

SZÉKFOGLALÓ ELŐADÁSOK:

A SZÓRÓDÁSI JELENSÉGEK SZEREPE A FOTONSUGÁRZÁSOK DOZIMETRIÁJÁBAN

(Székfoglaló előadás a Magyar Tudományos Akadémia
1973. március 25-i ülésén)

Az elektromágneses sugárzásnak anyaggal való találkozásakor a természet igen változatos kölcsönhatásokat hoz létre. Ezek vizsgálata egyrészt nagy jelentőségű új felismerésekhez vezetett, másrészt – főként a szóródási kölcsönhatások – kezdettől fogva komoly nehézségeket jelentettek e sugárzások dozimetriájának a kialakításában.

A dozimetria iránti igény rövidesen az első ionizáló sugárzásnak, a röntgen sugárzásnak a felfedezése után, még a múlt évszázad végén két területen, nevezetesen a sugárterápia és a sugárvédelem területén jelentkezett. Mindkettő lényegét a következőkben foglalhatjuk össze: minthogy az ionizáló sugárzások biológiai hatásai általában csak hosszabb, rövidebb idővel a besugárzás után jelentkeznek, szükségesnek látszott az ionizáló sugárzások valamely olyan hatásának fizikai mérőmódszerét kidolgozni, amely hatás párhuzamosan halad a később fellépő biológiai elváltozásokkal, hogy így e hatásnak a besugárzáskor való méréséből a később bekövetkező biológiai elváltozásokra előre következtetéseket lehessen levonni.

Amíg tehát a fizikai kutatásokban valamely foton sugárzásra vonatkozóan általában olyan mennyiségek mérése bír jelentőséggel, amelyek magának a foton sugárzásnak a leírására szolgálnak, pl. fluxus, energia fluens stb., addig a dozimetriai méréseknek a célja olyan mennyiségek meghatározása, melyek a sugárzás és adott anyag kölcsönhatásának az eredményét írják le.

A foton sugárzások dozimetriai mérésének alapvető fogalmi, elvi és gyakorlati mérési módszerei csak lassan alakultak ki, ismételten módosultak, sőt még ma sem tekinthetők véglegesen lezárt kérdéseknek. Az első évtizedekben a foton sugárzások számos hatásának a mérésével próbálkoztak, de valamennyiről kiderült, hogy nem haladnak párhuzamosan a később fellépő biológiai hatásokkal és így használhatatlannak. Christen dán fizikus fogalmazta meg végül 1913-ban a dózisonak lényegében ma is érvényes definícióját, amely szerint – más gyógyszerekkel ellentétben – az ionizáló sugárzás esetében nem a testbe bevitt összes sugárzási energia mennyiségét, hanem annak csupán a testben elnyelődött részét kell dózisonak tekintenünk. A testen kölcsönhatás nélkül áthaladó sugárzás semmiféle biológiai hatást nem fejt ki.

A testben elnyelt energiának *közvetlen mérése* azonban, tekintettel az általában igen kicsiny hőmérséklet változásokat (0,01–0,0001 °C) létrehozó elnyelt energiákra, megoldhatatlan nehézségeket jelentett. 1914-ben Szilárd Leó készítette az első dózismérésre alkalmas ionizációs kamrát és javasolta, hogy a dozimetria alapjául az ionizáló sugárzások által levegőben létrehozott ionizációt válasszuk. Ez a foton sugárzások kvantumenergiájától függetlenül nagymértékben párhuzamosan halad a később fellépő biológiai hatásokkal.

Szilárd Leó javaslata igen termékenynek bizonyult és általános nemzetközi elfogadásra talált. Kidolgozták az ionizációs kamrás dózismérés elvi és gyakorlati módszereit, definiálták az R-egységet és annak abszolút mérését. Ezzel 1930 és 1940 közti időszakban úgy tűnt, a dozimetria problémái megoldást nyertek.

A neutron sugárzásoknak, majd a betatronok és lineáris gyorsítók nagy ener-

giájú röntgen és elektron sugárzásainak a sugárterápia szolgálatába való állításával aztán egyrészt új dozimetriai igények jelentkeznek, másrészt nyilvánvalóvá vált, hogy a klasszikus röntgen és gamma sugárzásokra előzőleg kidolgozott dozimetriai rendszer is módosításra szorul. Nevezetesen a sugárterápia eredményességének növelése céljából az R-egységben mért besugárzási dózisiról feltétlenül át kell térni az elnyelt dózisban való dozírozásra.

De megváltozott a helyzet a sugárvédelem dozimetriai igényei terén is, amennyiben a reaktorok, gyorsítók és főként a mesterségesen előállított radioizotópok rohamosan növekvő alkalmazási területei révén sokszorosára növekedett az ionizáló sugárzásoknak kitett személyek száma is és a potenciális sugárveszély is. Ugrászerűen megnövekedtek tehát a sugárvédelmi problémák és ezzel együtt a dozimetria iránti érdeklődés, valamint a kérdések megoldásán dolgozó szakemberek száma is.

A következőkben a legrégebben és ma is legkiterjedtebben alkalmazott ionizáló sugárzás, a különböző eredetű foton sugárzások dozimetriájának egyes problémáival, elsősorban a szóródási folyamatok dozimetriai következményeivel kívánok foglalkozni.

A foton sugárzásoknál a következő szóródási folyamatokat különböztetjük meg:

1. A *Compton-féle szóródás*, melynél a foton haladási irányának megváltozásától függő energiacsökkenés, valamint az 1 elektronra vonatkozó totális szóródási hatáskeresztmetszet az ismert Compton-, illetve Klein–Nishina féle elmélet alapján kielégítő pontossággal kiszámítható.

2. A *koherens-, vagy Rayleigh-féle elektron szóródás* az atom valamennyi elektronjának együttes szórása. Minthogy a visszalökődést ez esetben nem az egyes elektronok, hanem maga a nagytömegű atom veszi fel, a szóródó fotonnál energia veszteség nem lép fel.

3. A *Thomson-féle*, magokon történő szóródás, melynek hatáskeresztmetszete az elektronokénál 5–6 nagyságrenddel nagyobb magtömegeknek megfelelően 5–6 nagyságrenddel kisebb, mint a Compton szóródási hatáskeresztmetszetek.

4. A *Delbrück-féle potenciál-szórás*, amikor a foton a mag elektrosztatikus terén szóródik és végül

5. A *koherens molekuláris*, vagy kristály szóródás, mely az egy atomon belüli elektronokon történő koherens szóródással analóg jelenség, csupán itt egy molekula, illetve kristályrács atomjai szerepelnek.

A szóródási jelenségek általában igen lényegesen befolyásolják a besugárzott anyagban kialakuló dózis nagyságát, a dózis térbeli eloszlását és ennek megfelelően természetesen magát a dózismérést is. Pontosabban megfogalmazva: a szóródási jelenségek között találunk olyanokat, amelyeknél csupán irányváltozás következik be, és találunk olyanokat, amelyeknél a foton energiát is közöl az anyaggal, tehát haladási irányának megváltoztatása mellett a foton energiája is csökken. A dozimetria szempontjából nagyobb jelentősége nyilván az utóbbinak van, mert ezeknél egyrészt a szóródás révén lecsökkentett energiájú fotonokra nézve megváltoznak az elnyelődési folyamataikra vonatkozó hatáskeresztmetszetek, ami megint csak közvetlenül befolyásolja a tömegegységben elnyelt energiát, azaz az elnyelt dózist.

A szóródási jelenségek szerepét két szempontból fogjuk vizsgálni, nevezetesen először magukban a besugárzott testekben létrejövő dózisterhelések, másodsor a besugárzott testeken, vagy testrészeken kívül eső, esetleg ezektől nagyobb távolságban fekvő testek dózisterhelése szempontjából.

I.

A *direkt sugárhatásnak kitett testrészen* a szóródási folyamatok révén az elnyelt energia minden esetben megnövekszik, mert hiszen minden egyes térfogatelembe a direkt sugárzáson kívül valamennyi körülötte fekvő besugárzott térfogatelemből is jut sugárzás, melynek egy része a térfogatelemben el is nyelődik. Ez a szóródásból eredő dózistöbblet igen sok tényezőtől függ. Ilyenek a beeső primer foton sugárzás energiája, illetve energia spektruma, a besugárzott anyag atomjainak rendszáma és relatív mennyisége, a sugárnyaláb keresztmetszetének alakja és nagysága, a sugárforrás távolsága stb. Nyilvánvaló, hogy kiterjedt, inhomogén közegekre vonatkozó szóródási folyamatokból eredő elnyelt energiák pontos kiszámítása a ma legkegyesebbnek tűnő Monte Carlo módszerrel is, csak egyes leegyszerűsített modelleknél lehetséges.

A szóródási jelenségek dozimetriai hatásainak a tanulmányozása tehát általánosságban *csak kísérleti úton* történhet. Intézetünkben több mint 3 évtizede foglalkozom különféle sugárfizikai kérdésekkel, köztük a röntgen és gamma sugárzások szóródási folyamatainak tanulmányozásával. A további általános érvényű megállapításaimat néhány saját kutatási terület ismertetéséhez kívánom kapcsolni.

A) Az elnyelt dózis meghatározása.

