

CHARACTERISTICS OF THE OPTIMIZATION OF LOCAL SHIELDING CALCULATION AGAINST IONIZING RADIATION GENERATED BY HIGH-INTENSITY LASER EQUIPMENT DURING DESIGN**NAGYINTENZITÁSÚ LÉZERBERENDEZÉS ÁLTAL KELTETT IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS ELLENI LOKÁLIS ÁRNYÉKOLÁS SZÁMÍTÁS OPTIMALIZÁLÁSÁNAK SAJÁTÓSÁGAI A TERVEZÉS SZORÁN**BODOR Károly¹ – ZAGYVAI Péter²**Abstract**

The design of shielding against ionizing radiation produced by high-intensity laser light is a special task, as both the unique properties of ionizing radiation resulting from laser-material interaction and the specific operating methods of the laser equipment differ from those used in classical accelerators. Shielding design must take into account the possible effects of changes in individual parameters in terms of radiation protection. Knowing these effects, the radiation protection adequacy of an already tested shielding arrangement must be checked when individual parameters are changed. This paper presents the planning process, possible methods and the possible effects of changes in individual parameters. Test simulations with the FLUKA Monte Carlo simulation code are also described.

Keywords

Radiation protection, High power laser facility, Parameter optimization, Radiation shielding, FLUKA

Absztrakt

A nagyintenzitású lézerfény által keltett ionizáló sugárzás elleni árnyékolás tervezése különleges feladat. A lézer-anyag kölcsönhatásból keletkező ionizáló sugárzás speciális tulajdonságai, valamint a lézeres berendezések sajátos üzemeltetési módjai eltérnek a klasszikus gyorsítók esetében alkalmazottakétól. Az árnyékolás tervezése során figyelembe kell venni az egyes paraméterek változásainak lehetséges hatásait sugárvédelmi szempontból. Ezek ismeretében az egyes paraméterek változásakor ellenőrizendő egy már tesztelt árnyékolás sugárvédelmi megfelelősége. A cikk bemutatja a tervezés menetét, lehetséges módszereit és az egyes paraméterek változásainak lehetséges hatását. A FLUKA Monte Carlo szimulációs kód felhasználásával elvégzett tesztszimulációk eredményeit is ismertetjük.

Kulcsszavak

Sugárvédelem, nagy teljesítményű lézerberendezés, paraméter-optimalás, sugárvédelmi árnyékolás, FLUKA

¹bodor.karoly@eli-alps.hu | <https://orcid.org/0000-0002-1612-8207> | Radiation protection expert, ELI ALPS | Sugárvédelmi szakértő, ELI ALPS

²zagyvai.peter@eli-alps.hu | <https://orcid.org/0000-0002-8121-8452> | Radiation protection advisor, ELI ALPS | Sugárvédelmi tanácsadó, ELI ALPS

BEVEZETŐ

A lézerberendezések fejlődésének köszönhetően a lézerfény intenzitása nagymértékben növekedett az elmúlt években. Korábban $\sim 10^{15}$ W/cm² maximális lézerfény intenzitás volt elérhető (pl. SLAC [1]), de a legújabb generációs nagy teljesítményű lézerek elérhetik a 10^{21-23} W/cm² intenzitást is (pl. az ELI [Extreme Light Infrastructure] létesítményeiben [2]).

A lézerfény (primer sugárzás) és egy adott céltárgy anyagának kölcsönhatása során (szekunder) nagy energiájú, kis divergenciájú ionizáló részecskenyalábok állíthatók elő, illetve jöhetnek létre (elektron, proton). Ezek a nyalábok az árnyékoló anyagokkal (nyalábcsapdával és szükség esetén kiegészítő árnyékolással, valamint a terem falával) való kölcsönhatás során elektromágneses és hadron kaskádokat keltenek, továbbá óriás rezonancia neutronok megjelenése is lehetséges, ezért az itt keltett tercier sugárzások igen összetettek. A lézer-anyag kölcsönhatás során keletkező ultrarövid (\sim fs) lézerimpulzusok ([3], [4], [5]) többféle ionizáló sugárzást kelthetnek. Ezek az úgynevezett szekunder és tercier prompt sugárzások a lézerberendezés működése során keletkeznek, és azt követően azonnal meg is szűnnek. Az ionizáló sugárzás egyes összetevői, elsősorban a neutronok, bizonyos körülmények között felaktiválhatják a besugárzó teremben található berendezéseket, a levegő részecskéit, illetve az egyéb környező tárgyakat. Ezért az esetlegesen keletkező hosszabb felezési idejű radionuklidok okozta reziduális dózissal is számolni kell a sugárvédelmi árnyékolás tervezése során. A felaktiválódás arányos a keltett neutronhozammal, amely jelentősen növekszik a nagy rendszámú anyagok esetén. A felaktiválódás során számos, eltérő felezési idejű radionuklid keletkezhet. A hosszabb felezési idejű, felaktiválódott radioaktív anyagok feldúsulhatnak, ezért tervezéskor a felaktiválódásból származó reziduális sugárzás okozta dózistöbbletet is figyelembe kell venni.

Mindezen egyedi tényezőket, ezek együttes hatását figyelembe véve kell a sugárvédelmi árnyékolásokat megtervezni.

A LOKÁLIS SUGÁRVÉDELMI ÁRNYÉKOLÁS TERVEZÉSI METODIKÁJA

A tervezés fő lépései

A munkahelyek sugárveszélyes besorolású területeit körülhatároló falak és födém-szerkezetek mellett, azok kiegészítéseként szükség lehet lokális árnyékolásokra is a lézerfény-anyag kölcsönhatás során keltett ionizáló sugárzás kibocsátására képes berendezések közelében. Ezek tervezéséhez ismerni kell a lézerfény-anyag kölcsönhatás során fellépő fő fizikai folyamatok alapvető jellemzőit (részecske-típus, energiaeloszlás, folytonos energiaeloszláshoz vagy a diszkrét részecske-energiákhoz tartozó keltett részecskeszámok, a nyaláb iránya, a besugárzó kamra térbeli elhelyezkedése).

Az árnyékolás tervezéséhez a berendezések várható üzemviteli paramétereit is meg kell határozni: napi, éves üzemidő, a lézerberendezés ismétlési frekvenciája, valamint az adott kísérletsorozathoz tartozó foglalkozási és lakossági dózismegszorítás. Ezen adatokból meghatározható a fajlagos (egy adott típusú, keltett részecskére vonatkozó) dózislímit, amelynél nagyobb fajlagos dózis nem megengedett az árnyékolás utáni, hozzáférhető térrészekben.

A keltett részecskenyaláb paramétereit és a besugárzó kamra geometriáját a FLUKA ([6], [7], [8], [9], [10]) kódba kell betáplálni. A szimulációs programban a koncepcionális árnyékolás adatait (árnyékolás anyaga, összetétele, mérete, elhelyezkedése) is meg kell adni.

Miután minden bemenő adat rendelkezésre áll, próbaszimulációval érdemes ellenőrizni, hogy minden adatot helyesen adtunk-e meg. Ezt követően a szimulációt le kell futtatni a szimuláció sajátosságaihoz igazodó, kellően nagy indított részecskeszámmal a szimulációs eredmények megbízhatóságának és pontosságának növelése érdekében.

A tervezés kezdeti szakasza

A fent felsorolt lépések egy ideális esetet mutatnak be, amikor minden paraméter ismert, és az értékek már állandónak tekinthetők. A tervezés korai fázisában a legtöbb paraméter még ismeretlen, vagy nagyon bizonytalan. Ekkor még csak koncepcionális tervezésről beszélhetünk. Ebben a fázisban több lehetséges elrendezést, üzemviteli paramétert, forrástágot kell megvizsgálni, és meg kell határozni az adott esetekhez tartozó várható sugárvédelmi árnyékolás jellemzőit.

A lézertény-anyag kölcsönhatás során keletkező szekunder nyaláb jellemzőit extrapolációval, közelítéssel érdemes meghatározni a szakirodalom alapján [11]. A későbbiekben a pontosabb értékek meghatározhatók a lézertény-anyag kölcsönhatást számító kód segítségével [10].

