 °C környékén éri el. Ennek megfelelően dozimetriai célra alkalmas, hiszen ilyen magas hőmérsékletű csúcsok már kellően stabilnak tekinthetőek. Látható a diagramon továbbá az is, hogy növekvő dózis esetén növekvő jelzést kaptunk. Ez a növekedés ugyan 720 mGy fölött megáll, azonban egészen addig monoton növekvő. Az SMD ellenállások dóziszfüggésének számszerű értékelése a fejezet végén található.



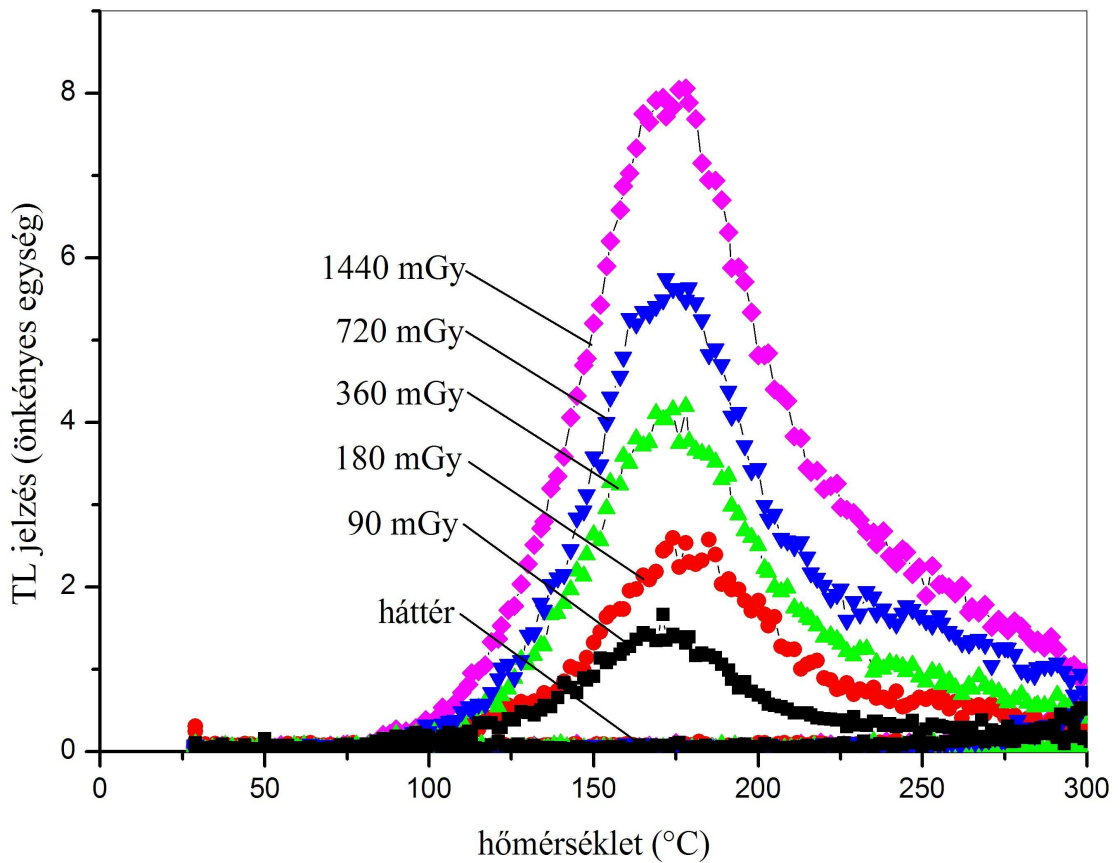
20. ábra: A 2. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 2. SMD kifűtési görbéi nagyon hasonlóak az előző 19. ábrán látható 1. SMD görbéihez. Jellegzetességeik szinte azonosak, a csekély különbséget a magasabb hőmérsékleten jelentkező másik csúcs alacsonyabb jelzése jelenti. A görbék ebben az esetben is növekvő jellegűek, a növekmény azonban itt is jelentősen csökken 720 mGy fölött.



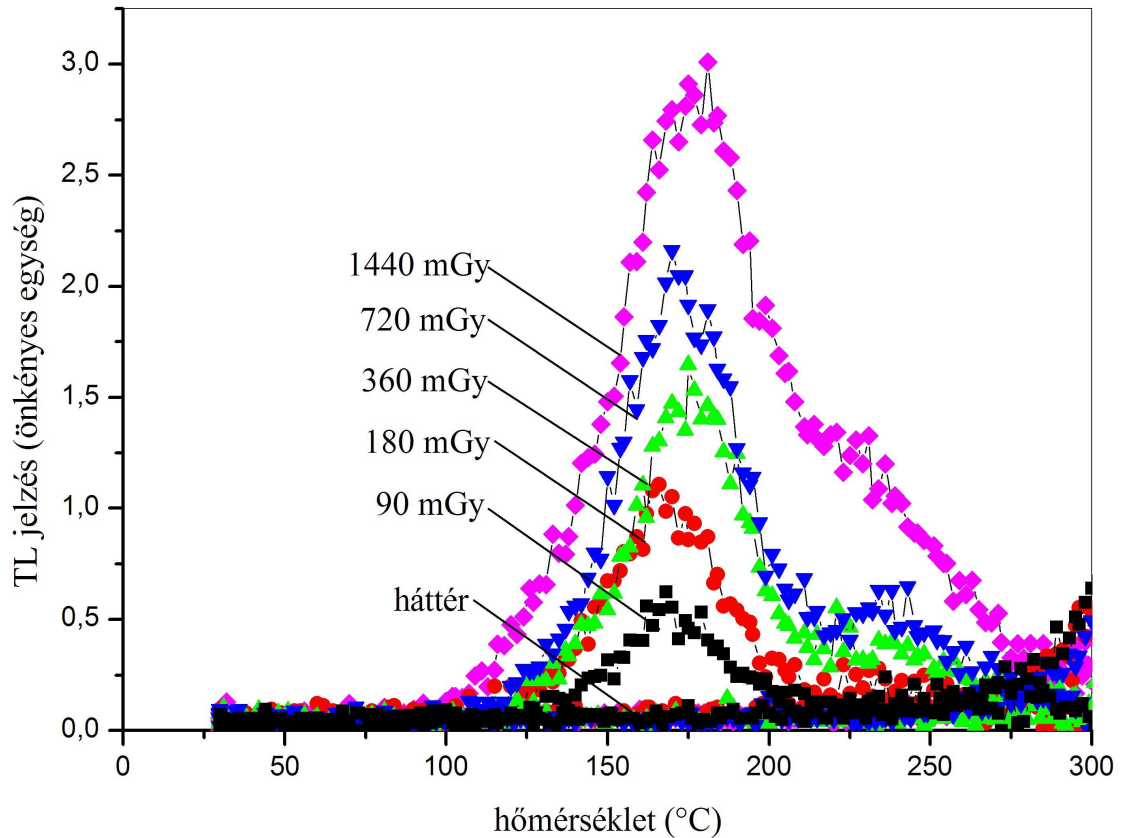
21. ábra: A 3. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 3. SMD ellenállás kifűtési görbéi ugyan hasonlatosak az előző kettőéhez, azonban számos különbség is felfedezhető közöttük. A leginkább szembevetendő változás a sokkal nagyobb jelzést produkáló magasabb hőmérsékletű csúcs. Megfigyelhető azonban, hogy a csúcs nagysága összevethető az alacsonyabb hőmérsékletű csúcs nagyságával, utóbbi mégis jól elkülöníthető marad, így dozimetriai célra továbbra is alkalmas lehet. Nagyobb dózisok esetén sajnos ez esetben sem kaptam növekvő TL jelzést, azonban a görbék jobb oldali magasabb (225 °C körüli) hőmérsékletű csúcsa mutatott növekedést. A magas hőmérsékleten jelentkező csúcs esetén az előzőekkel ellentétben kisebb dózisok esetén nem tapasztalható változás. Következésképpen az ilyen – vagy ehhez hasonló – SMD alkatrészek magas hőmérsékletű csúcsa további vizsgálatok tárgya lehet.



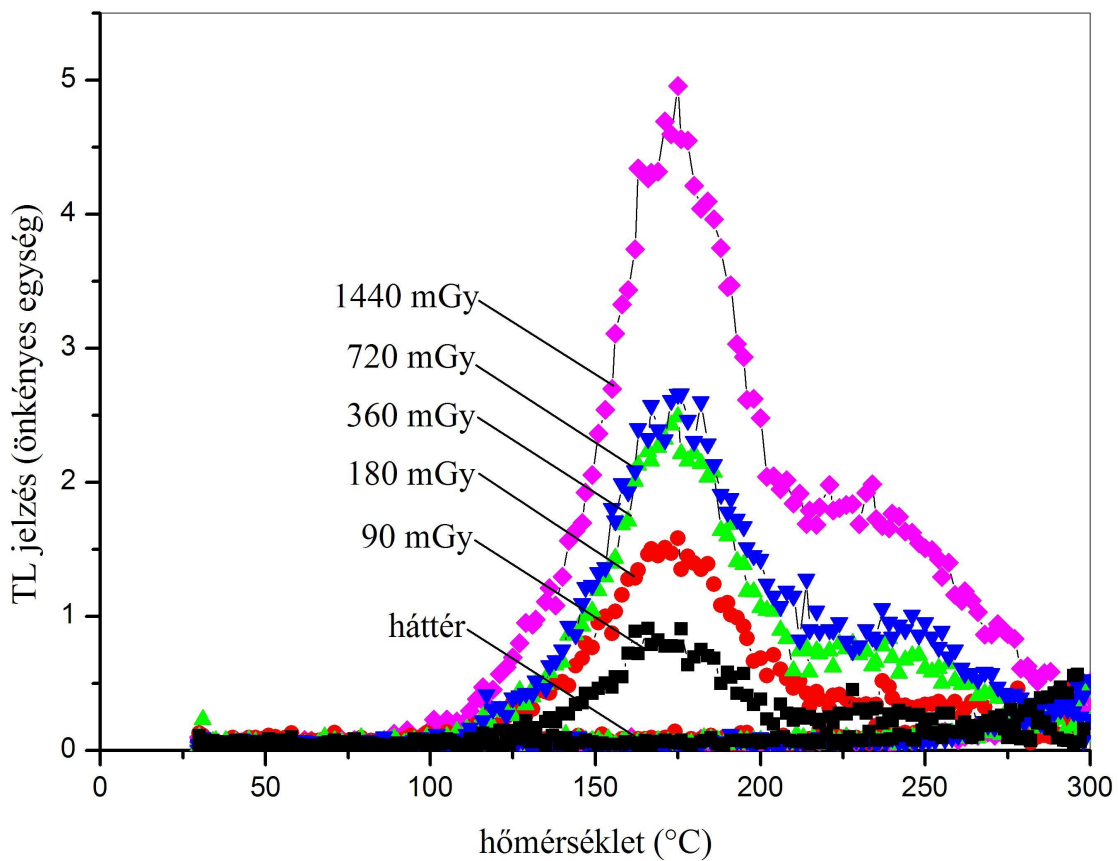
22. ábra: A 4. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 4. SMD kifűtési görbéi rendkívül kedvezőek, és az előzőektől eltérő jelleget mutatnak. Az első és legfontosabb különbség, hogy itt nem jelenik meg a magasabb hőmérsékletű csúcs. Ennek megfelelően kezelése és általa bármely további számítás vagy értékelés könnyebbé válik. A másik nagyon fontos különbség, hogy jelen esetben a növekedés nem áll meg 720 mGy esetén, hanem továbbra is megmarad. Érdekes eredmény továbbá, hogy a csúcsok nem jelentősen ugyan, de körülbelül 10 °C - al jobbra tolódtak az 1. és 2. SMD görbéihez viszonyítva.



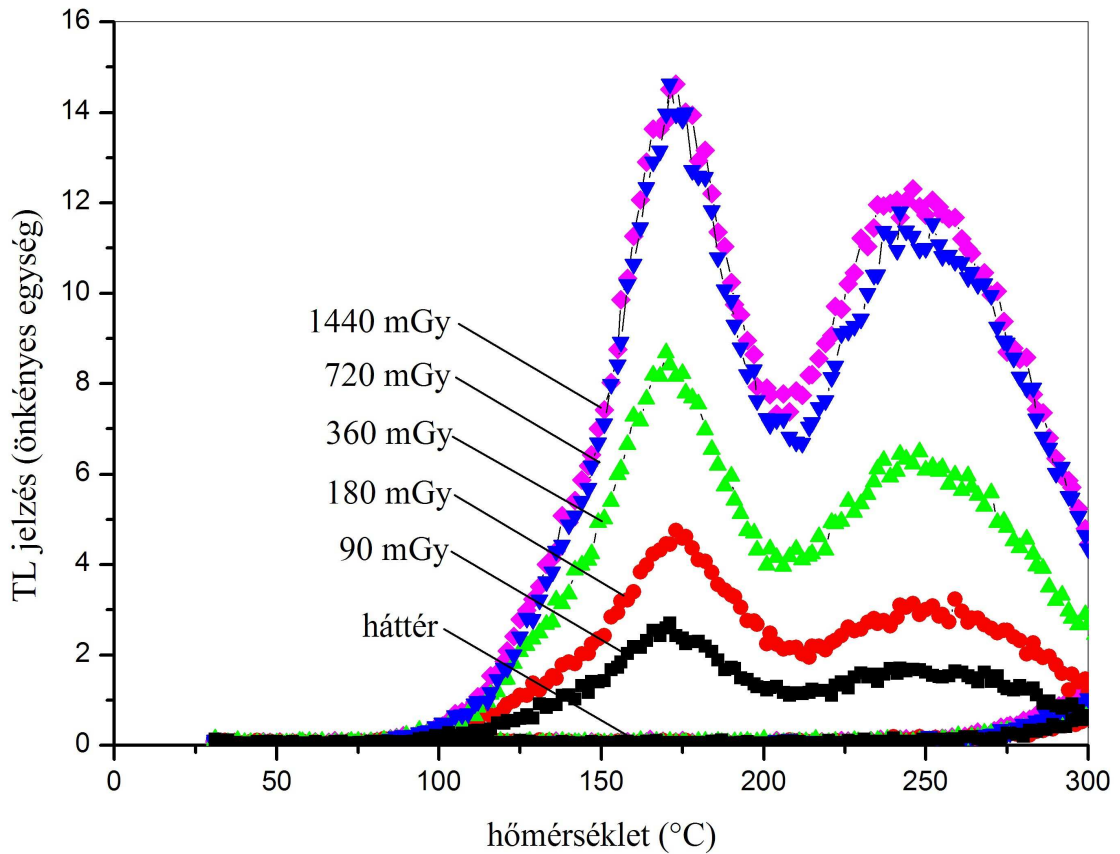
23. ábra: Az 5. SMD ellenállás kifűtési görbéi

Az 5. SMD ellenállás egyesíti az előbbi kettő (3. és 4. SMD) tulajdonságait. A görbék igen kedvező jellegük mellett a görbék alatti területek arányosak a dózissal, tehát növekvő tendenciájúak. Megjelenik azonban a magasabb hőmérsékletű csúcs, ami ebben az esetben is főként nagyobb dózisok esetén jelentkezik. Ebben az esetben azonban a két csúcs között nincs élesen elkülöníthető határ, gyakorlatilag az alacsony hőmérsékletű csúcs vállaként jelenik meg az utóbbi. Abban az esetben, amennyiben nagyobb dózisok meghatározása a cél, egy megfelelően megválasztott előfűtéssel az alacsony hőmérsékletű csúcs akár teljes egészében is törölhető (vagy legalább csökkenthető) és ezáltal csak a magasabb hőmérsékleten lévő „váll” jelentkezik, mint görbe.



