



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

TÉZISFÜZETE

BODOR KÁROLY BALÁZS

Lézerberendezések segítségével keltett ionizáló sugárzások elleni védelem sugárvédelmi tervezésének elemei

Témavezető: Dr. Zagyvai Péter Benedek

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025.01.15.

Tartalomjegyzék

1	Summary	3
2	A kutatás előzményei	4
3	Célkitűzések	5
4	Vizsgálati módszerek	7
5	Új tudományos eredmények.....	9
6	Az eredmények hasznosítási lehetősége	11
7	Irodalmi hivatkozások listája	16
8	Publikációk	24
8.1	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények.....	24
8.2	További tudományos közlemények.....	24

1 Summary

The PhD thesis presents the elements of radiation protection design for protection against ionizing radiations produced by high energy laser sources. The research methods and results presented in the thesis and the recommendations formulated from them can be used in general for the design of radiation protection for facilities using ionizing radiations produced by laser equipment.

I will present certain relevant parts of radiation protection design for the ELI ALPS research facility built in Hungary.

This task requires an interdisciplinary approach because it covers the following items:

- Radiation protection (design, legal background, principles of radiation protection).
- Knowledge of particle physics (particle acceleration mechanisms, properties of electromagnetic and hadron cascades).
- Special radiation protection measuring technique (pulsed fields).
- Monte Carlo simulations (calculations, FLUKA).
- Radiation protection work procedures (training, recommendations, practices).

I got involved in the preparatory phase of ELI, and later I helped the official designer in the planning and construction of the ELI ALPS building complex, and I participated in the approval of the plans.

Radiation protection planning has already started in the preparatory phase of the ELI project. During the construction of ELI ALPS, the irradiation rooms were designed based on these plans. Equipment containing ionizing radiation, but no radioactive material (beamlines) Hungarian Atomic Energy Authority (HAEA) approval required the planning and implementation of beam line shielding.

The PhD thesis presents the knowledge and procedures necessary for the development of radiation protection, with the help of which this thesis can provide a starting point for the development and further planning of the radiation protection of ELI ALPS and other accelerator-like facilities similar to ELI ALPS.

2 A kutatás előzményei

Az első működő lézert Theodore Maiman építette 1960-ban. Az ezt követő években a lézertechnika rohamos fejlődésnek indult, azonban az elérhető maximális lézerintenzitásnak határt szabott az optikai eszközök túlmelegedése és deformálódása, illetve az optikai elemek roncsolódása bizonyos teljesítménysűrűségek fölött. Ezt a problémát 1985-ben Gerard Mourou francia fizikus küszöbölte ki (aki az ELI – Extreme Light Infrastructure projekt kezdeményezője is) a Chirped Pulse Amplification (CPA) ötletével [1-2], amiért 2018-ban megkapta a fizikai Nobel díjat.

1997-ben a lézerfény - anyag kölcsönhatást szimuláló OSIRIS kóddal [3] nagy intenzitású lézerfényt szimuláltak, az eredmények alapján a kölcsönhatás során gyorsított elektronok keletkezése volt várható, azaz a primer fénysugárzás ionizáló sugárzást képes kelteni, amihez megfelelő sugárvédelem is szükséges lesz [3-6]. 2002-ben ezt kísérletileg is igazolták [7], majd Gerard Mourou kezdeményezésére az EU-ban elindították az ELI projektet [8-10]. Korábban a lézerek és a sugárvédelem (ionizáló sugárzás elleni védelem) nem kapcsolódtak össze, mivel a lézerek csúcsteljesítménye annyira csekély volt, hogy nem keletkeztek, vagy csak igen kismértékben gyorsított részecskék. Az ELI sugárvédelme a gyorsítók sugárvédelméhez hasonlítható leginkább. Az ionizáló sugárzások keltésére a várható maximális 10^{21} - 10^{23} W/cm²-es fényintenzitás ad lehetőséget [11-12]. Az attoszekundumos lézerimpulzusok előállításáért többek között Krausz Ferenc kapott 2023-ban fizikai Nobel díjat [13]. Ezen általános összefoglalás után kiemelem azokat a részleteket, amik a doktori munka közvetlen előzményének tekinthetők:

Az ionizáló sugárzást előállító impulzus üzemű lézerek sugárvédelmi kérdéseit kevés közlemény tárgyalja. Magyarországon még nincs a Budapest Főváros Kormányhivatala Metrológia és Műszaki Felügyeleti Főosztály [14] által kiadott, illetve elfogadott tesztelési, kalibrálási, hitelesítési eljárás pulzált terekben történő mérésekre. Ugyanakkor az Országos Atomenergia Hivatallal (OAH) történt egyeztetéseknél az OAH jelezte, hogy az engedély kiadáshoz a későbbiekben szükség lesz a sugárvédelmi mérések pontosságának igazolására. Kezdeményeztem a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (HUN-REN EK) Sugárbiztonsági Laboratóriumánál (SBL) a tesztlaboratórium képességeinek kiterjesztését, és az OAH részére készítettünk két OAH MMT (Műszaki Megalapozó Tanulmány) pályázatot a témában [15-16], valamint 2024-re elnyertük a 3. pályázatot is. Az ELI keretein belül pár éven belül igen nagy dózisteljesítményű pulzált tereket kívánnak létrehozni [17], a későbbiekben a lézerek fejlődésével a pulzált terek paraméterei (dózis/impulzus, impulzus dózis max./min.

aránya) még inkább növekedni fognak [5]. Az ezzel kapcsolatos számos probléma egyike a dózis és dózisteljesítmény mérése, mivel a mérőeszközök bizonyos dózisteljesítmény csúcs felett már nem képesek a valós értéket mérni, a mérés nem konzervatív [18-25]. Az elsődleges kérdés az, hogy az operatív sugárvédelmi szempontokból releváns területeken (besugárzó termekben kívüli térrészek) elhelyezett mérőeszközök képesek lesznek-e megfelelően mérni az ott megjelenő pulzált tereket. A tesztelésekhez felhasználtuk a külföldön alkalmazott specifikációkat [26-31].

A nagy intenzitású lézernyalábok által keltett szekunder- és tercier sugárzások egyik lehetséges, már ismert hatása a felaktiválódás, amelynek modellezése és az így előálló potenciális sugárterhelés elleni védekezés tervezése szintén megoldandó feladat [33-34].

Az ionizáló sugárzások keltését és hatását leíró szimulációhoz szükséges Monte Carlo-típusú kódok rendelkezésre álltak, de alkotó alkalmazásukhoz a futtatások paramétereinek részletes meghatározása, beállítása, illetve optimalása is szükséges [35-37].

Részecskefizikai ismereteket is figyelembe kellett venni [4], mivel ezen információkból számos következtetés vonható le az árnyékolás tervezésekor. Az árnyékolás anyaga, kiterjedése, összetétele előzetesen közelíthető a részecskefizikai ismeretek felhasználásával.

A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont a Rendőrségi helyszínelők részére közös eljárásrendet készített (ennek kidolgozásában részt vettem) a Sugárbiztonsági Laboratórium (SBL) Mobile Expert Support Team-el (MEST), az idevonatkozó rendelet és útmutató felhasználásával és gyakorlatokat is tartottunk [38-41]. A gyakorlatok megszervezésénél felhasználtam az Including EU projektben szerzett tapasztalataimat [42]. Ezen ismereteket alkalmaztam az ELI ALPS (Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source) eljárásrendjének készítéséhez, felaktiválódással keletkező és diszpergálódó radioaktív anyagok keresése tárgyában.