Az üzemviteli paramétereknél – amennyiben még nem ismertek – szintén már meglévő lézeres nagyberendezések üzemeltetésének sajátosságait érdemes figyelembe venni; a későbbiekben a kutatók az adatszolgáltatás során módosíthatják az értékeket.

Ezen adatok alapján a fajlagos dózislímitek megbecsülhetők, de a fent felsorolt paraméterek bizonytalanságait figyelembe véve az összesített bizonytalanság akár több nagyságrendnyi is lehet. A koncepcionális tervezésnél tehát érdemes a berendezés maximális kihasználtságához tartozó adatokkal számolni, mivel így a későbbiekben csökkenthető, konzervatív lokális árnyékolási méretek adhatók meg. Így az árnyékolás megvalósításához szükséges hely- és költségigények már bizonyos paraméterek ismerete nélkül is megbecsülhetők.

A fajlagos dózislímitek meghatározásához szükséges számítás egyenlete

A lefutott FLUKA szimuláció eredménye a fajlagos dóziseloszlás, illetve fajlagos dózistérkép. A kód a kialakuló dózistér fajlagos értékét jeleníti meg, azaz egyetlen adott kezdő energiájú részecske hozzájárulását a kialakuló dóziseloszláshoz. Ezt az értéket kell felszorozni a fenti egyenlet működési paramétereivel, így a dózistérkép dózisteljesítményként is megjeleníthető. Ezt a szakirodalom prompt dózissnak (dózisteljesítménynek) nevezi, megkülönböztetve azt az esetleges aktiválódás miatt előálló maradék (reziduális) dózisteljesítménytől.

Az általunk használt és definiált fő sugárvédelmi tervezési egyenletből [10] meghatározható a fajlagos dózislímít értéke:

$$\Sigma(D_{fajlagos\ limit} \cdot N)_{prompt\ dózis} \cdot F \cdot T \cdot G \cdot \eta < DC \quad (1)$$

ahol:

- $D_{fajlagos\ limit}$: A fajlagos dózis megengedett legmagasabb értéke (származtatott dózismegszorítás) a besugárzó termen kívül egy adott energiájú részecskére normalva [pSv/részecske, vagy mSv/részecske]. Az összegzésnek az adott kísérletben várható összes részecsketartalmat tartalmaznia kell.

- N : Az egy lézerimpulzus által keltett, adott energiájú részecskék elméleti, lézerfény-anyag kölcsönhatást leíró számítások által meghatározott száma [db részecske /lövés].
- F : A lézerimpulzus (lövés) ismétlési frekvenciája [Hz; lövés/s].
- T : A napi üzemelési idő [s/nap].
- G : Éves üzemidő [nap/év].
- η : Az ionizáló sugárzás keltésének hatásfoka [%]; értéke megadja, hogy 1 db lézerlövés hatására az elméleti számítással kapott, várt (maximális) számhoz képest mennyi részecske keletkezik.
- DC: A vonatkozó éves foglalkozási és/vagy lakossági dózismegszorítás [mSv/év].

A szimulációknál vagy a keltett részecskék folytonos energiaeloszlásához, vagy a diszkrét részecske energiaeloszlásához tartozó keltett részecskeszámmal számolhatunk. Az utóbbi esetben az energiatarományokra külön szimulációkat futtatunk. Az adott energiával rendelkező részecskék számával és az üzemviteli paraméterekkel meghatározhatók a fajlagos dózislímiték adott energiákra, lásd (1) egyenlet. A vizsgált dózispontban a mért fajlagos dózisznak mindenkor kisebbnek kell lennie a vonatkozó fajlagos dózislímitnél. Emellett a dóziszok összegének is teljesítenie kell az (1) egyenlet szerinti feltételeket.

PARAMÉTERVÁLTOZÁS HATÁSAINAK VIZSGÁLATA

A tervezési folyamat során az egyes paraméterek változhatnak, ahogy egyre több információ érhető el a tervezendő berendezésről, illetve kísérletről. Egy, már megtervezett és üzemelő berendezés továbbfejlesztése esetén is valószínűsíthetők a sugárvédelmet érintő paraméterváltozások. Ezért fontos tisztában lenni azzal, hogy az egyes paraméterek milyen mértékben befolyásolják a már meglévő árnyékolás megfelelőségét, illetve egy esetleges változás milyen áttervezést, módosítást igényel.

Az üzemviteli paraméterek változásának hatása

Az (1) egyenlet alapján látható, hogy a keltett dózis a fenti paraméterek értékének növelésével lineárisan nő, illetve ennek megfelelően a fajlagos dózislímit értékek szigorodnak.

A tervezőnek figyelembe kell venni tehát, hogy amennyiben az üzemviteli paraméterek közül több is jelentősen megnő, akkor jelentős áttervezésre, az árnyékolás kiegészítésére is szükség lehet. A tervezés optimalása során meghatározhatók azok a maximális üzemviteli paraméterértékek, amelyek mellett a meglévő árnyékoló rendszer még megfelelően árnyékol.

A keltett részecskeszám (N) változásának esetei és hatása

A lézerfény-anyag kölcsönhatása során keletkező szekunder ionizáló részecskék száma függ a lézerparaméterektől (pl. energia, impulzushossz), a céltárgy anyagi minőségétől, vastagságától, a besugárzás szögétől, valamint a céltárgy sűrűségétől és halmazállapotától [2], [3], [11] is. Ezen főbb paraméterek határozzák meg, hogy a kölcsönhatás során milyen részecskegyorsítási mechanizmus fog dominálni.

A nagy teljesítményű lézerek használatával keltett részecskék számát a meglévő berendezések mért adatainak extrapolálásával közelíthetjük.

A keletkező szekunder sugárzás sugárvédelmi paramétereit a lézerefény-anyag kölcsönhatást ún. Particle-in-Cell (PIC) módszerrel szimuláló programok alkalmazásával lehet pontosabbá tenni [16]. A lézerefény-anyag kölcsönhatás kollimált gyorsított részecskenyalábot hoz létre. A lézerefény a céltárgyra van fókuszálva. A besugárzás pillanatában kialakuló nagy elektromágneses erőter kiszakítja, majd gyorsítja az anyagból az elektronokat és – hidrogéntartalmú céltárgynál – a protonokat.

A lézerefény-anyag kölcsönhatás érzékeny a lézer-céltárgy beállítás körülményeire. A beállítás során a fókusz-távolságot kell minél pontosabban beállítani, valamint meg kell győződni arról, hogy a céltárgy mozgatása során a fókusz-távolság már nem változik. Ezért figyelembe kell venni a céltárgy vastagságának egyenletlenségeit, illetve a lézerefény beesési szögének is állandónak kell lennie. A céltárgy pozícióját mikrométeres pontossággal kell beállítani. Ez időigényes folyamat, ami a napi üzemvitel tekintetében korlátozza a napi kísérletek számát. Amennyiben a beállítás pontatlan és a céltárgy nem esik teljesen a lézerefény fókuszpontjába, a lézerefény-anyag kölcsönhatás során az elméleti számításokban megadott értékhez képest szignifikánsan kevesebb részecske keletkezhet, azaz a lézerefény-anyag kölcsönhatás részecskekeletkezési hatásfoka (η) csökken [12]. A tervezés során a számításoknál mindig ideális kísérleti körülményeket tételezünk fel, ugyanakkor a gyakorlatban ezek nem tudnak teljesülni, mivel a többszörös besugárzás során keletkező hó hatására a céltárgy anyaga deformálódhat, és a lézer optikai lencséinek geometriája is változhat. Az ideális körülményektől való eltérés a számításokkal megadott, szekunder és terciér sugárzásokra vonatkozó értékektől csak csökkent értékeket eredményezhet.

A keletkező részecskenyaláb energia- és szögeloszlása függ a domináló fizikai folyamatoktól. Az (1) egyenlet alapján látható, hogy a keltett részecskeszám a többi operációs paraméterhez hasonlóan fordítottan arányos a fajlagos dózislimmittel.

Dózismegszorítás

A dózismegszorítás értékének növelésében nincs túl nagy mozgástér, ugyanakkor a lakossági (nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalókra vonatkozó) megszorítás értéke és a sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalókra vonatkozó értékek között általában egy-két nagyságrendnyi különbség lehet, a sugárvédelmi szabályozásnak megfelelően.