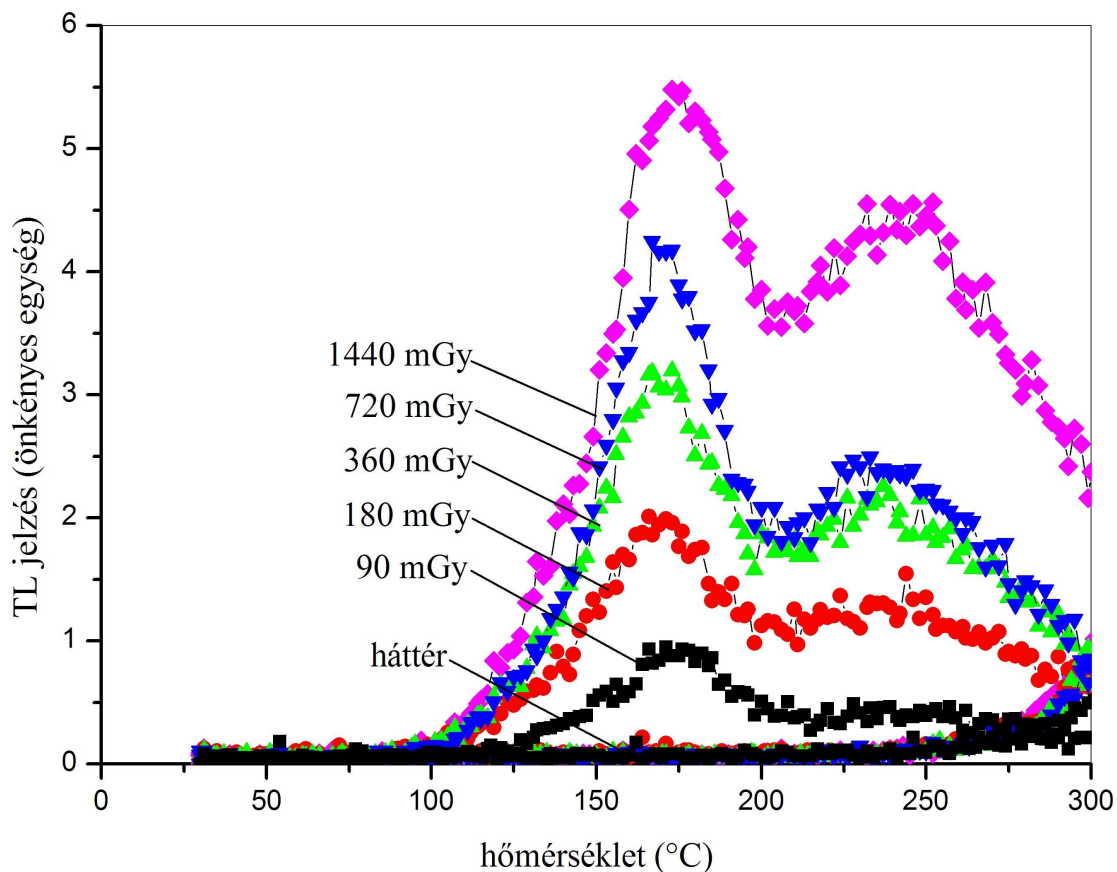
24. ábra: A 6. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 24. ábrán látható 6. SMD ellenállás kifűtési görbéi nagyon hasonlóak az előző 23. ábrán láthatóakéhoz. Az egyetlen különbség mindössze néhány % - os eltérés a középső dózistartományban, de jellegét tekintve nincs számottevő változás. A görbék alatti terület minden esetben arányos az elnyelt dózissal, így dozimetriai célra alkalmas.



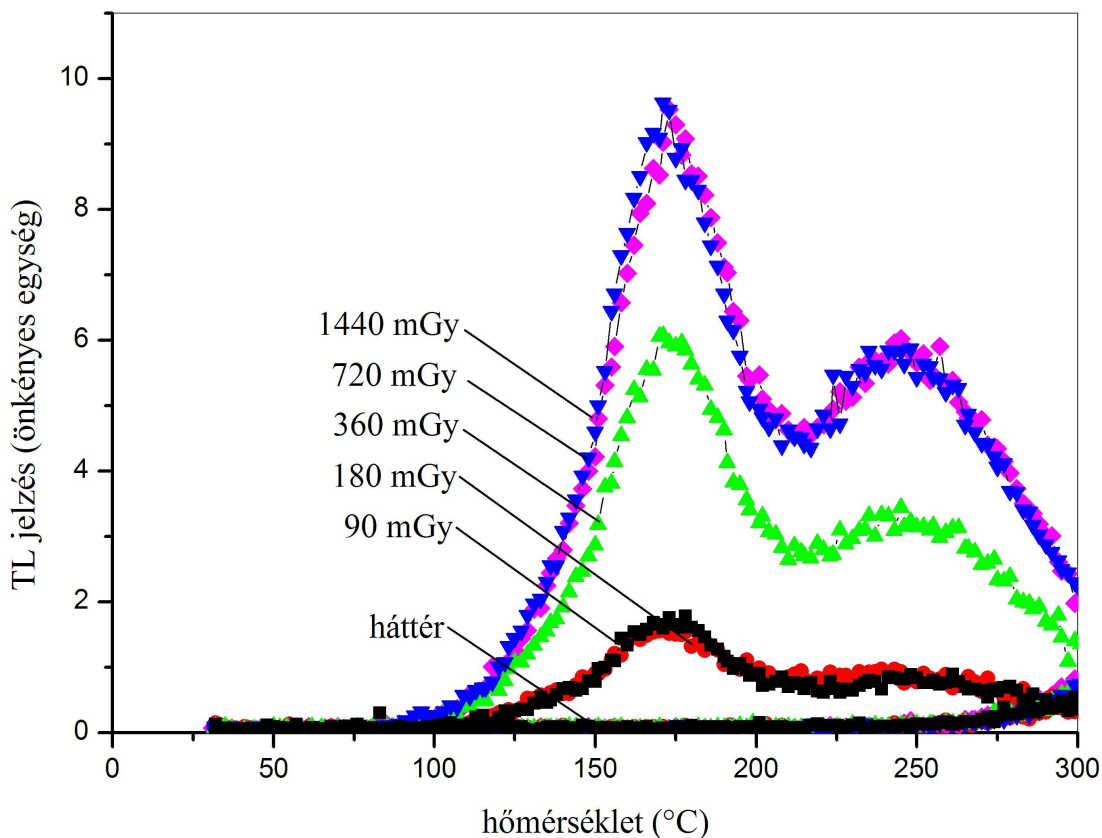
25. ábra: A 7. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 7. SMD ellenállás kifűtési görbéin megfigyelhető, hogy a TL intenzitás az eddig tárgyaltakhoz viszonyítva nagyobb, ez a legérzékenyebb SMD alkatrész. A görbéken jól elkülöníthető csúcsokat láthatunk, az adott hőmérsékleti tartományban kettőt. Az alacsony hőmérsékletű csúcs egészen 720 mGy dóziséig növekvő TL jelzést mutat növekvő dózis esetén, de a többi alkatrészhez hasonlóan fölötté a jelzés szublineáris. A szublinearitás okát a későbbiekben a fading mérések kapcsán magyarázom. A magasabb hőmérsékleten lévő csúcs az eddigiektől eltérően az alacsonyabb dózisosok esetén is növekvő jelzést ad.



26. ábra: A 8. SMD ellenállás kifűtési görbéi

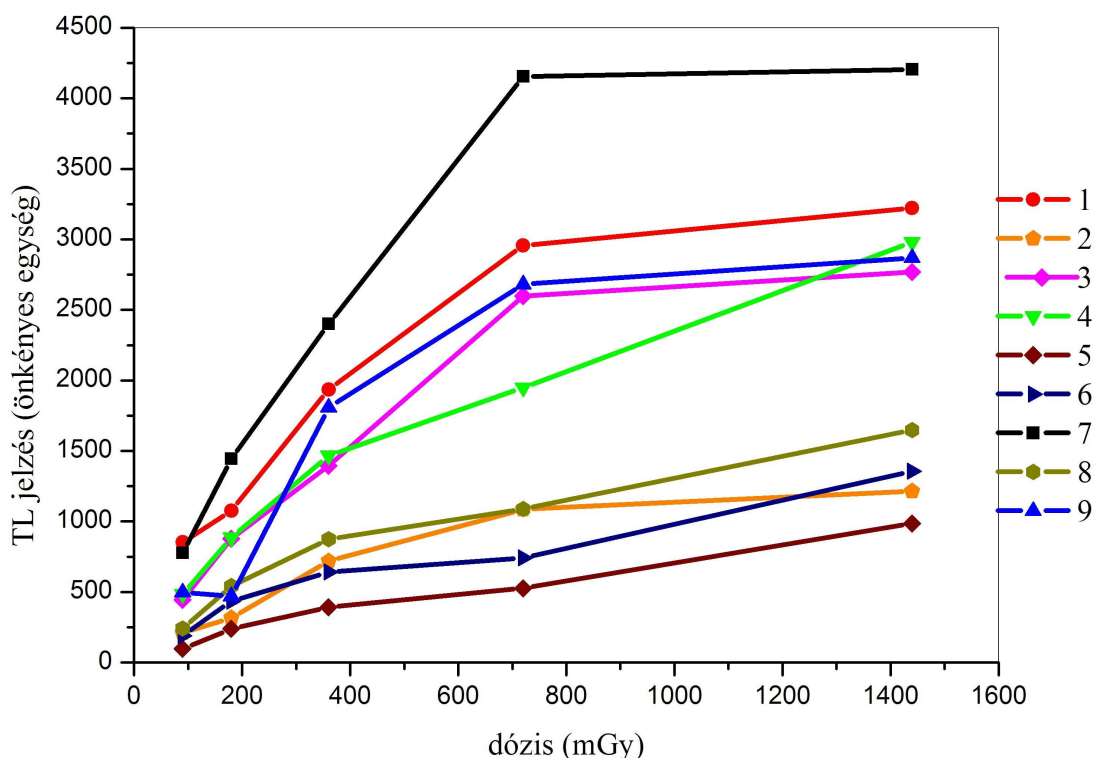
A 8. SMD ellenállás kifűtési görbéin megfigyelhető, hogy gyakorlatilag mind a két csúcs növekvő dózis esetén növekvő jelzést ad egyetlen kivételtől (magasabb hőmérsékletű csúcs 720 mGy) eltekintve. Az érzékenysége ugyan elmarad az előző SMD érzékenységétől, azonban még így is kellően nagy és értékelhető eredményt kaptam. A magasabb hőmérsékleten megjelenő csúcs ebben az esetben is növekvő jelzést ad már alacsony dózisok esetén is.



27. ábra: A 9. SMD ellenállás kifűtési görbéi

A 27. ábrán látható 9. SMD ellenállás kifűtési görbéi a leginkább kedvezőtlen tulajdonságúak a kilenc kiválasztott alkatrész közül. A 180 mGy dózis esetén mért TL intenzitás alacsonyabb volt, mint a 90 mGy esetén mért, valamint a két legmagasabb dózis esetén sincs nagy különbség. Ennek ellenére a teljes vizsgált dózistartományt figyelembe véve megállapítható, hogy amennyiben a cél az általunk előre meghatározott dózisbecslés, és nem a pontos mérés, úgy ez az érzékenység még megfelelő. Továbbá fontos megjegyezni azt a tényt, hogy a mért alkatrész egy elektronikai eszközbe épített adott funkcionalitással bíró eszköz, nem doziméter. A kapott eredmények pedig ennek tükrében rendkívül kedvezőek.

A linearitás megállapítása szorosan összefügg az előzőekben tárgyalt dózis-válasz mérésével. Valamely anyag akkor válhat jó dózismérővé, ha a növekvő dózis növekvő TL jelzéssel párosul, azaz az ismert dózis és a rá adott válaszjelek száma között egyértelmű összefüggés van. A felvett kifűtési görbéket itt nem ábrázoltam, a kifűtési görbék csúcs alatti területeinek értékei alapján végeztem számításaimat (a táblázat a Függelék részét képezi). A dózis-válasz eredmények lineáris megjelenítéséből a 28. ábrán található diagramot kaptam.



28. ábra: SMD ellenállások TL jelzésének dóziszfüggése

Az ábrát elemezve megállapítható, hogy a dózis növekedése nem lineáris minden esetben, azonban a növekedési üteme a vizsgált tartományban állandó, a dózis-válasz kapcsolat egyértelműen monoton. Megfigyelhető továbbá az is, hogy az SMD alkatrészek jelzései hasonló nagyságrendűek, a köztük lévő eltérés nem számottevő amennyiben dózismérés a cél. Vannak köztük olyan minták, amelyek egyértelműen az alacsony – 400 mGy alatti – dózistartományban adnak lineárisnak tekinthető választ, tipikus példa erre a 2. vagy a 3. SMD ellenállás. A 4. viszont szinte az egész vizsgált dózistartományban megfelelően növekvő jelzést adott.

Arra a következtetésre jutottam, hogy az ellenállások növekvő jelzést adnak a dózis növelésére az adott dózistartományban, így ilyen tekintetben alkalmasnak tekinthetők utólagos dozimetriai feladatok végrehajtásához, a dózisbecsléshez.

V.2.3 Fading (felejtés)

Doziméter anyagok és kereskedelmi forgalomban beszerezhető doziméterek esetén a legkedvezőbb, ha a fading a lehető legalacsonyabb érték, akár néhány % egy év alatt [70]. Retrospektív dozimetria esetén azonban nem lenne szerencsés egy csekély fadinget mutató anyag alkalmazása, hiszen akkor a baleset vagy terrorcselekmény következtében kialakuló dózis növekmény nem lenne megkülönböztethető az addig kapott háttér dózistól, hiszen csupán egy összevont értéket kapnánk kiértékeléskor.

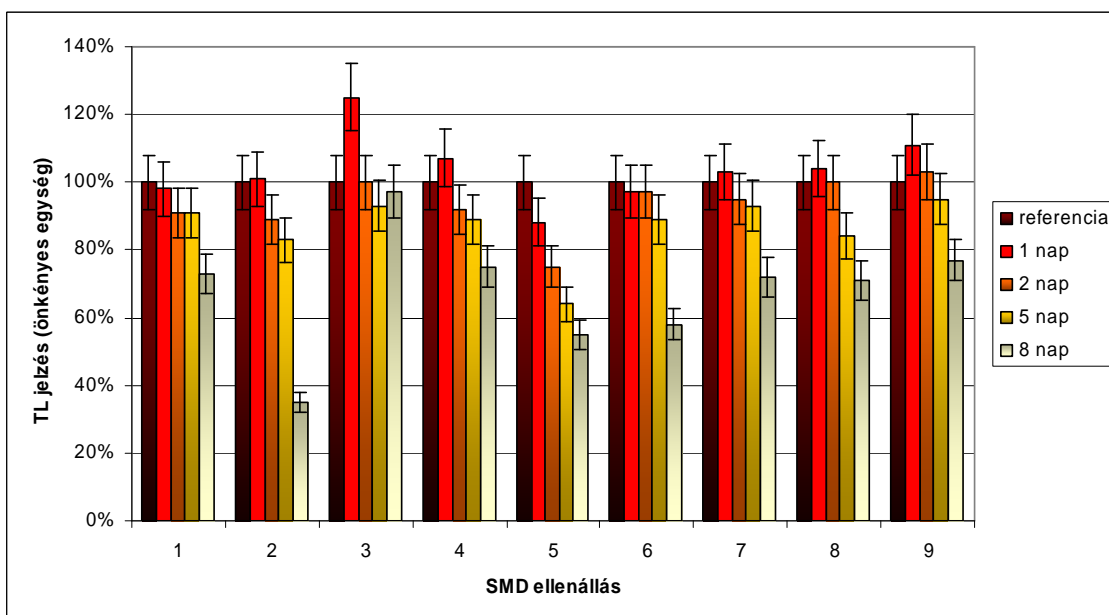
Ilyen célú felhasználásra a nagy fadinggel rendelkező anyagok az ideálisak. Az ilyen anyagok ugyan gyűjtik a háttér dózis adatait, eltárolják azt, azonban a töltéshordozók szobahőmérsékletű kiürülése miatt az információ nagyon gyorsan – akár napok alatt – törlődik. Ha ilyenkor történik a dózis növekmény, azt gyors kiértékelés esetén ki lehet mutatni és így a növekmény egyértelműen az adott esemény bekövetkezésére utal, nem pedig a háttér hosszú idejű eltárolására. Ezek alapján a fading meghatározása rendkívül fontos.

Az SMD ellenállások fading vizsgálatokor egy sorozat kiértékelését követően ugyanezt megismételtem 1, 2, 5 és 8 nap elteltével. A kifűtési görbéket itt sem ábrázolom, csupán a csúcs alatti területek alapján számított eredmények kerülnek bemutatásra % - ban kifejezve. Az azonnali kiértékelés képezte minden SMD ellenállás esetén a 100 % - ot (referencia). A kapott eredményeket a 6. táblázat tartalmazza.

6. Táblázat: SMD ellenállások relatív fading-je (%)

SMD	referencia	1 nap	2 nap	5 nap	8 nap
1.	100 %	98 %	91 %	91 %	73 %
2.	100 %	101 %	95 %	89 %	38 %
3.	100 %	125 %	100 %	93 %	97 %
4.	100 %	107 %	92 %	89 %	75 %
5.	100 %	89 %	75 %	64 %	55 %
6.	100 %	97 %	98 %	89 %	58 %
7.	100 %	103 %	95 %	93 %	72 %
8.	100 %	104 %	100 %	84 %	71 %
9.	100 %	111 %	103 %	95 %	77 %

A 6. táblázat adatait felhasználva diagramon ábrázoltam a besugárzás utáni időben megfigyelhető változást, ami a 29. ábrán látható. A különböző SMD típusokat különböző színnel jelöltem.

