

Optiline laserkiirgus

Biofüüsikaliselt põhjendatud ja asjakohased optilise laserkiirgusega kokkupuute väärtused on arvatavad allpool toodud valemite abil, kasutades mõõtetulemusi. Valemites võetakse arvesse laserkiirguse allikast lähtuva kiirguse lainepikkusi, kokkupuute kestust ja ohustatud elundeid. Kiirguse ohtlikkuse hindamisel peab mõõtetulemuste alusel arvatud väärtusi (koos mõõtemääramatusega) võrdlema tabelites 2.2–2.4 esitatud vastavate kokkupuute piirnormidega. Ühe optilise laserkiirguse allika kohta võib olla rohkem kui üks kokkupuute väärtus ja sellele vastav kokkupuute piirnorm.

Koefitsiendid tabelites 2.2–2.4 osutatud summade arvutamiseks on loetletud tabelis 2.5 ja korduva kokkupuute parandustegurid on loetletud tabelis 2.6.

$$E = \frac{dP}{dA} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$$

$$H = \int_0^t E(t) \cdot d t \text{ [J m}^{-2}\text{]}$$

Märkused:

dP	<i>võimsus, võimsuse muut</i> , mida väljendatakse vattides [W];
dA	<i>pindala, pindala muut</i> , mida väljendatakse ruutmeetrites [m ²];
E(t), E	<i>kiirgusintensiivsus või võimsustihedus</i> – teatud pinnale (sh pindalale dA) langeva kiirguse võimsus pindalaühiku kohta, mida tavaliselt väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [W m ⁻²]. E(t), E väärtused saadakse mõõtmise teel või võib need anda seadme valmistaja;
H	<i>kokkupuude kiirgusega</i> , kiirgustiheduse ajaintegraal, mida väljendatakse džaulides ruutmeetri kohta [J m ⁻²];
t, dt	<i>aeg, ajavahemik, kokkupuute kestus</i> , mida väljendatakse sekundites [s];
λ	<i>lainepikkus</i> , mida väljendatakse nanomeetrites [nm];
γ	<i>mõõdetavat vaatevälja piirav koonusnurk</i> , mida väljendatakse milliradiaanides [mrad];
γ _m	<i>mõõdetav vaateväli</i> , mida väljendatakse milliradiaanides [mrad];
α	<i>allika avanemisnurk</i> , mida väljendatakse milliradiaanides [mrad]; <i>piirav ava</i> – ringikujuline ala, mille ulatuses arvutatakse kiirgusintensiivsuse ja kiirgusega kokkupuute keskmised;
G	<i>integraalne kiirgustihedus</i> – kiirgustiheduse integraal antud kokkupuute aja jooksul, mida väljendatakse kiirgusenergia kiirgava pinna pindalaühiku kohta ja emissiooni ruuminurga ühiku kohta, džaulides ruutmeetri kohta ja steradiaani kohta [J m ⁻² sr ⁻¹].

Tabel 2.1: Optilise laserkiirguse liigitus ja ohud elunditele

Lainepikkuste vahemik [nm] λ	Kiirguse liigitus	Mõjutatud elund	Oht	Kokkupuute piirnormide tabel
180–400	UV	silm	fotokeemiline kahjustus ja termiline kahjustus	2.2; 2.3
180–400	UV	nahk	erüteemia	2.4
400–700	nähtav	silm	võrkkesta kahjustus	2.2
400–600	nähtav	silm	fotokeemiline kahjustus	2.3
400–700	nähtav	nahk	termiline kahjustus	2.4
700–1400	IR-A	silm	termiline kahjustus	2.2; 2.3
700–1400	IR-A	nahk	termiline kahjustus	2.4
1400–2600	IR-B	silm	termiline kahjustus	2.2
2600–10 ⁶	IR-C	silm	termiline kahjustus	2.2
1400–10 ⁶	IR-B, IR-C	silm	termiline kahjustus	2.3
1400–10 ⁶	IR-B, IR-C	nahk	termiline kahjustus	2.4

Tabel 2.2: Silmade suhtes kohaldatavad laserkiirgusega kokkupuute piirnormid. Lühike kokkupuuteaeg < 10 s