Előfordulhat, hogy a szimulációk alapján a besugárzási termen kívüli térrészekben a fajlagos dózis legfeljebb két nagyságrenddel lépi túl a nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalókhoz tartozó fajlagos dózislimitet. Ebben az esetben sugárvédelmi szempontból elfogadható, hogy csak sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalók dolgozhatnak a területen az ionizáló sugárzás fennállásának idején.

Az árnyékolás elrendezésének és anyagának tervezése

A tervezési folyamat elején az egyes üzemviteli paraméterek értékei akár nagyságrendi bizonytalanságúak is lehetnek, így az üzemviteli paraméterek (N, F, T, G) értékeinek teljes bizonytalansága akár 2-4 nagyságrend is lehet. Ez a bizonytalanság csökken, konkretizálódik, ahogy egyre pontosabb adatok állnak rendelkezésre. Így a fajlagos dózislimit is egyre pontosabban meghatározható. A kezdeti tervezési szakaszban a még bizonytalan üzemviteli paraméterek feltételezhető maximumával számolva lesz konzervatív a közelítés. Ebben az esetben a fajlagos dózislimit értékek alacsonyok, azaz szigorúak lesznek, amelyek betartásához jellemzően kiterjedt, vastag árnyékolást kell tervezni.

A bizonytalanság csökkenésével a későbbiekben már pontosabb, a kiindulásnál alacsonyabb értékek fognak rendelkezésre állni. Emiatt a fajlagos dózislímiték megnőnek, ezért a kezdeti árnyékolás kiterjedtsége, vastagsága jelentősen csökkenthető.

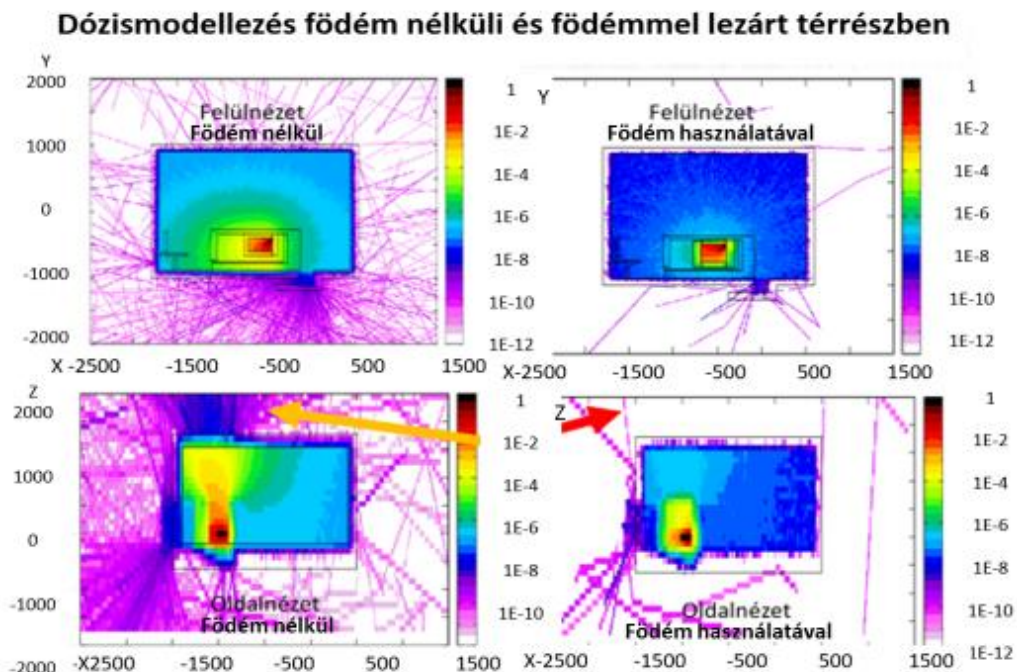
A sugárvédelem egyik alaptézise szerint a sugárzást a keletkezése helyén (besugárzó kamra) kell árnyékolni. Problémát jelenthet azonban az árnyékoló anyag térigénye, mivel a lézertény-anyag kölcsönhatást vizsgáló diagnosztikai berendezések és a detektorok is helyet foglalnak a berendezés közvetlen környezetében. A lézernyaláb bemenetének is szabadnak kell maradnia, valamint a kutatók munkavégzéséhez is megfelelő helyet kell biztosítani. Így az árnyékolás nem minden esetben helyezhető a forrás (besugárzó kamra) közvetlen közelébe. A megnövelt távolság miatt viszont nagyobb térrészben terjed az ionizáló sugárzás a keltett részecskenyaláb térszöge miatt, és ez csökkenti az árnyékolás hatékonyságát. Emiatt egy nagyobb méretű, a besugárzó kamrát körülvevő falrendszerre van szükség.

A geometria, valamint az árnyékolás pozicionálásának hatásait demonstrációs szimulációk elvégzésével vizsgáltuk meg. A demonstrációs szimulációknál a Szegeden megépült ELI Attoszekundumos Fényimpulzus Forrás (ELI ALPS) egyik besugárzó termét vettem alapul, és figyelembe vettem a releváns strukturális elemeket (falátörések, bejárati labirintus, besugárzó terem falának és födémének anyaga, vastagsága, besugárzó terem mérete, valamint a besugárzó kamra elhelyezkedése).

A lokális árnyékolás lefedésének hatása a dózistérre

A besugárzó kamra és a tőle csak távolabb elhelyezhető lokális árnyékolás közötti térben a részecskék szóródhatnak a besugárzó terem födémje irányában, illetve a teremfal falátörései felé, bár ezek tervezésénél eleve figyelembe vették az árnyékolás igényét. Ott egy részük ki is léphet a besugárzó termen túli területekre. Az ELI ALPS tervezési fázisában a lehetséges kiszóródást figyelembe vették. A falátörések nyílásai 15°-ban vannak döntve, így növelik a fal effektív vastagságát. A lokális árnyékolás súlya és a besugárzó kamra födém irányú nyílása miatt nem minden esetben egészíthető ki a lokális árnyékolás födémrel, ha a kamrától távolabb elhelyezkedő falrendszer miatt igen nagy kiterjedésű és nehéz kiegészítő födémre lenne szükség. Ugyanakkor egy demonstrációs szimuláció során (lásd 1. ábra) a FLUKA kóddal megvizsgáltuk, hogy sugárvédelmi szempontból milyen előnyös hatása lenne a födém alkalmazásának. A demonstrációs szimulációnál a besugárzó kamrát minden irányból körülvevő falrendszert alkalmaztunk, így a szekunder elektronsugárzás a födém irányába szóródik.

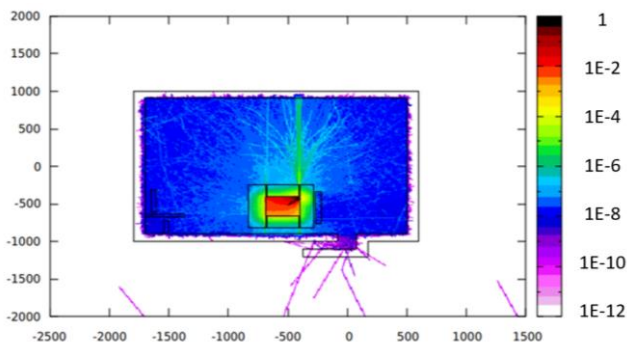
Az 1. ábra bal oldalán a nyalábot körülvevő falrendszer felett nincs kiegészítő födém (sárga nyíl), így a részecskesugárzás kijut a besugárzó teremből a terem falának felső részén elhelyezett falátöréseken. Jobb oldalon a lokális árnyékolás magasságában egy erre elhelyezett kiegészítő födém alkalmaztunk (piros nyíl), ekkor a besugárzó teremből minimális a kiszóródó sugárzás. Mivel a valóságban ez a besugárzó állomás megközelíthetlensége miatt nem kivitelezhető, fontos megvizsgálni a födém felett fellépő sugárzási viszonyokat. A pontos paraméterek birtokában eldönthető, hogy a födém tetején (a besugárzó terem fölötti szinten) tartózkodhatnak-e személyek a besugárzások ideje alatt.