Az elmúlt két évtized során sokan próbálkoztak az elnyelt dózis mérésére megfelelő mérési módszert kidolgozni. Az ICRU (International Commission of Radiological Units and Measurements) megállapítása szerint a ma legmegfelelőbbnek mondható eljárás lényege abban áll, hogy a kérdéses közegben levegőekvivalens anyagból készített hiteles ionizációs kamrával megmérjük a kérdéses pontra vonatkozó besugárzási dózist R-egységben. Ebből az elnyelt dózis meghatározása kétféle módon történik aszerint, hogy 0,6 MeV alatti energiával rendelkező foton sugárzásról van-e szó (A eset), avagy a fotonok energiája 0,6 MeV fölött van (B eset).

Az *alsó energia tartomány* esetében az ionizációs kamrát foton detektornak kell konstruálnunk, azaz az ionizációt magában a kamrafalban keltett elektronoknak kell létesíteniök. Levegőekvivalens kamrafal-anyag és elektron egyensúlyt biztosító falvastagság esetén a mért ionizációból a levegőben elnyelt dózis a Bragg-Gray elvnek megfelelően közvetlenül kiszámítható:

$$D_{\text{lev}}(\text{rad}) = 0,869 \cdot D_b(\text{R}).$$

ahol D_{lev} (rad) a rad-ban kifejezett levegőben elnyelt dózis és D_b (R) az R-ben mért besugárzási dózis.

Magában a kérdéses közegben elnyelt dózist a következő formulával számíthatjuk ki:

$$D_{\text{közeg}} = \frac{(\mu/\rho)_{\text{közeg}}}{(\mu/\rho)_{\text{levegő}}} \cdot D_{\text{lev}}$$

ahol μ/ρ a kérdéses közegre, illetve levegőre vonatkozó tömeggyengülési együttható.

A *0,6 MeV-nél nagyobb energiájú foton sugárzások* esetén viszont az ionizációs kamrát elektron detektorként kell kezelnünk, amely egyszerűen a kamra környezetéből a kamrába belépő elektronokat méri. Ez esetben a kamrában, azaz levegőben elnyelt dózistól (D_{lev}) a kérdéses közegben elnyelt dózist ($D_{\text{közeg}}$) a következő formulával határozhatjuk meg:

$$D_{\text{közeg}} = \frac{(S/\rho)_{\text{közeg}}}{(S/\rho)_{\text{levegő}}} \cdot D_{\text{lev}}$$

ahol S/ρ a közeg, illetve a levegő átlagos tömegfékező képessége. Mind a μ/ρ tömeggyengülési együtthatók, mind az S/ρ tömegfékezési együtthatók a különböző anyagokra és energiákra táblázatokba foglalva rendelkezésünkre állanak. Az I. táblázat

I. táblázat

A szénre és levegőre vonatkozó tömeggyengülési együtthatók hányadosa és a konverziós tényező számított értékei a foton-energia függvényében

Fotonenergia (MeV)	$\frac{(\mu/\rho)_C}{(\mu/\rho)_{\text{lev}}}$	$f = 0,869 \frac{(\mu/\rho)_C}{(\mu/\rho)_{\text{lev}}}$
0,05	0,588	0,511
0,1	0,922	0,801
0,2	0,996	0,866
0,5	1,000	0,869
1,0	0,996	0,866
1,5	1,000	0,869

például a szénre (C) és levegőre (A) vonatkozó μ/ρ együtthatók hányadosát és az $f = D_C : D_b$ konverziós tényező számított értékeit tünteti fel a foton-energia függvényében, míg a II. táblázat az ugyancsak szénre és levegőre vonatkozó S/ρ együtt-

II. táblázat

A szénre és levegőre vonatkozó átlagos tömegfékező képességek hányadosa és a konverziós tényező számított értékei a foton-energia függvényében

Fotonenergia (MeV)	$\frac{(S/\rho)_C}{(S/\rho)_{\text{lev}}}$	$f = 0,869 \frac{(S/\rho)_C}{(S/\rho)_{\text{lev}}}$
0,05	1,017	0,884
0,1	1,016	0,883
0,3	1,007	0,875
1,0	0,895	0,856
3,0	0,946	0,822

hatók hányadosát és a megfelelő konverziós tényezőket tartalmazza.

Az elnyelt dózis meghatározását ennek ellenére nem tekinthetjük kielégítően megoldott problémának, mert hiszen a táblázatok szerint mindkét együttható energiafüggő. Az elkerülhetetlenül fellépő szóródási folyamatok viszont a sugárforrás fotonjainak eredeti, ismert energiáját nagymértékben és alig ellenőrizhető módon megváltoztatják és így a megfelelő konverziós tényező kiválasztásánál nagyfokú bizonytalansággal találjuk magunkat szemben.

Mínthogy a korszerű sugárterápia egyik világszerte elterjedt, legfontosabb besugárzó berendezése ma a kobaltágyú, fontosnak láttam a

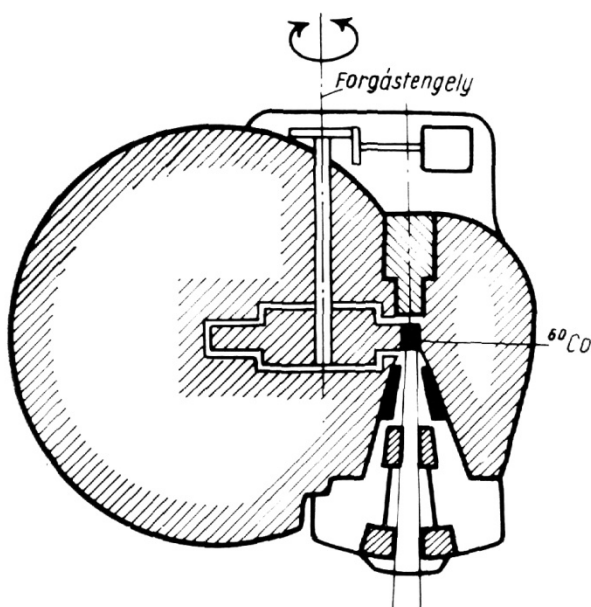
$$D_{\text{közeg}} = f_{\text{exp}} \cdot D_b$$

fundamentális összefüggés érvényességét ezekre a berendezésekre a $D_{köz}$ és a D_b mennyiségek közvetlen lemérésével kísérletileg megvizsgálni. A méréseket Intézetünknek két különböző kobaltágújánál, de teljesen azonos alakú és méretű sugárforrásokkal végeztük. Így magukban a forrásokban bekövetkező önabszorpció és szóródás azonos lévén, az összehasonlításból kizárólag a kollimátorokon és egyéb szerkezeti elemeken bekövetkező szóródási és egyéb szekunder folyamatok szerepére vonatkozólag várhattunk közvetlen adatokat.

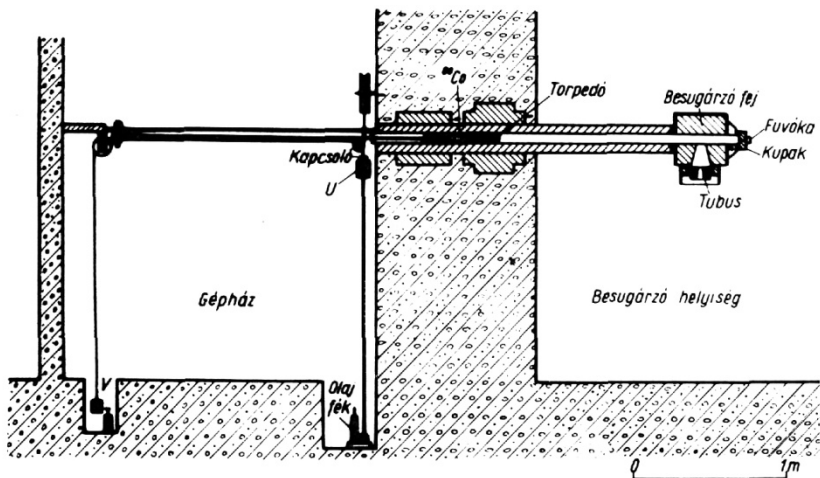
Az 1957-ben felépített GRAVICERT nevű készülékünk megtervezésénél eleve arra törekedtem, hogy a berendezés a terápiás besugárzások mellett sugárfizikai mérések elvégzésére is megfelelő legyen. A készülék alapvetően abban különbözik minden más országban gyártott készüléktől, hogy kikapcsoláskor a töltet nem a szokásos módon a besugárzófejben kerül egy megfelelő ólomtömb mögé (1. ábra), hanem a besugárzófejből egy ólom árnyékolású tartókaron át elhagyja a besugárzó helyiséget és egy 1 méter vastag betonfalba épített külön tárolóhelyre csúszik (2. ábra). Így minden más, kikapcsolt állapotban is számottevően sugárzó készülékekkel ellentétben berendezésünknel a besugárzó helyiség egész területén *csak a természetes háttérsugárzás* szintje mérhető. Ez a sugárvédelmi szempontokon túlmenően, éppen a sok esetben igen kis intenzitású szórt sugárzások vizsgálatánál nagyon lényeges körülmény (3. ábra).

Egy további lényeges új konstrukciós megoldás abban áll, hogy a sugárforrás, amely védelem nélkül 5 perc alatt 1 méter távolságban emberre nézve halálos dózist ad le, készülékünknel kísérleti célokra teljesen sugárvédett módon a besugárzófej elé tolnak ki. A szabadalmat nyert készüléket a MEDICOR MŰVEK vette gyártásba, külföldre is került belőle.