3 Célkitűzések

A lézeres gyorsítással keltett ionizáló sugárzásokat létrehozó, illetve alkalmazó berendezések egyes sugárvédelmi kérdéseinek megoldásához szükséges kutatási feladatokat választottam ki a doktori munka tárgyaként. Ennek során csak kis részben támaszkodhattam a már üzemelő, kisebb teljesítményű lézeres nagyberendezésekkel szerzett tapasztalatokra [43-48]. Az ELI ALPS-hoz hasonló csúcsteljesítményű lézeres kutatóhelyek sugárvédelmének megtervezése, kialakítása igen összetett és újszerű feladat.

Az ELI ALPS sugárvédelmének kialakítása az alábbi feladatokat jelenti, amelyekhez a doktori munkát kapcsolni kívántam:

- A nyalábvonalak árnyékolásának megtervezése, sugárvédelmi ajánlások készítése az ELI ALPS számára, a biztonságos üzemeltetés egyes sugárvédelmi feltételeinek megtervezése.
- OAH engedélyek megszerzése, melyekhez az előbb említett eredményekre volt szükség.
- Az ELI ALPS számára is hasznosítható tanulmányok, eljárásrendek, tanpályák [49], virtuális sugárforrás rendszer fejlesztésében való részvétel.
- Referencia pulzált terek előállítása és dozimetriai detektorok tesztelése.

A doktori dolgozat célja ebből az összetett feladatból kiválasztott egyes, új tudományos eredmények eléréséhez vezető részek megoldása volt, úgymint:

A nagyintenzitású, igen rövid impulzusokból álló lézernyalábok által keltett szekunder- és terciér sugárzások hatásainak, különösen a berendezések használata során a hozzáférhető helyeken és a tágabb környezetben kialakuló dózisterek sajátosságainak, valamint az esetleg bekövetkező felaktiválódás hatásainak modellezése alkalmasan választott Monte Carlo-típusú kóddal. A szimulációk optimalizálása és az eredmények gyakorlati alkalmazása. A fentiek során előálló pulzált sugárzási tér dózisének és dózisteljesítményének (a különféle típusú sugárzásoktól külön-külön származó, a berendezés működése során keletkező, azaz „fajlagos, prompt dózis”) pontos meghatározása.

A gyorsító jellegű berendezések sugárvédelmi engedélyezéséhez szükséges fenti számítások mellett olyan gyakorlati eljárások kidolgozása (pl.: „forró pontok” azonosítása), amelyekkel az adott körülmények között a lehető legkisebb munkahelyi és környezeti dózisek, szennyezések, inkorporáció adódnak*. Az OAH egyeztetések során a hatóság felhívta a figyelmet, hogy amennyiben az ELI ALPS berendezéseinek üzeme alatt várható felaktiválódott anyagok keletkezése, akkor az engedélyezés feltétele, hogy a Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzat és a Sugárvédelmi Leírás [50] tartalmazza a „forró pontok” lokalizálását és a felaktivált anyagok helyes kezelésének eljárásrendjét. A folyamatok oktatása és begyakorlása is feltétele az engedély kiadásának.

* Az OAH egyeztetések során a hatóság felhívta a figyelmet, hogy amennyiben az ELI ALPS berendezéseinek üzeme alatt várható felaktiválódott anyagok keletkezése, akkor az engedélyezés feltétele, hogy a Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzat és a Sugárvédelmi Leírás [50] tartalmazza a „forró pontok” lokalizálását és a felaktivált anyagok helyes kezelésének eljárásrendjét. A folyamatok oktatása és begyakorlása is feltétele az engedély kiadásának.

4 Vizsgálati módszerek

A témához tartozó szakirodalmat tanulmányoztam [1-12], [32-34], [43], [51-54], elemeztem a nyalábvonalak koncepcionális és technológiai leírásait. Ennek keretében részt vettem az ELI előkészítési fázisában tartott azon szakmai eseményeken, amelyeken a sugárvédelem tervezését, azaz a berendezés működését összefoglaló „White Book” [8] sugárvédelmi fejezetét tárgyalták. A megvalósítás során ezeket az általános ismereteket kiterjesztettem az egyes nyalábvonalak részletes adataira.

Elsajátítottam a FLUKA (FLUktuierende KAskade) kód [35-36] használatát, részt vettem a fejlesztők által megtartott alap- és haladó kurzusokon, ahol már saját szimulációs eredményeket is be kellett mutatnom a fejlesztők számára [37]. A későbbiekben alkalmaztam a FLUKA kódot a sugárvédelmi számításokban a dózisterek jellemzésére, ezen belül a nyalábvonalak geometriájának leírására, a szükséges árnyékolások anyagának, geometriai elrendezésének és méreteinek a meghatározására, valamint az esetenként várható felaktiválódás kiszámítására.

A sugárvédelmi tervezés, ennek részeként az optimalizálás egyik fontos eszköze a munkahelyi és lakossági dózismegszorítás származtatott értékének meghatározása, amit összekapcsoltam a kísérleti berendezések működési paramétereivel. Ehhez számítási összefüggéseket állítottam fel, amelyek alkalmazásához – különösen az előzmények nélküli, „méretnövelés” sugárzási helyzetek kezelésénél – szükségesek a szimulációk eredményei is. Az így kapott eredmények tartalmazzák az összes fajtájú keltett ionizáló sugárzásra és azok energiaszételészására külön-külön vonatkozó „fajlagos, prompt dózis limiteket”.

A lézeres részecskegyorsítás során előálló dózisteret alkotó ionizáló sugárzások a kiváltó lézerimpulzusok paramétereinek megfelelően pulzált sugárzási teret fognak alkotni. Ezek biztonságos sugárvédelmi kezeléséhez az ELI ALPS-ban rendelkezésre álló mérőeszközöket teszteltem a várható pulzált sugárzási viszonyok között. Az OAH-val történő egyeztetést követően két OAH MMT pályázatot is benyújtottam kollégáimmal, amelyekben ismertettük a készülékek tesztelési terveit [15-16]. Ennek érdekében első körben az OAH engedélyt kiterjesztettem pulzált terek mérésére, a projekt kiemelt kutatási téma lett a HUN-REN EK-ban. Pulzált teret előállító röntgen berendezést használtam a mérőeszközök tesztelésére. A készülék korlátozott ideig állt rendelkezésre, és csak a gyártó által megadott adatokra támaszkodhattam. Emiatt saját fejlesztésbe kezdtem bele, javaslatomra egy gamma nyalábot szaggató berendezést (gamma chopper) valósítottunk meg. A saját fejlesztésű készülékkel a berendezés által előállított pulzált tér jobban definiálható volt, valamint hangolható bizonyos

határokig. Így sikerült az ELI ALPS besugárzó termein kívüli térrészén kialakuló pulzált térhez hasonló pulzált teret előállítanom. Ezután különféle készülékeket teszteltem. A szakirodalmak alapján várható volt, hogy a tesztelt mérőkészülékek deficit nélkül mérnek, ezt a tesztmérések igazolták, természetesen a megfelelő beállításokkal. A projekt továbbfejlesztése jelenleg is zajlik.