1. ábra: 10 MeV-es elektronsugárzás fajlagos dóziseloszlása. A besugárzó kamra felülnézete, földem nélküli (bal felső ábra), a besugárzó kamra felülnézete földem használatával (jobb felső ábra) és oldalnézete földem nélküli (bal alsó ábra), valamint oldalnézete földem használatával (jobb alsó ábra). Az esetleges földmárnyékolás hatása a fajlagos dóziseloszlásra, x, y, z [cm], színekód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

Az árnyékolásillesztési rések hatása a dózistérre

A 2. ábrán egy másik demonstrációs szimulációval a lokális árnyékolófal elemeinek illeszkedési pontatlanságát modelleztem. Ebben az esetben nincs teljes átfedés az árnyékolósok találkozásánál, ezért a sűrű részecsketérből a szórt sugárzás (elektron, foton, fékezési röntgensugárzás) egy része „jet” formájában kilövell, ami a felülnézetben jól látható. A 2. ábrán a nyálábvonal árnyékolása látható illesztési hézaggal, valamint a geometriai hézag hatása a fajlagos dózistérre.



2. ábra: Árnyékoló, besugárzott céltárgy körül kialakuló dózistér szimulációja – felülnézetű kép, x, y [cm], színekód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

A foton sugárzás elleni védelemben gyakran használt árnyékoló anyag az ólom, mivel hatékonyan gyengíti a foton sugárzást. A korábban említett óriás rezonancia neutronok keletkezése esetén azonban köztudottan a nagy hidrogéntartalmú anyagok jelentenek hatékony sugárvédelmet. A nagy energiájú másodlagos nyalábokhoz (elektron, proton) nem célszerű nagy rendszámú anyagokat alkalmazni, mivel a nagy rendszámú anyagok (pl. ólom, szegényített urán) a másodlagos sugárzás nagy részét visszaverik és csak kisebb részét nyelik el. Ugyanakkor az elnyelt részecskék sok óriás rezonancia neutront generálnak, és ezek a neutronok felaktiválódást okozhatnak [10], [13], [15]. A generált neutronrészecskék elleni védelmet (kis rendszámú, /hidrogénben gazdag/ anyagok) követően érdemes csak alkalmazni közepes vagy nagy rendszámú anyagokat a másodlagos sugárzás elnyelésékor képződő fékezési röntgensugárzás árnyékolására. Egyes nagy rendszámú anyagokban (pl. ólom, szegényített urán) ezáltal jelentős valószínűséggel keletkezhetnek radionuklidok, amelyek következtében magasabb lesz a reziduális dózisteljesítmény. A kis rendszámú anyagokban ennek csekély ugyan a valószínűsége, azonban ezekből vastagabb árnyékolást kellene készíteni a fotonok elnyelésére. Ideálisnak a közepes rendszámú anyagok használata bizonyult. Ezek közé tartozik a beton, a vas és a rozsdamentes acél.

A TERVEZÉSHEZ HASZNÁLT FLUKA KÓD EREDMÉNYEINEK VIZSGÁLATA AZ INDÍTOTT RÉSZECSKÉK SZÁMÁNAK FÜGGVÉNYÉBEN

A kezdeti tervezési szakaszban lehetőleg minél több koncepcionális árnyékolás-elrendezést és várható üzemviteli állapotot kell megvizsgálni viszonylag rövid idő alatt, hogy látható legyen, milyen irányban haladjon a nyalábvonal további tervezése. Mivel ebben a szakaszban a paraméterek igen bizonytalanok, itt még nem a végleges árnyékoláshoz tartozó nagy pontosságú eredmények bemutatása a fő cél, hanem olyan koncepcionális tervek tesztelése, amelyek nagyságrendileg megfelelhetnek a sugárvédelmi elvárásoknak.

A szimulációs kód aktuális változatának lefuttatásához szükséges idő többek között függ a részecske típusától, energiájától, a vizsgált terület nagyságától, a benne elhelyezett anyagoktól, az indított részecskeszámától, a FLUKA által használt fizikai folyamatok modelljétől, valamint a számítógép teljesítményétől. Minél nagyobb az indított részecskeszám és a vizsgált terület, annál hosszabb időt vesz igénybe a szimuláció. A szimulációs idő csökkenthető nagy teljesítményű számítógép alkalmazásával, valamint a FLUKA által felkínált szimuláció beállítási lehetőségeivel. Ilyen például a felhasználó által definiált energiaküszöbnél alacsonyabb energiájú részecskék figyelmen kívül hagyásának lehetősége.

Az indított részecskeszám növelésével a kaszkádeffektusok során keletkező terciér sugárzás részecskéinek száma is drasztikusan emelkedik, ami jelentősen növeli a szimuláció futtatási igényét. A FLUKA itt bemutatott tesztelésével az volt a célunk, hogy megvizsgáljuk, milyen sugárvédelmi következtetések vonhatók le a gyors futású próbaszimulációk eredményeiből. A tesztelés során megvizsgáltuk, hogy támpontul szolgálhatnak-e az alacsony indított részecskeszámú szimulációk által szolgáltatott dózisértékek.

Az alábbi ábrákon demonstrációs, azaz tesztszimulációk láthatók. A tesztek során 100 MeV energiájú elektronnyalábot használtunk, az ábrákon ennek fajlagos dózistere (elektron, foton, fékezési röntgensugárzás), valamint ezen részecskék összesített (szimulált) fajlagos dózisértékeinek pontossága látható, ami az indított részecskeszám négyzetgyökével fordítottan arányos [17]. Az ábrákon a pontosság százalékban van megjelenítve, a 100% a teljes pontatlanságnak felel meg, a FLUKA-ban alkalmazott tárgyalásmódnak megfelelően. Minél

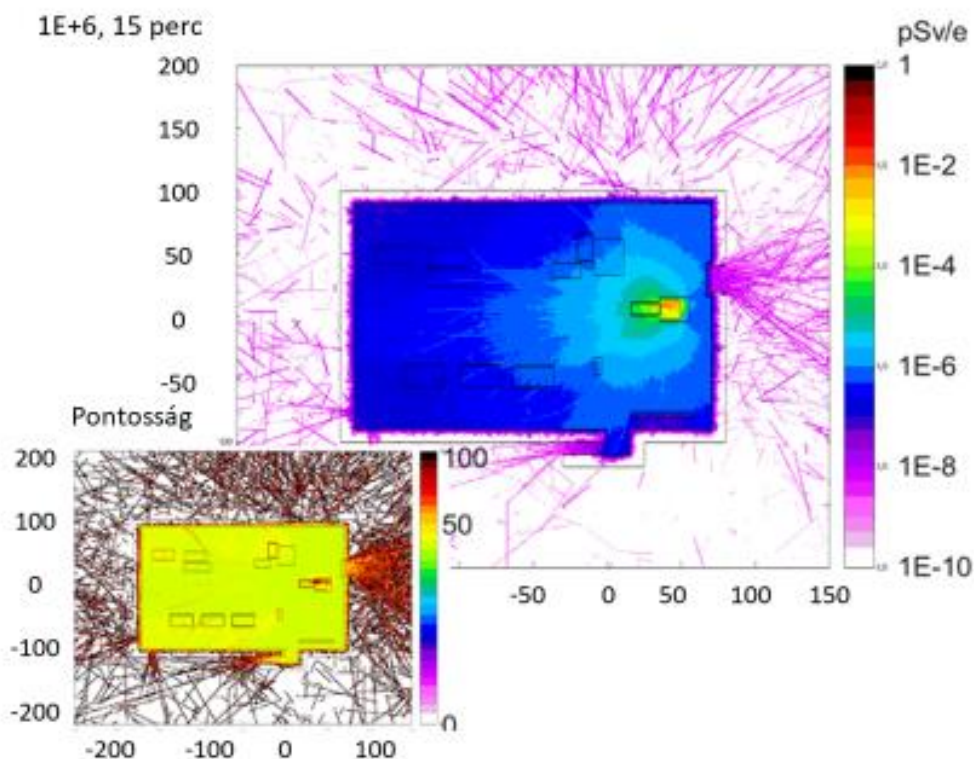
kiseb a szimuláció pontatlansága, annál megbízhatóbb a szimulált eredmény. Megjegyzendő, hogy a fehér színnel jelölt térrészekben nem értelmezhető a pontosság mértéke, mivel ott nem áll rendelkezésre elegendő szimulált adat.