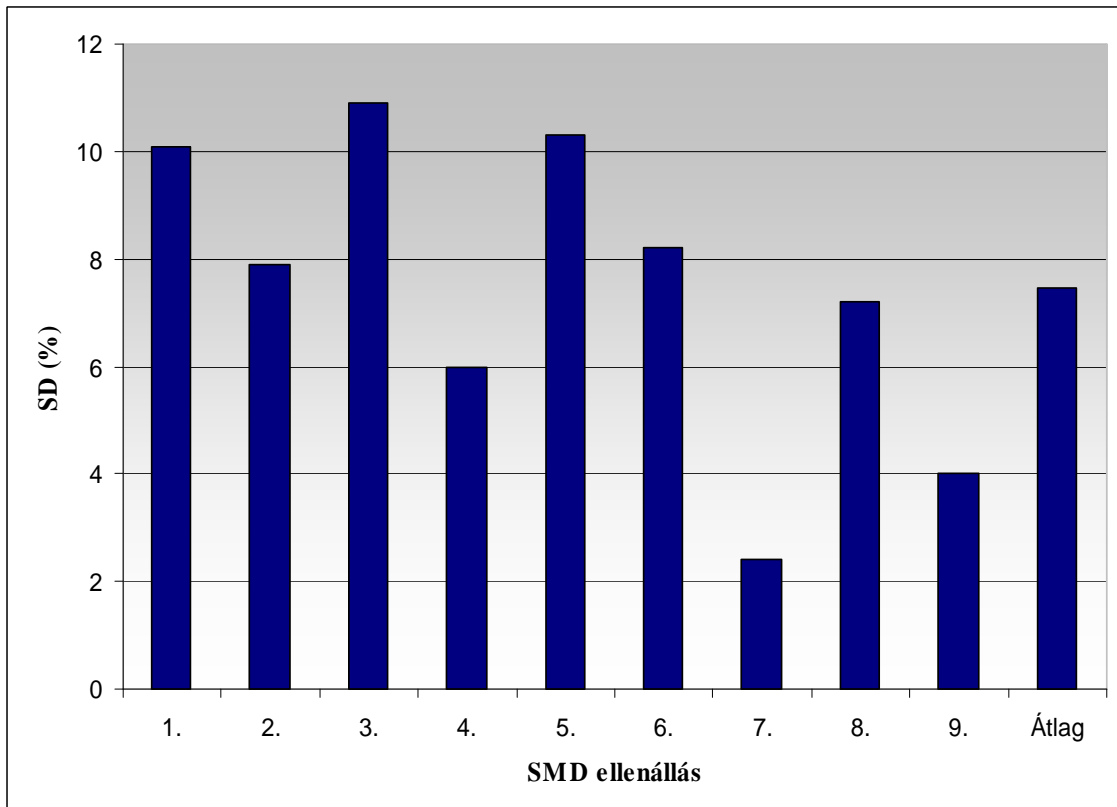


29. ábra: SMD ellenállások fading-je

A táblázatok és a diagram adataiból azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az ellenállások információ tárolása megfelelő, amennyiben a kiértékelésig nem telik el néhány napnál hosszabb idő. Az első nap elteltével három olyan SMD volt, amelyek jelzése csökkent, azonban ennek mértéke nagyon csekély. A 2. nap meghozza a várt effektust, hiszen három kivételével minden alkatrész jelzése csökken, ez természetesen a csapdák szobahőmérsékletű kiürülése miatt következik be. Az 5. nap eredményei azt mutatják, hogy az eredeti információ átlagosan 87 %-a még mindig mérhető. A kilenc ellenállásból azonban egy jelentős csökkenést mutatott (2.), ami a 8 napos eredménynél is kiugró értéket mutatott. A 8. nap eredménye azt mutatja, hogy ekkor már olyan mértékű a fading, hogy jelentős csökkenéssel kell számolnunk. Az átlag 68 %, de több olyan SMD is volt, amelyek esetén a TL jelzés csökkenése jelentősebb a többinél, így ez az átlag nem használható fel, mint lényegi információ. Emellett fontos azt is megjegyezni, hogy 8 nap elteltével az eredmények meglehetősen nagy szórást mutatnak, így szintén nem szolgálhatnak konkrét adatok és erre épülő következtetések alapjául. Célkitűzéseim elején megfogalmaztam, hogy egy esetleges terrorcselekmény vagy baleset következtében sugárterhelést kapott személyek dózisbecslését a mihamarabb, lehetőleg egy napon belül szükséges elvégezni. Ezen kritériumok alapján az SMD ellenállások kiváló lehetőséget biztosítanak arra, hogy általuk rövid időn belül mérési adatahoz juthassunk és a további intézkedés alapjait megteremtjük.

V.2.4 Reprodukálhatóság

A IV.1.2.1 fejezetben leírtak alapján a mérési sorozatok végrehajtását követően kiszámítottam a szórást, majd ebből a (10) egyenlet alapján meghatároztam a relatív szórást %-ban kifejezve minden SMD ellenállásra. A kísérletek elvégzésekor mind a kilenc SMD ellenállás ismételt besugárzását és kiértékelését követően végeztem el a számításokat. Az eredmény a 30. ábrán látható.



30. ábra: SMD ellenállások relatív szórása

A már idézett ISO és National Institute of Standards and Technology kiadványokat alapul véve megállapítható, hogy a relatív standard deviáció értéke megfelelő, az eljárás dózisbecslés elvégzésére mindenképpen alkalmas. Az értékek 3 % és 11 % között változnak, azonban átlaguk alig nagyobb 7 %-nál. A pontos mérések esetén 5 % alatti SD érték tekinthető megfelelőnek, 10 % alatti pedig még elfogadható érték. A mérési eredményeink tehát megfelelően pontosak, így az adatok felhasználásával végzett további számítás megbízható eredményt ad.

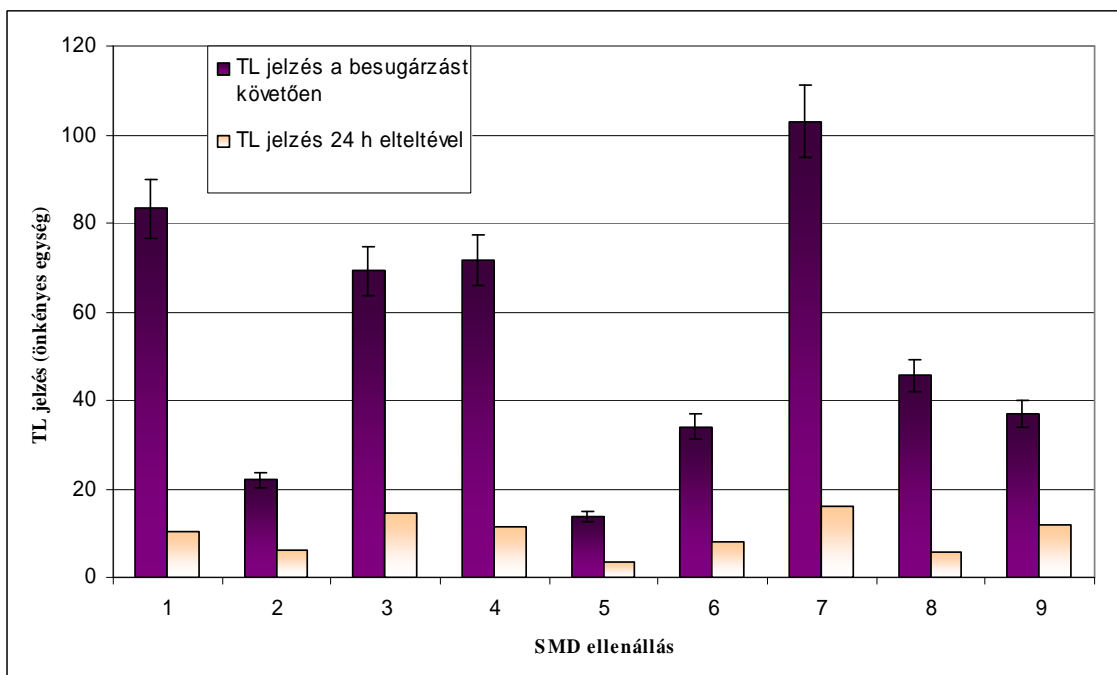
V.2.5 Fényérzékenység

A doziméterek jellemzésekor fontos szem előtt tartani azt, hogy azon anyagok egy része, amelyek érzékenyek γ sugárzásra, érzékenyek fényre is. A csapdák kiürítéséhez

ugyanis nem csupán a hőmérséklet növekedése biztosít elegendő energiát, hanem a fényfotonok is (lásd III.3 fejezet). Ennek megfelelően a fényen tárolt doziméterek egy részében a töltéshordozók rekombinációja megtörténik még kiolvasás előtt. Ez a gyakorlatban azt idézi elő, hogy a nem megfelelően tárolt vagy nem azonnal kiolvasott doziméterek az általuk tárolt információ egy részét elveszítik, így alacsonyabb dózist adva az adott viszonyok mellett. A jelenség hasonló a fading-hez, eredménye pedig gyakorlatilag azzal megegyező.

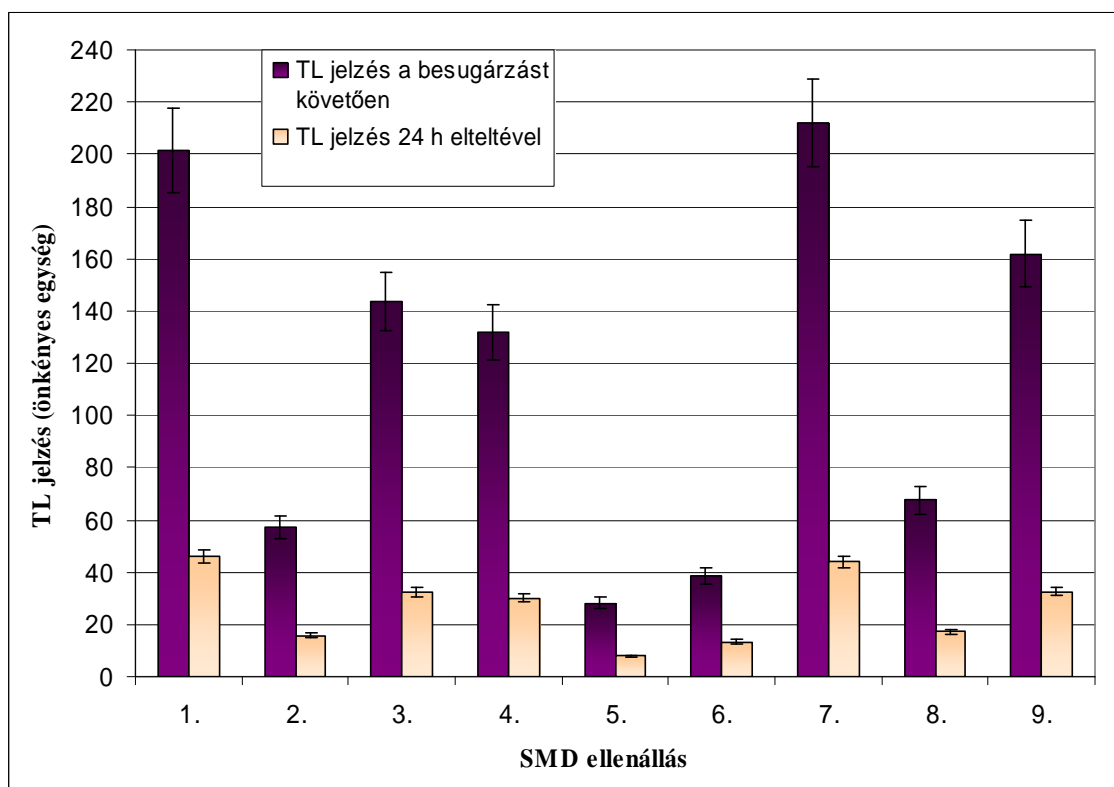
A kereskedelmi forgalomban kapható és széleskörűen alkalmazott Al_2O_3 doziméterek érzékenyek fényre. Az általam vizsgált SMD alkatrészek fő összetevője Al_2O_3 . Ennek megfelelően feltételezhetően az SMD alkatrészek is fényérzékenyek. Retrospektív dozimetriai felhasználásuk esetén tehát ezt is figyelembe kell venni, így vizsgálatokat végeztem arra vonatkozóan, hogy milyen mértékben kell számításba venni a fény hatását a minták kezelésekor.

A kísérleteket az SMD alkatrészek hőkezelésével kezdtem (30 percig $300\text{ }^\circ\text{C}$), majd 125 mGy és 250 mGy dózissal történő besugárzás következett. Ezután felvettem az alkatrészek kifűtési görbéit, míg egy másik sorozat SMD alkatrészt 24 órára fénytől nem védett helyre tettem. A második sorozat minta kifűtési görbéinek felvétele tehát 24 óra elteltével történt, a fényérzékenység ezek alapján pedig meghatározható. A 125 mGy besugárzási dózis esetén kapott eredmények a 31. ábrán láthatóak.



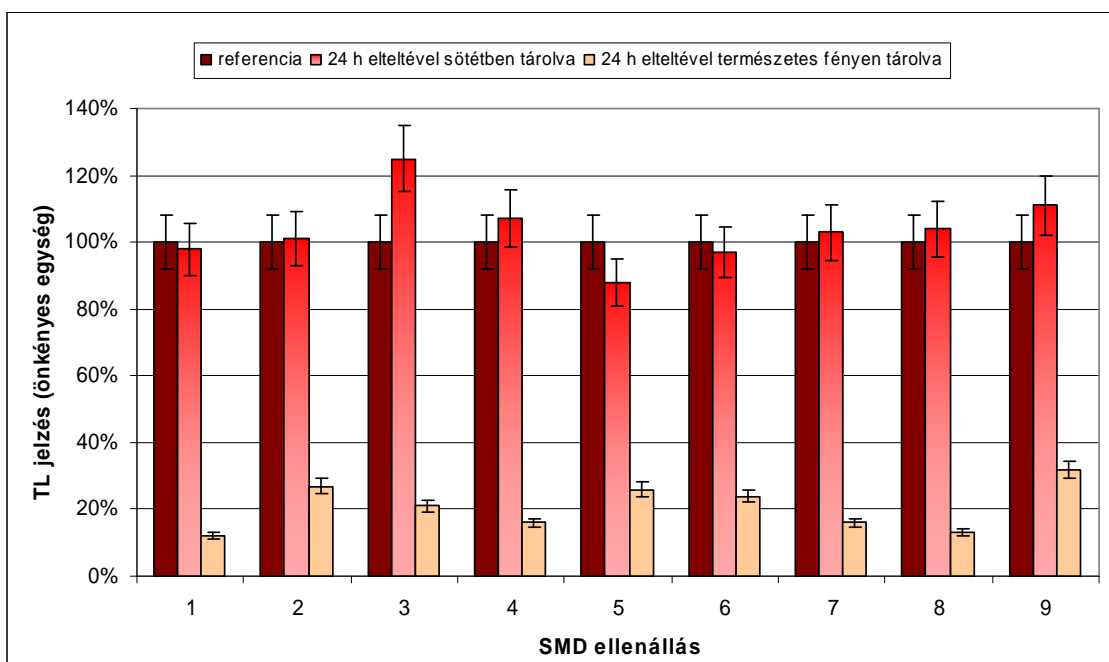
31. ábra: SMD ellenállások fényérzékenysége 125 mGy dózis esetén 24 h alatt

Sötét színnel jelöltem a besugárzást követően, világos színnel pedig a 24 órával később mért adatokat. A diagramon jól megfigyelhető, hogy a legkevésbé fényérzékeny SMD 24 óra alatt az eredeti intenzitás 30 %-át, míg a legérzékenyebb csupán körülbelül 15 %-át adta vissza. Következésképpen az SMD alkatrészek fényérzékenyek tekinthetőek, ez pedig igazolja előzetes várakozásaimat. A 250 mGy dózis esetén kapott eredményeket a 32. ábra szemlélteti.



32. ábra: SMD ellenállások fényérzékenysége 250 mGy dózis esetén 24 h alatt

A diagramon ismételten sötét színnel az eredeti, világos színnel a 24 h múlva mért eredmények láthatóak. A kisebb dózis esetén megfigyelt jelentős fényérzékenység természetesen itt is megjelenik. A fény hatásának szemléltetése végett egy diagramon (33. ábra) ábrázoltam az SMD ellenállások TL jelzéseit természetes fénynek való kitétség illetve sötétben tárolás után 24 óra elteltével.



33. ábra: Az SMD ellenállások TL jelzése sötétben és természetes fénynek kitett helyen tárolva 24 h elteltével

Megállapítható, hogy az SMD alkatrészek fényérzékenyek, tehát retrospektív dozimetriai felhasználásuknál ezt figyelembe kell vennünk. A gyakorlatban azonban az alkatrészek fényen történő tartása, kezelése legrosszabb esetben is pár perces időtartamot igényel, ennek megfelelően rövid idejű expozíciónál nem jelentős a csökkenés. Ha azonban a kiszereles hosszabb időt igényel, mindenképpen sötét helyiség és vörös fény alkalmazása szükséges.

