



A LÉZERSUGÁR VESZÉLYEI

HAZARDS OF LASER BEAM

Nagy Balázs Ákos,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Lasers are now indispensable tools in industry, medicine, communications, and scientific research. Their precision and efficiency have led to widespread adoption. However, their use demands significant caution, as laser radiation poses a serious hazard to the human body, especially the eyes and skin. Due to this reason, most laser sources are isolated from the environment (protective enclosure), however, there are applications where the operator is in the same airspace as the equipment emitting hazardous radiation. In an industrial environment, cutting, welding, and cleaning tasks can be performed with manual laser equipment. In this case, not only does the laser radiation pose a potential risk, but also the smoke gases and aerosols generated during the interaction between the laser light and the material, which can lead to respiratory diseases. To ensure safe operation, the proper use of protective equipment – such as laser safety goggles and specialized clothing – is crucial, along with meticulous workspace design and adherence to international standards. Ensuring radiation safety is not only essential for protecting individual health, but also a fundamental requirement for the sustainable and safe application of laser technology.

Keywords: *laser beam, scattered radiation, wavelength, handheld laser source, photon-matter interaction.*

Összefoglalás

A lézerek napjainkban az ipar, az orvostudomány, a kommunikáció és a tudományos kutatások meghatározó eszközei. Precizitásuk és hatékonyságuk miatt széles körben elterjedtek, ugyanakkor használatuk jelentős figyelmet igényel, mivel a lézersugárzás komoly veszélyt jelenthet az emberi szervezetre, különösen a szemre és a bőrre. Ebből fakadóan a legtöbb lézerforrás el van szigetelve a környezettől (védőburkolat), viszont vannak olyan alkalmazások, melyeknél az üzemeltető egy légtérben tartózkodik a veszélyes sugárzást kicsatoló berendezéssel. Az ipari környezetben a kézi lézeres berendezésekkel vágási, hegesztési és tisztítási feladatok végezhetők, ez esetben a nemcsak a lézersugárzás jelent potenciális kockázatot, hanem a lézerfény-alapanyag kölcsönhatása során keletkező füstgázok és aeroszolok is, amelyek légúti megbetegedésekhez vezethetnek. A biztonságos működtetés érdekében kulcsfontosságú a megfelelő védőeszközök – például lézerszemüvegek és speciális ruházat – alkalmazása, a munkakörnyezet gondos tervezése és a nemzetközi szabványok betartása. A sugárvédelem biztosítása nemcsak az egyéni egészség megóvásának, hanem a lézertechnológia fenntartható és biztonságos alkalmazásának alapfeltétele.

Kulcsszavak: *lézersugár, szórt sugárzás, hullámhossz, kézi lézerforrás, fény-anyag kölcsönhatás.*

1. Bevezetés

Az első lézerfényt kibocsátó berendezés megalkotásától (Theodore Maiman, Hughes Research Laboratory, California, 1960.) fogva mára nélkülözhetetlen szerepet töltenek be az emberek

mindennapjaiban a lézeres technikák [1]. Ennek oka a lézerfény speciális tulajdonságaiban rejlik: hagyományos fényforráshoz képest a sugárnyaláb kis divergenciájú (kis sugárszéttartás), monokromatikus (egyszínű) és koherens, azaz állandó

frekvenciájú és fázisú elektromágneses sugárzás (1. ábra) [2, 3, 4]. Az első két tulajdonság indokolja a nagyfokú alkalmazásukat (méréstechnika, orvostudomány, szórakoztatóipar), viszont ipari anyagmegmunkálás szempontjából fontos a besugárzott felület energiaeloszlása és a nagy teljesítménysűrűség biztosítása [1]. Utóbbi miatt teljesítménylézereknek is hívhatjuk az ilyen berendezéseket, hiszen több kilowatt teljesítményleadásra képesek [2, 3].