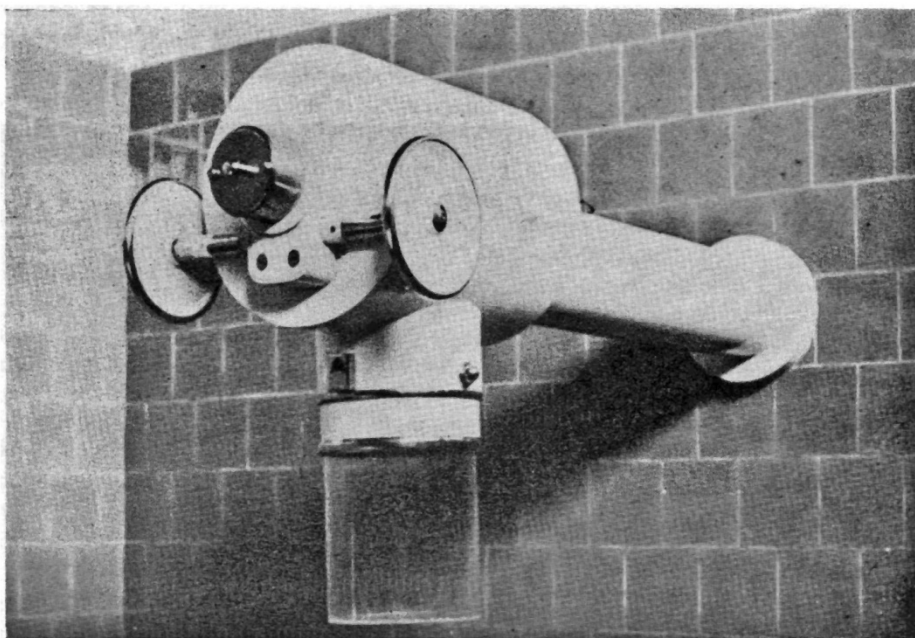
A másik kobaltágúnk lényegében véve azonos felépítésű, csupán az egész rend-



1. ábra. Egytárolóhelyes kobaltágú besugárzófej állandó jellegű környezet-besugárzással



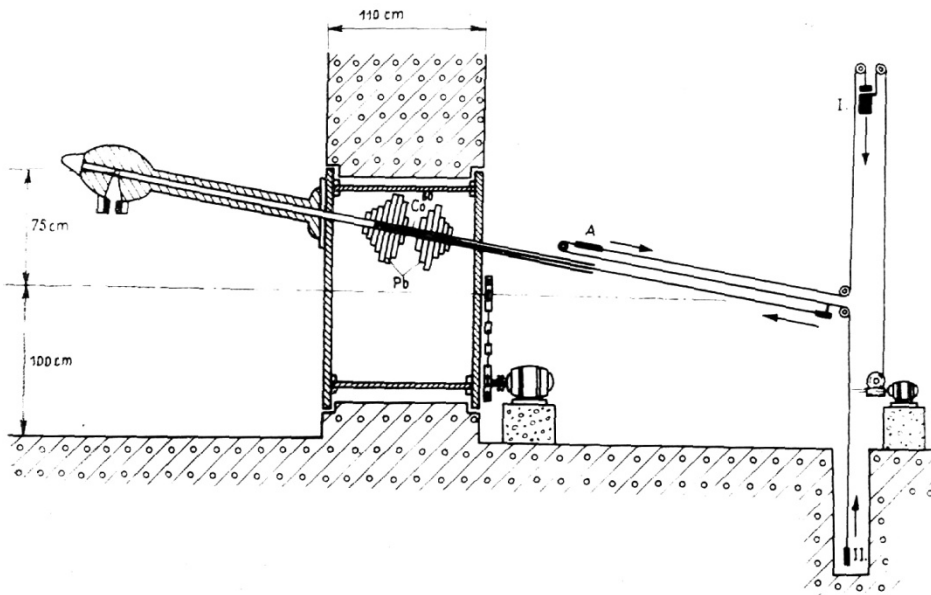
2. ábra. Kéttárolóhelyes GRAVICERT kobaltágyú állandó jellegű környezet-besugárzás nélkül



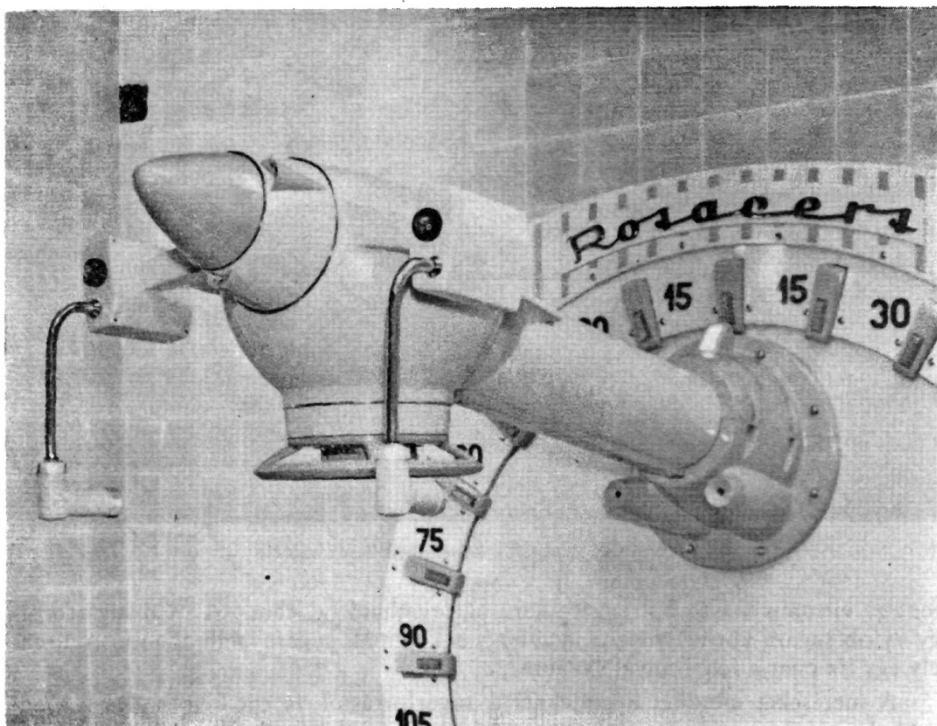
3. ábra. GRAVICERT kobaltágyú besugárzófeje

szer egy virtuális vízszintes tengely körül elforgatható (4. ábra). A ^{60}Co sugárforrás egy 75 cm sugarú köríven mozog úgy, hogy a kollimált sugárnyaláb állandóan a tengely egy fix pontja felé irányul (5. ábra).

A méréseket mindkét készüléknél a sugárforrástól 75 cm távolságban ugyanazokkal a mérő berendezésekkel, azonos körülmények között, reaktor tisztaságú grafitban végeztük. A kilocuries források aktivitása elegendőnek látszott ahhoz, hogy az



4. ábra. A ROTACERT nevű mozgómézős kobaltágyú keresztmetszeti képe



5. ábra. A ROTACERT nevű mozgómézős kobaltágyú besugárzófeje

elnyelt energiákat kaloriméterrel közvetlenül mérni lehessen. Minthogy hazai viszonylatban ilyen mérő berendezés még nem készült, a bécsi Nemzetközi Atomenergia Ügynökséghez fordultam. Az Ügynökség, minthogy a vizsgálatot maga is fontosnak találta, segítségünkre sietett és az összesen mintegy 600 kp súlyú mérő berendezését Intézetünkbe szállította.

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által kifejlesztett kaloriméteres primer dózismérő standard (6. ábra) energia elnyelő közege egy vákuumban függő 20 mm átmérőjű és 4 mm vastag grafit korong, melynek hőmérsékletét egy a közepébe beépített fél mm átmérőjű üveggömbbe zárt termisztor méri. A mérésre kerülő foton energiáknál a grafitban kémiai, illetve magreakciók még nem jönnek létre és így az elnyelt energia teljes egészében hőenergiává alakul át. A rendszert nagyobb tömegű grafit termosztát veszi körül és így a kaloriméter közvetlenül a grafitban elnyelt sugárzási energiát méri (7. ábra).

A besugárzási dózist egy $0,6 \text{ cm}^3$ -es Farmer-féle ionizációs kamrával és $0,02 \text{ cm}^3$ -es saját készítésű kondenzátor ionizációs kamrákkal mértük ugyancsak reaktor tisztaságú, $1,90 \text{ g.cm}^{-3}$ sűrűségű grafitban, különböző mélységeekben. Ez utóbbit úgy valószínűsítettük meg, hogy a 75 cm távolságban felállított kaloriméter, illetve ionizációs kamra elé egyre több 1 cm vastag, $25 \times 25 \text{ cm}^2$ -es precíziósan megmunkált grafit lapot helyeztünk. Mind a kaloriméteres, mind az ionizációs kamrás mérések több napon át megismételve, 1% -nál kisebb eltérésű eredményekkel reprodukálhatók voltak.