V.2.6 Előfűtés alkalmazása

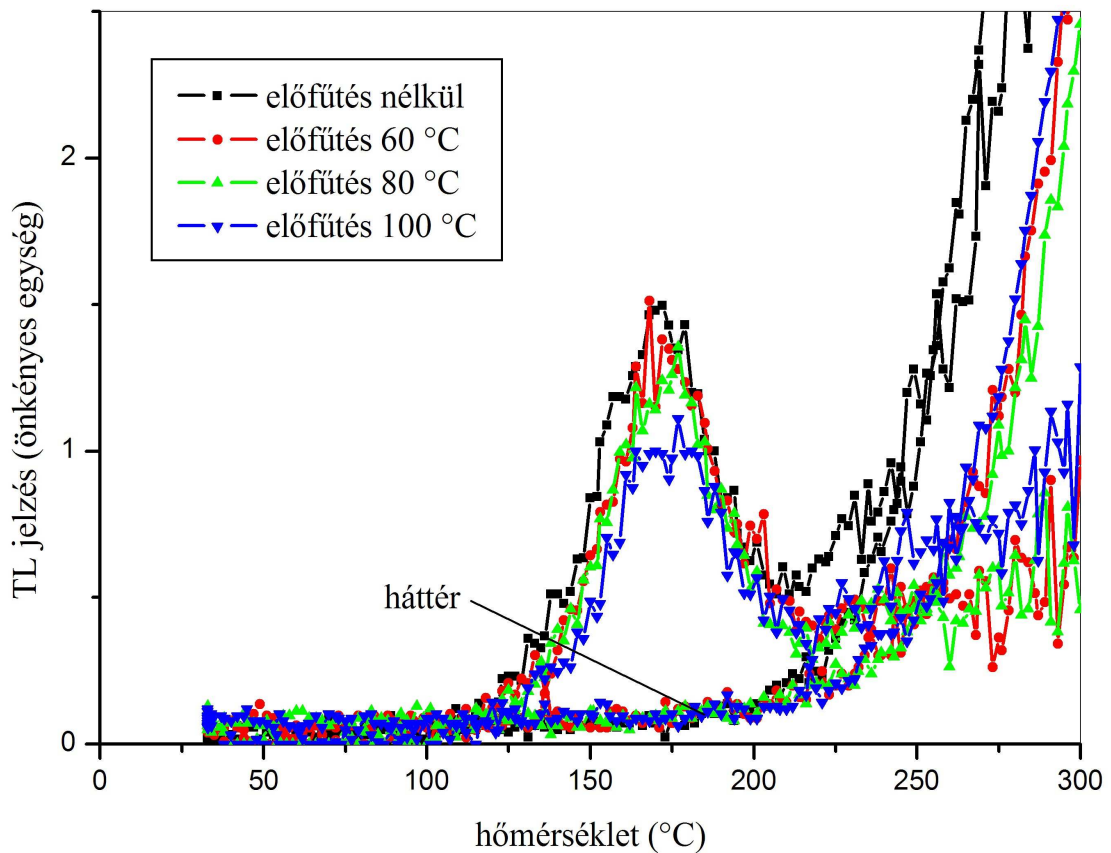
A termolumineszcens dózismérők egyik nagyon fontos jellemzője, hogy az anyagokat használat előtt egy, a gyártó által előre meghatározott eljárás alapján hőkezelní kell. Ez a hőkezelés adott hőmérsékleten adott ideig tartó folyamat, amit meghatározott lehülési folyamat követ. A gyártók az előre megadott reprodukálhatóságot és más anyagi dozimetriai tulajdonságokat csak a hőkezelések szigorú betartásakor garantálják. Ilyen hőkezelési követelményre példa az $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ (TLD-500K) esetén: $900\text{ }^\circ\text{C} \pm 30\text{ }^\circ\text{C}$, 10 min – 15 min, lehűtés $6\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{sec}^{-1}$ [71, 72].

Az egyértelmű és egyszerűbb kiértékelés, valamint a reprodukálhatóság javítása céljából TL méréseknél gyakran végeznek előfűtést. Ennek során a mintát valamilyen, a mérendő TL csúcsánál alacsonyabb hőmérsékletre felmelegítik, majd hagyják visszahűlni. A tényleges TL kiértékelés csak ezután kezdődik. Az előfűtés során a

„sekély” csapdák által befogott töltéshordozók kiszabadulnak, így a felfűtés során a csapdák kiürülése közel azonos hőmérsékleten indul meg. Ezáltal gyakorlatilag biztosítható, hogy minden görbe hasonló jellegű legyen.

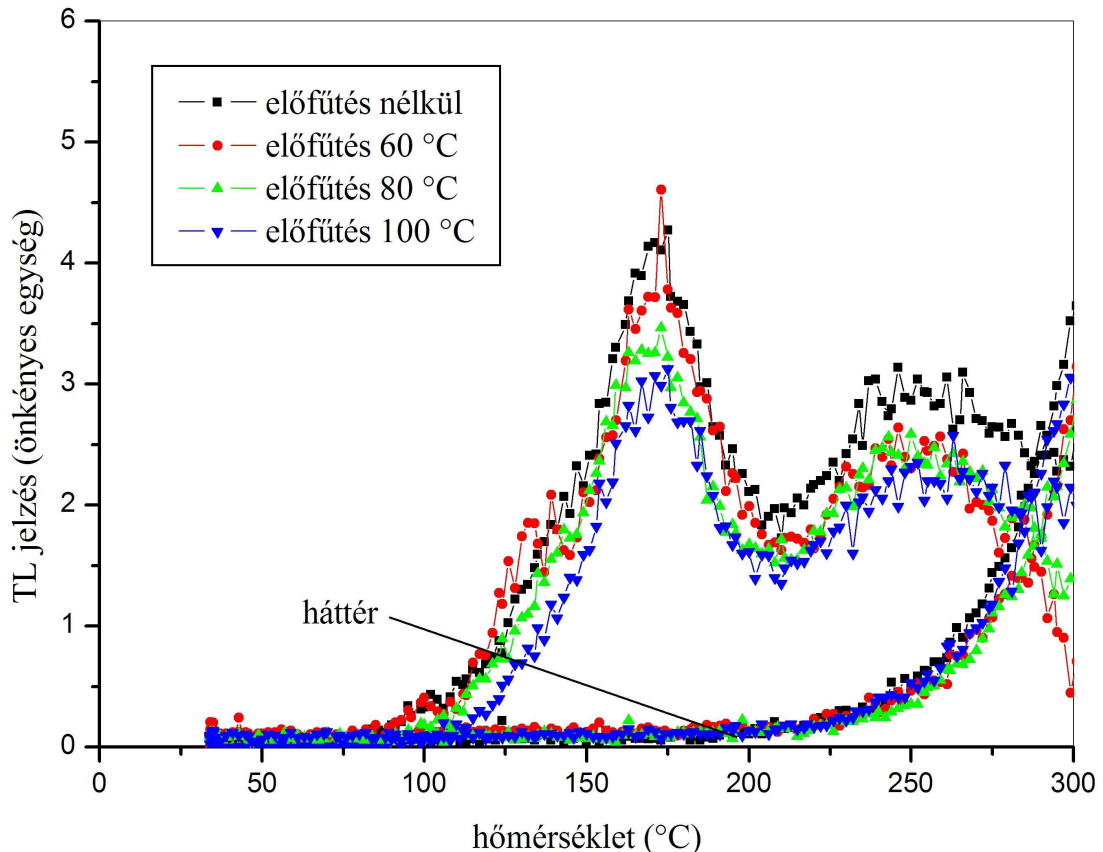
Az előfűtés alkalmazása jelentősen javíthatja a görbék kiértékelhetőségét, ennek megfelelően a kísérleteket mind a kilenc SMD ellenálláson célszerűnek tartottam elvégezni.

Az SMD ellenállások hőkezelését minden mérés előtt elvégeztem (300 °C 30 percen keresztül, 6 °C. sec⁻¹ sebességgel lehűtve azokat). A minták együttes besugárzását (125 mGy) követően kilenc SMD ellenállást azonnal kiértékeltem előfűtés nélkül. Egy másik sorozat esetén oly módon ismételt meg a mérést, hogy a minták kifűtése (300 °C véghőmérsékletig) előtt 60 °C hőmérsékletre hevítettem őket, majd hagytam a mintákat szobahőmérsékletre visszahűlni. A sorozatot ugyanígy megismételttem 80 °C, végül 100 °C hőmérsékletre történő előfűtéssel. Az összes kifűtési görbe nem kerül bemutatásra, mindössze két tipikus példa látható a következő két diagramon.



34. ábra: A 2. SMD ellenállás kifűtési görbéi előfűtést alkalmazva

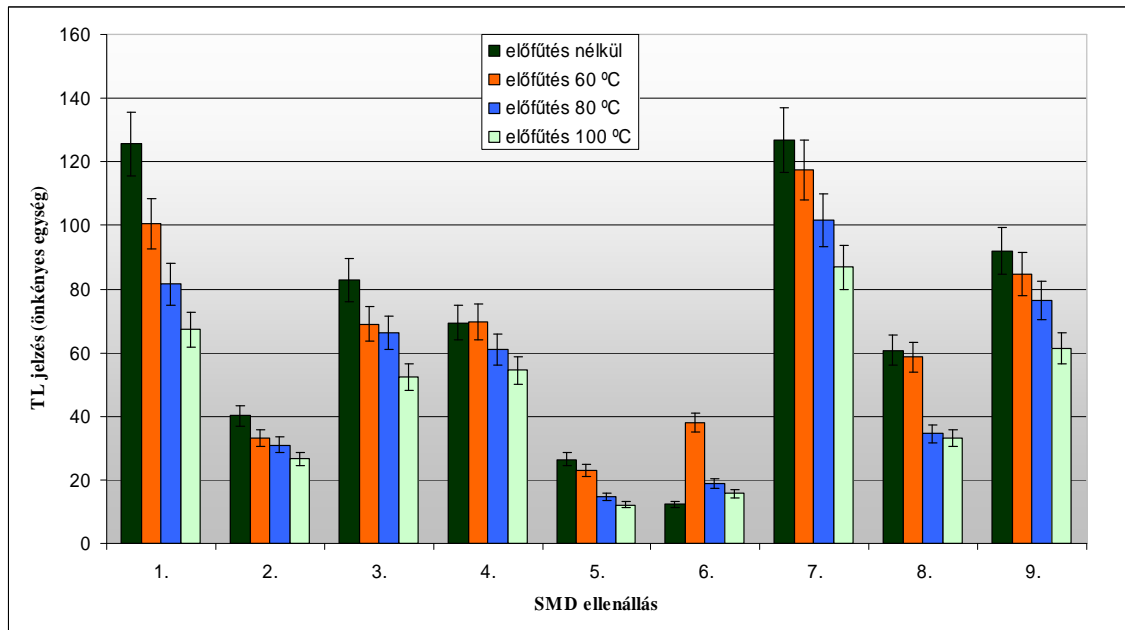
A 2. SMD ellenállás kifűtési görbéinek jellege (34. ábra) nem változik meg az előfűtés hatására. A dózis-válaszjel az előfűtés hatására csökkent, a csökkenés mértéke ellenállásonként is változik, emellett a csökkenés mértéke arányos az érzékenységgel is. A kevésbé érzékeny SMD ellenállások esetén ennek megfelelően a csökkenés is jellemzően kisebb, még ha egyedi eltérések is vannak az ellenállások között.



35. ábra: A 7. SMD ellenállás kifűtési görbéi előfűtést alkalmazva

A 7. SMD ellenállás a kiválasztott kilenc közül a legérzékenyebbnek bizonyult, és ezt a 35. ábra is bizonyítja. A többinél nagyobb csúcsok és csúcs alatti területek jellemzik a görbéket, amelyek a növekvő előfűtési hőmérsékletre következetesen csökkenő jelzést mutatnak a teljes intervallumon. A görbék természetesen már előfűtés nélkül is kedvező karakterisztikájúak, az előfűtés pedig csak javít a görbék alakján.

A kapott eredményeket összegezve megállapítottam, hogy a TL jelzés minden esetben csökkent, a diagramok egyszerűbben kiértékelhetőek. Az előfűtés alkalmazása esetén mért TL jelzéseket mind a kilenc ellenállás esetén egy összefoglaló diagramon a 36. ábrán tüntettem fel.

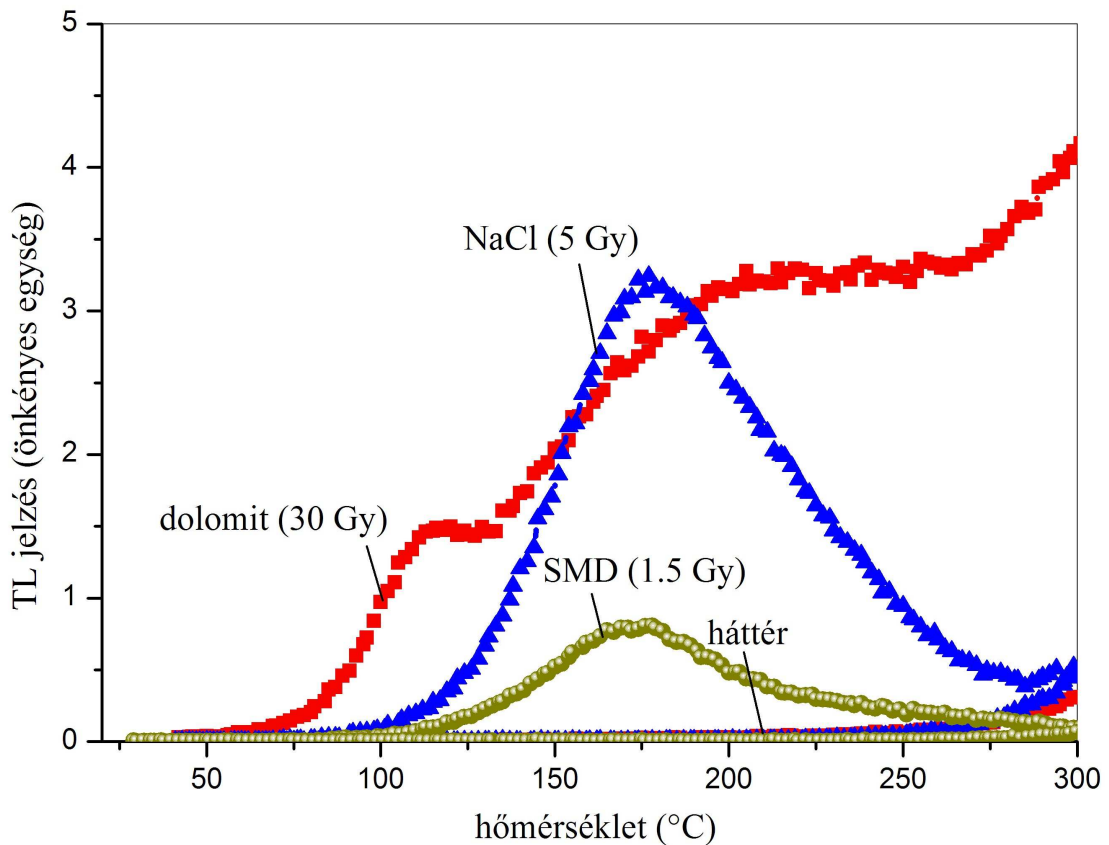


36. ábra: SMD ellenállások TL jelzései előfűtés alkalmazása esetén

Az előfűtés hatásának vizsgálati eredményei alapján megállapítható, hogy amennyiben a mérések kivitelezése esetén nem szükséges a legrövidebb idő alatt történő kiértékelésre törekedni, úgy 60 °C vagy 80 °C hőmérsékletű előfűtési lépés végrehajtása célszerű. A diagramok kiértékelhetősége jelentősen javítható, ám ennél nagyobb hőmérsékleten az információvesztés mértéke jelentőssé válhat. Különösen retrospektív dozimetriai felhasználás esetén kell ügyelni a lépés beiktatására vagy elhagyására, hiszen egy ismeretlen SMD ellenállás esetén, amennyiben érzékenysége viszonylag alacsony, könnyen törölhetjük az információt és elveszíthetjük a dózisbecslés lehetőségét.

V.2.7 A TL vizsgálatok áttekintő értékelése

Az *V.1* és *V.2* fejezet zárásaként a 37. ábrán feltüntettem a dolomit, a konyhasó és egy SMD ellenállás kifűtési görbéit egy diagramon.



37. ábra: Dolomit por (30 Gy), NaCl (5 Gy) és SMD ellenállás (1.5 Gy) TL kifűtési görbéi

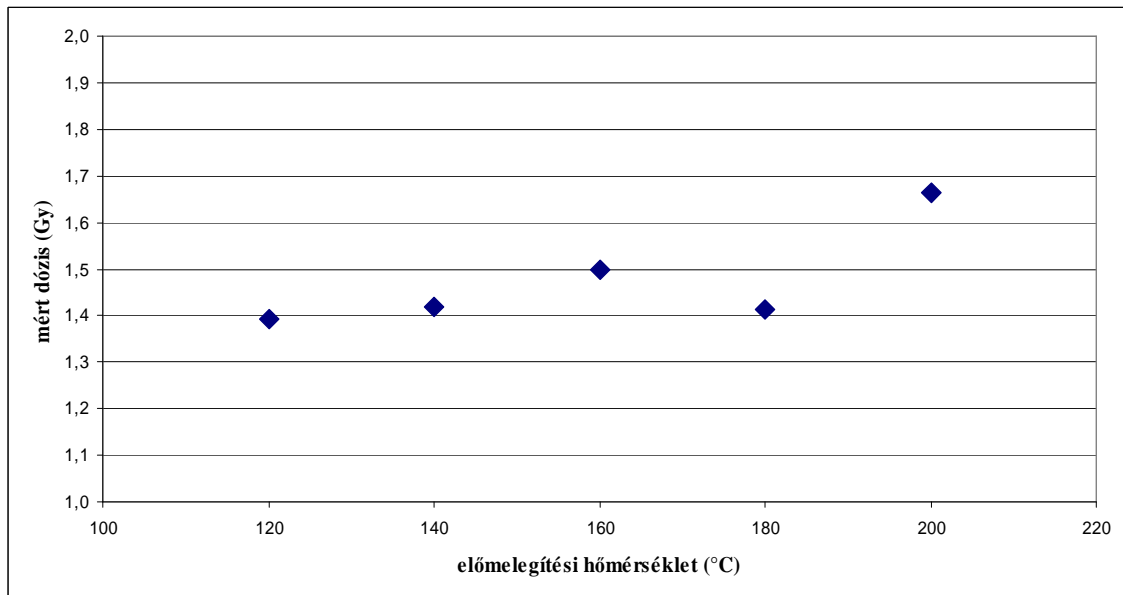
Az ábra kellőképpen szemlélteti az elért eredményekből levonható végső következtetést, miszerint a vizsgált anyagok kedvező lumineszcens tulajdonságai lehetővé teszik az utólagos dózisbecslést. Az SMD ellenállások különösen érzékenyek bizonyultak a vizsgált dózistartományban. A környezeti anyagok alkalmazása azonban nem hanyagolható el, hiszen dóziseloszlást az adott területről egy vészhelyzet esetén csak és kizárólag a környezetben található anyagok valamelyike által nyerhetünk.