A sugárvédelem hatékonyságának növeléséhez vizsgálati megoldást dolgoztam ki a lézeres gyorsítással keltett részecskék által okozott felaktiválódás helyeinek és mértékének felismerésére [38-42]. A világon szinte egyedülálló speciális tanpályát [55] hoztam létre a HUN-REN EK-ban, ami nagyban hasonlít az ELI ALPS egyes nyalábvonalainak későbbi üzemi körülményeihez, amikor a felaktiválódásból származó remanens dózisteljesítmény emelkedett háttérrel fog létrehozni. Ilyen körülmények között igen nehéz a sugárforrások, illetve ELI esetében a céltárgyról leváló darabok megtalálása. A tanpálya működtetéséhez az OAH csak zárt, a fizikai védelmi rendelet szerint [56] 4. és 5. kategóriájú sugárforrásokat engedélyezett, így a tanpályán a nagy dózisteljesítményű terek következtében létrejövő szennyeződés, illetve annak mentesítése nem gyakorolható valós körülmények között. Emiatt az ELI-ben a felaktiválódásból származó felületi szennyezettség lokalizálása, dekontaminálása, illetve baleseti szituációk (hirtelen dózisteljesítmény növekedés, amennyiben az ionizáló sugárzás eltérül és nem az árnyékolásba csapódik) begyakorlása kérdésessé vált. Javaslatomra a fenti problémákra a megoldást az ún. Virtuális sugárforrás rendszer továbbfejlesztése jelentette. A rendszer egyfajta Mixed Reality rendszer, amely nem ionizáló sugárzást használ, így biztonságos, ugyanakkor a felhasználó számára teljesen realizisztikusan működik. A rendszerrel a fent említett scenáriókat valós időben meg lehet csinálni, így az ELI ALPS szakembereit a várható speciális helyzetekre is fel lehet készíteni, mely jelentősen megnöveli a létesítmény sugárbiztonságát és minimalizálható a rendkívüli események köre [57]. A fejlesztés az ELI ALPS mellett más intézmények számára is hasznos lehet, több technológiát és idevonatkozó szakirodalmat is megvizsgáltam [58-73]. A virtuális rendszer alapvetően az adó és vevő közötti távolság mérésén, illetve pozíció meghatározáson, valamint az abból számolt távolság méréseken alapul. A távolság ismeretében számítja ki a dózisteljesítményt a megadott értékek alapján [74]. A rendszert a fejlesztés során több esetben is teszteltem, alkalmaztam [75-77].

5 Új tudományos eredmények

Tézispontok

(T1) Elektronrefluxból származó fékezési sugárzás meghatározása szimulációval, lokális sugárvédelmi árnyékolás tervezése

Szakirodalmi anyagok és a nyalábvonalak paramétereit felhasználva, extrapolációval meghatároztam a nagy teljesítményű lézernyalábbal besugárzott szilárd céltárgyat tartalmazó besugárzási kamra külső felületén és annak közelében a keltett elektronsugárzás lassulása következtében kialakuló fékezési sugárzás várható dózisteljesítményét. A számításokban – az MSZ 62-2:2017 szabvány 3.8. és 4. fejezetében foglaltakat követve – figyelembe vettem a terem falvastagságát és a sugárvédelmi tervben is szereplő lokális árnyékolást. A későbbiekben az extrapolált értékek validálhatók a passzív detektoros (PorTl [78]) dózismérések segítségével. Javaslatot tettem a PorTl-ek használatára a besugárzó kamrák körül.

[Cikk I.]

(T2) Nyalábcsapda tervezése

A csehországi ELI BEAMLINES egyik nyalábcsapdájára további tervezési javaslatokat dolgoztam ki. Az ELI ALPS egyik nyalábvonalának várható működési paramétereit felhasználva a FLUKA szimulációs programban megterveztem az adott nyalábvonalhoz illesztendő összetett nyalábcsapdát. Optimalizálási szempont volt az elvárt hatékonyság mellett a csapda minél csekélyebb mértékű felaktiválódása.

Meghatároztam az indukált radioaktivitás várható viszonyait. A felaktiválódás modellezésével kiválaszthatók a gamma- és röntgensugárzás árnyékolására általánosan használt ólom árnyékolásnál előnyösebb anyagok. A felaktivált anyagok minimalizálására tettem javaslatot.

[Cikk II.]

(T3) Gyorsított szimulációk, Paraméteroptimalás

Gyorsított szimulációs eljárást dolgoztam ki a kialakuló dózisterek modellezésére. Megvizsgáltam, hogy a FLUKA által szolgáltatott eredmények mennyire függenek az indított részecskeszámától. Amennyiben az indított részecskeszám értékét lecsökkentem, akkor jelentősen tudtam csökkenteni a szimuláció futási idejét. Az eredmények támpontként felhasználhatók a tervezés kezdeti szakaszában.

Paraméteroptimalizációs vizsgálatokat végeztem. Az általam megalkotott tervezési egyenletben szereplő komponenseket vizsgáltam meg egyenként: ezek változásai hogyan befolyásolják a fajlagos dózislímiteket, illetve ez alapján megbecsülhető, hogy a meglévő árnyékolást milyen mértékben szükséges módosítani.

[Cikk III.]

(T4) Felaktivált anyagok lokalizálása: Eljárásrend, Tanpálya, VRSS

A besugárzás előidézheti a céltárgy mechanikus sérülését, darabolódását, ezért meg kell akadályozni a törmelékek ellenőrizetlen módon történő nyitott sugárforrássá válását. Ehhez eljárásrendet dolgoztam ki. Megállapítottam, hogy a felaktivált anyagok remanens dózisteljesítménye a természetes háttérhez képest megnövelheti a dózisteljesítményt. Speciális, az ELI körülményeihez várhatóan nagyon hasonló tanpályát alakítottam ki, ahol a sugárvédelmi szakemberek a jövőbeni dózisviszonyokhoz hasonló környezetben gyakorlatozhatnak.

Részt vettem a szennyezettség lokalizálására, illetve dekontaminálására való felkészültség gyakorlására szolgáló virtuális sugárforrás-kereső berendezés fejlesztésében.

[Cikk: I, IV, V., VI]

(T5) Sugárvédelmi mérőeszközök vizsgálata pulzált terekben

A besugárzó termeken kívüli térrészekben várható szórt sugárzás által keltett pulzált terekhez hasonló teret előállító berendezést valósítottunk meg javaslatomra. A berendezés segítségével ismert, hangolható pulzált tereket lehet előállítani. Ezen terekben teszteltem kollégáimmal az ELI ALPS-ban üzemelő sugárvédelmi detektorokat. A teszt eredményei alapján a készülékek képesek lesznek megfelelően mérni a külső terekben létrejövő pulzált tereket.

Megfelelően összeállított mérési környezetben végzett dózis- és dózisteljesítmény mérésekkel megállapítottam, hogy ennek a feltételnek az integrált üzemmódban működő dózismérők jobban megfelelnek.

[Cikk VII.]