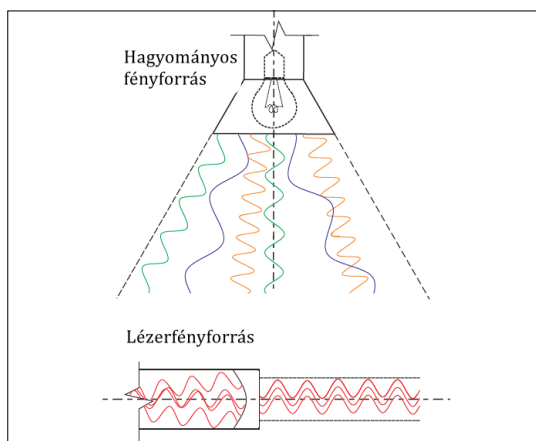
Ilyen nagy teljesítményre gázlézerek közül a CO_2 gázmédiumú ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} / \text{H}_2\text{O}$ gőz 1:1:8 arányú gázkeverék) és a szilárdtestlézerek képesek [2]. Először CO_2 -lézerekkel sikerült nagy teljesítményű berendezéseket alkotni, viszont bonyolult kialakítása és üzemeltetési, karbantartási költségei miatt visszaszorulóban vannak, de nem elhanyagolhatóak [1]. Ilyen kialakításban a lézeraktív anyag (amelyet gerjesztünk) a CO_2 molekula, a többi gáz/gőz a kettőnél több energianívós rendszer fenntartása érdekében van jelen (2. ábra). Ennek biztosítása elengedhetetlen a folyamatos üzemmódú (Continuous Wave) sugárzás eléréséhez, ami nélkül vágási, felületkezelési és egyes hegesztési feladatok elképzelhetetlenek lennének. A sugárzás 10 600 nm hullámhosszúságon történik, melyet a CO_2 vibrációs energiájának (mechanikai mozgásának) köszönhetünk [2, 3].

A fejlesztés iránya a szilárdtestlézerek felé fordult az elmúlt 30 évben, főleg a fiberkivitélű (szál, rost) gerjesztés irányában [5, 6]. Az egyik indok, hogy a még a legrobosztusabban kialakított rúd-lézerek (régi irányzat) sem vetekednek a CO_2 lézerek gerjesztőkörének méreteivel. Ezenfelül üzemeltetésük és hatásfokuk is kedvezőbb [7], bár karbantartások speciális alkatrészeket/szer-

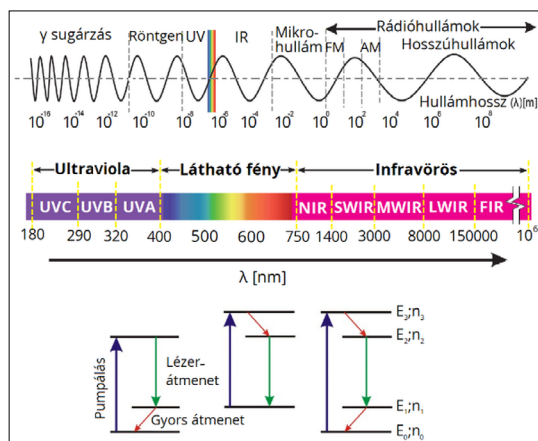
számokat igényelhet [1]. Nem utolsósorban a szilárdtestlézergépből kicsatolt fény tulajdonságai bővítik a lézerek alkalmazhatóságának palettáját [2, 3].

Az ilyen típusú lézergyorsítók lézermédiuma egy optikailag közvetítő közeg (kristály), mely lézeraktív anyaggal szennyeznek. A legelterjedtebb a YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: ittrium-alumínium-gránát) kristály- neodímiumionokkal (Nd^{3+}) szennyezve, de más anyag ionjait is alkalmazhatják (pl.: itterbium, erbium, holmium) [1, 2]. A berendezésből kicsatolható fény hullámhossza a szennyezőtől függ, neodímium esetében 1064 nm (2. ábra). Ezen NIR (közel infravörös) tartományban sugárzó lézereknek köszönhetően képesek vagyunk olyan anyagokat (Al, Cu, Ti stb.) is megmunkálni, amit CO_2 esetében komplikált lenne [1, 2, 8].