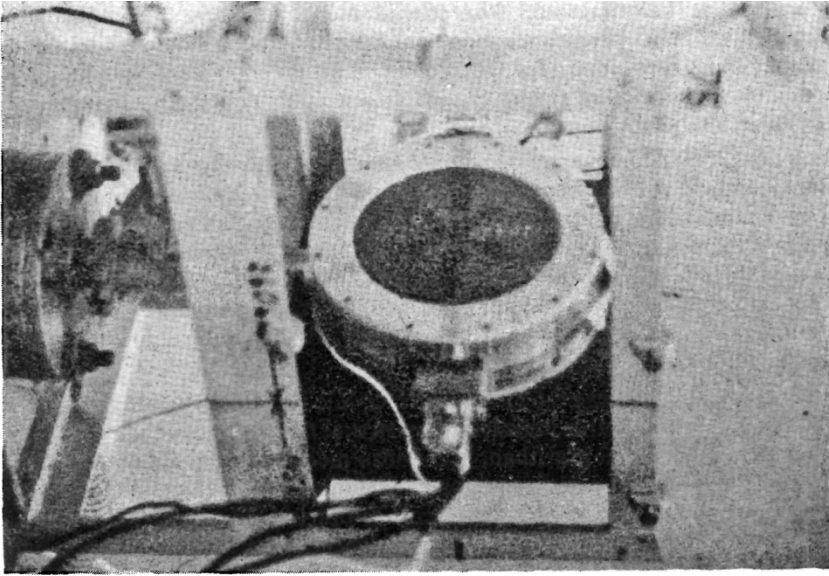
Az $F_{\text{exp}} = D_{\text{közeg}} / D_{\text{b}}$ faktorra kapott kísérleti értékeket a mélység függvényében a 8. és 9. ábrák szemléltetik. Eszerint a két készülék között 9% -os, tehát egyáltalában nem elhanyagolható olyan eltérés jelentkezik, amiről a világszerte alkalmazott dózismeghatározási metodika nem tud számot adni. Hiszen, két, csaknem azonos készülékről, teljesen azonos sugárforrásokról, azonos mérőberendezésekről és azonos mérési körülményekről lévén szó, a faktor értékének a nemzetközileg kidolgozott táblázatoknak megfelelően azonosaknak kellene lenniük.

Felmerül tehát a kérdés: mivel magyarázható a kísérletileg talált jelentős eltérés? A válasz egyszerű: a számításoknál figyelmen kívül hagyott szóródási jelenségek-nél mutatkozó különbségekkel. Ha pontosabban szemügyre vesszük ugyanis a két kobalt készülék besugárzó fejét (10. ábra), akkor a következő különbségeket állapíthatjuk meg:

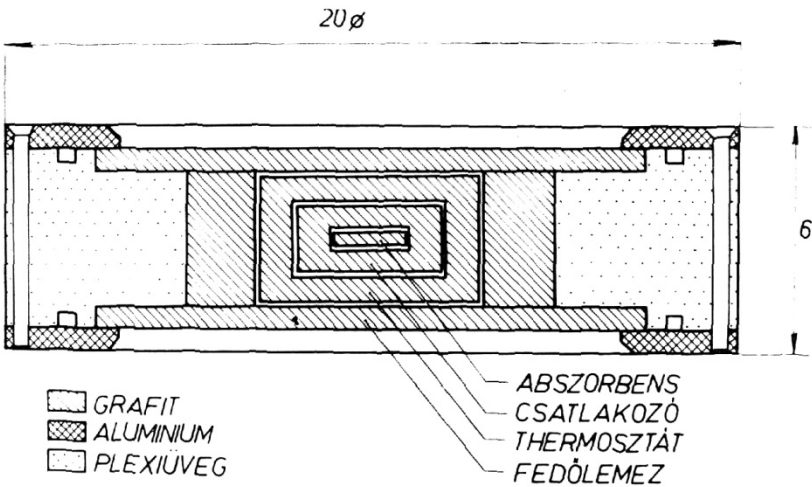
a) A ROTACERT-nél 8 cm-rel távolabb van a kollimátor a sugárforrástól, mint a GRAVICERT-nél, ennek megfelelően az azonos keresztmetszetű sugárnyaláb előállításához szükséges fekvő és nagyobb nyíláson át a mérési pontból nyilvánvalóan nagyobb terület látszik a besugárzófej sugárforrás körüli, belső, ólomból és acélból készült szerkezeti elemeiből.

b) A ROTACERT-nél a szerkezeti elemek szorosabban veszik körül a sugárforrást, mint a GRAVICERT-nél, tehát nagyobb intenzitású gamma sugárzás esik rájuk.

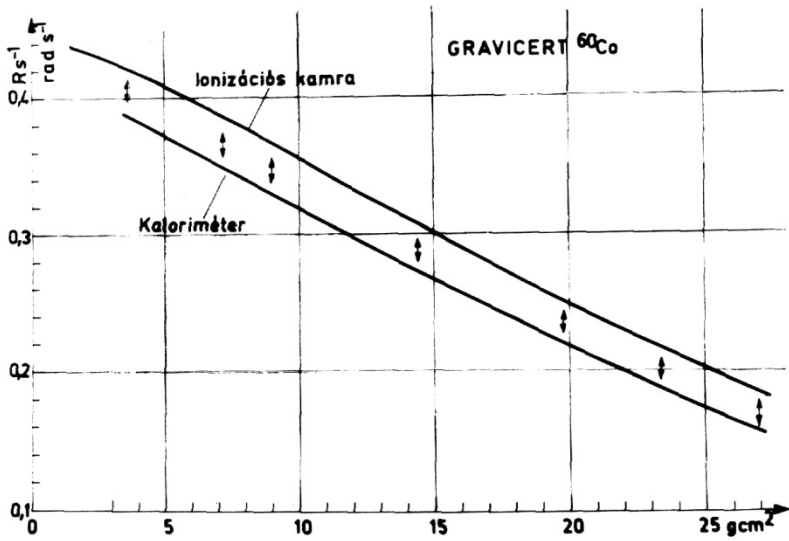
Mindkét tényező azt eredményezi, hogy a besugárzó-fejek belső, igen nagy intenzitással besugárzott ólom és acél elemeiről a ROTACERT-nél jelentősen több, kisebb energiájú szórt és szekunder sugárzás jut a mérési pontba, illetve annak környezetébe, mint a GRAVICERT-nél. A ^{60}Co eredeti 1,17 és 1,33 MeV-es fotonjaihoz tehát különböző mértékben keverednek a kisebb energiájú szórt fotonok, illetve az ezek nagyobb hatás keresztmetszettel rendelkező fotoelektromos abszorpciójából származó karakterisztikus röntgen fotonok, ólom esetében például $0,07 \text{ MeV}$ -es energiával. Márpedig a kisebb energiájú fotonokra nézve kisebb a táblázatokban szereplő F érték is és így a két készülék közötti eltérés kvalitatíve magyarázható.



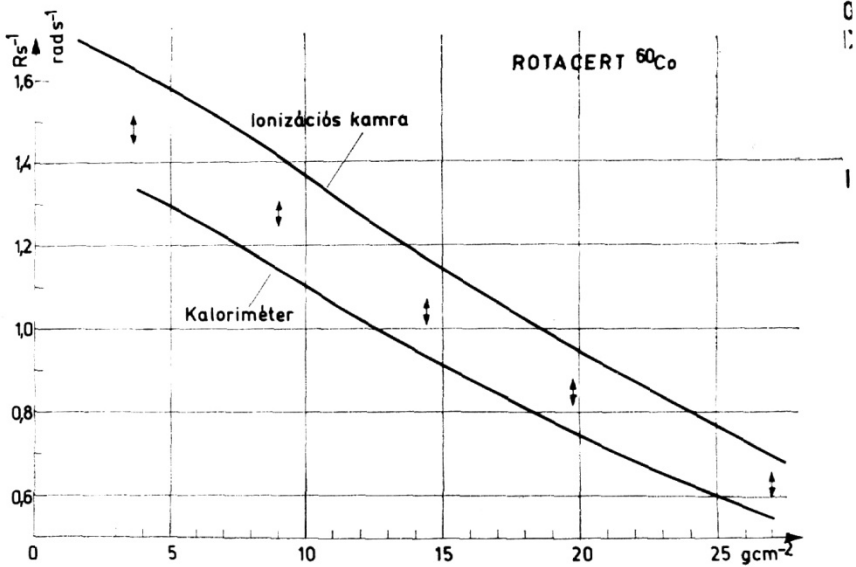
6. ábra. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség kaloriméteres primer standard dózismérőjének energia-
elnyelő eleme



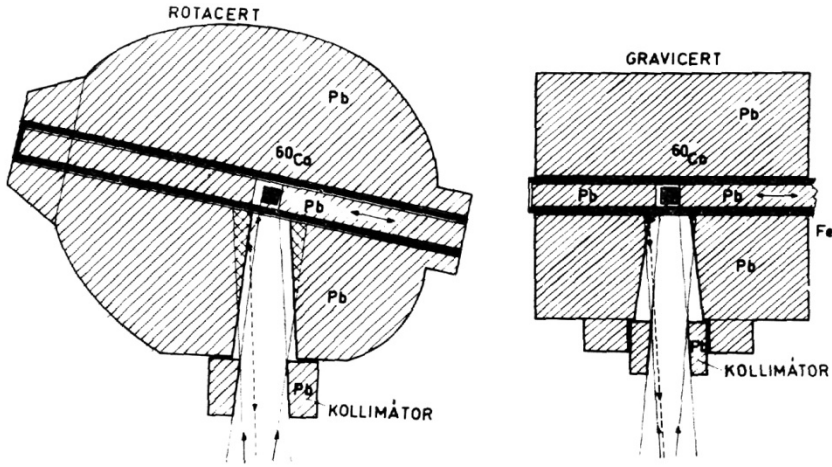
7. ábra. A kaloriméter keresztmetszeti képe



8. ábra. Az elnyelt dózis és besugárzás dózis hányadosa grafitban a GRAVICERT kobaltágyúnál a mélység függvényében



9. ábra. Az elnyelt dózis és besugárzás dózis hányadosa grafitban a ROTACERT kobaltágyúnál a mélység függvényében



10. ábra. A GRAVICERT és ROTACERT kobaltágyúk besugárzási fejének azonos besugárzott területről látható elemei

Az eltérés kvantitatív értelmezésére, illetve kiszámítására ma még nincs lehetőségünk. A szóródási jelenségek olyan sokrétűek, hogy kiterjedt közegben teljes általánosságban a számítások egyelőre nem hajthatók végre.