6 Az eredmények hasznosítási lehetősége

- (1) (T1, CI) A nagyenergiájú lézerrel besugárzott céltárgyak részlegesen megolvadhatnak, feltöredhetnek, emellett igen kis darabok lepattoghatnak róluk, emellett fel is aktiválódhatnak. Emiatt egy eljárásrend részeként sugárvédelmi ajánlásokat fogalmaztam meg. A céltárgyat csak távtartóval szabad megfogni, valamint a besugárzást követően a sugárvédelmi szakembereknek kereső- felderítő lépést kell beiktatni, hogy a későbbi kontamináció elkerülhető legyen. Az eljárásrend általam kidolgozott egyes részei bekerültek az ELI ALPS Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzatába.
- (2) (T1, CI) A céltárgyban és/vagy az azt körülvevő anyagokban az ún. elektron reflux hatására fékezési röntgensugárzás is keletkezhet. A tervezett üzemviteli paramétereket felhasználva extrapoláció segítségével számításokkal meghatároztam (10^{15} W/cm² mért intenzitásból kiindulva 10^{19-22} W/cm² intenzitásig) a várható fotondózist a besugárzó kamra körül. Megállapítottam, hogy jelentős dózisoskra (2,4 Sv/s) lehet számítani a besugárzási kamra környékén, emiatt kiemelten fontos az oktatás és a PSS interlock rendszer megfelelő logikájának kiépítése, hogy ilyen körülmények között senki se tartózkodhasson a besugárzó teremben. Javasoltam, hogy a HUN-REN EK-ban gyártott PorTL mérőrendszert alkalmazzák a besugárzó kamra körüli fotondózistér meghatározására, mely szintén bekerült az ELI ALPS Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzatába. Amikor az ELI ALPS lézereinek fókuszált intenzitását elkezdik megnövelni, ellenőrző mérések segítségével nagyságrendenként lehet majd meghatározni a nemzetközi szakirodalomban jelenleg még hiányzó fotondózis adatokat. Ezzel a módszerrel a jelenlegi, extrapolációval kapott görbe validálható lesz.
- (3) (T2, CII) A szimulációs számítási eredmények arra mutattak, hogy az óriás rezonancia neutronok általi felaktiválódással egyértelműen számolni kell nagyobb részecske energiák esetén. A felaktiválódás minimalizálható megfelelő árnyékoló anyag választásával, mely kevésbé aktiválódik fel, és kevesebb óriás rezonancia neutron generál, ezért az elvégzett szimulációk alapján közepes rendszámú anyagokat választottam. A kísérletek folyamatos nyomon követésével, tervezésével, mérésével meghatározható lesz a felaktiválódás mértéke a besugárzó teremben, megfelelő pihentetéssel, cserével pedig a tartósan radioaktív hulladékok volumene minimalizálható lesz.
- (4) (T2, CII) A csehországi ELI Beamlines-nak tervezett nyalábcspadát továbbfejlesztettem a még hatékonyabb neutronárnyékolás érdekében, valamint az ottani eredeti tervektől eltérően kisebb

darabokból terveztem meg a nyaláb csapdát, emiatt könnyebb azt mozgatni, szállítani, és egyszerűbb bizonyos időközönként lecserélni és pihentetni a leginkább felaktiválódott csapdárészeket.

- (5) (T3, CIII) Az egyes nyalábvonalak sugárvédelmi tervezése során kihívás volt időben teljesíteni a tervezési részfeladatokat. Emiatt a szimulálási időkeretet le kellett csökkenteni, úgy, hogy érdemi információvesztés ennek ellenére ne történjen. Megvizsgáltam ennek a lehetőségét, és sikerült kidolgoznom egy olyan eljárást, melynek segítségével kisebb indított részecskeszámmal is megfelelően pontos eredmények adódtak, így jelentős időt tudtam megtakarítani, és adott időkeret alatt többféle elképzelést tudtam megvizsgálni, illetve paraméteroptimalás vizsgálatot végezni.
- (6) (T3, CIII) A sugárvédelmi tervezéshez megalkottam a tervezés fő egyenletét, majd egy Excel táblázatba programoztam fel az átrendezett egyenletet. Ennek segítségével gyorsan meghatározhatók a választott dózismegszorításokból származtatott prompt, illetve fajlagos dózis limitek, és bármely paraméter változás esetén szintén előállnak az új módosult értékek. A paraméteroptimalás vizsgálatok alapján látható, hogy az operációs paraméterek egyenesen arányosak a fajlagos dózissal. Előnyös és szükséges lehet, hogy megfelelő munkaszervezéssel csak sugárvédelmi besorolású munkavállalók tartózkodjanak az „A” épületben a besugárzások idején. A keletkező szekunder sugárzások adatait figyelve megállapítható, hogy minél nagyobb a keltett részecske energiája, annál kevesebb keletkezik belőle, és fordítva. Ebből következik, hogy egy adott nyalábvonal esetén nem feltétlenül a legnagyobb energiájú komponens a limitáló tényező. Az árnyékolások geometriai elrendezését is megvizsgáltam. A szimulációk igazolták, hogy minél távolabb vagyunk kénytelenek az árnyékolást elhelyezni, annál rosszabb az árnyékolás határfoka. A részecske (elektron) energia növekedés hatásának vizsgálatánál látható, hogy 100 MeV és 1 GeV közti növekedés esetén szükség lesz az árnyékolás kiegészítésére (6 nagyságrend prompt dózis növekedés), míg GeV tartományban már csak további 2 nagyságrendnyi emelkedés várható. A szimulációk alapján látható, hogy minél közelebb helyezük el az árnyékolást a forráshoz, annál hatékonyabban lehet azt árnyékolni. A kutatói igények ezt több esetben sajnos nem teszik lehetővé, és emiatt külön földem se helyezhető a besugárzó kamra fölé. Az árnyékolás illesztésére, az elemek átfedésére is nagy hangsúlyt kell fektetni, mivel nem megfelelő illesztési réseken a sugárzás jet formájában kilőhet.
- (7) (T4, CI, CIV, CV, CVI) A HUN-REN EK-ban javaslatomra tanpályákat létesítettünk a munkahelyi sugárvédelmi tevékenységek gyakorlására. A beltéri pálya tartalmaz enyhén emelkedett háttérű térrészeket, ezt kifejezetten az ELI számára alakítottam ki. A beltéri pályán az ELI-hez hasonló remanens dózisteljesítményű terekben lehet sugárforrások és felaktiválódott anyagok

keresését valós körülmények között gyakorolni. Továbbá a HUN-REN EK-ban a részvételemmel kifejlesztett virtuális sugárforrás rendszer segítségével a nyaláb eltérülés okozta hirtelen dózisteljesítmény növekedést is be lehet mutatni, és gyakorolni lehet az ilyenkor szükséges sugárvédelmi tevékenységeket: gyors felderítés, döntés, beavatkozás. Javaslatomra a rendszert tovább fejlesztettük, és így megvalósult a virtuális felületi szennyezettséggel történő dekontaminálási gyakorlatok elvégezhetősége, mely teljesen valósághű, ugyanakkor biztonságos. Az ELI-ben a felaktivált céltárgy darabkák és a hot spotok felületi szennyezettséget okozhatnak, emiatt javasoltam a virtuális rendszer továbbfejlesztését. Az ELI működésének fejlődésével járó sugárvédelmi kihívásokra (forráskeresés emelkedett dózistérben, dekontaminálás, hirtelen dózisteljesítmény növekedés) a tanpályával, virtuális rendszerrel fel lehet készülni.

- (8) (T5, CVII) Az ELI ALPS működése pulzált sugárzási tereket hoz létre. A sugárvédelmi berendezések megbízható működésének elősegítésére a HUN-REN EK-ban javaslatomra az SBL Tesztlaboratóriumát kiterjesztettük pulzált terek elemzésére. Kifejlesztettünk egy referencia pulzált teret előállítani képes berendezést (ún. Gamma chopper), továbbá a szükséges sugárvédelmi dokumentumok elkészítésével hozzájárultam az ehhez szükséges OAH engedély megszerzéséhez. A tesztlaboratóriumban a STEP OD-02 és FHT 192 dozimetriai eszközöket összemértem. Az eredmények alapján az ELI-ben használt készülékek firmware cserére szorultak, és javaslatomra ezen csere meg is történt. A csere után már nem volt tapasztalható indokolatlan riasztás a detektorok által. Két OAH MMT tanulmány is készült, melynek társszerzője voltam, ezen tanulmányok nagyban hozzásegítik az OAH-t a pulzált terek sugárvédelmi problémáinak megértéséhez, valamint segítséget nyújthatnak az ELI ALPS engedélykérelem elbírálásában.