Utalva az előzőekben megállapítottakra, a szál-lézeres technikák terjednek leginkább [8, 9]. Oka a gerjesztőkör kis méretéből és a könnyedén megvalósítható sugárvezetéséből fakad [1, 2]. Ezen tulajdonságok maximalizálása mellett születtek meg a kézi lézerforrások [5, 6, 8]. Az ilyen berendezéseket több funkcióra alkották (3 in 1: vágás, hegesztés, felülettisztítás), melyekhez készülékeket (lézerfejeket) is kapunk megvásárlása esetén. Sok esetben különálló huzalelőtoló egységet is mellékelnek, melynek köszönhetően a hegesztési sebesség állandó hozaganyagos eljárás folyamán (a huzalelőtoló sebességétől függ). Szintén hozzájárul a kézi lézerforrások terjedéséhez, hogy könnyedén integrálható kollaboratív robotkarra, elősegítve a hozaganyagmentes hegesztés sebességének állandó értéken tartását és a reprodukálhatóságot (3. ábra). CNC-programozással képesek vagyunk virtuális munkateret definiálni, abból



1. ábra. Sematikus ábra a hagyományos fényforrás és a lézerfény különbségéről



2. ábra. Sugárzások hullámhosszai és 3, illetve 4 energianívós rendszer sematikus ábrázolása



3. ábra. Kézi lézerforrások (bal) és azok integrált rendszere kobottal (jobb) [6]

külépve lézersugarat nem enged a rendszer kicsatolni [6].

Napjainkban már a 4. generációs kézi lézerberendezésekről beszélünk, gyártásuk a Közel-Ketlekre összpontosul. Áruk kedvezőbb a kötött munkatérrel rendelkező, CNC-vezérlésű ipari lézerekénél (10.000 € körül), sajnos ebből fakadóan az ilyen berendezések a biztonságos üzemeltetési követelményeket csak részben teljesítik (pl.: EN ISO 11553-2; CE stb.). Üzemeltetésük folyamán ezt is figyelembe kell venni a környezet helyes kialakítása és a személyi védelem biztosítása mellett [5, 6].

2. Lézerosztályok

A lézerfényt kibocsátó eszközöket veszélyességük alapján az EN 60825-1 (jelenleg hatályos a 2014. évi) szabványosztályokba rendezte. A csoportosítás a lézerfény teljesítményének (W, mW), hullámhosszának (nm, μm), az expozíció idejének (s) és a sugárzás típusának (folyamatos üzemű, impulzusos üzemű) függvényében történt [8, 10]. 4 osztályt különböztetnek meg, egyes osztályokon belül külön betűvel alcsoportokat hoztak létre. Az M jelölés az angol magnification (nagyítás) szóból származik, jelentése a szabványra nézve az, hogy az adott, eredetileg „veszélytelen” osztályába tartozó berendezés ártalmassá válik, ha optikai eszközt helyezünk a forrás elé (Class 1M, Class 2M). Az R betű a reduced (csökkentett) angol kifejezést jelenti, azaz csökkentett kockázatúak az ilyen berendezések, de közvetlen expozíció esetén ugyanúgy veszélyesek (Class 3R). A B jelölés a szabvány korábbi változatából maradt (Class 3B) meg, külön jelentése nincs (az 1994-es verzióban a 3A a mostani 3R alosztály, a 3B maradt) [11, 12, 13].

Az 1. osztályú lézerek zárt rendszerűek, és nem jelentenek veszélyt az emberi szervezetre (pl.: CD-olvasó). Az 1M osztály 302,5–400 nm közötti hullámhosszú lézereket tartalmaz, amelyek szabad szemmel biztonságosak, de optikai eszközzel veszélyesek lehetnek (pl.: lézeres mutató).

Kötelezettségek:



Védőszemüveg



Védőruházat



Kesztyű

Figyelmeztetések:



4. ábra. Figyelmeztetések és kötelezettségek jelzései (ISO 7010 szerint)

A 2. osztályú lézerek (400–700 nm, max. 1 mW) a szem pislogási reflexe révén nem jelentenek veszélyt rövid expozíció esetén (pl.: lézermutató). A 2M osztály ugyanilyen paraméterekkel rendelkezik, de optikai eszközzel nézve káros lehet (pl.: jelölőlézerek). A 3R osztály lézerei 1–5 mW teljesítményűek (400–700 nm). Rövid ideig nem veszélyesek, de hosszabb expozíció károsíthatja a szemet. Figyelmeztető jelzések (4. ábra) és védőszemüveg ajánlott (pl.: lézervágók). A 3B osztály (5–500 mW) közvetlen és szórt sugárzás esetén is káros. Védőszemüveg kötelező (pl.: ipari/orvosi lézerek). A 4. osztály súlyos szem- és bőrkárosodást, valamint tűzveszélyt okozhat. Védőfelszerelés és szigorú biztonsági intézkedések szükségesek (pl.: ipari anyagmegmunkáló lézerek) [10, 11, 13].