V.3 Elektronikai alkatrészek OSL vizsgálata

Az eddig tárgyalt termolumineszcens kísérleteket az SMD ellenállások esetén optikailag stimulált lumineszcenciás kísérletek is kiegészítik, így a következőkben ezen eredmények bemutatására kerül sor.

A IV.2.2 fejezetben leírtaknak megfelelően az első lépés az optimális előfűtési hőmérséklet megállapítása. Az előre meghatározott dózis 1,43 Gy volt, a kiértékelést 90 °C hőmérsékleten 40 sec ideig hajtottuk végre kék megvilágítással. A hőmérséklet növekedése minden esetben $5\text{ °C} \cdot \text{sec}^{-1}$ volt, míg az előfűtés hőmérséklete 120 °C, 140 °C, 160 °C, 180 °C és 200 °C volt 10 sec ideig. Az így kapott mérési pontokat

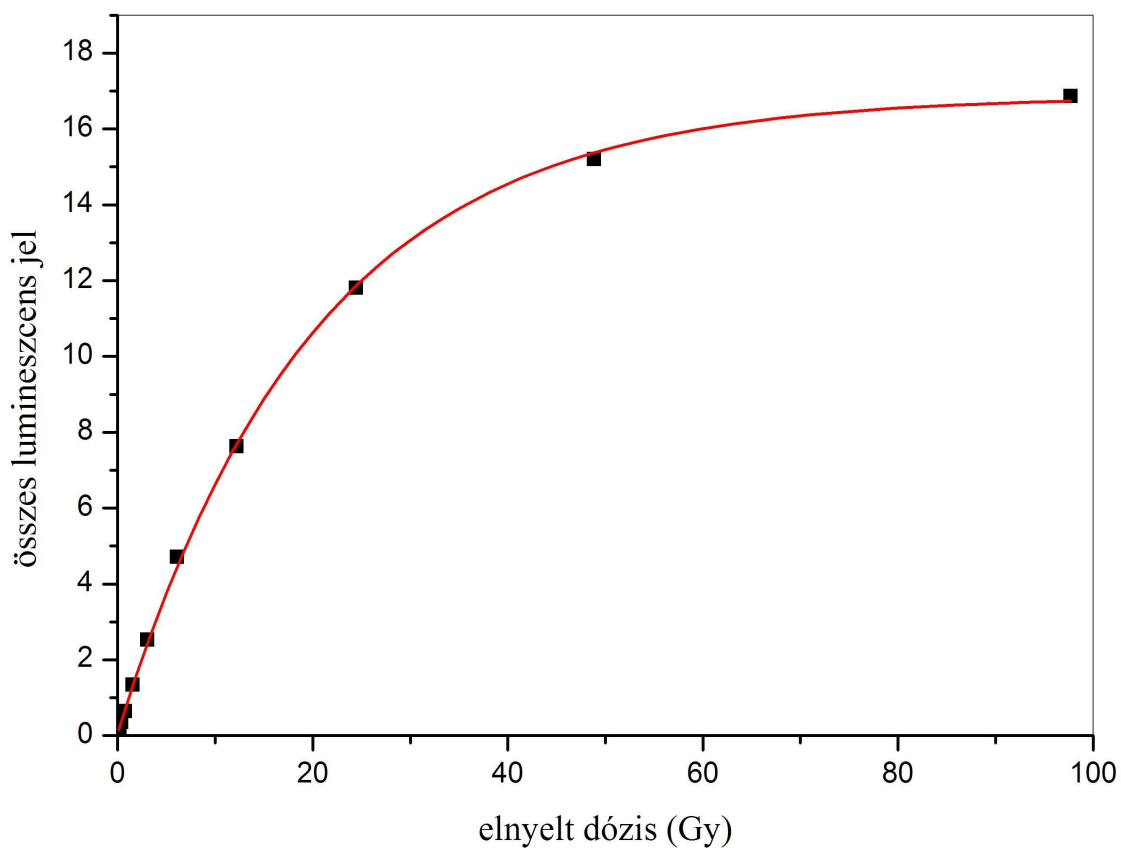
(mért dózisok) az előfűtési hőmérséklet függvényében ábrázolva egy úgynevezett platót kapunk. A 38. ábra a 9. SMD ellenállás esetén felvett platót mutatja.



38. ábra: A 9. SMD ellenállás OSL platója

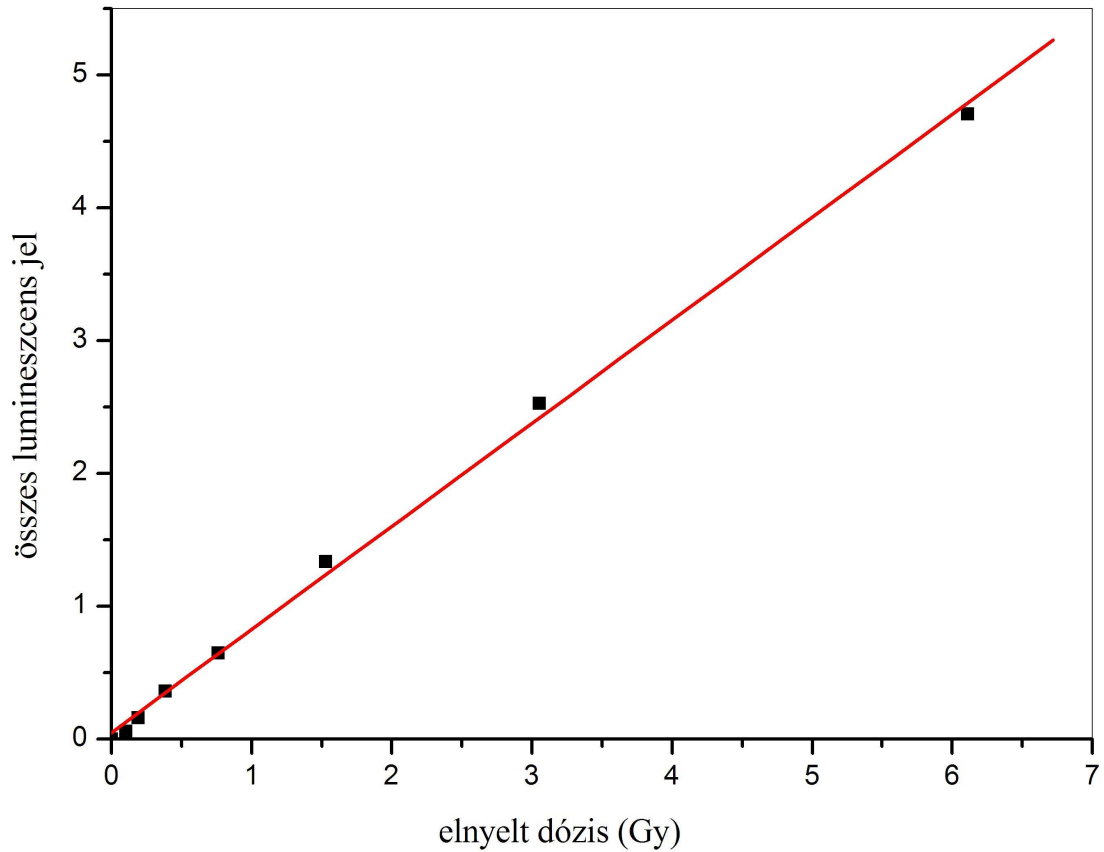
A diagramon két olyan pont látható, amelyik alkalmas lehet a további mérések elvégzésére. A 140 °C és 180 °C hőmérsékleten mért adatok közelítenek leginkább az eredeti dózishoz. Ennek megfelelően az alacsonyabb hőmérséklet mellett döntöttünk, tehát az előfűtés hőmérséklete 140 °C lett.

Az SMD ellenállások mérésekor 140 °C 10 sec ideig tartó előfűtés mellett 40 sec ideig 90 °C hőmérsékleten végeztük a kiértékelést. A mérési ciklusok végén 40 sec ideig 190 °C hőmérséklet alkalmazásával biztosítottuk a maradék információ törlését. A 9. SMD ellenállás esetén mért dózis-válasz görbe a 39. ábrán látható.



39. ábra: A 9. SMD ellenállás OSL dózis-válasz görbéje

A dózis-válasz görbe ábrázolásában megfigyelhető, hogy az alacsonyabb dózisok (<10 Gy) esetén igen jó közelítéssel lineáris OSZ jelzést kaptunk (40. ábra). A 10 Gy – 20 Gy tartományban a lumineszcens jel egyre kevésbé emelkedik tovább a dózissal, míg 40 Gy és 50 Gy között pedig már alig tapasztalható növekmény, a görbe szublineáris jelleget ölt (telítésbe megy), ám a dózis-válasz kapcsolat továbbra is egyértelmű.



40. ábra: A 9. SMD ellenállás OSL dózis-válasz görbéje 6 Gy alatti dózistartományban

Az alacsonyabb dózistartomány kinagyításánál jól megfigyelhető, hogy az SMD ellenállás OSL jele már igen kis dózisok (0.19 Gy, 0.38 Gy, 0.76 Gy) esetén is csaknem lineárisan növekvő, és ez a növekedés még a 10 Gy – 20 Gy dózistartományban is közel lineáris ($R^2=0.9979$).

VI. A MÓDSZER GYAKORLATI ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE

2010-ben BOOSTER néven az Európai Unió FP7 keretprogramjaként három éves kutatás indult. A projekt teljes neve: BiOdOSimteric Tools for triagE to Responders. A vállalt feladat olyan módszerek kifejlesztése volt, amelyek egy piszkos bomba bevetése után alkalmasak a sérültek gyors és hatékony elkülönítésére a helyszínen. A cél értelemszerűen a gyors orvosi beavatkozás lehetővé tétele súlyos esetekben (a váratlan esemény a lehető legkevesebb és kevésbé súlyos áldozattal járjon) illetve azon érintettek megnyugtatása, akik nem kaptak többlet sugárterhelést. Ehhez azonban a különféle a projekt során kifejlesztett vagy már létező, de továbbfejlesztett eljárások együttes alkalmazása szükséges, amelyet egy szintén a projekt keretein belül kifejlesztett informatikai program foglal egységes egészé. Az eredmény pedig a helyszín digitális leképezése, amelyen a különböző módszerek által rendelkezésre bocsátott dózisviszonyok is megjeleníthetők.

A BOOSTER projekt zárásaként 2013 májusában egy szimulációs gyakorlat került megrendezésre a KFKI sporttelepén. A gyakorlaton számos egymástól igen eltérő eljárás együttes, összehangolt alkalmazását mutatták be nemzetközi együttműködésben. A tudományos színvonal biztosítása érdekében a gyakorlat szervezői (OAH és MTA EK) független nemzetközi szakértőket kértek fel a módszerek értékelésére és minősítésére. A retrospektív dozimetria – mint módszer – a szakértői vélemények alapján sikerrel szerepelt, és egy esetleges vészhelyzetben eredményesen alkalmazható lenne.



41. ábra: Retrospektív dozimetria bemutatása a BOOSTER projekt keretein belül

VII. ÖSSZEFOGLALÁS

Az emberiség növekvő energiaigénye, a fogyatkozó fosszilis energiahordozók valamint a globális felmelegedéssel is kapcsolatos környezeti problémák – ésszerű megfontolások alapján – az atomenergia mind szélesebb körű felhasználását támasztják alá. Ugyanakkor a csernobili és fukusimai reaktor balesetek után és az esetleg radioaktív anyagok bevetésével („piszkos bomba”) is fenyegető terrorizmus következtében az atomtechnikára árnyék vetült, társadalmi megítélése jelentősen megromlott.

A bizalom visszaszerzésére a legjobb módszer a biztonság további növelése, a felmerülő kockázatokra adott legmegfelelőbb válasz pedig az esetleges eseményekre való felkészülés. A felkészülés első és legfontosabb eleme tehát a megelőzés, a másik pedig a következmények elhárítása vagy mérséklése.

A retrospektív dozimetria lehetőséget nyújt egy nukleáris vagy radioaktív anyaggal végrehajtott terrortámadás, baleset vagy egyéb kockázatot jelentő esemény után a lakosságot ért külső gamma sugárterhelés utólagos becslésére. A retrospektív dozimetriai módszerek igen szerteágazóak, a biológiai módszerektől egészen a fogpótlások vizsgálatáig sok mindent magukba foglalnak. A módszerek ugyan különbözően is használhatóak, azonban a gyakorlatban ezek együttese tekinthető hatékonynak és egymást támogató módszereknek.

A dolgozat célja környezeti anyagok és elektronikai alkatrészek retrospektív dozimetriai felhasználhatóságának vizsgálata illetve annak igazolása, hogy a kifejlesztett módszer életképes, és egy valós eseményt követően hatékonyan alkalmazható. Ezt szem előtt tartva vizsgáltam a kiválasztott anyagok dozimetriai tulajdonságait is különös figyelmet szentelve annak, hogy mely anyagok milyen feladatra használhatóak egy éles helyzetben.

A környezeti anyagok esetén igazoltam, hogy érzékenységük ugyan megfelelő, de a felejtésük nagy, a jelzés a besugárzást követően igen rövid időn belül lecsökken. Amennyiben a baleset vagy terrorcselekmény helyszíne rövid időn belül megközelíthető, és a mintavétel az eseményt követő 24-48 órán belül elvégezhető, úgy a módszer közvetve alkalmas lehet utólagos dózisbecslésre. A mészkő és a dolomit esetén arra a következtetésre jutottam, hogy TL kifűtési görbéik jellege kedvező, segítségükkel értékes információ nyerhető a környezeti dózisviszonyokról.

Az elektronikai alkatrészek vizsgálata során igazoltam azt a feltételezést, miszerint az Al_2O_3 kerámia alkatrészek anyagi tulajdonságuk miatt megfelelő lumineszcencia

tulajdonságokkal rendelkeznek ahhoz, hogy utólagos dozimetriai célra használhatóak legyenek. A dozimetriai jellemzésük során megállapítottam, hogy ezek az alkatrészek kis dózisok viszonylag pontos becslésére is lehetőséget biztosítanak, mivel eredeti funkciójuk és kivitelük mellett igen érzékenyek az ionizáló sugárzásra is. Bár az SMD ellenállások nem doziméternek készültek, ennek ellenére igen kedvező reprodukálhatóság érhető el alkalmazásuk esetén. Az optikailag stimulált lumineszcenciás vizsgálatok pedig igazolták, hogy a módszer további vizsgálatokra és fejlesztésre érdemes.

Összességében tehát megállapítható, hogy mind a környezeti anyagok, mind pedig az elektronikai eszközökben található alkatrészek alkalmazhatóak közvetve utólagos dózisbecslésre. A módszer és maga az eljárás együttesen akár valós vészhelyzetet követően is alkalmazhatóvá vált.

A doktori disszertáció zárásaként egy dózismérési protokollt készítettem. A leírás részletesen tartalmazza az elektronikai alkatrészek (személyekhez köthető dózisok) valamint a környezeti anyagok (környezeti dózisviszonyok, háttér) mérési utasításait és lépéseit. A leírás a Függelékben (3. Mérési utasítások) található.