Ajánlások:

A doktori dolgozatban megfogalmazott ajánlásaim hasznosak lehetnek az ELI-ben lévőkhöz hasonló gyorsítók tervezéséhez, illetve az ELI további tervezéséhez:

Ajánlom a kutatókkal, mérnökökkel és az engedélyező hatóság (OAH) szakembereivel történő szoros együttműködést, egyeztetéseket.

A részecskefizika mélyebb szintű ismerete fontos, mivel tisztában kell lenni a fizikai folyamatokkal (lézerfény - anyag kölcsönhatás, gyorsítási mechanizmusok, elektromágneses - hadron kaszkádok, felaktiválódás). Egy árnyékolástervezésnél még a szimuláció előtt kikövetkeztethető hozzávetőlegesen, hogy milyen kiterjedésű és anyagú védelemre van szükség. A szimuláció elsősorban a pontosabb méretezésben segít.

- (1) (T1, CI) A Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzat betartásával és az eljárásrend folyamatos gyakorlásával minimalizálható a felaktivált céltárgy által okozott kontamináció.
- (2) (T1, CI) A besugárzó termekben meghatároztam a kamra körüli várható fotondózis-tereket. Az eredmények alapján ajánlottam a PorTL területi dózismérő rendszer használatát, azaz a doziméterek kihelyezését a kamra körül, majd a besugárzások utáni kiértékelését, így validálható lesz a szakirodalmi extrapoláció által kapott görbe meredeksége. A fenti gondolatból adódóan ajánlom a PSS rendszer körültekintő megtervezését, ne állhasson elő semmilyen körülmény között olyan állapot, hogy besugárzás alatt a besugárzó terembe be lehessen menni.
- (3) (T2, CII) A sugárvédelmi tervezéshez szimulációs Monte Carlo kód szükséges. E kód haladó felhasználói szintű ismerete elvárható a sugárvédelmi szakemberektől, olyan kódot kell használni, választani, ami képes a várhatóan keltett részecske típusokat és energiákat kezelni.
- (T2, CII) A nyalábcspadák és árnyékolások anyagaként elsősorban közepes rendszámú anyagok használatát javaslom, mivel a nagyobb rendszámú anyagokban nagyobb út megtétele után „fagynak be” a kaszkádok a kis kritikus energia miatt, nagyobb visszaszórás jelentkezhet (pl. neutronokra ólom árnyékolásnál), valamint hajlamosabbak a felaktiválódásra és nagy hozamú óriás rezonancia neutronokat termelnek, ami növeli a környező anyagok felaktiválódását. A kis rendszámú anyagok fő foton abszorbensnek nem alkalmazhatók, mert igen kiterjedt méretű árnyékolást kellene készíteni.
- (4) (T2, CII) Az árnyékolást érdemes modulárisra tervezni, ugyanakkor nagy figyelmet kell fordítani az illesztésekre, hogy a réseken kilövő jet sugárzást elkerüljük.
- (5) (T3, CIII) Ajánlom a gyorsított szimulációs eljárás használatát, mivel nemcsak a tervezésben, tovább tervezésben, paraméteroptimalás vizsgálatok esetén hasznos, de egy esetleges üzemzavar vagy baleset gyorsabb sugárvédelmi értékelésére is lehetőséget ad.
- (6) (T3, CIII) Ajánlott paraméteroptimalás vizsgálatokat végezni, mivel számos fontos megállapítás vonható le az eredményekből, úgymint:
- Nem feltétlenül a legnagyobb energiájú részecskékhez tartozik a legszigorúbb fajlagos dózis limitáció.
- Érdemes az árnyékolást a forráshoz minél közelebb elhelyezni. Ha ez nem lehetséges, számolni kell a kiszóródással, valamint az árnyékolási hatások csökkenésével, illetve a kémény effektussal.
- A Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzatban korlátozó előírásokat kell bevezetni. A besugárzások alatt a besugárzó termék felett és a folyosókon nem sugárvédelmi besorolású

munkavállaló nem tartózkodhat, akkor a fajlagos dózis limiteknél legalább egy nagyságrend nyerhető. Ezen megoldáshoz a PSS rendszert is hozzá kell fejleszteni.

Nagyon fontos az árnyékolás megfelelő pozicionálása a várható nyaláb irányokat figyelembe véve, ellenkező esetben a besugárzó termen kívül a dózisterhelés több nagyságrendet növekedhet.

Ajánlom a sugárvédelmi tervezésnél (ideértve a nyalábvonalak megközelítésének helyigényét), hogy a 100 MeV-es nagyságrendű részecske nyalábok sugárvédelmi áttervezésénél várhatóan kiegészítő árnyékolást kell alkalmazni, mivel az energia növekedésével jelentősen nőhet a fajlagos dózis tér, míg a már kiinduláskor is GeV-es nagyságrendű nyaláboknál ez a növekedés kevésbé szignifikáns.

(7) (T4, CI, CIV, CV, CVI) A várható felaktiválódás és a kialakuló hot spotok miatt ajánlom a HUN-REN EK tanpályákon történő gyakorlatozást, kiegészítve a virtuális rendszer lehetőségeivel. Javaslom a felderítési eljárásrend beillesztését a Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzatba.

(8) (T5, CVII) Ajánlom az ELI ALPS-ban használatos detektorok tesztelését referencia pulzált térben. A referencia pulzált mező rendelkezésre áll a HUN-REN EK-ban a Gamma chopper berendezés által, mely fejlesztésében jómagam is részt vettem. Nagyon fontos a mérő készülék megfelelő üzemmódú beállítása.

(T5, CVII) Ajánlom a pulzált terek mérésére alkalmas detektorokat összekötni a lézerrendszert irányító egységgel, a sugárvédelmileg biztonságos üzemelés érdekében, de csak a fenti ajánlások betartásával, különben a sok hamis pozitív jelzés ellehetetleníteni a kísérletek végrehajtását.