Az ismertetett vizsgálatok alapján mindenesetre a következőket állapíthatjuk meg:

1. A gamma besugárzó berendezéseknél a kollimátoron és egyéb szerkezeti elemeken bekövetkező szóródási jelenségek az alkalmazott radioizotóp eredeti energia spektrumát olyan mértékben megváltoztatják, hogy az $f = \text{rad}/R$ konverziós tényező értékénél, a konstrukciótól függően jelentős változás következik be.

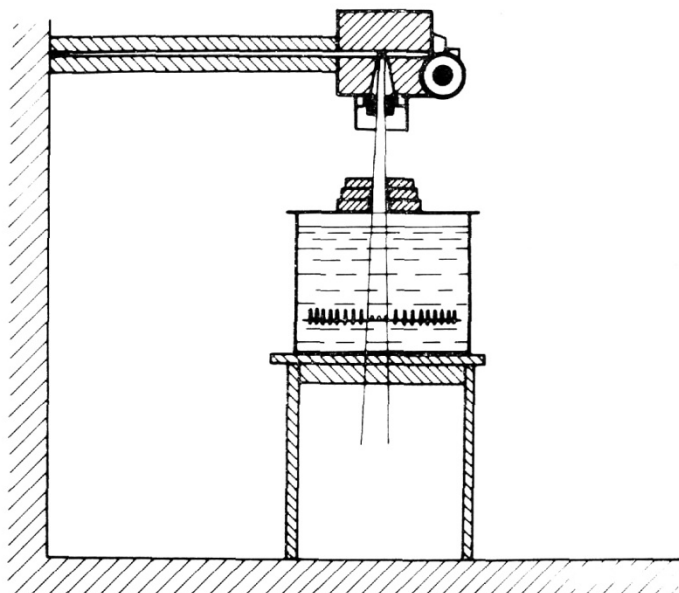
2. Az elnyelt dózisanak a kérdéses közegben ionizációs kamrával mért besugárzási dózisából az ICRU által javasolt jelenleg szokásos módon történő kiszámítása tehát csupán akkor ad kielégítő eredményt, ha a sugárforrás közelében szóró közeg nincsen. Leárnyékolást és kollimátorokat alkalmazó gamma besugárzó készülékeknél – amilyenek a telecurie terápiás kobaltágyúk is – a szóródási jelenségek számításokkal nem követhető, jelentős dózismódosító hatásainak figyelembe vétele céljából, a konverziós faktornak készülék típusonkénti kísérleti meghatározására feltétlenül szükség van.

— — —

B) A szóródási jelenségeknek egy másik fontos szerepét a telecurie besugárzások során közvetlenül *átsugárzott térfogatot körülvevő térfogatelemek* sugárterhelő hatásában jelölhetjük meg. Hogy az alkalmazott sugárnyaláb keresztmetszetének megfelelő térfogatrészen kívüli térrész sugárterhelése mekkora, azt elsősorban a fotonok energiájától és az átsugárzott térfogat anyagi összetételétől függő szóródási jelenségek szabják meg.

Az oldal irányú szóródás legnagyobb a 0,01 és 0,1 MeV nagyságrendű klasszikus röntgen sugárzásoknál, kisebb a MeV nagyságrendű fotonoknál és még kisebb a körkörös és lineáris gyorsítók sok MeV-es fotonjainál.

Kérdés mármost, hogy mekkora a környező térfogatelemek dózisterhelése, hogyan változik értéke a direkt sugárnyalábtól mért távolsággal, a felszíntől mért távol-



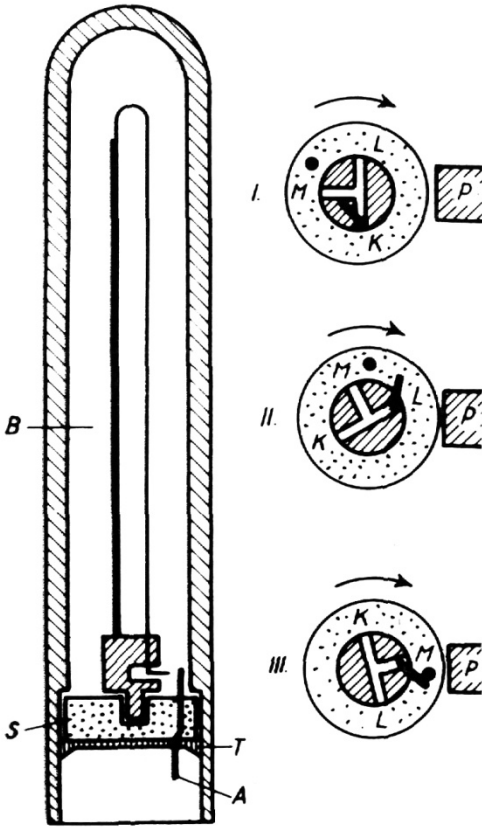
11. ábra. Az átsugárzott vízből a környező víz térfogatelemekbe kiszóródó gamma sugárzás mérése

sággal, a felszíntől mért mélységgel, a primer fotonok energiájával stb. Nehézséget jelent többek között a kérdés megválaszolásánál megint az a körülmény, hogy nagyobb mélységek felé haladva, a primer sugárzás energiája éppen a szóródási jelenségek következtében megváltozik, a kezdeti foton energiákhoz egyre nagyobb számban keverednek jóval kisebb energiájú és így jobban szóródó fotonok is.

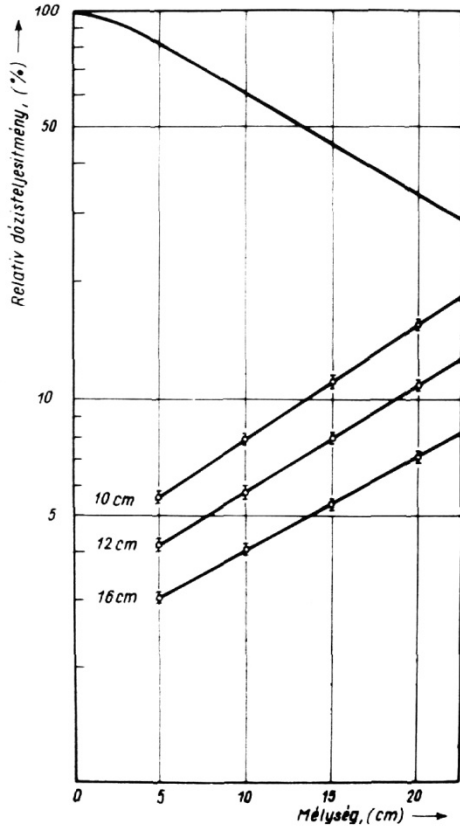
A kérdés legközvetlenebb kísérleti megválaszolásához a következő mérő berendezést állítottam össze: nagyobb vízfantomban (60 cm átmérőjű és 50 cm mély) a direkt sugárnyalábra merőleges vékony falemezbe egymástól 3 cm távolságban fűrt lyukakba, egyszerre több, levegőekvivalens falú feltöltött kondenzátor ionizációs kamrát helyeztem el (11. ábra). Tekintettel arra, hogy kizárólag a belső sugárnyalábból kiszóródó sugárzás dóziseloszlását kívántam tanulmányozni, a fantom felszínét a sugárforrás irányába röntgen sugárzás esetén 1 cm, gamma sugárzás esetén 15 cm vastag ólomréteggel gondosan leárnyékoltam. A kamrasornak különböző mélységeken történő besugárzásával közvetlenül meghatároztam a direkt sugárnyalábon kívüli tér részben kialakuló dóziseloszlást.

Itt említem meg, hogy a vízalatti és más különleges körülmények között végzendő méréseink céljaira olyan *légmentesen lezárt, száraz levegővel töltött*, mágneses térrel működtethető kondenzátor ionizációs kamrákat konstruáltam (12. ábra), amelyek a légköri nedvességgel, porral, hőmérséklet- és légnyomás-változásokkal szemben teljesen érzéketlenek. A kamra belső elektródjának (B) ugyanis a szigetelő tárcsán keresztül nincs átvezetése. A belső elektród a feltöltés, valamint a maradék töltés lemérésének idejére mágnessel kapcsolható a szigetelő tárcsán átvezető segédelektrodához (A). Egy T alakú kényszerpályát definiáló lemezke viszont megakadályozza, hogy ugyanaz a kapcsolódás ütés, vagy rázás hatására is létrejöhessen. Az ugyancsak szabadalmat nyert mérőberendezést a Gamma Művek vette gyártásba.