RÖVIDÍTÉSEK ÉS MOZAIKSZAVAK

CW-OSL	–	folyamatos optikailag stimulált lumineszcencia
FISH	–	fluoreszcens in situ hibridizáció
IAEA	–	Nemzetközi Atomenergia Ügynökség
IBSS	–	Nemzetközi Biztonsági Alapszabályzat
ICRP	–	Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság
ICRU	–	Nemzetközi Sugárzási Mértékegység- és Mérésügyi Bizottság
EPR	–	elektron paramágneses rezonancia
LED	–	világító dióda
LM-OSL	–	lineárisan modulált optikailag stimulált lumineszcencia
OECD	–	Gazdasági Együtműködési és Fejlesztési Szervezet
OSL	–	optikailag stimulált lumineszcencia
PM	–	fotomultiplier/fotoelektronsokszorozó
POSL	–	pulzált optikailag stimulált lumineszcencia
RBE	–	relatív biológiai hatékonyság
RPL	–	radiofotolumineszcencia
SD	–	standard deviáció
SMD	–	surface-mount device
TL	–	termolumineszcencia
TLD	–	termolumineszcens doziméter
TSSE	–	termikusan stimulált exo-elektron emisszió
UNSCEAR	–	Egyesült Nemzetek Tudományos Bizottsága a Sugárzás Hatásainak Tanulmányozására

VIII. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Koen Beerten, Clemens Woda, Philip Vanhavere: Thermoluminescence dosimetry of electronic components from personal objects, *Radiat. Meas.*,44 (2009), pp.,620-625
- [2] E. L. Inrig, D.I. Godfrey-Smith, S. Khanna: Optically stimulated luminescence of electronic components for forensic, retrospective and accident dosimetry, *Radiat. Meas.*, 43 (2008), pp., 726-730
- [3] Kanyár Béla, Béres Csilla, Somlai János, Szabó S. András: Radioökológia és környezeti sugárvédelem, 2000, Veszprém. Veszprémi Egyetemi Kiadó ISBN 963 9220 31 0
- [4] Kortov, V.: Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future trends, 2007, *Radiation Measurements* 42, 576-581
- [5] Fehér István, Deme Sándor: Sugárvédelem, 2010, Budapest, ELTE Eötvös Kiadó, ISBN: 978 963 284 080 2
- [6] McKeever, S. W. S., Moscovitch, M.: On the advantages and disadvantages of optically stimulated luminescence dosimetry and thermoluminescence dosimetry, 2003, *Radiation Protection Dosimetry* 104, 263-270
- [7] International Atomic Energy Agency: INES The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual 2008 Edition, 2009, Vienna
- [8] http://www.haea.gov.hu/web/v2/portal.nsf/html_files/INES letöltve: 2012. augusztus 22. 14:25
- [9] Somlai János: A radioaktív anyagok, mint az „örök élet elixírjei?”, 2011, Veszprém, Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet ISBN 978-963-08-1074-6

- [10] http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0000016.EUM, letöltve: 2014-01-22, 14:45
- [11] Somlai János: Esetek sugárbaesetek, 2008, Veszprém, Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet ISBN 978-963-06-4366-5
- [12] International Commission on Radiological Units and Measurements, Retrospective assessments of exposure to ionizing radiation (Report 68.), J. ICRU 2 (2002)
- [13] Inrig, Elizabeth Lynne: Retrospective dosimetry using optically stimulated luminescence of electronic components, 2009, ProQuest Dissertations and Theses, PhD dissertation
- [14] Molnár Kolos, Solymosi József: Alfa-sugárzó anyagok alkalmazása a radiológiai terrorizmusban, 2008, Hadmérnök, III. évfolyam, 1. szám
- [15] Dr. Kovács András, Dr. Kelemen András, Dr. Vajda-Katona Tünde: Retrospektív dozimetria illicit és safeguards célú alkalmazását bemutató tanulmány, 2008, Budapest, MTA Izotópkutató Intézet, OAH-ÁNI-ABA-05/08
- [16] Bøtter-Jensen, L., Banerjee, D. Jungner, H., and Murray, A. S.: Retrospective assessment of environmental dose rates using optically stimulated luminescence from $Al_2O_3:C$ and quartz, 1999, Radiation Protection Dosimetry 84, pp. 537-542
- [17] E. A. Ainsbury, E. Bakhanova, J. F. Barquinero, M. Brai, V. Chumak, V. Correcher, F. Darroudi, P. Fattibene, G. Gruel, I. Guclu, S. Horn, A. Jaworska, U. Kulka, C. Lindholm, D. Lloyd, A. Longo, M. Marrale, O. Monteiro Gil, U. Oestreicher, J. Pajic, B. Rakic, H. Romm, F. Trompier, I. Veronese, P. Voisin, A. Vral, C. A. Whitehouse, A. Weiser, C. Woda, A. Wojcik and K. Rothkamm: Review of retrospective dosimetry techniques for external ionising radiation exposures, 2010, Radiation Protection Dosimetry, pp. 1-20

- [18] Bailiff, I. K.: The use of ceramics for retrospective dosimetry in the Chernobyl exclusion zone, 1995, *Radiation Measurements* 24, Number 4, 507-511
- [19] Bøtter-Jensen, L. Mejdahl, V.: Retrospective radiation dose reconstruction using optically stimulated luminescence on natural minerals, 1994, The proceedings of the international workshop on scientific bases for decision making after a radioactive contamination of an urban environment, IAEA TECDOC, Rio de Janeiro and Goiania, Brazil, IAEA
- [20] Daniela Ekendahl, Libor Judas: Retrospective dosimetry with alumina substrate from electronic components, 2012, *Radiation Protection Dosimetry* 150 (2), 134-141
- [21] Göksu, H. Y., Telephone chip-cards as individual dosimeters, 2003, *Radiation Measurements* 37, 617-620
- [22] M. Discher, C. Woda, I. Fiedler: Improvement of dose determination using glass display of mobile phones for accident dosimetry. 2013, *Radiation Measurements*, in press
- [23] V. G. Skvortsov, A. I. Ivannikov, V. F. Stepanenko, A. F. Tsyb, L. G. Khamidova, A. E. Khondrashov, D. D. Tikunov: Application of EPR retrospective dosimetry for large-scale accidental situation, 2000, *Applied Radiation and Isotopes* 52, 1275-1282
- [24] Davies, J. E.: On the use of dental ceramics as a possible second-line approach to accident irradiation dosimetry, 1979, *Radioprotection* 14, 89-97
- [25] Mauricio C. L. P., L. A. R. Rosa and P. G. Cunha: Accident dosimetry using the TL from dental restoration porcelains, 1985, *Radiation Protection Dosimetry* 11, 185-188
- [26] Kelemen András: Termikusan stimulált, optikailag és sugárzással gerjesztett lumineszcencia alkalmazása doziméter alapanyagok és röntgenfoszforok

vizsgálatában, doktori (PhD) értekezés, 2003, Eötvös Lóránd Tudományegyetem,
Természettudományi Kar

- [27] Bernard Valeur, Mário N. Berberan-Santos: A Brief History of Fluorescence and Phosphorescence before the Emergence of Quantum Theory, *J. Chem. Educ.* 2011, 88(6), pp. 731-738
- [28] J. W. Hastings: Biological Diversity, Chemical Mechanisms, and the Evolutionary Origins of Bioluminescent Systems, 1983, *J. Mol. Evol.*, Vol. 19:309-321
- [29] John G. Burr: Chemi- and bioluminescence, 1985, Marcel Dekker Press, New York, ISBN: 9780824772772
- [30] M. Barsanti, F. Maccarrone: Crystalloluminescence, 1991, *La Rivista Del Nuovo*, Vol. 14, No. 6, 1-67
- [31] Donald G. Fink, H. Wayne Beaty: Standard Handbook for Electrical Engineers, 1978, The Kingsport Press, 11th edition, ISBN: 978-0070209749
- [32] B. G. Yacobi, D. B. Holt: Cathodoluminescence Microscopy of Inorganic Solids, 1990, Plenum Press, New York, ISBN: 0-306-43314-1
- [33] Nathan C. Eddingsaas, Kenneth S. Suslick: Mechanoluminescence: Light from sonication of crystal slurries, 2006, *Nature*, 444, 163
- [34] Yoshizo Kawaguchi: Fractoluminescence in Minerals, Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology, 1999, Volume 149, Issue 1-4, 131-135
- [35] W. G. Cady: Piezoelectricity: 1946, McGraw-Hill, New York
- [36] Linda M. Sweeting, Arnold L. Rheingold, Joanne M. Gingerich, Alan W. Rutter, Rebecca A. Spence, Christopher D. Cox, Terry J. Kim: Crystal Structure an

- Triboluminescence 2.9-Anthracenecarboxylic Acid and Its Ethers, 1997, Chem. Mater. 9, 1103-1115
- [37] Hadis Morkoc: Handbook of Nitride Semiconductors and devices, 2008, WILEY-VCH, ISBN: 978-3-527-40838-2
- [38] J. W. Verhoeven: Glossary of terms used in photochemistry (IUPAC Recommendations 1996), 1996, Pure & Appl. Chem., Vol. 68, No. 12., pp. 2223-2286
- [39] McKeever, S. W. S., Moscovitch, M., Townsend, P.D.: Thermoluminescence Dosimetry Materials: properties and uses, 1995, Nuclear Technology Publishing, Asford
- [40] S. J. Putterman: Sonoluminescence: Sound into light, 1995, Scientific American 272 (2): pp. 46–51. ISSN 0036-8733
- [41] McKeever, S.W.S.: Thermoluminescence of Solids, 1985, Cambridge University Press, ISBN 0 521 24520 6
- [42] L. Solymar, D. Walsh: Szilárdtestek elektromos tulajdonságai, 1972, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [43] Daniels, F., Boyd, C. A., and Saunders, D. F.: Thermoluminescence as a research tool, 1953, *Science*, 117, 343-349
- [44] Horowitz, Y.S. (ed.). Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry. ,1984, Vol. I - III. Boca Raton, Florida: CRC Press
- [45] Aitken, M. J.: Physics and Archeology, 1974, Oxford University Press, Oxford, UK, ISBN: 0198519222
- [46] Aitken, M. J.: Thermoluminescence Dating, 1985, Academic Press, London, UK, ISBN: 0-12-046380-6

- [47] Paweł Olko: Advantages and disadvantages of luminescence dosimetry, 2010, Radiation Measurements 45, 506-511
- [48] Reuven Chen, Stephen W. S. McKeever: Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena, 1997, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, ISBN 9810222956
- [49] Claudio Furetta, Pao-Shan Weng: Operational Thermoluminescence Dosimetry, 1998, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, ISBN 9810234686
- [50] Godfrey-Smith, D. I.: Applicability of moissanite, a monocrystalline form of silicon carbide to retrospective and forensic dosimetry, 2006, Radiation Measurements 41, 976-981
- [51] B. Yang, Q. Lu, S. Wang, P. D. Townsend: Studies on the thermoluminescence spectra and thermal stability of Li:Mg,Cu, Li:Mg,Cu,Na and Li:Mg,Cu,Si, 2005, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Volume 239, Issue 3, 171-178
- [52] Mansi Rameshchandra Shah: Development and characterization of neutron-sensitive optically stimulated luminescence (OSL) detectors, 2009, Master of Science, Oklahoma State University, ISBN: 9781109618570
- [53] Ramona Gaza: Space radiation dosimetry: an optically stimulated luminescence radiation detector for low-earth orbit, 2004, Oklahoma State University, PhD dissertation
- [54] Enver Bulur: An alternative technique for optically stimulated luminescence (OSL) experiment, 1996, Radiation Measurements 26, 701-709
- [55] L. Bøtter-Jensen, A. S. Murray: Optically stimulated luminescence techniques in retrospective dosimetry, 2001, Radiation Physics and Chemistry 61, 181-190

- [56] Yukihiro, E. G., Giza, R., McKeever, S. W. S., Soares, C. G.: Optically stimulated luminescence and thermoluminescence efficiencies for high-energy heavy charged particle irradiation in $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, 2004, *Radiation Measurements* 38, 59-70
- [57] Preciado-Flores, S., Meléndrez, R., Chernov, V., Pedroza-Montero, M., Bernal, R., Cruz-Vázquez, C., Brown, F., Cruz-Zaragoza, E. and Barboza-Flores, M.: Detection and dose assessment of irradiated herbs and spices of Mexican origin by optically stimulated luminescence, 2007, Book of abstracts, 15th International Conference on Solid State Dosimetry, Delft, The Netherlands
- [58] McKeever, S. W. S., Markey, B. G., Akselrod, M. S.: Pulsed optically stimulated luminescence dosimetry using $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, 1996, *Radiation Protection Dosimetry* 65, 267-272
- [59] D.J. McDougall: *Thermoluminescence of geological materials*, London and New York, 1968, Academic Press
- [60] W. L. Medlin: Thermoluminescence Growth Curves in Calcite in *Thermoluminescence of geological materials*, Ed. D.J. McDougall, 1968, London and New York, Academic Press p.91
- [61] D.R. Lewis: Effect of Grinding on Thermoluminescence of Dolomite, Calcite and Halite in *Thermoluminescence of geological materials*, Ed. D.J. McDougall, 1968, London and New York, Academic Press p.91
- [62] Becker, K., *Solid State Dosimetry*, 1973, CRC Press, Boca Raton
- [63] Osvay, M., Biró, T.: Aluminium oxide in TL dosimetry, 1980, *Nuclear Instruments and Methods* 175, pp. 60-61
- [64] JCGM 100:2008, GUM: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008, ISO

- [65] Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt: NIST Technical Note 1297 (1994): Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results
- [66] P. G. Hunter, N. A. Spooner, B. W. Smith, D. F. Creighton: Investigation of emission spectra, dose response and stability of luminescence from NaCl, 2012, Radiation Measurements 47, pp. 820-824
- [67] Á. Török: Formation of dolomite mottling in Middle Triassic ramp carbonates (Southern Hungary), 2000, Sedimentary Geology, Volume 131, Issue 3 – 4, pp. 131-145
- [68] <http://hippurites.hupont.hu/3/titokzatos-kozetunk-a-dolomit>, letöltve: 2014-02-18, 13:13
- [69] <http://www.dnr.mo.gov/geology/geosrv/imac/limestone.htm>, letöltve: 2013-08-13, 14:28
- [70] Akselrod, M.S., Kortov, V.S., Kravtsevsky, D.J., Gotlib, V.I.: Highly sensitive thermoluminescent anion-defective α -Al₂O₃:C single-crystal detectors, Radiation Protection Dosimetry 32 (1) 1990, 15-20
- [71] M. S. Akselrod, V. S. Kortov and E. A. Gorelova: Preparation and properties of α -Al₂O₃:C, Radiation Protection Dosimetry Vol. 47 (1993), 159-164
- [72] MEDUS Ltd.: Certificate of quality Artificial corundum single crystal TLD-500K
- [73] <http://nightowl.sote.hu/sugtanf/kanyar1.pdf>, letöltve: 2014-01-22,10:29

IX. A DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

1. Igazoltam, hogy a vizsgálatokra kiválasztott elektronikai eszközökben található felületszerelt alkatrészek, valamint egyes kiválasztott környezeti anyagok a retrospektív dozimetria szempontjából kedvező lumineszcens tulajdonságokkal rendelkeznek. Megállapítottam, hogy ezek az anyagok olyan TL és OSL tulajdonságokkal rendelkeznek (válaszjel és dózis lineáris kapcsolata, felejtés), amelyek alapján vizsgálatukkal lehetséges az elnyelt sugárdózis retrospektív meghatározása. Kimutattam, hogy a mérések pontossága a lumineszcens dozimetria más területein is alkalmazott előfűtés alkalmazásával tovább növelhető. Ennek alapján ezen anyagok - alkalmasan megválasztott berendezés, mintaelőkészítés és mérési eljárás alkalmazásával - lehetőséget biztosítanak a személyi sugárterhelés retrospektív becslésére.

2. Bebizonyítottam, hogy az általam kidolgozott értékelési módszer, Al_2O_3 alapanyagú elektronikai alkatrészek felhasználásával alkalmas valamely, előre nem látható, ellenőrizetlen sugárzással járó esemény (radioaktív anyagokkal kapcsolatos baleset vagy terrorcselekmény) következményeként az érintetteket ért személyi dózisok becslésére a 30 mGy – 1440 mGy dózistartományban. Az eljárás minden olyan esetben alkalmazható, ahol az esetleges sugárterhelés utólagos megállapítása a cél.

3. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált környezeti anyagok (konyhasó, dolomit, mészkő) néhány dozimetriai tulajdonság, úgymint érzékenység és felejtés tekintetében kevésbé kedvezőek, mint az Al_2O_3 alapanyagú felületszerelt ellenállások. Alkalmazásukkal azonban mégis lehetséges a rendkívüli esemény következtében kialakult térbeli dóziseloszlás feltérképezése és ennek alapján a helyszínen tartózkodott személyek dózisének becslése. Ez kiegészítheti, illetve szükség esetén helyettesítheti a testközeli tartott elektronikai alkatrészek mérése alapján végezhető dózisbecslést.

X. THESES OF THE PHD DISSERTATION

1. I justified that the selected surface-mount components located in electronic devices and some environmental materials have favourable luminescent properties. I stated, that these materials have favourable TL and OSL properties (response and dose relation is linear, fading), which make it possible to retrospectively determine the absorbed dose. I have demonstrated as well, that the accuracy of the measurements could be increased using preheating of the samples. These materials - using properly chosen equipment, sample-preparation and measurement procedure - offer the possibility of estimating the radiation dose retrospectively.

2. I proved, that the method developed using Al_2O_3 as main component of electronic devices is favourable for the personal dose estimation of the affected people involved in an event causing uncontrolled radiation (accident involving radioactive materials or terror attack). The procedure can be used in such cases, when the aim is the determination of personal radiation exposure.

3. I have shown, that some environmental materials (table salt, dolomite, limestone) can also be used for retrospective dosimetry. I have stated that some dosimetric characteristics of the environmental materials (like sensitivity and fading) are less favourable than the characteristics of the Al_2O_3 made surface-mount devices. The application of environmental materials in the affected area makes possible the determination of the dose distribution in the vicinity of the unexpected event and consequently the estimation of the personal doses too, which can replace or contribute to the dose measurement using the electronic devices kept upon the body of the person.