7 Irodalmi hivatkozások listája

- [1] POCSAI M. A.: Részecskegyorsítás lézerrel, Diplomamunka 2014.
<https://www.kfki.hu/~pocsai/diplomamunka.pdf> (Letöltve: 2015.12.05.)
- [2] MOUROU G.: Nobel Lecture: Extreme light physics and application, Rev. Mod. Phys. 91, 030501 – Published 2 July 2019
Doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.030501>(Letöltve: 2020.01.14.)
- [3] CARDOSO L., MARTI M., LOPES N.: OSIRIS 2.0 application to the 100 PW ELI case, előadás, ELI előkészítő fázis, Salamanca, 2010.
- [4] FÖLDES I.: Részecskegyorsítás lézerplazmában, Fizikai Szemle, 2006/11, LVI. évfolyam
<http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0611/FizSzem-200611.pdf> (Letöltve: 2009.12.25.)
- [5] TAJIMA T.: Laser acceleration and its future, Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci. 2010 Mar; 86(3): pp.147–157. Doi: 10.2183/pjab.86.147 (Letöltve: 2015.06.08.)
- [6] Buborék effektus szimulációja:
<https://www.youtube.com/watch?v=MI NxgmPVF6U&t=2s> (Letöltve: 2014.09.15.)
- [7] MALKA V. et al.: Electron Acceleration by a Wake Field Forced by an Intense Ultrashort Laser Pulse, Science 22 Nov 2002 Vol 298, Issue 5598 pp. 1596-1600 Doi: 10.1126/science.1076782 (Letöltve: 2012.04.05.)
- [8] MOUROU G., KORN G., SANDNER W., COLLINER J. L.: ELI White Book: <https://eli-laser.eu/media/1019/eli-whitebook.pdf> (Letöltve: 2014.01.11.)
- [9] ELI ERIC honlap: <https://eli-laser.eu/> (Letöltve: 2023.04.22.)
- [10] AMIRANOFF F., AUGÉ F., BACKE H., BALCOU PH., BLASCHKE D.-B., BERNARD D., BRASILE J.-P., BULANOV S., CANOVA F., CHAMBARET J.-P., CHARALAMBIDIS D., CHÉRIAUX G., DOLLINGER G., DRUON F., FERRAND R., FORGET N., GEORGES P., GRUENER F., HABS D., HANNACHI F., HATSAGORTSYAN K., HULIN D., KARSCH S., KOMPA K., KRAUSZ F., KUSHEL NICK K., LE BLANC C., LEDINGHAM K., MALKA G., MALKA V., MEYER-TER-VEHN J., MORA P., MOUROU G.-A., NAUMOVA N., PEGORARO F., PETITE G., PISKARSKAS A., PITTMAN M., PLÉ F., PUKHOV A., ROTH M., SAUERBREY R., ROUSSE A., SCHARDT D., SCHREIBER J., SEBBAN S., SETTE F., SCHUETZOLD R., TSAKIRIS G., TIKHONCHUCK V., ULLRICH J., VIDEAU H., VRAKKING M., WILLI O.: Proposal for a European Extreme Light Infrastructure (ELI)
- [11] OSVAY K.: Az ELI-ALPS lézerei és kutatási infrastruktúrája
https://www.kfki.hu/elftkisk/61_Anket/61_Eloadasok/Osvay_K.pdf (Letöltve: 2013.06.14.)

[12] FUCHS J., AUDEBERT P., BORGHESI M., PÉPIN H., WILLI O.: Laser acceleration of low emittance high energy ions and applications, ELSEVIER, 2009. Comptes Rendus Physique 10, (2009) pp. 176-187.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070509000450>

(Letöltve: 2010.02.03.)

[13] KRAUSZ F., IVANOV M.: Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163 – Published 2 February 2009 Doi: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.163> (Letöltve: 2018.08.29.)

[14] Budapest Főváros Kormányhivatala Metrológia és Műszaki Felügyeleti Főosztály honlapja: <https://mkeh.gov.hu/meresugy> (Letöltve: 2023.10.10.)

[15] BODOR K., GULYÁS A., CSÖME CS., TÓTH CS.: Impulzus üzemű ionizáló sugárzást létrehozó berendezés által generált pulzált terek vizsgálata, sugárzásmérő detektorok, detektáló rendszerek tesztelése és a tesztelést segítő szimulációk, OAH-MMT tanulmány, 2019.

[16] BODOR K., GULYÁS A.: Pulzált sugármező, mérőeszközök és forgótárcsás kísérleti berendezés vizsgálati eljárásainak megalkotása. Az előállított pulzált sugármező, a mérőeszközök és a kísérleti berendezés tesztelése, OAH-MMT tanulmány, 2020.

[17] OSVAY K., SZABÓ G.: Lézeres neutronforrás fejlesztése

https://mersz.hu/hivatkozas/matud202012_f52076#matud202012_f52076

(Letöltve: 2023.01.15.)

[18] HUPE O., ZUTZ H., KLAMMER J.: Radiation protection dosimetry in pulsed radiation fields <https://www.irpa.net/members/TS2f.3.pdf> (Letöltve: 2021.11.22.)

[19] KLAMMER J., ROTH J., HUPE O.: Novel reference fields for pulsed photon radiation installed at PTB, Radiat. Protect. Dosim. 151 (3), pp. 478–482.

[20] AMBROSI P., BOROWSKI M., IWATSCHENKO M.: Considerations concerning the use of counting active personal dosimeters in pulsed fields of ionizing radiation, Radiation Protection Dosimetry (2010), Vol. 139, No. 4, pp. 483–493.

<https://academic.oup.com/rpd/article/139/4/483/1672346?login=false> (Letöltve: 2021.04.08.)

[21] ANKERHOLD U., HUPE O., AMBROSI P.: Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields, Radiation Protection Dosimetry (2009), Vol. 135, No. 3, pp. 149–153., <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/135/3/149/1727634?login=false> (Letöltve: 2019.07.14.)

[22] ZUTZ H., HUPE O., AMBROSI P., KLAMMER J.: Determination of relevant parameters for the use of electronic dosimeters in pulsed fields of ionizing radiation, Radiat. Prot. Dosim. 151, pp. 403–410 (2012),

<https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/151/3/403/1607704?login=false>

(Letöltve: 2014.03.13.)

[23] GINZBURG D.: Ionisation Chamber for Measurement of Pulsed Photon Radiation Fields, Radiation Protection Dosimetry, Volume 174, Issue 3, (April 2017), pp. 297–301

[24] ZUTZ H.: Basic requirements on area dosimeters,
https://indico.cern.ch/event/610058/contributions/2459583/attachments/1411802/2159771/AreaDosimetry_Requirements_Zutz_V2_mail.pdf (Letöltve: 2020.02.17.)

[25] KNOLL F. G.: Radiation Detection and Measurement, third edn. (John Wiley & Sons, Inc.) (2000). ISBN 0-471-07338-5.

<https://phyusdb.files.wordpress.com/2013/03/radiationdetectionandmeasurementbyknoll.pdf>
(Letöltve: 2020.06.18.)

[26] IEC TS 62743:2012. Radiation protection instrumentation - Electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation, Technical Specification, 2012,
<https://webstore.iec.ch/publication/7411> (Letöltve: 2018.08.29.)

[27] IEC TS 63050:2019. Radiation protection instrumentation - Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation, Technical Specification, 2019, <https://webstore.iec.ch/publication/30695>
(Letöltve: 2020.06.23.)

[28] IEC/CDV 61526:2010. Radiation protection instrumentation—measurement of personal dose equivalents $H_p(10)$ and $H_p(0.07)$ for X, gamma, neutron and beta radiations—direct reading personal dose equivalent meters, International Electrotechnical Commission. Committee Draft for Voting of International Standard (Geneva: IEC), International Standard, 2008. <https://webstore.iec.ch/publication/5540> (Letöltve: 2018.06.25.)

[29] IEC/FDIS 60846-1. Radiation protection instrumentation—ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation—Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors, International Electrotechnical Commission. Final Draft International Standard (Geneva: IEC), 2014
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/c1a3d0b4-b6eb-4f6c-b509-5498da8e5bbf/en-60846-1-2014> (Letöltve: 2020.02.11.)

[30] ISO/NP TS 18090. 2012. Radiological protection—characteristics of reference pulsed radiation, ISO. <https://www.iso.org/standard/61352.html> (Letöltve: 2017.07.13.)

[31] IEC 62743. Radiation protection instrumentation—electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation, IEC, TS Ed. 1: 2012., Technical specification, 2012,
<https://webstore.iec.ch/publication/7411> (Letöltve: 2018.04.05.)

[32] FEI G. et al.: Establishment of pulsed X-ray reference radiation field and measurement of related parameters, Radiation Physics and Chemistry 198 (2022) 110221,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X22002638>,

(Letöltve: 2023.02.26.)