Lainepikkus ^a [nm]		Ava	Kestus t [s]					
			10^{-13} – 10^{-11}	10^{-11} – 10^{-9}	10^{-9} – 10^{-7}	10^{-7} – $1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-3}
UV-C	180–280	1 mm , kui $t < 0,3 \text{ s}$; $1,5 \cdot t^{0,375} \text{ mm}$, kui $0,3 < t < 10 \text{ s}$	$E = 3 \cdot 10^{10} \cdot [\text{W m}^{-2}]$ Vaata märkus ^c	$H = 30 [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}]$				
UV-B	280–302			$H = 40 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	303			$H = 60 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	304			$H = 100 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	305			$H = 160 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	306			$H = 250 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	307			$H = 400 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	308			$H = 630 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	309			$H = 10^3 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	310			$H = 1,6 \cdot 10^3 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	311			$H = 2,5 \cdot 10^3 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	312			$H = 4,0 \cdot 10^3 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	313			$H = 6,3 \cdot 10^3 [\text{J m}^{-2}]$; kui $t < 1,6 \cdot 10^0$ siis $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$ vaata märkus ^d				
	314			$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} [\text{J m}^{-2}]$				
	UV-A			315–400				
nähtav valgus ja IR-A	400–700	7 mm	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_E [\text{J m}^{-2}]$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_E [\text{J m}^{-2}]$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_E [\text{J m}^{-2}]$		$H = 18 \cdot t^{0,75} C_E [\text{J m}^{-2}]$	
	700–1050		$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_A C_E [\text{J m}^{-2}]$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_A C_E [\text{J m}^{-2}]$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_A C_E [\text{J m}^{-2}]$		$H = 18 \cdot t^{0,75} C_A C_E [\text{J m}^{-2}]$	

	1050–1400		$H = 1,5 \cdot 10^{-3} C_C C_E$ [J m ⁻²]	$H = 2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_C C_E$ [J m ⁻²]	$H = 5 \cdot 10^{-2} C_C C_E$ [J m ⁻²]	$H = 90 \cdot t^{0,75} C_C C_E$ [J m ⁻²]	
IR-B ja IR-C	1400–1500	λ p märke	$E = 10^{12}$ [W m ⁻²] Vaata märkus ^c		$H = 10^3$ [J m ⁻²]		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ [J m ⁻²]
	1500–1800		$E = 10^{13}$ [W m ⁻²] Vaata märkus ^c		$H = 10^4$ [J m ⁻²]		
	1800–2600		$E = 10^{12}$ [W m ⁻²] Vaata märkus ^c		$H = 10^3$ [J m ⁻²]		$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ [J m ⁻²]
	2600–10 ⁶		$E = 10^{11}$ [W m ⁻²] Vaata märkus ^c		$H = 100$ [J m ⁻²]	$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ [J m ⁻²]	

- a Kui laserkiirguse lainepikkus on hõlmatud kahe piirnormiga, siis kohaldatakse rangemat normi.
- b Kui $1400 \leq \lambda < 10^5$ nm: ava läbimõõt = 1 mm, kui $t \leq 0,3$ s ja $1,5 t^{0,375}$ mm, kui $0,3 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$; kui $10^5 \leq \lambda < 10^6$ nm: ava läbimõõt = 11 mm.
- c Kuna sellise impulsi pikkuse kohta on teave puudulik, soovitab ICNIRP kasutada kiirgusintensiivsuse piirväärtust 1 ns impulsi jaoks.
- d Tabelis on üksikute laserimpulsside väärtused. Kui tegemist on mitme laserimpulsiga, tuleb vahemikus T_{\min} (loetletud tabelis 2.6) toimunud impulssid kokku liita ja tulemus tuleb asetada valemisse $5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}$.

Tabel 2.3: Silmade suhtes kohaldatavad laserkiirgusega kokkupuute piirnormid. Pikk kokkupuuteaeg ≥ 10 s

Lainepikkus ^a [nm]		Ava	Kestus t [s]		
			10^1-10^2	10^2-10^4	$10^4-3 \cdot 10^4$
UV-C	180–280	3,5 mm	$H = 30 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
UV-B	280–302				
	303		$H = 40 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	304		$H = 60 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	305		$H = 100 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	306		$H = 160 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	307		$H = 250 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	308		$H = 400 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	309		$H = 630 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	310		$H = 1,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	311		$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	312		$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	313		$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
	314		$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$		
UV-A	315–400	$H = 10^4 \text{ [J m}^{-2}\text{]}$			
Nähtav 400 – 700	400–600 Fotokeemiline ^b Võrkkestakahjustus	7 mm	$H = 100 C_B \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 11 \text{ mrad}$) ^d	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}$; ($\gamma = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$) ^d	$E = 1 C_B \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ ($\gamma = 110 \text{ mrad}$) ^d
	400–700 Termiline ^b Võrkkestakahjustus		kui $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ siis $E = 10 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ kui $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ ja $t \leq T_2$ siis $H = 18 C_E t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ kui $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ ja $t > T_2$ siis $E = 18 C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		
IR-A	700–1400	7 mm	kui $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ siis $E = 10 C_A C_C \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ kui $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ ja $t \leq T_2$ siis $H = 18 C_A C_C C_E t^{0,75} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$ kui $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ ja $t > T_2$ siis $E = 18 C_A C_C C_E T_2^{-0,25} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ (kui $E > 1000 \text{ W m}^{-2}$, siis normiks loetakse 1000 W m^{-2})		
IR-B ja IR-C	1400– 10^6	Vt. ^c	$E = 1000 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		