$$\sigma \sim 1/\sqrt{N} \quad (2)$$

ahol:

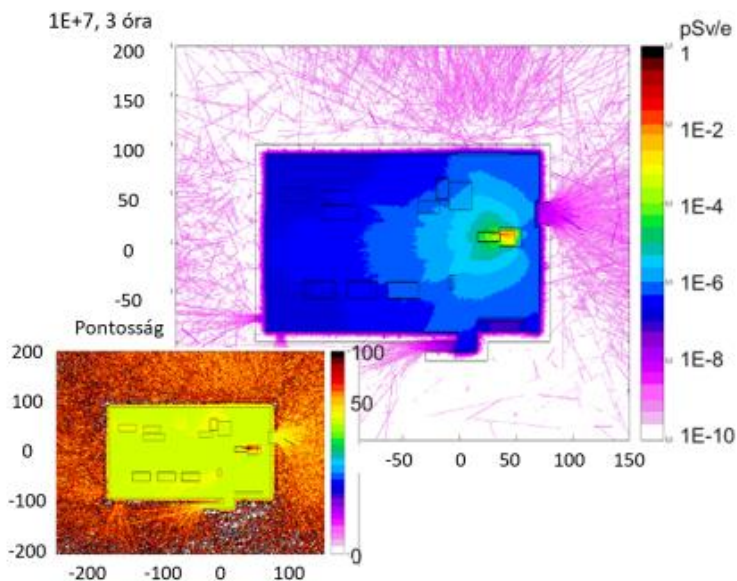
- σ : pontosság [%]
- N : indított részecskeszám [db]

A szimulációk során növeltük az indított részecskék számát (3-6. ábra). A 3. ábrán az indított részecskeszám 1 millió, a futtatási idő 15 perc, valamint az alsó ábrán a fajlagos dózisértékek pontossága [%] látható.



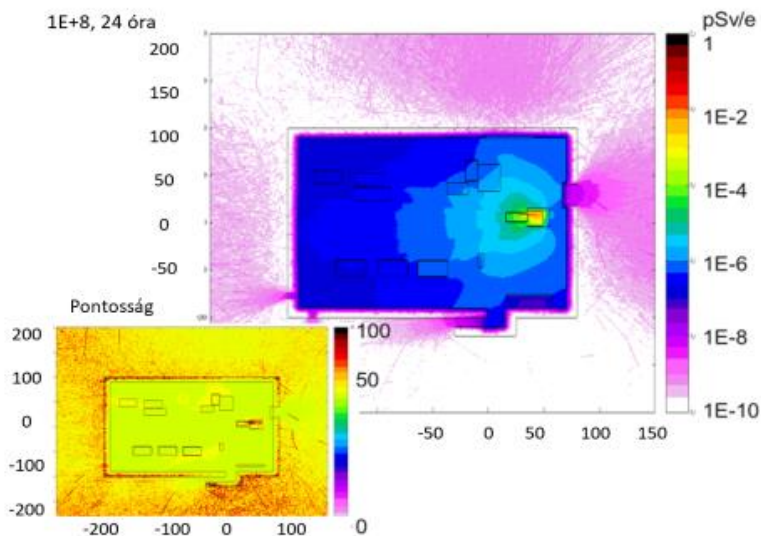
3. ábra: Lézerrel keltett 100 MeV-os elektronokkal besugárzott céltárgy körül kialakuló dóziszter szimulációja – felülnézet, x, y [cm], szinkód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

A 4. ábrán az indított részecskeszám 10 millió, a futtatási idő 3 óra; az alsó ábrán a fajlagos dózisértékek pontossága [%] van feltüntetve.



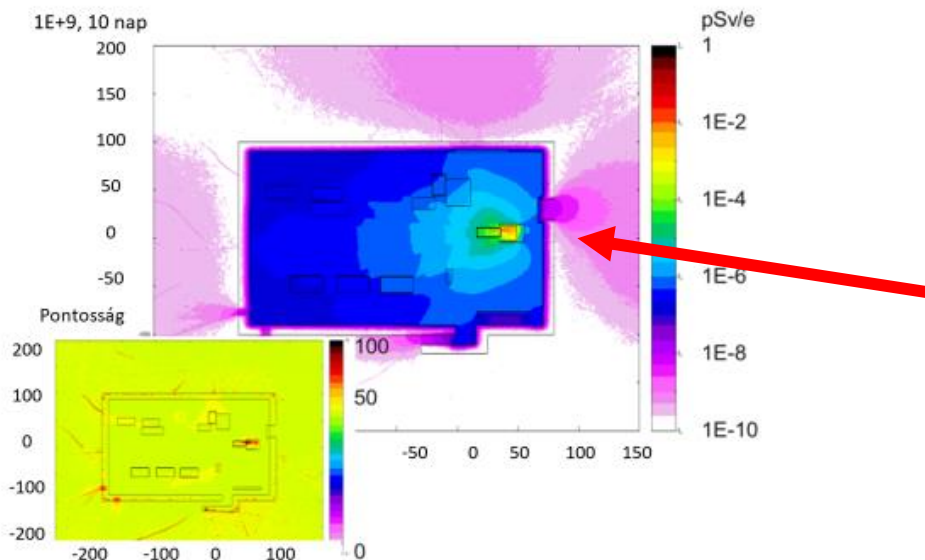
4. ábra: Lézerrel keltett 100 MeV-os elektronokkal besugárzott céltárgy körül kialakuló dózistér szimulációja – felülnézet, x, y [cm], szinkód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

Az 5. ábrán az indított részecskeszám 100 millió, a futtatási idő 24 óra; az alsó ábrán a fajlagos dózisértékek pontossága [%] van feltüntetve.



5. ábra: Lézerrel keltett 100 MeV-os elektronokkal besugárzott céltárgy körül kialakuló dózistér szimulációja – felülnézet, x, y [cm], szinkód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

A 6. ábrán az indított részecskeszám 1000 millió, a futtatási idő 10 nap; az alsó ábrán a fajlagos dózisértékek pontossága [%] van feltüntetve.



6. ábra: Lézerrel keltett 100 MeV-os elektronokkal besugárzott céltárgy körül kialakuló dózistér szimulációja – felülnézet, x, y [cm], szinkód: [pSv/elektron], [saját szerkesztés]

A 3-6. ábrák szépen mutatják, hogy az indított részecskeszám növelésével az adatok pontossága csökken, a dózistérképek felbontása, részletessége javul. A besugárzó teremnél a falárnyékolás külső felületén megjelenő dózis értéke nagyságrendileg nem változik az indított részecskeszám növelése ellenére (lásd 6. ábra, piros nyíl). Az 1 és 1000 millió indított részecskeszámmal elvégzett szimulációk időigénye 15 perc, illetve 10 nap, tehát a teljes futtatási idő 0,1%-a alatt lefuttatott szimuláció is hordoz a sugárvédelmi tervezés szempontjából használható információt.

A FLUKA tesztelés eredményei alapján megállapítható, hogy a rövid futásidejű próbaszimuláció fajlagos dózisértékei már a tervezés korai fázisában [10] is támpontot adhatnak a tervezőnek. Így számos koncepcióterv előzetes szimulációs eredménye alapján választhatók ki az ígéretes, továbbfejlesztendő változatok. Természetesen a végleges terv jóváhagyásakor szükséges a nagy indított részecskeszámmal elvégzett szimuláció nagy teljesítményű számítógép alkalmazásával.