[33] CLARKE R. J., DORKINGS S., HEATHCOTE R., MARKEY K., NEELY D.: Proton activation history on the Vulcan high-intensity petawatt laser facility, *Laser and Particle Beams* (2014), 32, pp. 455–460. ©Cambridge University Press, 2014 0263-0346/14 \$20.00

Doi:10.1017/S026303461400038X

<https://www.cambridge.org/core/journals/laser-and-particle-beams/article/abs/proton-activation-history-on-the-vulcan-highintensity-petawatt-laser-facility/CF5804FE10DAD0D365B715A71470FCDA> (Letöltve: 2015.03.25.)

[34] STEVENSON G. R.: Induced activity in accelerator structures, air and water, https://www1.lnl.infn.it/~radprot/index_htm_files/act.pdf (Letöltve: 2017.06.29.)

[35] FLUKA honlap: <https://fluka.cern>, AHDIDA C., BOZZATO D., CALZOLARI D., CERUTTI F., CHARITONIDIS N., CIMMINO A., CORONETTI A., D’ALESSANDRO G. L., DONADON SERVELLE A., ESPOSITO L. S., FROESCHL R., GARCÍA ALÍA R., GERBERSHAGEN A., GILARDONI S., HORVÁTH D., HUGO G., INFANTINO A., KOUSKOURA V., LECHNER A., LEFEBVRE B., LERNER G., MAGISTRIS M., MANOUSOS A., MORYC G., OGALLAR RUIZ F., POZZI F., PRELIPCEAN D., ROESLER S., ROSSI R., SABATÉ GILARTE M., SALVAT PUJOL F., SCHOOF P., STRÁNSKÝ V., THEIS C., TSINGANIS A., VERSACI R., VLACHOUDIS V., WAETS A., WIDORSKI M.: New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code, *Frontiers in Physics* 9, 788253, 2022.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.788253/full> (Letöltve: 2014.03.14.)

[36] BRUGGER M., FERRARI A., ROESLER S., ULRICI L.: Validation of the FLUKA Monte Carlo code for predicting induced radioactivity at high-energy accelerators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 562, Issue 2, 23 June 2006, Pages 814-818

[37] BODOR K.: Principle design elements of the radiation protection systems of the ELI - ALPS, 2nd FLUKA Advanced Course and Workshop, Vancouver, Canada, 2012. előadás, https://www.fluka.org/free_download/course/triumf2012/Workshop/Bodor.pdf

(Letöltve: 2013.01.20.)

[38] KOVÁCS-SZÉLES É., ALMÁSI I., BALASKÓ Á., BÍRÓ CS., BODOR K., CSÖME CS., KAKUJA I., KREITZ ZS., PAPP K., TÓBI CS., VOLARICS J.: How to respond a crime scene contaminated with radioactive material? *Belügyi Szemle / 2020 / Special Issue 3.*, <https://ojs.mtak.hu/index.php/belugyiszemle/article/view/4852> (Letöltve: 2021.01.13.)

- [39] 490/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet a hiányzó, a talált, valamint a lefoglalt nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos bejelentésekről és intézkedésekről, továbbá a nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos egyéb bejelentést követő intézkedésekről
- [40] OAH Útmutató: Útmutató a hiányzó nukleáris vagy más radioaktív anyagok keresésére [http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/708B91804DA53733C1258167002F0F67/\\$FILE/FV-20v1T_v%C3%A9gleges_korr_tiszta.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/708B91804DA53733C1258167002F0F67/$FILE/FV-20v1T_v%C3%A9gleges_korr_tiszta.pdf) (Letöltve: 2021.11.03.)
- [41] Rendőri gyakorlatozás a tanpályán: <https://www.youtube.com/watch?v=vbNwCNtQpmQ> (Letöltve: 2023.01.02.)
- [42] Az INCLUDING EU projekt: <https://www.including-h2020.eu/movies.html> (Letöltve: 2023.11.30.)
- [43] BAUER J., LIU J. C., PRINZ A. A., ROKNI S., TRAN H., WOODS M., XIA Z., GALTIER E., LEE H-J., MILATHIANAKI D., NAGLER B.: Measurements of Ionizing Radiation Doses Induced by High Irradiance Laser on Targets in LCLS MEC Instrument, SLAC PUB-15889, 2013.12.15. <https://www.osti.gov/biblio/23082908> (Letöltve: 2015.03.29.)
- [44] Vulcan laser facility honlap: <https://www.clf.stfc.ac.uk/Pages/Vulcan.aspx> (Letöltve: 2023.07.28.)
- [45] National Ignition Facility, NIF honlap: <https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works> (Letöltve: 2021.08.03.)
- [46] Bella Berkely laser honlap: <https://bella.lbl.gov/> (Letöltve: 2012.04.15.)
- [47] Salamaca PW laser honlap: https://www.clpu.es/en/vega_introduction (Letöltve: 2015.08.12.)
- [48] HiPER laser honlap: <http://www.hiper.org/> (Letöltve: 2014.10.10.)
- [49] BODOR K.: Tanpálya kialakítása a nukleáris védeltségi és egyéb radiológiai események esetén kivonuló elsődleges reagáló erők gyakorlati képzésének elősegítésére: 2. év OAH-MMT tanulmány 2020.
- [50] 2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről
- [51] ESPOSITO A.: Radiation Protection around laser-based accelerators, előadás ELI WP6 találkozó, Salamanca, Spain 2010.04.26-27
- [52] CIMMINO A., HORVÁTH D., OLŠOVCOVÁ V., STRÁNSKÝ V., TRUNEČEK R., TSINGANISA A., VERSACIA R.: Radiation Protection at ELI Beamlines: A Unique Laser Driven Accelerator Facility, Prague, Czech Republic, Proceedings of Science, 2020. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2104/2104.05479.pdf> (Letöltve: 2023.09.08.)

- [53] CALDWELL A., LOTOV C., PUKHOV A., SIMON F.: Proton-driven plasma wake field acceleration, *NaturePhysics*, vol.5, pp. 363–367., 2009.
- [54] FERRARI A., COWAN T., MARGARONE D., PROKUPEK J., RUS B.: Shielding assessment for the ELI high intensity laser beamline facility in Czech Republic, SATIF-10, CERN, 2010. <https://docplayer.net/221310833-Shielding-assessment-for-the-eli-high-intensity-laser-facility-in-czech-republic.html> (Letöltve: 2012.01.03.)
- [55] BODOR K., CSÖME CS., KOVÁCS-SZÉLES É., KÓROSI P.: Tanpálya kialakítása a nukleáris védettségi és egyéb radiológiai események esetén kivonuló elsődleges reagáló erők gyakorlati képzésének elősegítésére (1év), OAH MMT, 2019 [56] 190/2011. (IX. 19.) Korm. rendelet az atomenergia alkalmazása körében a fizikai védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről, <https://njt.hu/jogszabaly/2011-190-20-22>
- [57] PETRÁNYI J., BUDAHÁZI É., BODÓ Á., SZABÓ N., ESZENYI G., OSVÁTH SZ.: Sr-90 zárt sugárforrás inhermetikussá válása a Gamma Műszaki Zrt. izotóplaboratóriumában, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/kulonsz/2017sv/szerda/Petranyi_Sr-90_incicens_v2.pdf (Letöltve: 2023.04.11.)
- [58] IFE Halden. (2020). HVRC VRdose code [computer software]. Halden Virtual Reality Centre, Institute for Energy Technology. <https://ife.no/en/service/hvrc-vrdose/> (Letöltve: 2021.01.13.)
- [59] JI Y., WANG X., ZOU Y., LI D., ZHANG Y., NING J.: A simulation system of radiation field and its detection for nuclear and radiological emergency preparedness and response training, 2022 *J. Radiol. Prot.*, 42, 021526. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6498/ac7361/pdf> (Letöltve: 2023.02.17.)
- [60] SZÓKE I., LOUKA N. M., BRYNTESEN R. T., BRATTELI J., EDVARDESEN T. S., ROEITRHEIM K. K., BODOR K.: Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments. *J. Radiol. Prot.*, June, 2014, 34(2): pp. 389-416. Doi: 10.1088/0952-4746/34/2/389. Epub April 14, 2014. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24727389/> (Letöltve: 2015.09.03.)
- [61] MARQUES L., VALE A., VAZ P.: State-of-the-art mobile radiation detection systems for different scenarios. *Sensors*, 21, 1051., (December 2021). <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1051>, <https://doi.org/10.3390/s21041051> (Letöltve: 2023.05.10.)