A lézergépgyártók kiemelt figyelmet fordítanak arra, hogy termékeik megfeleljenek a legszigorúbb biztonsági előírásoknak, ezért törekednek arra, hogy a forgalomba hozott berendezéseik az 1. osztályba tartozzanak, így rendeltetésszerű használat mellett nem jelentenek veszélyt a felhasználókra [1, 10, 12]. Fontos megjegyezni, hogy az eredetileg magasabb veszélyességi osztályba tartozó berendezések biztonsági burkolatának eltávolítása esetén (karbantartás folytán) a berendezés tényleges lézerosztálya magasabbra változik, és így jelentős biztonsági kockázatot jelenthet az ott-tartózkodók számára [5, 10].

3. Biológiai károsodások és védekezés

A cikk küldetése, hogy megismertesse az olvasóval a szórt lézersugár biológiai szervezetre gyakorolt hatásait. A veszélyeztetett szervek, szervrendszerek a szem és a bőr. Minden esetben

biztosítani kell akkreditált védőeszközöket az előírások és törvények betartása mellett [14].

Az emberi test legérzékenyebb szerve a szem a sugárzás szempontjából, ezért elsődleges fontosságú a megfelelő védőeszközök biztosítása a munkavégzés során [4, 5, 10]. Az 5. ábra szemlélteti, hogyan reagál a szem különböző sugárbehatásokra.

Láthatjuk, hogy a CO₂-lézerek infravörös tartományú sugárzása (10600 nm) a szaruhártyában abszorbeál, annak szerkezetét és a csarnokvíz összetételét módosíthatja, rövid expozíció esetén reverzibilis folyamat [1, 12]. A közeli infravörös tartományban nem ilyen kedvező a helyzet: jellemző hullámhosszát képes közvetíteni a szemlencse szerkezete, fókuszálva a retinára, mely lokális koagulációhoz vezethet [3, 4, 11]. Ezért speciális védőszemüvegeket fejlesztettek ki, amelyek különböző törésmutatójú lencsékkel rendelkeznek attól függően, hogy milyen hullámhosszú sugárzást kell kiszűrniük. Az ilyen termékekre vonatkozó legismertebb szabvány az EN 207:2020, amely szigorú követelményeket ír elő, szemben az amerikai megfelelőjével (ANSI Z136.1), ami csak az optikai sűrűség meghatározására tér ki [4, 5, 6].

Az optikai sűrűség (Optical Density) a lézersugárzás elleni védelem hatékonyságát jelzi, amelyet a védőszemüvegek piacra kerülés előtt különböző tesztekkel határoznak meg. Az OD értéke a sugárzás csillapításának logaritmikus mértéke:

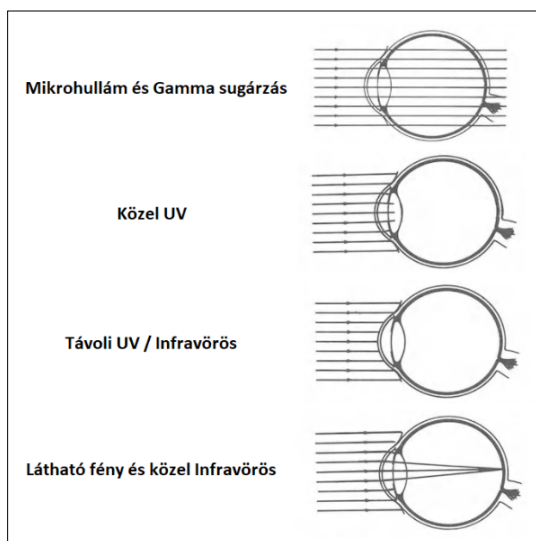
$$OD = \log_{10} \left(\frac{M_i}{M_t} \right), \quad (1)$$

ahol M_i a beeső sugár teljesítménye (W), M_t pedig a továbbított sugár teljesítménye (W) [1, 4, 12]. Minél nagyobb az OD értéke, annál hatékonyabb a védelem, ugyanakkor a költségek is növekednek, ezért fontos a szükséges minimális védelmi szint meghatározása [12]. Az OD és a maximálisan megengedett expozíció (Maximum Permissible Exposure; J/m²) között a következő összefüggés áll fenn:

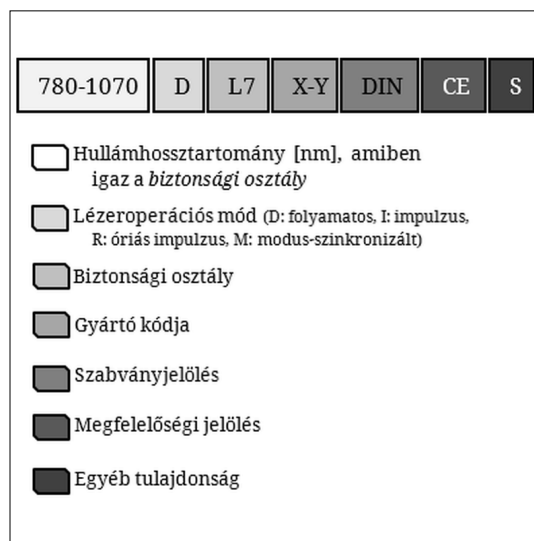
$$OD = \log_{10} \left(\frac{E}{MPE} \right), \quad (2)$$

ahol E az expozíció mértéke (J/m²). A megfelelő védőszemüveg kiválasztásához figyelembe kell venni a lézergép működési paramétereit, mint a hullámhossz, teljesítmény (P ; W), nyalábátmérő (A ; mm²) és üzemmód [4, 12]. Az EN 207:2020 szabvány táblázata segít a minimális biztonsági osztály meghatározásában, amelyet a szemüvegnek teljesítenie kell a biztonságos használatához. A védőszemüvegek műszaki dokumentációjában található diagramok az adott hullámhosszhoz tartozó áteresztőképességet és optikai sűrűséget mutatják, így ezek figyelembevételével lehet kiválasztani a megfelelő védőeszközt [5, 6, 12]. Védelemmaximalizálás érdekében pajzskivitelű eszközt válasszunk, hogy az archórt is védjük, és hogy semmilyen irányból ne juthasson sugárzás a szembe [5, 8, 9]. A védőszemüvegek jelölésrendszerét a 6. ábra mutatja [15].

Lézervédelmi szemüvegek lencsái készülhetnek üvegből és polikarbonátból. Az üveglencsék kiváló fényvezető képességgel rendelkeznek, így



5. ábra. Sematikus ábra az emberi szem reakciójáról különböző sugárzásokra



6. ábra. Lézervédelmi szemüvegek jelölésrendszere az EN 207 szerint

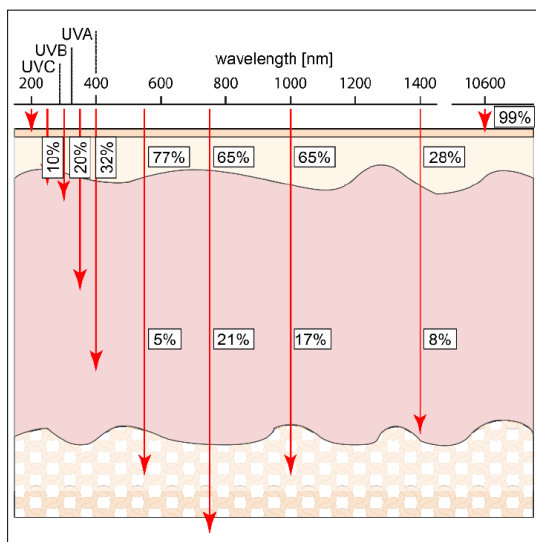
nagyobb látható fényáteresztést (Visible Light Transmission) biztosítanak, azonban ezek drágábbak, nehezebbek és törékenyebbek. Ezzel szemben a polikarbonát lencsék költséghatékonyabbak, könnyebbek és ütésállóbbak, viszont kevesebb látható fényt engednek át [4]. Ergonómiai szempontok miatt érdemes a VLT értékét 35% fölé emelni [4, 5, 8].