A szóródásból eredő dóziseloszlást a fenti mérőberendezéssel különféle kemény-



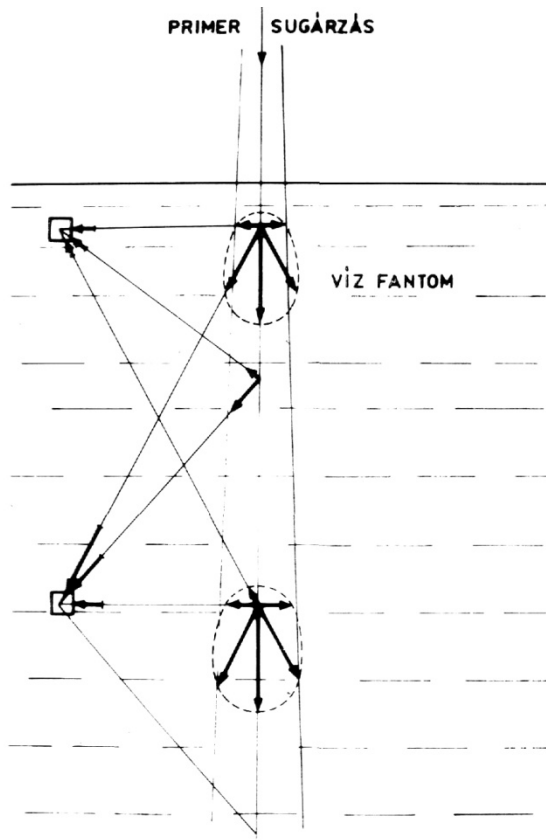
12. ábra. Légmentesen lezárt, mágneses kapcsolású kondenzátor ionizációs kamra a véletlen kapcsolást kizáró terelő lemezkével



13. ábra. A vízben mért mélydózis görbe és a fő-sugártól különböző távolságokban mért szórt sugárzás dózisteljesítménye a mélység függvényében

ségű röntgen és ^{60}Co gamma sugárzásnál végeztem el vízben. Ez utóbbira vonatkozó mérési eredményeket a 13. ábra szemlélteti, melyen felül a besugárzási mezőre vonatkozó mélydózisgörbe, alatta a sugárnyaláb tengelyétől 10, 12 és 16 cm-es távolságokban mért és az azonos mélységhez tartozó tengelymenti dózis érték százalékában kifejezett szórt sugárzási dózis értékek vannak feltüntetve 50 cm-es forrás-fantom felszín távolságnál. Az ábra szerint a tengely menti mélydózis értékek csökkenését a sugárnyalábban kívüli szórt sugárzásból eredő dózisok emelkedése közelítőleg kompenzálja. Így a főtengelytől azonos távolságokban a szórt sugárzás dózisteljesítmény a mélységtől függetlenül közelítőleg azonos.

Ezt az első pillanatra meglepő eredményt, hogy tudniillik a szórt sugárzás dózisteljesítménye nem követi a mélydózisok jól ismert csökkenését, hanem közelítőleg állandó marad, a következőképpen értelmezhetjük: a ^{60}Co gamma sugárzásnál a szórt sugárzás irány és intenzitás eloszlásából következik, hogy míg a felső rétegekben főként a 90° -os és ennél nagyobb szögű szóródások érvényesülnek, a mélyebb rétegekben egyre inkább szerephez jutnak a fentebbi rétegekből kisebb szög alatt szóródó



14. ábra. A környezetbe jutó szórt sugárzás mennyiségi változásának értelmezése

sugarak is. Ezeknek nagyobb intenzitása kompenzálja a mélydózissal együtt csökkenő 90° körül szóródó gamma sugarak intenzitását (14. ábra).

A 200 kV-os csúcspotenzitású röntgen sugárzásnál végzett méréseim szerint egyrészt az oldal irányokban mért szórt sugárzások dózisteljesítménye mintegy háromszor nagyobbak adódtak, másrészt a mélydózis görbe rohamosabb csökkenését a szórt sugárzás dózisteljesítményének relatív növekedése már nem tudja kompenzálni. Így a szórt sugárzás dózisteljesítménye a felszíntől számított távolság növekedésével egyre csökken. A nagy energiájú foton sugárzások terápiás alkalmazásának elterjedését jelentős mértékben éppen ennek a kisebb mérvű oldal irányú szóródásnak, azaz a szervezet egészét kevésbé károsító hatásának köszönheti.

II.

A következőkben rátérek a foton sugárzások szóródásával kapcsolatosan a sugárvédelem területén végzett egyes vizsgálataim ismertetésére.

Az atomenergia békés felhasználása során egyre növekszik az orvosi, ipari, mező-

gazdasági stb. célokra felhasznált nagy források száma és aktivitása. Ezeknek a besugárzó berendezéseknek sugárvédelmi szempontból is megfelelő megtervezése feltétlenül megkívánja a különféle szilárd anyagokon, levegőn stb. szóródó gamma sugárzások dózisteljesítményére vonatkozó összefüggések, törvényszerűségek ismeretét. Az elemi Compton szóródás törvényszerűségei jól ismertek és ezek alapján a vékony sugárnyaláboknak kis tömegekkel való kölcsönhatását eléggé jól számításba is lehet venni.

Széles sugárnyalábok és a gyakorlatban szereplő többnyire nagyobb tömegek esetében a viszonyok egyre bonyolultabbá válnak, számításokkal való követésüknél egyre nagyobb elhanyagolásokat és a valóságnak meg nem felelő leegyszerűsítéseket kell alkalmaznunk. Az adott körülmények között szóródó gamma sugárzás dózisteljesítményét ugyanis jelentős mértékben befolyásolják a következő tényezők:

A primer gamma sugárzás intenzitása és keménysége, a primer sugárnyaláb keresztmetszete, a szóró közeg anyagi minősége, sűrűsége és vastagsága, a primer sugárnyalábnak a szóró közegre vonatkozó beesési szöge, a szóródás szöge, a sugárforrás és a szóró közeg, valamint a szóró közeg és a vizsgálati pont egymástól való távolsága, a primer sugárzás által átsugárzott levegőoszlop, esetleg másodlagos és harmadlagos szóródási lehetőségek és végül a szórt sugárzásoknál érvényesülő abszorpciós tényezők.

Széles sugárnyalábok esetén egy bizonyos irányba sokféle szóródási szög mellett, tehát különböző energiájú gamma sugarak juthatnak el. A különböző mélységekben szóródó különböző energiájú gamma sugarakat maga a szóró közeg igen különböző mértékben nyeli el. Vastag szóró közegeknél ezenkívül a többszörös szóródás, azaz további energicsökkenés is fellép stb. Tehát egy eredetileg monokromatikus sugárzás esetén is erősen heterogén szórt sugárzást kapunk. Az elnyelt dózis számításához viszont feltétlenül szükségünk lenne ennek a heterogén sugárzás összetételének az ismeretére is, amit a szóródási folyamat sokrétűsége következtében számítással csak igen durva közelítéssel lehet meghatározni.

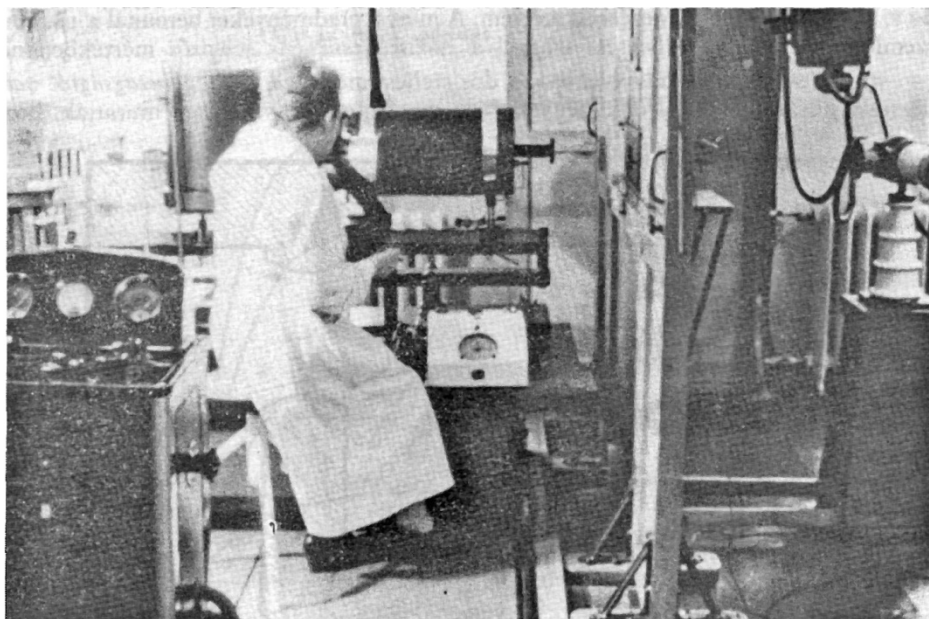
A fenti megfontolások alapján célul tűztem ki, hogy kísérleti vizsgálat tárgyává teszem a szórt gamma sugarak dózisteljesítményét befolyásoló fizikai tényezőket és egyes konkrét mérési sorozatok eredményeiből általános érvényű következtetéseket levonva, gyakorlatilag felhasználható összefüggéseket állapítok meg.

A nagymértékben heterogén szórt sugárzások mérésére olyan különféle típusú kondenzátor kamrákat dolgoztam ki, amelyek lehetővé tették a 8 nagyságrendet felölelő intenzitás tartományon belüli irány- és energia-független dózismérést. Valamennyi kamrának ugyanazzal a gömb alakú rádium etalonnal való hitelesítése lehetővé tette a 8 nagyságrendnyi dózisteljesítmény tartományon belüli értékek közvetlen és megbízható összehasonlítását. A kondenzátor kamrák energiatartományai vizsgálatait az abszolút R-meghatározó berendezésünkkel (15. ábra), valamint ^{60}Co , ^{226}Ra és ^{137}Cs sugárforrások gamma sugárzásával végeztük.