NYALÁBVONAL ÁRNYÉKOLÁS KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE

Ebben a fejezetben egy nyalábvonal (LEIA berendezés) koncepcionális tervezését mutatjuk be a korábban ismertetett módszerek felhasználásával. A példában a keltett elektronok diszkrét energiaeioszlását, illetve a keltett részecskék számát (N) az 1. táblázat tartalmazza. Feltételezzük, hogy minden nyalábvonal komponens a lézertény irányában halad tovább. A koncepcionális tervezéshez használt éves lézerpulzus lövésszáma $F \cdot T \cdot G = 108\,000$ [lövés/év], $F = 10$ Hz. A keltési hatásfok valószínűleg a rendszer beüzemeléskor a legkisebb. A

beállítások precizitásának javulásával (cél tárgy - lézertény fókuszálás stabilitásának növekedése), a hatásfok és ezáltal a ténylegesen keltett részecskék száma is növekedni fog. Az okozható maximális dózis meghatározása kedvéért a lézertény-anyag kölcsönhatás hatásfokát (η) konzervatíván 1-nek vesszük.

| Maximális elektron energia [MeV] | N [db] | N·F·T·G [db részecske/év] |
|----------------------------------|----------|---------------------------|
| 0,5 | 8,70E+09 | 9,40E+14 |
| 1 | 8,00E+09 | 8,64E+14 |
| 2 | 1,00E+09 | 1,08E+14 |
| 5 | 1,80E+09 | 1,94E+14 |
| 7 | 8,70E+08 | 9,40E+13 |

1. táblázat: Üzemviteli paraméterek elektronokra, [saját szerkesztés]

A 2. táblázat a sugárveszélyes és nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalók dózismegszorításait tartalmazza.

| | | |
|-----------------------|------|---|
| DC ₁ (RP) | 1 | [mSv/év sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló] |
| DC ₂ (NRP) | 0,05 | [mSv/év nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló] |

2. táblázat: DC: Dózismegszorítások, [saját szerkesztés]

Az (1) egyenletet és az 1-2. táblázat adatait felhasználva meghatározhatók a példában szereplő LEIA nyálábvonalra az egyes energiaszintekhez tartozó fajlagos és prompt dózislímit (3. táblázat). A prompt dózislímitet mSv/s mértékegységben adtuk meg, azaz:

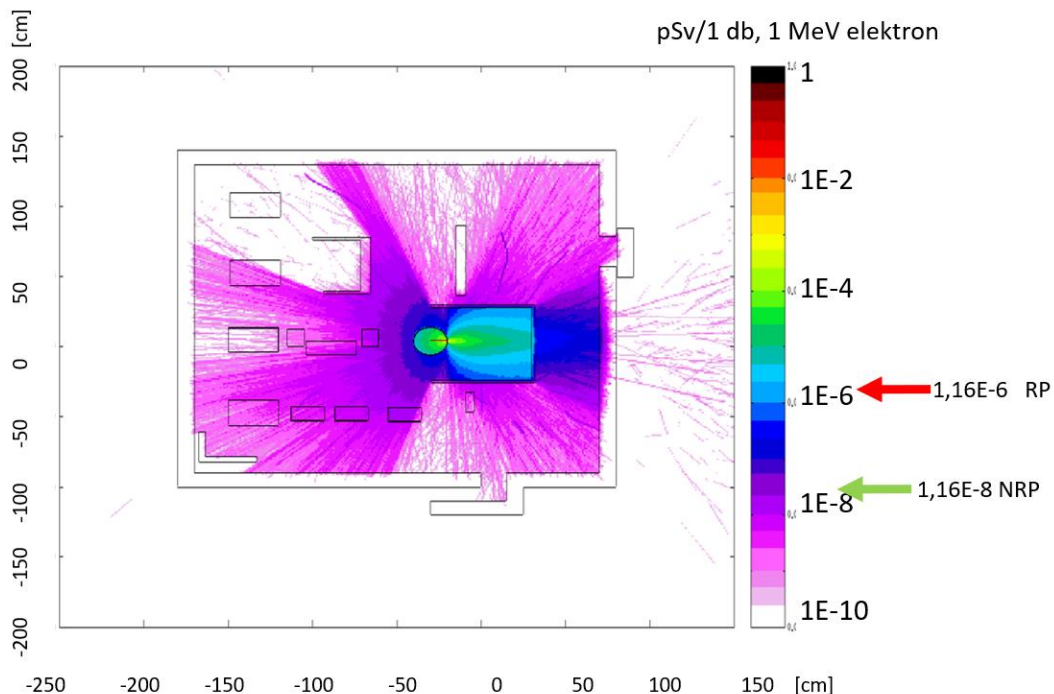
$$D_{prompt\ limit} [mSv/s] = D_{fajlagos\ limit} [pSv/elektron] \cdot N \cdot F \cdot 1E-9 \quad (2)$$

| Maximális elektron energia [MeV] | Fajlagos dózislímit sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló részére [pSv/elektron] | Fajlagos dózislímit nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló részére [pSv/elektron] | Prompt dózislímit sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló részére [mSv/s] | Prompt dózislímit nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló részére [mSv/s] |
|----------------------------------|---|---|--|--|
| 0,5 | 1,06 E-6 | 1,06 E-08 | 9,26 E-5 | 9,26 E-7 |
| 1 | 1,16 E-6 | 1,16 E-08 | 9,26 E-5 | 9,26 E-7 |
| 2 | 9,26 E-06 | 9,26 E-08 | 9,26 E-5 | 9,26 E-7 |
| 5 | 5,14 E-06 | 5,14 E-08 | 9,26 E-5 | 9,26 E-7 |
| 7 | 1,06 E-05 | 1,06 E-07 | 9,26 E-5 | 9,26 E-7 |

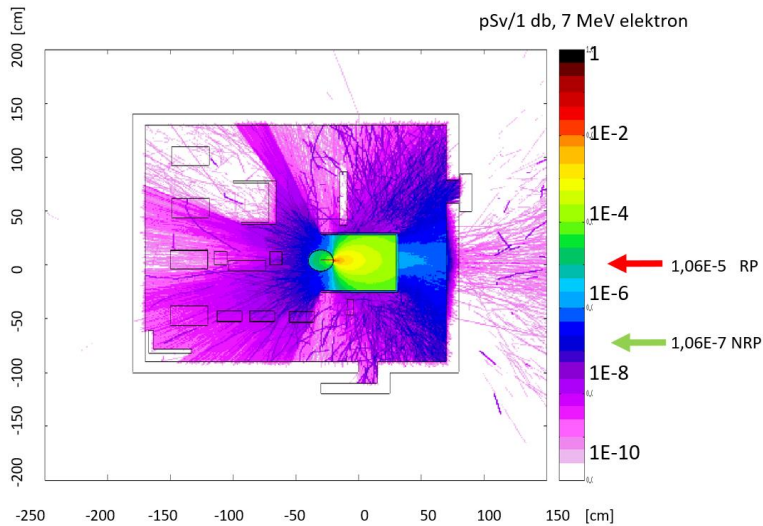
3. táblázat: Számolt fajlagos és prompt dózislímiték [pSv/elektron], illetve [mSv/s] értékben, [saját szerkesztés]

A táblázat és az energiaspektrum alapján látható, hogy tervezésnél az alacsonyabb energiájú részecskéket is figyelembe kell venni. A szimulációkat az összes energiára le kell futtatni, és a vizsgált pontokban az összes esetenél teljesülnie kell a fajlagos dózislímit kritériumoknak, amennyiben nem folytonos, hanem diszkrét energiaspektrummal dolgozunk. Folytonos energiaspektrum esetén a FLUKA figyelembe veszi a megadott energiaeloszlást és a hozzá tartozó részecskeszámokat.

A vizsgálati paraméterek növelése érdekében ebben a példában lokális, 20 cm vastag nehézbeton árnyékolást alkalmaztunk a besugárzó nyalábkamra körül. A 7. ábrán a kisenergiájú 1 MeV elektron-, míg a 8. ábrán a 7 MeV-es elektronkomponens dózisterének szimulációja látható. A piros nyíl (RP) a sugárveszélyes munkaköri besorolású, míg a zöld nyíl (NRP) a nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállaló fajlagos dózislímitjét jelzi. A szimulációk eredményei azt mutatják, hogy a berendezés működése közben a besugárzó teremben a fellépő sugárzás miatt csak a 7-8. ábrán látható lila színnel jelölt területeken lehet tartózkodni. A 3. táblázatban megadott fajlagos dózislímiték mellett a nem sugárveszélyes munkaköri besorolású munkavállalók csak limitált térrészben (rózsaszín, fehér) tartózkodhatnak a kísérletek alatt a teremben.