A lézervédő szemüvegek lencséire vékony réteget juttatnak föl a szűrőteltjesítmény fokozásáért. A legelterjedtebb bevonási eljárások közé tartozik az elektronsugaras porlasztás, amely során a bevonóanyag (SiO_2 , HfO_2) vákuumban történő elpárolgatásával hoznak létre vékony rétegeket az optikai felületeken. Ezt az eljárást gyakran egészítik ki ionasszisztált bevonással, amely az ionnyaláb segítségével tömöríti a bevonatot, csökkentve annak porozitását és növelve a lézerállóságot. Az ionsugaras porlasztás további előnyt nyújt azért, hogy rendkívül sűrű és alacsony szórású rétegeket eredményez (Al_2O_3 , Ta_2O_5), ezáltal növelve a védőszemüvegek tartósságát és optikai teljesítményét. A megfelelő anyagválasztás kulcsfontosságú, hiszen az optikai rétegeknek nemcsak a lézersugárzás ellen kell védelmet nyújtaniuk, hanem biztosítaniuk kell a megfelelő fényáteresztést és látási komfortot is. Az MLD, vagyis multirétegű dielektromos rácsok (SiO_2 és HfO_2 kombinációja) lehetővé teszik, hogy a szilárdtestlézerek készült védőlencsék optimálisan kombinálják a nagy optikai sűrűséget a minimális fényvesztéssel. Az egyes rétegek vastagsága

és az alkalmazott anyagok törésmutatója gondos tervezést igényel annak érdekében, hogy a végső bevonat hatékonyan csökkentse a veszélyes visszaverődéseket és maximalizálja a védelmet [4, 12].

Az emberi bőr természetes védelmet nyújt a környezeti hatásokkal szemben, azonban a mesterséges sugárzás ellen kevésbé hatékony. A különböző hullámhosszú lézersugárzás különböző mélységig hatolhat a bőrbe, és ennek megfelelően eltérő károsodási mechanizmusokat okoz [4, 10, 11]. A 7. ábra szemlélteti, hogy jelentős különbség van az egyes lézertípusok hatása között.

A CO_2 -lézer (10,6 μm hullámhossz) sugárzása csak a bőr felső rétegéig hatol, ahol hővezetés révén okoz károsodást. A szövet túlmelegedhet, ami koagulációhoz vezethet [12]. Ezzel szemben a szilárdtestlézerek egy nagyságrenddel rövidebb hullámhosszú sugárzása mélyebben behatol a bőrbe, ahol a szövetekben lévő víz elpárolgatásával és a vérben levő hemoglobin (Fe^{2+} és Fe^{3+} ionok) túlgerjesztésekor bekövetkező „vérsejt-robbanás” okoz károsodást [4, 9, 11]. Utóbbi a vérrögök kialakulásához vezethet, mely például a szem hajszálereit könnyen elzárhatja [4, 12]. A bőrsérülések megelőzése érdekében a test minden részét megfelelő védőruházattal kell fedni. A ruházat anyagának el kell nyelnie a lézersugárzást anélkül, hogy károsodna [5, 9, 10]. CO_2 -lézerek esetén a hagyományos marhabőr hegesztőruházat megfelelő védelmet nyújt. Szilárdtestlézerek ellen speciális, kompozitanyagokból készült ruházat



7. ábra. Az emberi bőrbe különböző sugárzások behatolási mélysége [15]



8. ábra. Ajánlott egyéni védőfelszerelések (internet)

szükséges, általában rozsdamentes acélszállal (reflektál) szőtt szövetek (abszorbeál) [12, 16]. Az emberi testet teljesen be kell borítani, így kabátok, nadrágok és kesztyűk is készülnek ilyen anyagokból [18]. Minden esetben ellenőrizni kell, hogy a védőfelszerelés megfelelő védelmet biztosít-e az adott lézertípus és -teljesítmény ellen [4, 10].