XI. ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK JEGYZÉKE

Idegen nyelvű tudományos publikációk

D. Mesterházy, M. Osvay, A. Kovács, A. Kelemen,: Accidental and retrospective dosimetry using TL method, Radiat. Phys. Chem. ,Volume 81, September 2012, Pages 1525-1527

A. Kelemen, D. Mesterházy, M. Ignatovych, V. Holovey: Thermoluminescence characterization of newly developed Cu-doped lithium tetraborate materials, Radiat. Phys. Chem. , Volume 81, Issue 9, September 2012, Pages 1533-1535

D. Mesterházy, M. Osvay, A. Kovács, A. Kelemen: Retrospective dosimetry using TL/OSL method, Progress in Nuclear Science and Technology, 2013

A. Kelemen, I. Kása, P. Mell, D. Mesterházy: Effect of the Cu co-activator on the charge-carrier trapping efficiency in CaSO₄:Tm,Cu, Radiation Measurements, 2013

Magyar nyelvű publikációk

Mesterházy Dávid, Kovács András, Kasztovszky Zsolt: Beszámoló a “Regional Training course on Demonstration of Techniques for Cultural Heritage Protection” rendezvényről, Archeometriai Műhely, elektronikus folyóirat, HU ISSN 1786-271X, 2011, elérhető: <http://www.ace.hu/am/>

Előadások

2010. április 27 - 29. XXXV. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló
Totál dekontaminációs technológia fejlesztése kiszerezhető atomipari berendezések sugármentesítésére, magyar nyelvű előadás, Mesterházy Dávid

2010. október 20 - 22. Őszi radiokémiai napok, Keszthely
Termolumineszcens doziméterek újabb alkalmazási lehetőségei, magyar nyelvű előadás, Mesterházy Dávid, Osvay Margit, Kovács András, Kelemen András
2011. május 3 - 5. XXXVI. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, Hajdúszoboszló
Elektronikai alkatrészek vizsgálata retrospektív dozimetriai célra, magyar nyelvű előadás, Mesterházy Dávid, Osvay Margit, Kovács András, Kelemen András
2011. augusztus 27- szeptember 1. Tihany Symposium on Radiation Chemistry
Accidental and retrospective dosimetry using TL method, angol nyelvű előadás, Dávid Mesterházy, Margit Osvay, András Kovács, András Kelemen
2011. október 4. MTA Matematikai és Természettudományi Szakbizottság, fiatal kutatók meghallgatása, Baleseti és retrospektív dozimetria TL módszerrel, magyar nyelvű előadás
Mesterházy Dávid, Osvay Margit, Kovács András, Kelemen András
2011. november 10. 36. Nemzetközi restaurátor konferencia, Budapest
Kulturális örökségünk megóvása besugárzásos módszerrel: lehetőségek Magyarországon, magyar nyelvű előadás
Mesterházy Dávid, Kovács András
2012. április 24 - 26. XXXVII. Sugárvédelmi továbbképző tanfolyam, Hajdúszoboszló
TL/OSL technika alkalmazása retrospektív dozimetriai célra, magyar nyelvű előadás,
Mesterházy Dávid, Osvay Margit, Kovács András, Kelemen András
2012. június 18. MTA Energiatudományi Kutatóintézet Tudományos tanács ülése
TL/OSL technika alkalmazása retrospektív dozimetriai célra, magyar nyelvű előadás, Mesterházy Dávid, Osvay Margit, Kovács András, Kelemen András, másodéves doktori beszámoló
2012. szeptember 2 - 7. International Conference on Radiation Shielding, Nara, Japan
Retrospective dosimetry using TL/OSL method, angol nyelvű előadás

Dávid Mesterházy, Margit Osvay, András Kovács, András Kelemen

2013. EK Iskola, MTA székház

Retrospektív dozimetria nukleáris törvényszéki és baleseti alkalmazási lehetőségei

Dávid Mesterházy, András Kovács, András Kelemen

Nemzetközi konferenciák és tréningek

2010. október 4 - 8. - Regional Training Course on Radiation Protection of the Environment, Athens, Greece (IAEA) – NAÜ tréning

2011. május 9 - 13. - Regional Training Course on Demonstration of Techniques for Cultural Heritage Protection, Magurele, Romania (IAEA) – NAÜ tréning

2011. július 11 - 15. - Regional Training Course Characterization of Cultural Heritage Objects, Ankara, Turkey (IAEA) – NAÜ tréning

2011. augusztus 27 - szeptember 2. - Regional Workshop on Feasibility Studies for the Establishment of Radiation Processing Facilities, Zalakaros, Hungary (IAEA) – NAÜ tréning

2011. október 24 - 28. - Regional Training Course on IAEA Validation and Process Control for Gamma Radiation Processing, Budapest, Hungary, (IAEA) – NAÜ tréning

2012. szeptember 2 - 7. International Conference on Radiation Shielding, Nara, Japan

2012. november 5 - 9. - Regional Training Course on Enhancing the Characterization, Preservation and Protection of Cultural Heritage Artefacts, Sacavem, Portugal, (IAEA) – NAÜ tréning

Kutatási jelentések

Kelemen András, Mesterházy Dávid: Elektronikai alkatrészek lumineszcencia tulajdonságainak vizsgálata retrospektív (utólagos, baleseti, törvényszéki) dozimetriai alkalmasságuk megállapításának céljából (OAH-ÁNI-ABA-10/13, Budapest, 2010)

Almási István, Nguyen Cong Tam, Hlavathy Zoltán, Mesterházy Dávid: NAH tartályok átszállítás előtti mérése a 4500321747 vállalozási szerződés 3.3 pontja teljesítése (Budapest, 2010. december 15.)

Almási István, Hlavathy Zoltán, Mesterházy Dávid: SFAT mérések a 2-es blokki pihentető medencékben a 4500365878 vállalozási szerződés 3.2 pontja 2. részjelentése 4500365878 (Budapest, 2011. augusztus 16.)

FÜGGELÉK

1. A dózismennyiségeket összefoglaló táblázat [73]

Megnevezése és jele	Rövid leírása	Mértékegysége	Érvényessége, megjegyzések
Elnyelt dózis, D	Besugárzott anyagban elnyelt energia osztva az elnyelő tömegével.	1 Gy ($J \cdot kg^{-1}$)	Mindenfajta ionizáló sugárzásra és elnyelő anyagra értelmezhető, azonban a biológiai hatást egymagában nem jellemzi.
Egyenérték dózis, H_T	Elnyelt dózis szorozva a sugárzás fajtájára jellemző súlytényezővel.	1 Sv ($J \cdot kg^{-1}$)	Emberi szövetekre és szervekre ≈ 1 Sv dóziséig használható. Jellemző a szövetek, szervek biológiai, egészségkárosító hatására.
Effektív dózis, E	Egyenérték dózis és a szöveti súlytényezők szorzatának összege.	1 Sv ($J \cdot kg^{-1}$)	A szöveti súlytényezők összege 1. Emberi egésztestre alkalmazható 1 Sv dóziséig.
Környezeti dózisegyenérték, $H^*(d)$	ICRU fantomban, különböző irányban és mélységben mért dózis.	Sv	Terület és munkahelyi ellenőrzésre szolgál.
Személyi dózisegyenérték, $H_p(d)$	ICRU fantomban, különböző irányban és mélységben mért dózis.	Sv	Személyi sugárterhelés ellenőrzésére szolgál.
Besugárzási dózis	Levegőben keletkező töltés és tömeg hányadosa.	R (röntgen)	Csak γ és röntgen-sugárzásra, levegő elnyelő közeg esetén használható, SI-n kívüli egység.
Lekötött dózis	Szervezetbe került radioaktív anyagoktól 70 (gyermekek) és 50 (felnőttek) év időtartamra integrálva.	Gy, Sv	Csak belső dózissnál használatos.
Kollektív dózis, S	Több személyre egy populáció egyéni dózisainak összege.	személy \cdot Gy, személy \cdot Sv	Társadalmi kockázat jellemzésére szolgál néhány mSv-től néhány 100 mSv-ig.
Dózislekötés	Szervezetbe került radioaktív anyagoktól $t=\infty$ -ig integrálva.	személy \cdot Gy, személy \cdot Sv	Hirtelen szennyeződést követően több generációra kiterjedő kollektív dózis.

2. Az SMD ellenállások kiértékelésekor kapott eredmények (a táblázatban feltüntetett értékek nettó területeket jelölnek)

SMD ellenállás	Dózis (mGy)				
	90	180	360	720	1440
1.	85.436	107.717	193.620	295.792	322.276
2.	21.248	31.696	72.015	108.693	121.517
3.	44.400	87.701	139.535	259.740	276.937
4.	48.628	88.688	146.712	194.997	298.187
5.	9.728	23.950	39.374	52.729	98.652
6.	19.086	43.592	64.293	74.249	135.623
7.	77.818	144.452	240.063	415.420	420.489
8.	24.178	54.220	87.497	108.927	164.859
9.	49.840	47.056	180.865	268.168	286.916

3. Mérési utasítások

A. Személyi retrospektív dozimetria

Az érintett személyektől összegyűjtjük mobiltelefonjaikat. Mindegyikre elhelyezzük tulajdonosuk egyéni azonosítóját. A készülékeket szétszereljük, és az alaplapról eltávolítjuk, kinyerjük a felületszerelt ellenállásokat. A szétszerelés majd a kinyert ellenállásokkal kapcsolatos minden tevékenység a napfény kizárásával, sötétben, vörös fényű megvilágítás mellett történik. Néhány ellenállásból álló csoportokat vizsgálunk egyszerre. Elsőként a baleset/terrortámadás következtében történt besugárzás eredményeként létrejött lumineszcenciát mérjük meg. Ezt követi a csoporton végzett kalibráció: ismert dózissal történő besugárzás és a hatásukra létrejött lumineszcencia mérése. 0.01, 0.1 és 1 Gy lesznek kalibrációs dózissok. A kalibrációs pontokra alapozva lineáris közelítéssel becslést adunk az ismeretlen dózissra.

A mérésvezérlést és a kalibrációt, ill. a dózisbecslést számítógépes program segítségével végezzük. Az eredményeket egy ASCII formátumú adatfájlba írjuk, amelyben egy rekord az érintett személy azonosítóját és a telefonjából származó ellenállások alapján megbecsült dózisértéket tartalmazza.

A mérés lépései egy személyre/mobiltelefonra vonatkozóan:

1. A telefon szétszerelése
2. Az alaplemez kiemelése
3. Néhány (6-10 db) felületszerelt ellenállás eltávolítása mechanikus úton egy késszerű speciális szerszám segítségével
4. Az ellenállásokat egy azonosítóval ellátott kis dobozba gyűjtjük
5. Bekapcsoljuk a hordozható műszert és a számítógépet
6. Elindítjuk a mérésvezérlő szoftvert
7. Az ellenállásokat a műszer mintatartójába helyezzük
8. A mintatartót „mérés” állásba toljuk
9. Elvégezzük az OSL mérést
10. A mérés végeztével a mintatartót „besugárzás” állásba állítjuk
11. Elindítjuk az 1. kalibrációs besugárzást
12. A besugárzás végeztével a mintatartót „mérés” állásba toljuk.
13. Elvégezzük az 1. kalibrációs mérést
14. A mérés végeztével a mintatartót „besugárzás” állásba állítjuk
15. Elindítjuk a 2. kalibrációs besugárzást
16. A besugárzás végeztével a mintatartót „mérés” állásba toljuk.
17. Elvégezzük a 2. kalibrációs mérést
18. A mérés végeztével a mintatartót „besugárzás” állásba állítjuk
19. Elindítjuk a 3. kalibrációs besugárzást
20. A besugárzás végeztével a mintatartót „mérés” állásba toljuk.
21. Elvégezzük a 3. kalibrációs mérést
22. A 3. kalibrációs mérés elvégzése után a szoftver kiszámítja az ismeretlen dózis becült értékét és az eredményt az adatfájlba elmenti.

Az 1-22. lépéseket minden személyre/telefonra megismételjük.

B. Környezeti retrospektív dozimetria

A mintákat az esemény helyszínén gyűjtjük. Igyekszünk homokot, mészkövet vagy dolomitot találni, a gyűjtés helyének GPS koordinátáit feljegyezzük, és a mintatartón feltüntetjük. A mintákat beszállítjuk a laboratóriumba. A nagyobb darabokat porítjuk, őröljük. A kapott porral egy fém mintatartót töltünk meg, és azt a TL készülék fűtőtálcájára helyezzük. Felvesszük a kifűtési görbét, és kijelöljük a csúcs

alatti terület határait (ROI). Ezt követően kalibrációs méréseket végzünk 3 ismert dózissal történő besugárzás után, valamint ezeket követően a már kiolvasott minta segítségével felvesszük a háttérét. Ezen 5 mérés (ismeretlen, 3 kalibráció, háttér) alapján kiszámítjuk a becsült dózist, amit a GPS koordinátákhoz rendelve az ASCII formátumú adatfájlban rögzítünk. Az adatfájlt időről időre – a személyi adatokhoz hasonlóan – eljuttatjuk a központi adatgyűjtő számítógéphez.

A mérés lépései:

1. A TL olvasó és számítógép bekapcsolása
2. A TL szoftver elindítása
3. A minta elhelyezése a fűtőtálcán
4. A fotoelektronszorzó (PM) mérési helyzetbe állítása
5. Nagyfeszültség (HV) bekapcsolása
6. A TL mérés indítása
7. A kifűtési görbe (S) mentése
8. HV kikapcsolása
9. A rendszer hűlése szobahőmérsékletre
10. A besugárzó elhelyezése a mérőtálka felett
11. 1. kalibráló besugárzás elvégzése
12. A besugárzó eltávolítása
13. PM mérési helyzetbe állítása
14. HV bekapcsolása
15. A TL mérés indítása
16. A kifűtési görbe (C1) mentése
17. HV kikapcsolása
18. A rendszer hűlése szobahőmérsékletre
19. A besugárzó elhelyezése a mérőtálka felett
20. 2. kalibráló besugárzás elvégzése
21. A besugárzó eltávolítása
22. PM mérési helyzetbe állítása
23. HV bekapcsolása
24. A TL mérés indítása
25. A kifűtési görbe (C2) mentése

26. HV kikapcsolása
27. A rendszer hűlése szobahőmérsékletre
28. A besugárzó elhelyezése a mérőtálka felett
29. 3. kalibráló besugárzás elvégzése
30. A besugárzó eltávolítása
31. PM mérési helyzetbe állítása
32. HV bekapcsolása
33. A TL mérés indítása
34. A kifűtési görbe (C3) mentése
35. Az integrálási határok (ROI) kijelölése: r1, r2
36. HV kikapcsolása
37. A rendszer hűlése szobahőmérsékletre
38. A háttér TL mérés indítása
39. A kifűtési görbe (B) mentése
40. Az ismert kalibrációs dózisértékek, valamint S, C1, C2, C3, B, r1 és r2 felhasználásával a becsült dózisérték kiszámítása
41. Az eredmény rögzítése az adatfájlban.

Az 1-41. lépéseket minden mintára megismételjük.

4. A vizsgált SMD alkatrészek gyári adatlapja

DATA SHEET

THICK FILM CHIP RESISTORS AUTOMOTIVE GRADE

AC series

5%, 1%

sizes 0402/0603/0805/1206/
1210/1218/2010/2512

RoHS compliant & Halogen free



SCOPE

This specification describes AC0402 to AC2512 chip resistors with lead-free terminations made by thick film process.

APPLICATIONS

- All general purpose applications
- Car electronics, industrial application

FEATURES

- Comply with AEC-Q200 standard
- Superior resistance against sulfur containing atmosphere
- MSL class: MSL I
- AC series soldering is compliant with J-STD-020D
- Halogen free epoxy
- RoHS compliant
 - Products with lead-free terminations meet RoHS requirements
 - Pb-glass contained in electrodes, resistor element and glass are exempted by RoHS
- Reduce environmentally hazardous waste
- High component and equipment reliability
- Save PCB space
- The resistors are 100% performed by automatic optical inspection prior to taping.

ORDERING INFORMATION - GLOBAL PART NUMBER

Part number is identified by the series name, size, tolerance, packaging type, temperature coefficient, taping reel and resistance value.

GLOBAL PART NUMBER

AC XXXX X X X XX XXXX L
 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7)

(1) SIZE

0402 / 0603 / 0805 / 1206 / 1210 / 1218 / 2010 / 2512

(2) TOLERANCE

F = ±1%
 J = ±5% (for Jumper ordering, use code of J)

(3) PACKAGING TYPE

R = Paper/PE taping reel K = Embossed taping reel

(4) TEMPERATURE COEFFICIENT OF RESISTANCE

- = Base on spec

(5) TAPING REEL

07 = 7 inch dia. Reel 10 = 10 inch dia. Reel
 13 = 13 inch dia. Reel 7D = 7 inch dia. Reel with double quantity

(6) RESISTANCE VALUE

1Ω to 10 MΩ
 There are 2~4 digits indicated the resistance value. Letter R/K/M is decimal point, no need to mention the last zero after R/K/M, e.g.1K2, not 1K20.
 Detailed coding rules of resistance are shown in the table of "Resistance rule of global part number".

(7) DEFAULT CODE

Letter L is the system default code for ordering only. (Note)

Resistance coding rule	Example
XRXX (1 to 9.76 Ω)	1R = 1 Ω 1R5 = 1.5 Ω 9R76 = 9.76 Ω
XXRX (10 to 97.6 Ω)	10R = 10 Ω 97R6 = 97.6 Ω
XXXR (100 to 976 Ω)	100R = 100 Ω 976R = 976 Ω
XKXX (1 to 9.76 KΩ)	1K = 1,000 Ω 9K76 = 9760 Ω
XMXX (1 to 9.76 MΩ)	1M = 1,000,000 Ω 9M76 = 9,760,000 Ω
XXMX (10 MΩ)	10M = 10,000,000 Ω

ORDERING EXAMPLE

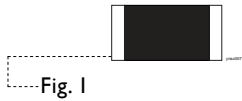
The ordering code for an AC0402 chip resistor, value 100 KΩ with ±1% tolerance, supplied in 7-inch tape reel is: AC0402FR-07100KL.