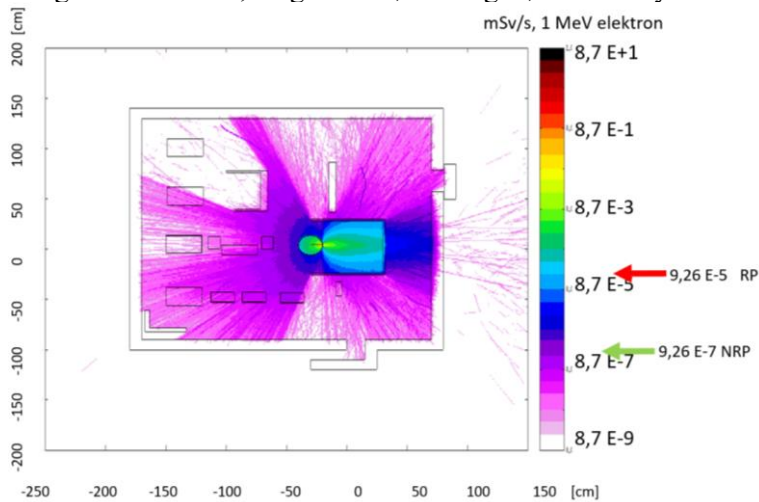


7. ábra: A berendezés 1 MeV energiájú elektronsugárzásához tartozó fajlagos dózister felülnézeti térképe, jelezve a „sugárveszélyes munkaköri besorolású” (RP) és „nem sugárveszélyes munkaköri besorolású” (NRP) munkavállalói fajlagos dózislímiteket, x, y [cm], színekód: [pSv/1 MeV elektron], [saját szerkesztés]



8. ábra: A berendezés 7 MeV-es elektronsugárzásához tartozó fajlagos dózistér felülnézeti térképe a „sugárveszélyes munkaköri besorolású” és „nem sugárveszélyes munkaköri besorolású” munkavállalói fajlagos dózislímitiek jelölésével, x, y [cm], színekód: [pSv/7 MeV elektron], [saját szerkesztés]

A 9. ábrán 1 MeV energiájú szekunder részecskére normált prompt dózistér értékét jelenítettük meg mSv/másodperc mértékegységben, a korábban is értékelt berendezés közelében. Az (1) egyenletben a fajlagos dózist $N \cdot F$ -fel megszorozva az egy másodpercre jutó dózist kapjuk. A prompt dózistérkép azonban arányaiban nem változik, ha összevetjük a 9. és a 7. ábrát. A tervezés során a fajlagos értékekkel érdemes számolni, mert ha bármelyik üzemviteli paraméter (F, T, G) vagy a részecskeszám (N) változik, akkor a fajlagos dózislímit is változik és a már elvégzett szimulációt megvizsgálva azonnal látható, hogy az adott meglévő árnyékolást szükséges-e áttervezni, kiegészíteni, és ha igen, akkor milyen mértékben.



9. ábra: A berendezés 1 MeV elektronsugárzásához tartozó prompt dózistér felülnézeti térképe, 20 cm vastag nehéz-beton nyalábárnyékolással, x, y [cm], színekód: [mSv/s 1 MeV elektron] [saját szerkesztés]

Tételezzük fel, hogy az üzemviteli paraméterek összességében két nagyságrenddel kisebbek. Ekkor a dózislímitek két nagyságrenddel nőnek, így pl. a 7. és a 8. ábra alapján a sugaras és nem sugaras munkavállalók a lokális árnyékoláson belüli teret kivéve bárhol tartózkodhatnak a besugárzó teremben.

Amennyiben a koncepcionális tervhez képest megnövelik a berendezés üzemviteli paramétereit (pl. három nagyságrenddel), akkor a dózislímitek három nagyságrendet szigorodnak (csökkennek). Így a 7. és a 8. ábrán látható, hogy a besugárzó teremben senki, a termen kívüli térrészekben pedig csak sugaras munkavállalók tartózkodhatnak.

Ekkor három lehetőség van:

- A paraméterek növelése (F, T, G, N) nem engedélyezhető.
- A besugárzó terem körüli területek sugárveszélyes munkaterületté minősíthetők át.
- Ki kell egészíteni az addig alkalmazott lokális árnyékolást.

A sugárvédelmi szakembereknek e lehetőségeket megvizsgálva, mérlegelve kell döntést hozniuk.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

- A sugárvédelmi tervezés kezdeti fázisában az új kísérleti berendezések esetén a számítások bemeneti paraméterei (N, F, T, G, geometria, keltett ionizáló sugárzás iránya, szögeloszlása) még nem teljesen ismertek vagy nagy bizonytalansággal terheltek.
- A keltett részecskék száma elsődlegesen extrapolációval határozható meg a már üzemelő létesítmények tapasztalatai alapján, viszont az extrapoláció közel hat nagyságrendet ível át a lézerintenzitás függvényében, így ezen értékek is bizonytalanok.
- A dózisbecslés bizonytalansága 2-4 nagyságrend is lehet.
- A FLUKA kód tesztelése alapján látható, hogy már az alacsonyabb indított részecskeszámmal végzett szimulációk is elegendően pontosak ahhoz, hogy támpontot adjanak a tervezőnek [10].
- A fenti tulajdonság felhasználható a nyalábvonal továbbtervezéséhez, pl. paraméternöveléshez vagy új berendezés alpméreteinek előzetes meghatározásához (azaz kb. mekkora kiterjedésű, illetve vastagságú lokális árnyékolásra lehet szükség), illetve a balesetelhárítás tervezése során több scenárió is megvizsgálható, és rövid idő alatt adhatók nagyságrendi becslések.
- Az eleve nagy bemeneti paraméter bizonytalansághoz és a szimulációk nagy pontatlanságához képest a szimulált értékek bizonyos feltételek mellett felhasználhatók. Így a kezdeti fázisban a koncepcionális tervezésnél e feltételek figyelembevételével alkalmazhatók az iniciális eredmények az ígértes koncepciók kiválasztásában, azok további tervezéséhez. Konzervatív becslést kaphatunk az árnyékolás helyigényére és annak várható költségére.
- A lézerfény-anyag kölcsönhatás hatásfokát érdemes 1-nek választani, mivel a precízebb beállításoknak köszönhetően a hatásfok várhatóan növekedni fog. Így egyszerűbb a dózislímitek számolása, és a szimulációk konzervatívak maradnak.
- A nagy energiájú elektronok elleni árnyékolás anyagának megválasztásánál kerülni kell a nagy rendszámú anyagokat. Alacsony rendszámú anyagokat főként a szórt kis

energiás részecskék árnyékolásához kell használni. Fő abszorbensnek érdemes közepes rendszámú anyagokat választani. A részletes tervezéshez ismerni kell a keltett foton sugárzás energiaeoszlását.

- Lehetőleg törekedni kell az árnyékolás–forrás távolság minimalizálására, hogy a szórt sugárzás miatt ne legyen szükség kiterjedt árnyékolás alkalmazására.
- A részecskesugárzás egy része elnyelődik a lokális árnyékolásban, másik része áthatol rajta, valamint visszaszóródik. A visszaszórt részecskék jelentős része a lokális árnyékolás nélküli részekben kiszóródhat, pl. illesztési hézag esetén „jet” formájában. Ezért nagyon fontos a végleges árnyékolás tervezésénél és telepítésénél a megfelelő átfedések biztosítása. A szórt sugárzás a besugárzó terem födéme felé is eljut, így meg kell vizsgálni, hogy besugárzás alatt lehet-e a födémen tartózkodni, illetve az ott tartózkodást lehet-e limitálni, megtiltani.
- A szimulációknál érdemes a FLUKA által szolgáltatott fajlagos értékekben megjeleníteni az adatokat, mivel paraméterváltozás esetén gyorsan eldönthető, hogy a meglévő árnyékolás megfelel-e az új limiteknek, illetve mekkora áttervezést igényel a rendszer. Ideiglenes paraméternövelés esetén a dózismegszorítás is változtatható, például a területek ideiglenes átminősítésével összekapcsolva. Ezen opciókat a sugárvédelmi szakembereknek kell mérlegelni.
- A diszkrét energiaeoszlási tervezési módszer alkalmazásánál minden energiára le kell futtatni a szimulációkat, és minden esetben teljesülniük kell a dózislimiteknak. A diszkrét módszerrel látható, hogy a részecskeenergia mely tartományára a legérzékenyebb a rendszer.
- A végleges terv készítésekor nagy indított részecskeszámmal is el kell végezni a szimulációt.