4. Környezeti megoldások

Az említett károsodások elkerülését erősíti az az elv, hogy minden lézerforrást az első csoportba tudhassuk [1, 10, 12]. Iparban használatos teljesítménylézerek CNC-rendszerekkel vezetik a sugarat kötött munkaterületen, mely kijelöli a berendezés határait, könnyedén elburkolható a külvilágtól [2, 12]. Kézi lézerforrások használatakor feltételezzük, hogy manuálisan vezérelt, így kezelője komoly szórt sugárzásnak van kitéve [5, 6, 9]. Hagyományos hegesztési technikák alkalmazásakor is elkerítik a munkaterületet, hogy azon a területen kívül tartózkodók ne szenvedjenek sérülést az UV-sugárzástól [3]. Az ilyen hegesztőállomásokot függönyökkel és paravánokkal kerítik el [3, 10]. Véleményem szerint ez nem elegendő NIR-sugárzás ellen, hiszen az ilyen rendszerek nem szigetelnek hermetikusan. Ennek ellenére léteznek kifejezetten ezen hullámhossz ellen alkotott hegesztőparavánok és függönyök. Ezek közül kiemelendők a lézeraktív rendszerek, amelyek össze vannak kötve a lézerforrással, és direkt sugárzás esetén leállítják a fotonok áramlását [5, 8, 17].

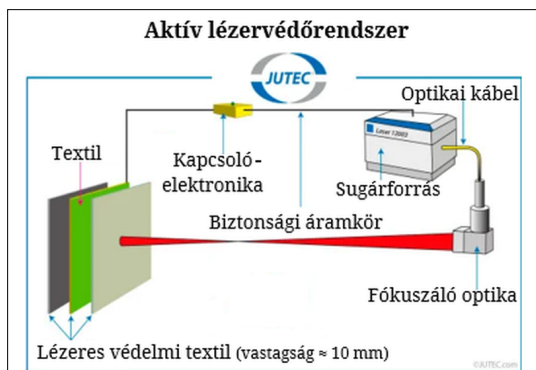
Ha sikerült bezárni egy „dobozba” a berendezést a kezelőjével, akkor megvédtük a munkatérrel kívüli levőket, viszont belül a különböző helyzetű, abszorpciós tényezőjű, felületi érdességű anyagok növelik a szórt sugárzás értékét, diffúzan tükröződik [4, 5, 9]. Mérséklésére különböző VANTA

BLACK-típusú festékeket használnak, de egyéb reflektálóanyag (Al) bevonatolása vagy szendvics-panelek felhasználása is jó megoldásnak bizonyul [3, 4, 12]. Utóbbi megoldásokat alkalmazzák lézerhegesztő konténerek készítésénél. A teljesen elburkolt hegesztőállomásnak legalább egy megfigyelő ablakkal kell rendelkeznie, hogy a munkaterületen kívül tartózkodók folyamatosan ellenőrizhessék az üzemeltető egészségi állapotát, és időben észlelhessék az esetleges baleseteket [4, 18]. Az ilyen ablakok kiválasztásakor a szemüvegeknél taglalt szempontokat kell figyelembe venni [12].

A lézerhasználati területeken a hozzáférés-szabályozás kulcsfontosságú, gondoskodni kell az egyértelmű figyelmeztető jelzések (figyelmeztetések és kötelezettségek; 4. ábra) és beléptető-rendszerek elhelyezéséről. Intézkedések, például reteszelvek vagy zárt ajtók javasoltak az illetéktelen behatolás megelőzése érdekében [4, 8, 18]. Fontos környezeti tényezők közé tartozik a megfelelő megvilágítás és szellőzés. Fémek lézerrel való megmunkálásakor az alapanyag túlgerjesztése miatt fémgőz és egyéb füstgázok keletkeznek, melyek komoly légúti megbetegedésekhez vezethetnek [1, 4, 10]. A munkatér teljes szellőztetése, vagy lokális elszívás javasolt [16, 18]. A teret úgy kell megtervezni, hogy megfeleljen a biztonsági protokolloknak, és a sugárutakat úgy kell kialakítani, hogy elkerüljék a véletlen expozíciót. Nagy teljesítményű lézergépek üzemeltetéséhez sugárfelelőst kell választani [4, 10, 18].