NOTE

1. All our RSMD products are RoHS compliant and Halogen free. "LFP" of the internal 2D reel label states "Lead-Free Process".
2. On customized label, "LFP" or specific symbol can be printed.
3. AC series with ±0.5% tolerance is also available. For further information, please contact sales.

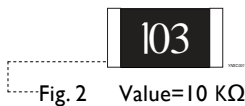
MARKING

AC0402



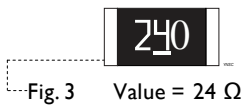
No marking

AC0603 / AC0805 / AC1206 / AC1210 / AC2010 / AC2512

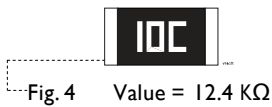


E-24 series: 3 digits, $\pm 5\%$
 First two digits for significant figure and 3rd digit for number of zeros

AC0603

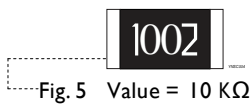


E-24 series: 3 digits, $\pm 1\%$
 One short bar under marking letter



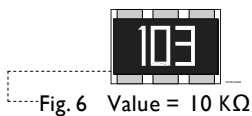
E-96 series: 3 digits, $\pm 1\%$
 First two digits for E-96 marking rule and 3rd letter for number of zeros

AC0805 / AC1206 / AC1210 / AC2010 / AC2512

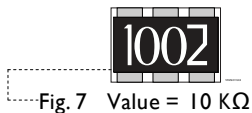


Both E-24 and E-96 series: 4 digits, $\pm 1\%$
 First three digits for significant figure and 4th digit for number of zeros

AC1218



E-24 series: 3 digits, $\pm 5\%$
 First two digits for significant figure and 3rd digit for number of zeros



Both E-24 and E-96 series: 4 digits, $\pm 1\%$
 First three digits for significant figure and 4th digit for number of zeros

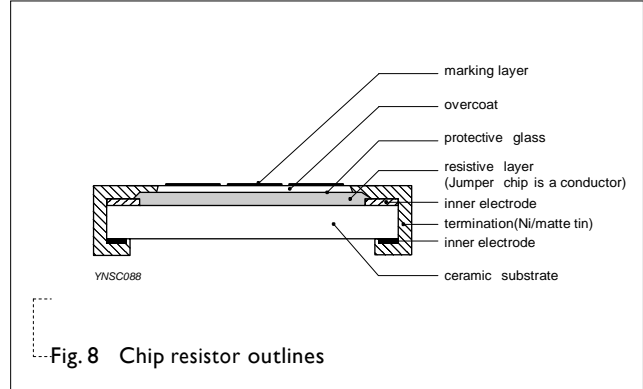
NOTE

For further marking information, please refer to data sheet "Chip resistors marking". Marking of AC series is the same as RC series.

CONSTRUCTION

The resistors are constructed on top of an automotive grade ceramic body. Internal metal electrodes are added at each end and connected by a resistive glaze. The resistive glaze is covered by a lead-free glass. The composition of the glaze is adjusted to give the approximately required resistance value and laser trimming of this resistive glaze achieves the value within tolerance. The whole element is covered by a protective overcoat. Size 0603 and bigger is marked with the resistance value on top. Finally, the two external terminations (Ni / matte tin) are added, as shown in Fig.8.

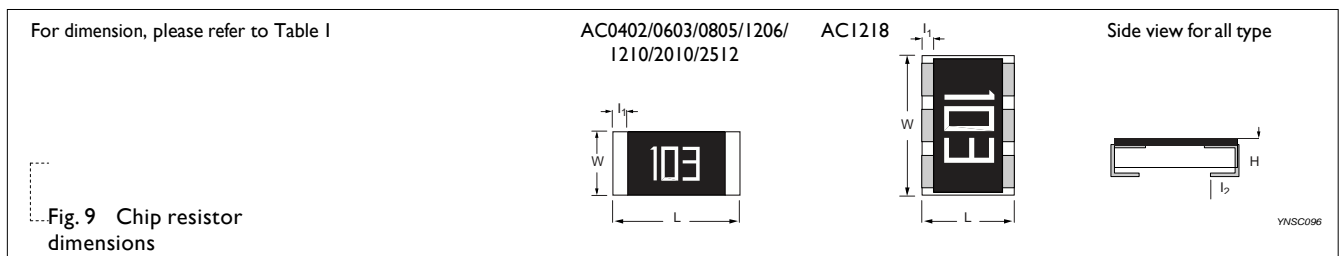
OUTLINES



DIMENSIONS

Table I For outlines, please refer to Fig. 9

TYPE	L (mm)	W (mm)	H (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
AC0402	1.00 ±0.05	0.50 ±0.05	0.32 ±0.05	0.20 ±0.10	0.25 ±0.10
AC0603	1.60 ±0.10	0.80 ±0.10	0.45 ±0.10	0.25 ±0.15	0.25 ±0.15
AC0805	2.00 ±0.10	1.25 ±0.10	0.50 ±0.10	0.35 ±0.20	0.35 ±0.20
AC1206	3.10 ±0.10	1.60 ±0.10	0.55 ±0.10	0.45 ±0.20	0.40 ±0.20
AC1210	3.10 ±0.10	2.60 ±0.15	0.50 ±0.10	0.45 ±0.15	0.50 ±0.20
AC1218	3.10 ±0.10	4.60 ±0.10	0.55 ±0.10	0.45 ±0.20	0.40 ±0.20
AC2010	5.00 ±0.10	2.50 ±0.15	0.55 ±0.10	0.55 ±0.15	0.50 ±0.20
AC2512	6.35 ±0.10	3.10 ±0.15	0.55 ±0.10	0.60 ±0.20	0.50 ±0.20



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Table 2

TYPE	RESISTANCE RANGE	CHARACTERISTICS					Temperature Coefficient of Resistance	Jumper Criteria
		Operating Temperature Range	Max. Working Voltage	Max. Overload Voltage	Dielectric Withstanding Voltage			
AC0402			50 V	100 V	100 V		Rated Current 1A Max. Current 2A	
AC0603			50 V	100 V	100 V		Rated Current 1A Max. Current 2A	
AC0805			150 V	300 V	300 V		Rated Current 2A Max. Current 5A	
AC1206	5% (E24), 1% (E24/E96) 1 Ω to 10 MΩ	-55 °C to +155 °C	200 V	400 V	500 V	1 Ω ≤ R ≤ 10 Ω, ±200 ppm/°C	Rated Current 2A Max. Current 10A	
AC1210	Jumper < 0.05 Ω		200 V	500 V	500 V	10 Ω < R ≤ 10 MΩ, ±100 ppm/°C	Rated Current 2A Max. Current 10A	
AC1218			200 V	500 V	500 V		Rated Current 6A Max. Current 10A	
AC2010			200 V	500 V	500 V		Rated Current 2A Max. Current 10A	
AC2512			200 V	500 V	500 V		Rated Current 2A Max. Current 10A	

FOOTPRINT AND SOLDERING PROFILES

Recommended footprint and soldering profiles of AC-series is the same as RC-series. Please refer to data sheet “Chip resistors mounting”.

PACKING STYLE AND PACKAGING QUANTITY

Table 3 Packing style and packaging quantity

PACKING STYLE	REEL DIMENSION	AC0402	AC0603	AC0805	AC1206	AC1210	AC1218	AC2010	AC2512
Paper/PE taping reel (R)	7" (178 mm)	10,000 20,000	5,000	5,000	5,000	5,000	---	---	---
	10" (254 mm)	20,000	10,000	10,000	10,000	---	---	---	---
	13" (330 mm)	50,000	20,000	20,000	20,000	20,000	---	---	---
Embossed taping reel (K)	7" (178 mm)	---	---	---	---	---	4,000	4,000	4,000

NOTE

I. For paper/PE/embossed tape and reel specifications/dimensions, please refer to data sheet “Chip resistors packing”.

FUNCTIONAL DESCRIPTION

OPERATING TEMPERATURE RANGE

Range: -55 °C to +155 °C

POWER RATING

Each type rated power at 70 °C:

AC0402=1/16 W (0.0625W)

AC0603=1/10 W (0.1W)

AC0805=1/8 W (0.125W)

AC1206=1/4 W (0.25W)

AC1210=1/2 W (0.5W)

AC1218=1 W

AC2010=3/4 W (0.75W)

AC2512=1 W

RATED VOLTAGE

The DC or AC (rms) continuous working voltage corresponding to the rated power is determined by the following formula:

$$V = \sqrt{P \times R}$$

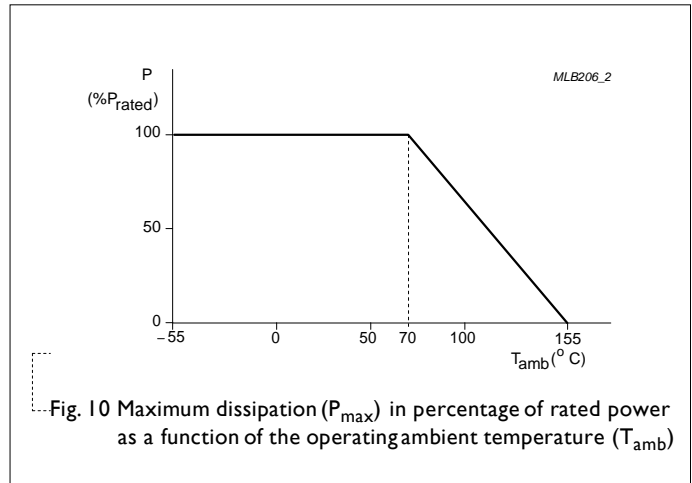
Or Maximum working voltage whichever is less

Where

V = Continuous rated DC or AC (rms) working voltage (V)

P = Rated power (W)

R = Resistance value (X)



TESTS AND REQUIREMENTS

Table 4 Test condition, procedure and requirements

TEST	TEST METHOD	PROCEDURE	REQUIREMENTS
High Temperature Exposure	AEC-Q200 Test 3	1,000 hours at $T_A = 125\text{ }^\circ\text{C}$, unpowered	$\pm(1.0\%+0.05\ \Omega)$
	MIL-STD-202 Method 108		<50 m Ω for Jumper
Moisture Resistance	AEC-Q200 Test 6	Each temperature / humidity cycle is defined at 8 hours (method 106F), 3 cycles / 24 hours for 10d. with $25\text{ }^\circ\text{C} / 65\text{ }^\circ\text{C}$ 95% R.H, without steps 7a & 7b, unpowered	$\pm(0.5\%+0.05\ \Omega)$ for 1% tol. $\pm(2.0\%+0.05\ \Omega)$ for 5% tol.
	MIL-STD-202 Method 106	Parts mounted on test-boards, without condensation on parts	<100 m Ω for Jumper
Biased Humidity	AEC-Q200 Test 7	1,000 hours; $85\text{ }^\circ\text{C} / 85\%$ RH	$\pm(1.0\%+0.05\ \Omega)$
	MIL-STD-202 Method 103	10% of operating power Measurement at 24 ± 4 hours after test conclusion.	<100 m Ω for Jumper
Operational Life	AEC-Q200 Test 8	1,000 hours at $125\text{ }^\circ\text{C}$, derated voltage applied for 1.5 hours on, 0.5 hour off, still-air required	$\pm(1.0\%+0.05\ \Omega)$
	MIL-STD-202 Method 108		<100 m Ω for Jumper
Resistance to Soldering Heat	AEC-Q200 Test 15	Condition B, no pre-heat of samples	$\pm(0.5\%+0.05\ \Omega)$ for 1% tol.
	MIL-STD-202 Method 210	Lead-free solder, $260\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$, 10 ± 1 seconds immersion time Procedure 2 for SMD: devices fluxed and cleaned with isopropanol	$\pm(1.0\%+0.05\ \Omega)$ for 5% tol. <50 m Ω for Jumper No visible damage
Thermal Shock	AEC-Q200 Test 16	$-55/+125\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm(1.0\%+0.05\ \Omega)$
	MIL-STD-202 Method 107	Number of cycles is 300. Devices mounted Maximum transfer time is 20 seconds. Dwell time is 15 minutes. Air – Air	<50 m Ω for Jumper
ESD	AEC-Q200 Test 17	Human Body Model,	$\pm(3.0\%+0.05\ \Omega)$
	AEC-Q200-002	1 pos. + 1 neg. discharges 0402/0603: 1 KV, 0805 and above: 2 KV	<50 m Ω for Jumper

TEST	TEST METHOD	PROCEDURE	REQUIREMENTS
Solderability - Wetting	AEC-Q200 Test 18 J-STD-002	Electrical Test not required Magnification 50X SMD conditions: (a) Method B, aging 4 hours at 155 °C dry heat, dipping at 235±3 °C for 5±0.5 seconds. (b) Method B, steam aging 8 hours, dipping at 215±3 °C for 5±0.5 seconds. (c) Method D, steam aging 8 hours, dipping at 260±3 °C for 7±0.5 seconds.	Well tinned (≥95% covered) No visible damage
Board Flex	AEC-Q200 Test 21 AEC-Q200-005	Chips mounted on a 90mm glass epoxy resin PCB (FR4) Bending for 0402: 5 mm 0603/0805: 3 mm 1206 and above: 2 mm Holding time: minimum 60 seconds	±(1.0%+0.05 Ω) <50 mΩ for Jumper
Temperature Coefficient of Resistance (T.C.R.)	IEC 60115-1 4.8	At +25/-55 °C and +25/+125 °C Formula: $T.C.R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \times 10^6 \text{ (ppm/°C)}$ Where t ₁ =+25 °C or specified room temperature t ₂ =- 55 °C or +125 °C test temperature R ₁ =resistance at reference temperature in ohms R ₂ =resistance at test temperature in ohms	Refer to table 2
Short Time Overload	IEC60115-1 4.13	2.5 times of rated voltage or maximum overload voltage whichever is less for 5 sec at room temperature	±(1.0%+0.05 Ω) <50 mΩ for Jumper

REVISION HISTORY

REVISION	DATE	CHANGE NOTIFICATION	DESCRIPTION
Version 2	Feb. 10, 2012		- Jumper criteria added - AC1218 marking and outline figure updated
Version 1	Feb. 01, 2011	-	- Case size 1210, 1218, 2010, 2512 extended - Test method and procedure updated - Packing style of 7D added
Version 0	Nov. 10, 2010	-	- First issue of this specification

LEGAL DISCLAIMER

Yageo, its distributors and agents (collectively, “Yageo”), hereby disclaims any and all liabilities for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any product related information, including but not limited to product specifications, datasheets, pictures and/or graphics. Yageo may make changes, modifications and/or improvements to product related information at any time and without notice.

Yageo makes no representation, warranty, and/or guarantee about the fitness of its products for any particular purpose or the continuing production of any of its products. To the maximum extent permitted by law, Yageo disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any Yageo product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for a particular purpose, non-infringement and merchantability.

Yageo statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Yageo’s knowledge of typical operating conditions for such types of applications in a generic nature. Such statements are neither binding statements of Yageo nor intended to constitute any warranty concerning the suitability for a specific customer application or use. They are intended for use only by customers with requisite knowledge and experience for determining whether Yageo products are the correct products for their application or use. In addition, unpredictable and isolated cases of product failure may still occur, therefore, customer application or use of Yageo products which requires higher degree of reliability or safety, shall employ additional protective safeguard measures to ensure that product failure would not result in personal injury or property damage.

Yageo products are not designed for application or use in medical, life-saving, or life-sustaining devices or for any other application or use in which the failure of Yageo products could result in personal injury or death. Customers using or selling Yageo products not expressly indicated for above-mentioned purposes shall do so at their own risk and agree to fully indemnify Yageo and hold Yageo harmless.

Information provided here is intended to indicate product specifications only. Yageo reserves all the rights for revising this content without further notification, as long as products are unchanged. Any product change will

be
an
no
un
ced
by
PC
N.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Kovács Andrásnak, aki nem csupán szakmai tanácsaival, hanem emberi értékeivel és útmutatásával irányított. Időt és energiát nem kímélve lett vezetőm, példaképem és keresztapám egy személyben. Köszönöm!

Szakmai segítségéért és támogatásáért köszönet illeti Dr. Somlai Jánost is, hiszen mindvégig támogatott és tanácsaival a helyes úton tartotta lépteimet.

Köszönettel tartozom a feleségemnek, aki mosolyával és szelíd szavaival mindig mellettem volt jóban, rosszban, dolgozatban...

Köszönöm a családomnak, hogy biztos támaszt nyújtottak minden téren és segítettek idáig jutnom.

Köszönöm azoknak a kollégáknak, és barátoknak, akik nélkül az idáig vezető ösvényt sem találtam volna meg. Köszönet Éva, Hajni, és Kelcsi!

Köszönet illeti az Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumának dolgozóit, akik tanácsaikkal segítettek munkámat.

Mesterházy Dávid

Budapest, 2014

„Ama nemes harcot megharcoltam, futásomat elvégeztem, a hitet megtartottam...”

Pál Apostolnak Timóteushoz írt második levele