ÖSSZEFOGLALÓ

A nagy teljesítményű lézerberendezések sugárvédelmi tervezése időigényes, összetett folyamat, és a tervezés fázisaiba több szakág (sugárvédelem, munkavédelem, lézervédelem, épületgépészet, épüleüzemeltetés) bevonása szükséges. A cikk a tervezés menetét mutatta be. Megvizsgáltuk, hogy az egyes üzemi paraméterek változásai hogyan és milyen mértékben befolyásolják a koncepcionális tervek sugárvédelmi megfelelőségét.

A tervezést a FLUKA kóddal végeztünk. A kód tesztelése során látható volt, hogy a kis részecskeszámmal végzett próbaszimulációk is hordoznak sugárvédelmi szempontból használható eredményeket, amelyek támpontot adhatnak a tervezőnek arra, hogy a koncepcionális terv nagyságrendileg megfelelhet-e az elvárásoknak.

Egy koncepcionális tervezési példával bemutattuk, hogy a tervezési egyenlet alapján hogyan határozhatók meg a dózislimitek, és szimulációk segítségével mutattuk be a koncepcionális lokális árnyékolás megfelelőségét. Továbbá megvizsgáltuk, hogyan hat a meglévő árnyékolás sugárvédelmi megfelelőségére az üzemviteli paraméterek csökkenése vagy növelése.

A javaslatok, következtetések felhasználhatók a már meglévő berendezések lokális árnyékolásának továbbtervezésénél, valamint új kísérleti elrendezés tervezésénél, méretezésénél is.

Az ELI-ALPS projekt (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] J. Bauer, J. C. Liu, A. A. Prinz, S. Rokni, H. Tran, M. Woods, and Z. Xia, *Measurements of Ionizing Radiation Doses Induced by High Irradiance Laser on Targets in LCLS MEC Instrument*. SLAC National Accelerator Laboratory, USA, 2013. Elérhető: <https://www.slac.stanford.edu/cgi-bin/getdoc/slac-pub-15889.pdf>
- [2] G. Mourou, G. Korn, W. Sandner, J. L. Collier, *ELI WHITEBOOK*, M C, France: ELI PP Publications, 2011, pp. 71-77. Elérhető: https://www.eli-alps.hu/files/Documents/file_eng/ELI-Book_low_res_version_1.pdf
- [3] A. Cimmino, D. Horváth, V. Olšovcová, V. Stránský, R. Truneček, A. Tsinganisa and R. Versacia, *Radiation Protection at ELI Beamlines: A Unique Laser Driven Accelerator Facility*, Prague, Czech Republic, Proceedings of Science, 2020. Elérhető: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2104/2104.05479.pdf>
- [4] T. Liang, J. Bauer, M. Cimeno, A. Ferrari, E. Galtier, E. Granados, H. J. Lee, J. Liu, B. Nagler, A. Prinz, S. Rokni, H. Tran and M. Woods, *Radiation dose measurements for high-intensity laser interactions with solid targets at SLAC, US.*, Oxford University Press 2015. Elérhető: <https://academic.oup.com/rpd/article/172/4/346/2527702?login=false>
- [5] F. S. Englbrecht, A. Döpp, J. Hartmann, F. H. Lindner, M. L. Groß, H.-F. Wirth, P. G. Thirolf, S. Karsch, J. Schreiber, K. Parodi and G. Dedes, *Radiation protection modelling for 2.5 Petawatt-laser production of ultrashort x-ray, proton and ion bunches: Monte Carlo model of the Munich CALA facility*, UK, Journal of Radiological Protection, IOP Publishing, 2020. Elérhető: https://pure.mpg.de/rest/items/item_3261745_1/component/file_3263093/content
- [6] Website: <https://fluka.cern>, C. Ahdida, D. Bozzato, D. Calzolari, F. Cerutti, N. Charitonidis, A. Cimmino, A. Coronetti, G. L. D'Alessandro, A. Donadon Servelle, L. S. Esposito, R. Froeschl, R. García Alía, A. Gerbershagen, S. Gilardoni, D. Horváth, G. Hugo, A. Infantino, V. Kouskoura, A. Lechner, B. Lefebvre, G. Lerner, M. Magistris, A. Manousos, G. Moryc, F. Ogallar Ruiz, F. Pozzi, D. Prelicpean, S. Roesler, R. Rossi, M. Sabaté Gilarte, F. Salvat Pujol, P. Schoofs, V. Stránský, C. Theis, A. Tsinganis, R. Versaci, V. Vlachoudis, A. Waets, M. Witorski, "New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code", *Frontiers in Physics* 9, 788253, 2022. Elérhető: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.788253/full>
- [7] G. Battistoni, T. Boehlen, F. Cerutti, P. W. Chin, L. S. Esposito, A. Fassó, A. Ferrari, A. Lechner, A. Empl, A. Mairani, A. Mereghetti, P. Garcia Ortega, J. Ranft, S. Roesler, P. R. Sala, V. Vlachoudis, G. Smirnov, „Overview of the FLUKA code”, *Annals of Nuclear Energy* 82, 10-18, 2015. Elérhető: <https://inspirehep.net/literature/1421238>
- [8] T.T. Böhlen, F. Cerutti, M.P.W. Chin, A. Fassó, A. Ferrari, P.G. Ortega, A. Mairani, P.R. Sala, G. Smirnov and V. Vlachoudis: *The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications*, *Nuclear Data Sheets* 120, 211-214, 2014. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0090375214005018>
- [9] A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fassó, and J. Ranft: *FLUKA: a multi-particle transport code*, CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, 2005.

- Elérhető: <https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/reports16/slac-r-773.pdf>
- [10] K. Bodor, *Principle design elements of the radiation protection systems of the ELI - ALPS*, 2nd FLUKA Advanced Course and Workshop, Vancouver, Canada, 2012. Elérhető: https://www.fluka.org/free_download/course/triumf2012/Workshop/Bodor.pdf
- [11] J. Fuchs, P. Audebert, M. Borghesi, H. Pépin, O. Willi, *Laser acceleration of low emittance high energy ions and applications*, ELSEVIER, C. R. Physique, 2009. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070509000450>
- [12] D. Gustas, D. Guénot, A. Vernier, F. Böhle, R. Lopez-Martens, A. Lifschitz, and J. Faure, *Recent Progress on kHz Laser-Plasma Acceleration Driven by Single Cycle Laser Pulses*, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2018).
Elérhető: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=HILAS-2018-HM3A.3>
- [13] A. Ferrari, T. Cowan, D. Margarone, J. Prokupek and B. Rus, *Shielding assessment for the ELI high intensity laser beamline facility in Czech Republic*, SATIF-10, CERN, 2010. Elérhető: <https://docplayer.net/221310833-Shielding-assessment-for-the-eli-high-intensity-laser-facility-in-czech-republic.html>
- [14] A. Esposito, *Radiation Protection around laser-based accelerators*, ELI WP6 meeting, Salamanca, Spain, 2010. Elérhető: https://indico.ihep.ac.cn/event/10011/attachments/106/162/RP_laserbasedaccelerators.pdf
- [15] M. Brugger, A. Ferrari, S. Roesler, L. Ulrici: *Validation of the FLUKA Monte Carlo code for predicting induced radioactivity at high-energy accelerators*, ELSEVIER, CERN, Geneva, Switzerland, 2006. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900206003020>
- [16] M.E. Dieckmann, *The particle-in-cell simulation method: Concept and limitations*, 2007 Summer College on Plasma Physics, Italy 2007. <https://indico.ictp.it/event/a06211/session/63/contribution/43/material/0/0.pdf> (Letöltés ideje: 2023.01.08.)
- [17] Fluka scoring, Advanced Fluka course előadás, tananyag, https://indico.cern.ch/event/489973/contributions/2000424/attachments/1269290/1880139/03_AdvancedScoring2016.pdf (Letöltés ideje: 2013.08.10.)