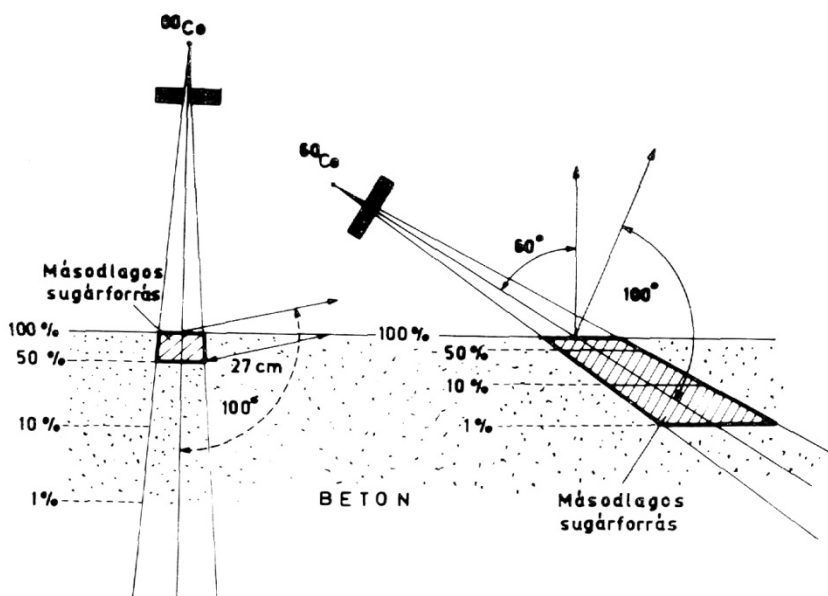
A vizsgálatok és azok eredményei röviden a következőkben foglalhatók össze:

1. A mérési eredmények értelmezése és a szóró közegben lejátszódó fizikai folyamatok lényegének szemléltetése céljából munkahipotézisként bevezettem a primer gamma sugárzás hatására a szóró közegben kialakuló *másodlagos sugárforrás* fogalmát, definiáltam annak keresztmetszetét és a beesés és szóródás szögétől is függő vastagát (16. ábra).

2. A primer sugárzás szóródásának különböző vastagságú ólom, vas, beton, téglá, parafin stb. lemezekben történő vizsgálatával tisztáztam a beesési szögnek és a rétegvastagságnak a szerepét, a szórt sugárzás dózisteljesítményének kialakulásában. A 100° -os szóródási iránynál a mért dózisteljesítménynek a *beesési szögtől való függését*



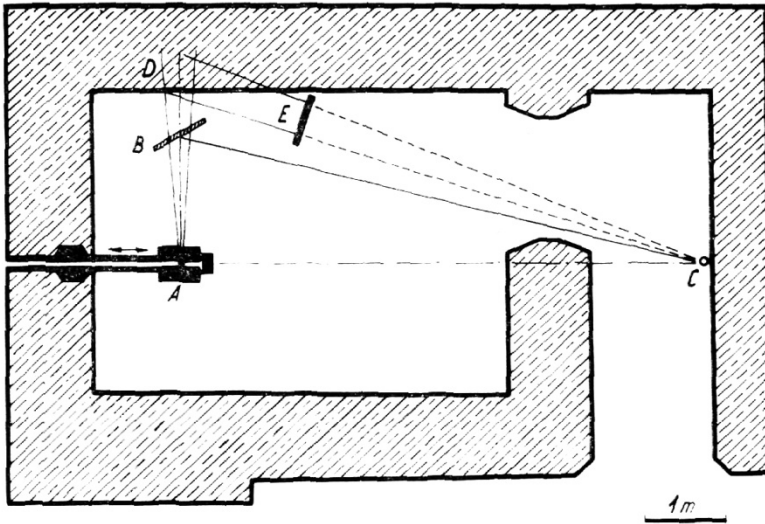
15. ábra. Abszolút R-meghatározó berendezésünk, az ólomfal jobb oldalán elhelyezkedő röntgenkészülékkel



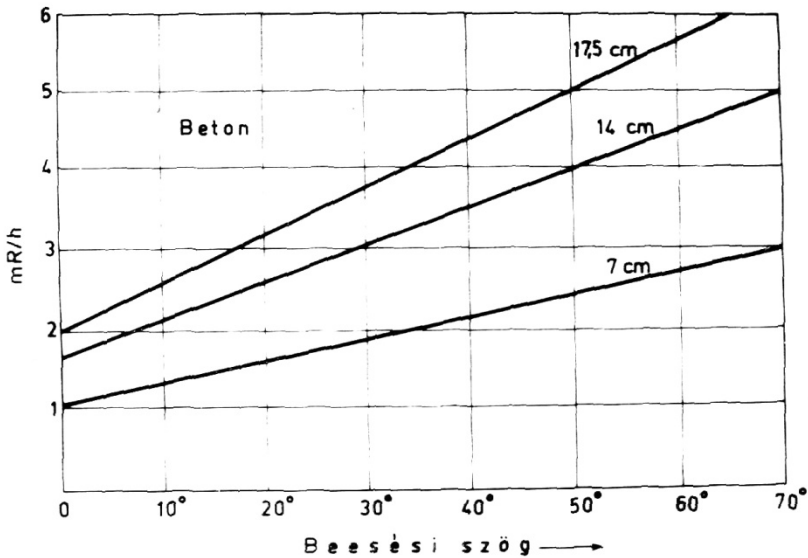
16. ábra. A másodlagos sugárforrás kialakulása a besugárzott szóróközegben ^{60}Co gamma sugárzásnál

a 17. ábrán látható elrendezésben mértem. A mérési eredményeket betonnál a 18. ábra szemlélteti. Eszerint a beesési szöggel a dózisteljesítmény jelentős mértékben nő.

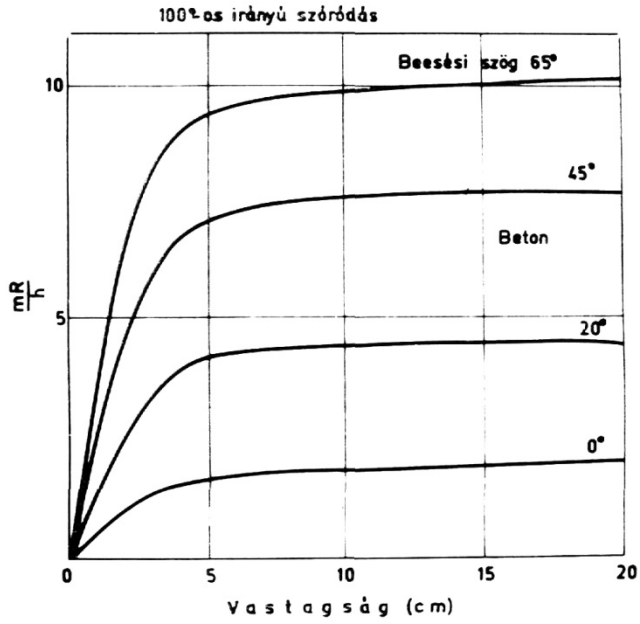
3. A 100°-os szóródási iránynál a dózisteljesítménynek a rétegvastagságtól való függését ábrázoló mérési eredmények (19. ábra) egyrészt világosan mutatják, hogy



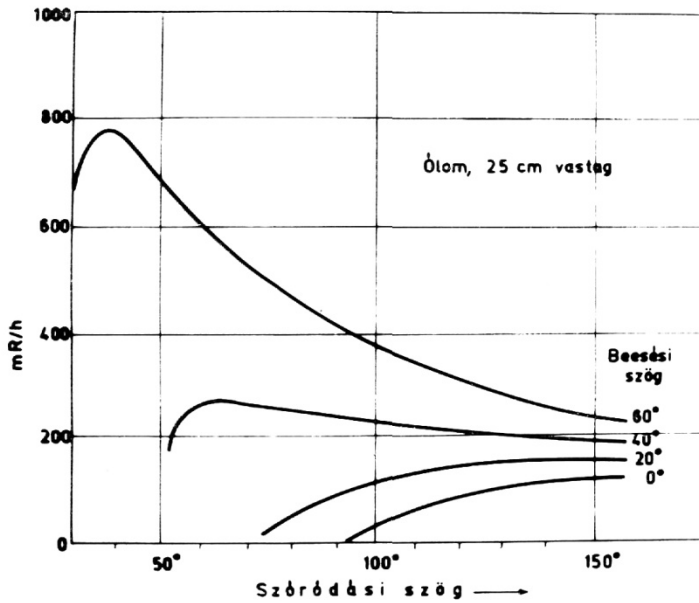
17. ábra. A szórt sugárzás dózisteljesítményének mérése különféle beesési szögeknél a GRAVICERT kobaltágyúval



18. ábra. A szórt sugárzás dózisteljesítménye betonnál a beesési szög függvényében



19. ábra. A szórt sugárzás dózisteljesítménye ólomnál a szóródási szög függvényében, különböző beesési szögeknel és telítési rétegvastagságoknál



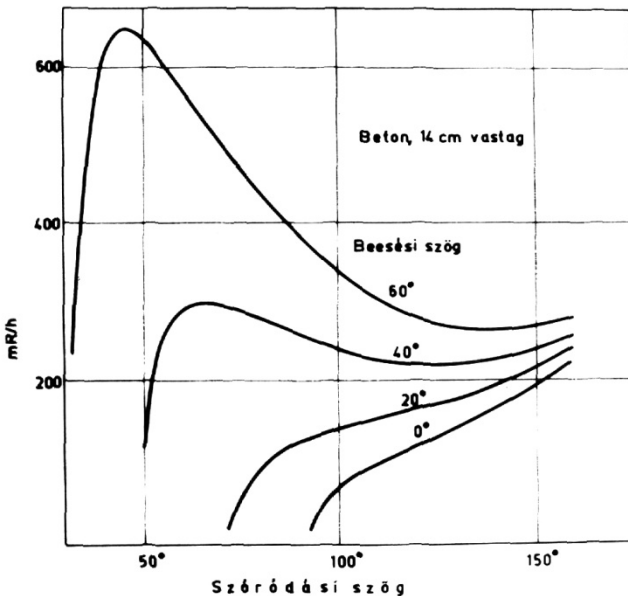
20. ábra. A szórt sugárzás dózisteljesítménye ólomnál a szóródási szög függvényében, különböző beesési szögeknel és telítési rétegvastagságoknál

például betonnál a rétegvastagság növekedésével a dózisteljesítmény egy telítődési értékhez közeledik, melynek értéke a beesési szög növekedésével jelentősen nő, másrészt a telítődési réteg vastagága a másodlagos sugárforrásra vonatkozó törvényszerűségnek megfelelően a beesési szöggel együtt ugyancsak nő. Hasonló menetű görbéket kapunk más anyagoknál is, csak természetesen lényegesen más dózisteljesítmény értékekkel.