5. Összefoglaló

Manapság egyre több felhasználó fordul a kézi lézerforrások felé sokoldalú alkalmazhatóságuk és alacsony beruházási, üzemeltetési költségei okán. Kis méretük és rugalmas sugárvezetésük révén könnyen kezelhetők, valamint kollaboratív robotkarokra is integrálhatók, ami növeli a termelékenységet és a folyamatok automatizálhatóságát [2, 5, 6]. Bár kedvező árú és sokoldalúságuk miatt egyre népszerűbbek, biztonsági szempontból kihívásokat jelentenek, mivel használatuk során a kezelő közvetlenül ki van téve a szórt lézersugárzásnak [4, 10, 11]. A megfelelő védelem érdekében fontos a munkaterület elhatárolása megfelelő anyagokkal, a terület tervezésekor érdemes a LEAN-elveket szem előtt tartani [1, 12, 16]. A kézi lézerek biztonságos használatához nemcsak a megfelelő személyi védőfelszerelések – például speciális szemüvegek és védőruházat – elengedhetetlenek, hanem a munkakörnyezet



9. ábra. Lézeraktív rendszer sematikus ábrája [17]

átgondolt kialakítása is, amely magában foglalja a hozzáférés szabályozását, a veszélyforrások feltűntetését, a figyelmeztetőrendszerek alkalmazását és a megfelelő szellőzést a keletkező füstgázok eltávolítására [4, 10, 18].

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Elijah Kannatey-Asibu Jr.: *Principles of Laser Materials Processing. Developments and Applications*. 2nd edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2023.
- [2] Buza Gábor: *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola. Budapest, 2012.
- [3] Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007.
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [4] Ken Barat: *Laser Safety: Tools and Training*. Second Edition, Taylor & Francis LTD, Broken Sound Parkway, 2017.
- [5] Halász Gábor: *A kézi lézeres berendezések biztonságos használata*. Hegesztéstechnika, XXXV/1. (2024) 41–47.
- [6] Gáti József, Kovács Tünde, Nagy Balázs: *Gépesített kézi lézeres hegesztés gyakorlati tapasztalatai*. Hegesztéstechnika, XXXIV/4. (2024) 43–47.
- [7] <https://www.techmonitor.hu/piacmonitor/az-optikai-szalas-lezer-es-a-co2-lezer-osszehasonlitas-a-20230310> (megtekintve: 2024.12.)
- [8] Tóth László: *A kézi lézeres hegesztőgépek biztonságtechnikája*. Nagy energiasűrűségű ankét, Magyar Hegesztési Egyesület, Kecskemét, 2023. október 26., előadás-prezentáció
https://maheg.hu/wp-content/uploads/2023/11/Lezervedelem_PPT_MDTL-231026-Nagy_energiasurusegu_Anket.pdf
- [9] Buza Gábor: *Lézersugaras technológiák tegnap, ma, holnap*. Nagy energiasűrűségű ankét, Magyar Hegesztési Egyesület, Kecskemét, 2023. október 26., előadás-prezentáció.
https://maheg.hu/wp-content/uploads/2023/11/Buza_Nagy_energiasurusegu.pdf
- [10] Bagyinszki Gyula: *Lézerek alkalmazásának technológiai és biztonságtechnikai szempontjai*. XI. Nemzetközi és IV. GTE-MHtE-DVS Hegesztési Konferencia, Budapest, 2004. augusztus 23–26., 14–29.
- [11] Andraws Andrew, Kovács-Coskun Tünde: *Lézervágás biztonságtechnikai kérdései*. Műszaki Tudományos Közlemények, 5. (2016) 65–68.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2016.05.07>
- [12] Roy Henderson, Karl Schulmeister: *Laser Safety*. 1st edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2003.
- [13] EN 60825-1: Safety of Laser Products - Part 1: Equipment Classification and Requirements, 2014.
- [14] 2012. évi I. törvény a munka törvénykönyvéről: 51. § és 86. §
- [15] EN 207:2017: Personal Eye-Protection Equipment - Filters and Eye-Protectors against Laser Radiation (Laser Eye-Protectors)
- [16] Penny J. Smaller: *Laser Safety: Risks, Hazards, and Control Measures*. Laser Therapy, 20/2. (2011) 95–106.
- [17] <https://www.jutec.com> (megtekintve: 2024.11.)
- [18] California Institute of Technology: *Laser Safety Manual*, Caltech Environmental Health and Safety Office, California, 2023.