- [62] KUMAR A. K. P., SUNDARAM S. G. A., SHARMA B. K., VENKATESH S., THIRUVENGADATHAN R.: Advances in gamma radiation detection systems for emergency radiation monitoring 2020 october, Nucl. Eng. and Technol., 52:2151-2161.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573319304425>,
<https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.014> (Letöltve: 2022.04.28.)
- [63] IHANTOLA S., TENGBLAD O., TOIVONEN H., CSOME CS., BORG J., PAEPEN J., TAGZIRIA H., GATTINESI P.: European Reference Network for Critical Infrastructure Protection: Novel Detection Technologies for Nuclear Security; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-87925-8.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112304> (Letöltve: 2020.02.11.)
- [64] PASSOS A. C., MÓL A. C. A., CARVALHO P. V. R., LIMA F. A., ROCHA T. L.: Use of virtual simulator for agent training in radiation protection actions in major events. 2015 International Nuclear Atlantic Conference (INAC).
<https://core.ac.uk/download/pdf/159274409.pdf> (Letöltve: 2017.03.11.)
- [65] SPEICHER M., HALL B. D., NEBELING M.: What is mixed reality? In Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems,
<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3290605.3300767> (Letöltve: 2023.05.10.)
- [66] LEE D., LEE B. I., PARK Y., KIM D.: Application plan for radiological exposure model using virtual reality-based radiological exercise system. Nucl. Eng. Technol., 50:745-750.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2018.03.009> (2018), (Letöltve: 2023.05.12.)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573317306502?via%3Dihub>
- [67] SATO Y., MINEMOTO K., NEMOTO M., TORII T.: Construction of virtual reality system for radiation working environment reproduced by gamma-ray imagers combined with SLAM technologies. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, 976, 164286, 2020
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220306823?via%3Dihub>
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164286> (Letöltve: 2023.06.03.)
- [68] BRUGUERAS R. P.: Ultra-wideband positioning Systems for industrial environments. Project report. Universitat Politècnica de Catalunya, 2016
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/96877/PRB-PFC-UWB-Industrial-Final.pdf> (Letöltve: 2023.06.15.)
- [69] JACHIMCZYK B.: Real-time locating systems for indoor applications. The methodological customization approach. PhD thesis, Blekinge Tekniska Högskola, 2019.
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1298734/FULLTEXT02.pdf>
(Letöltve: 2023.06.20.)

- [70] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [71] SHI Q., ZHAO S., CUI X., LU M., JIA M.: Anchor self-localization algorithm based on UWB ranging and inertial measurements. In Tsinghua Science and Technology, vol. 24, no. 6, pp. 728-737, (Dec. 2019), Doi: 10.26599/TST.2018.9010102.
- [72] Pozyx[®] documentation. (2020). <https://www.pozyx.io/documentation> (Letöltve: 2021.01.05.)
- [73] Ionactive (September 2021). Inverse Square Law - when is a source a point source? <https://ionactive.co.uk/resource-hub/guidance/inverse-square-law-when-is-a-source-a-point-source> (Letöltve: 2022.11.17.)
- [74] MSZ 62-2: 2017. Ionizáló sugárzás elleni védelem. Béta-, gamma-, és röntgensugárzás elleni védelem.
- [75] 3rd ENEN European Nuclear Competition for Secondary School Pupils. <http://nuclearcompetition2023.enen.bme.hu/> (Letöltve: 2023.10.04.)
- [76] INCLUDING Rome 6th Joint Action, TEST RED Exercise, Using the VRSS mounted on a drone to measure and localize the splitted sources pieces. <https://www.including-h2020.eu/movies/51-including-light-h264.html> (Letöltve: 2023.10.23.)
- [77] 31. Regulation of transport of radioactive material and fissile material” EU training course INSC T&T Project MC3.01/20 https://training.ek-cer.hu/wp-content/uploads/2023/06/INSC_MC3_01_20_Course_announcement_9_1_REG3.pdf (Letöltve: 2023.11.28.)
- [78] PorTl dose meter honlap: <https://portl.kfki.hu/> (Letöltve: 2013.12.01.)

8 Publikációk

8.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- I. BODOR K., ZAGYVAI P.: Ajánlások nagy teljesítményű lézerberendezések sugárvédelméhez, Biztonságtudományi Szemle, V. Évf. 1. szám (2023.),
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/282/262>
- II. BODOR K.: Az ELI sugárvédelmi rendszereinek tervezési alapjai, Sugárvédelem on-line folyóirat, IV. évf. (2011) 1. szám. 42-54.
https://www.elftsv.hu/svonline/docs/V4i1/Bod_V4_I1final.pdf
- III. BODOR K., ZAGYVAI P.: Nagyintenzitású lézerberendezés által keltett ionizáló sugárzás elleni lokális árnyékolás számítás optimalizálásának sajátosságai a tervezés során, Biztonságtudományi Szemle, V. Évf. 4. szám (2023.)
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/391/308>
- IV. BODOR K., ZAGYVAI P.: Lost radioactive source exploration training capabilities at the Centre for Energy Research (EK), Biztonságtudományi Szemle, IV. Évf. 4. szám (2022.)
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/252/228>
- V. BODOR K., CSALÓTZKY ZS., PETŐ J., VÖLGYESI P., GULYÁS A., KAPOSY N.: Virtual Radioactive Source System (VRSS) for exercises modelling high doses, Nukleonika 2024;69(3):151-158, doi: 10.2478/nuka-2024-0022,
<http://www.ichtj.waw.pl/nukleonika/?p=1669>
- VI. BODOR K., CSALÓTZKY ZS., VÖLGYESI P., ZAGYVAI P.: Sugárvédelmi munkafolyamatok gyakorlása virtuális sugárforrás és szennyezettség létrehozásával, Biztonságtudományi Szemle, VI. Évf. 2. szám (2024.)
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/459/364>
- VII. BODOR K., GULYÁS A., ZAGYVAI P., VÖLGYESI P.: Testing measuring devices in well-defined pulsed radiation fields, RAD Conference Proceedings, vol. 7, pp. 40-46. 2023. ISSN 2466-4626 (online), DOI: 10.21175/RadProc.2023.08.
<https://www.rad-proceedings.org/proceedings.php?id=7>

8.2 További tudományos közlemények

- I. BODOR K., ZAGYVAI P.: Lézerfény által generált ablációs dekontaminálási technológia vizsgálata, Biztonságtudományi Szemle, V. Évf. 2. szám (2023.)
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/321/274>