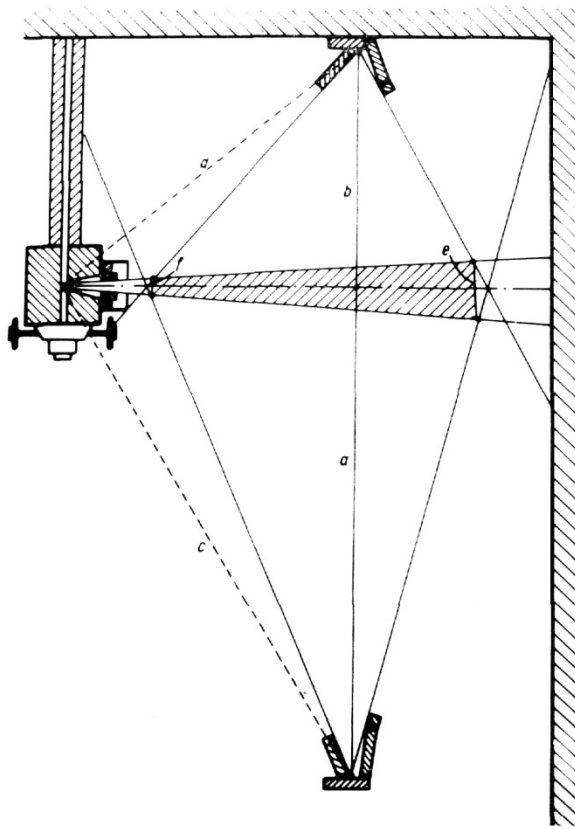
4. A 20. és 21. ábra ólomnál, illetve betonnál különböző beesési szögeknél szóródó gamma sugárzás dózisteljesítményét tünteti fel a *szóródási szög függvényében* telítési rétegvastagságoknál. Hasonló görbéket kapunk más anyagoknál is. Az ábráról közvetlenül leolvasható, hogy a merőleges beesésnél kapott értékekhez képest az egyre ferdebben beeső sugárzásokhoz tartozó dózisteljesítmények egyre nagyobbak lesznek. A 100° -os szóródási szögnél a növekedés több mint 1 nagyságrend. A növekedés nyilvánvalóan a másodlagos sugárforrás keresztmetszetének és a benne szóródó fotonok számának a megnövekedésével magyarázható.

5. Nagy sugárforrások szerelése, átemelése stb. alkalmával, panorama besugárzásoknál, igen jelentős szerepet játszik a *levegőn szóródó gamma sugárzás*. A méréseket a 22. ábra szerinti összeállításban végeztem. Az 1 liter levegőn szóródó gamma sugárzás dózisteljesítménye pl. 80° -os szóródási irányban a primer sugárzás megfelelő dózisteljesítményének $4,2 \cdot 10^{-5}$ százaléka 1 méter távolságban a szóró közegtől. A szóródás irányfüggése követi a differenciális szóródási hatáskeresztmetszet ismert irányfüggését.

6. A 4π -tér szögű szóródás vizsgálatok, melyeket a sugárvédelmi és az abszolút aktivitás meghatározási méréseknél jelentkező üreghatás, azaz a helyiség falairól, mennyezetéről és padlójáról visszaszóródó sugárzások zavaró hatásának meghatározása céljából végeztem, a hitelesítő mérések szempontjából fontos eredményre vezettek. Így például a dózisteljesítmény a forrástól számított távolsággal csak igen lassan csökken, tehát értéke a helyiség egész területén első közelítésben állandónak vehető.



21. ábra. A szórt sugárzás dózisteljesítménye betonnál a szóródási szög függvényében, különböző beesési szögeknél és telítési rétegvastagságoknál



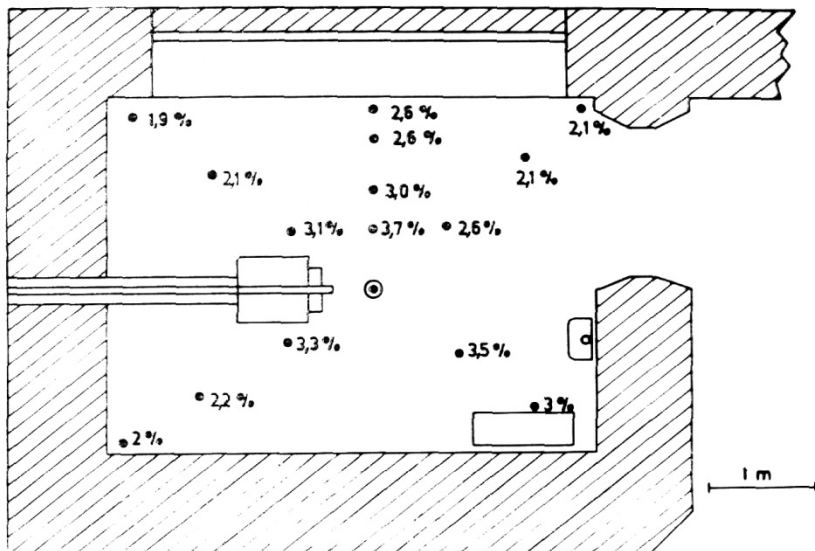
22. ábra. A levegőn szóródó gamma sugárzás dózisteljesítményének mérése; felülnézeti kép a padló fölött 150 cm-es magasságban

A 23. ábra az 5×4 méter alapterületű, 3 méter magas helyiségünkre vonatkozó mért értékeket tünteti fel, az azonos pontokban mért primer sugárzás dózisteljesítményének százalékában. Az üreghugárzás értékének meghatározása és korrekcióba vétele tehát esetenként feltétlenül szükségesnek mondható.

A szórt sugárzás dózisteljesítményére vonatkozó eredmények egyes sugárnyalábok esetén a következő formulával adhatók meg:

$$D_b = K \frac{F \cdot A}{10 \cdot d^2} \text{ mR/óra,}$$

ahol F a sugárnyaláb effektív keresztmetszete a forrástól 1 méter távolságban (cm^2), A a sugárforrás effektív aktivitása (Ci), d a kérdéses pont távolsága a másodlagos sugárforrástól (cm) és K a szóró közeg anyagi minőségétől, a beesés és a szóródás szögétől függő szorzótényező. Ennek értékeit ólomra a III. táblázat, betonra a IV. táblázat tartalmazza.



23. ábra. Szabadon álló sugárforrástól eredő összes szórt sugárzás dózisteljesítménye a helyiség különböző pontjaiban

III. táblázat

Az F-tényező értékei ólomra

Szóródási szög	Beesési szög							
	0	10	20	30	40	50	60	70
170	27,5	30,0	32,3	34,7	37,0	39,5	42,9	46,7
150	25,4	28,5	31,5	34,5	37,6	41,0	45,5	50,5
130	22,0	26,2	30,4	35,0	39,9	45,4	51,6	58,8
110	15,6	21,5	27,0	34,6	42,5	52,0	62,6	74,5
90		9,5	19,4	32,7	46,7	62,3	79,1	97,1
70				27,4	50,8	74,4	97,9	122,0
50						73,4	128,0	182,0

IV. táblázat

Az F-tényező értékei betonra

Szóródási szög	Beesési szög							
	0	10	20	30	40	50	60	70
170	244	247	249	251	253	255	257	259
150	182	191	201	211	222	236	250	266
130	138	156	172	189	206	223	242	261
110	86	114	144	177	208	244	276	312
90		69	122	180	240	297	355	412
70				147	262	363	460	562
50						317	597	

Végül az anyagi minőség szerepét a szórt sugárzás dózisintenzitásának a kialakulására az V. táblázat mutatja, amely különböző anyagokra, egyébként teljesen azonos

V. táblázat

Különböző anyagokon azonos körülmények között szóródó gamma sugárzás relatív dózisteljesítménye

Beesési szög	mR/óra				
	ólom	vas	beton	tégla	paraffin
0°	1	4,4	6,0	4,7	5,8
20°	2,32	10,3	13,5	13,0	13,2
45°	4,50	18,0	24,0	23,0	23,2
65°	7,25	24,7	31,7	29,7	30,5

körülmények között, az ólomra vonatkoztatott relatív dózisteljesítményeket tünteti fel 0°, 20°, 45° és 65°-os beesési szögeknél 100°-os szóródási irányban.

BOZÓKY LÁSZLÓ,
az MBT Elnökségének
tagja