- a Kui laseri lainepikkus või muu omadus on hõlmatud kahe piirväärtusega, siis kohaldatakse rangemat normi.
- b Väikeste allikate puhul, mille vaatenurk on 1,5 mrad või väiksem, rakendatakse vahemikus 400 nm kuni 600 nm (nähtav valgus) kiirgusega kokkupuute piirnorme sõltuvalt kokkupuute kestusest t :
kui $10 \text{ s} \leq t < T1$, siis kiirgusintensiivsuse E piirnormi vähendatakse kuni termilise toime piirnormini ja
kui $t > T1$, siis kehtivad fotokeemilise toime piirnormid. $T1$ ja $T2$ jaoks vt tabel 2.5.
Kiirguse fotokeemilise toime ohtu silma võrkkestale võib väljendada ka kiirgustiheduse ajaintegraalina
 $G = 106 \text{ CB} [\text{Jm}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$, kui $t > 10 \text{ s}$ ja kuni $t = 10\,000 \text{ s}$ ja $L = 100 \text{ CB} [\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$, kui $t > 10\,000 \text{ s}$. G ja L mõõtmisel tuleb γ_m -i kasutada kui keskmistatud vaatevälja. Nähtava valguse ja infrapunakiirguse vaheline ametlik piir on CIE määratud 780 nm.
Veerg lainepikkuste ribade nimetustega on vaid kasutajale parema ülevaate andmiseks. (CEN kasutab tähist G , CIE kasutab tähist L_t ning IEC ja CENELEC kasutavad tähist LP.)
- c Lainepikkusele 1400– 10^5 nm: ava läbimõõt = 3,5 mm; lainepikkusele 10^5 – 10^6 nm: ava läbimõõt = 11 mm.
- d Kokkupuute väärtuse mõõtmiseks võetakse γ arvesse järgmiselt: kui α (allika avanemisnurk) $> \gamma$ (piirav koonusnurk, esitatud vastavas veerus sulgudes), siis mõõdetavale vaateväljale γ_m tuleb anda γ väärtus. (Kui kasutada laiemat mõõtmise vaatevälja, hinnatakse ohtu üle).
Kui $\alpha < \gamma$, siis mõõdetav vaateväli γ_m peab olema piisavalt avar, et katta allikas täielikult, samas ei piirata seda teiselt poolt ja see võib olla suurem kui γ .

Tabel 2.4: Naha suhtes kohaldatavad laserkiirgusega kokkupuute piirnormid

Lainepikkus ^a [nm]		Ava	Kestus t [s]					
			$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^1$	$10^1 - 10^3$	$10^3 - 3 \cdot 10^4$
UV (A, B, C)	180–400	3,5 mm	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	Samad mis silma suhtes kokkupuute piirnormid				
nähtav valgus ja IR-A	400–700	3,5 mm	$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	$H = 200 C_A \text{ [J m}^{-2}\text{]}$	$H = 1,1 \cdot 10^4 C_A t^{0,25} \text{ [J m}^{-2}\text{]}$	$E = 2 \cdot 10^3 C_A \text{ [W m}^{-2}\text{]}$		
	700–1400		$E = 2 \cdot 10^{11} C_A \text{ [W m}^{-2}\text{]}$					
IR-B ja IR-C	1400–1500	3,5 mm	$E = 10^{12} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$	Samad mis silma suhtes kokkupuute piirnormid				
	1500–1800		$E = 10^{13} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$					
	1800–2600		$E = 10^{12} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$					
	2600– 10^6		$E = 10^{11} \text{ [W m}^{-2}\text{]}$					

^a Kui laseri lainepikkus või mõni muu omadus on hõlmatud kahe piirnormiga, siis kohaldatakse rangemat normi.

Tabel 2.5: Kohaldatavad parandustegurid ja teised arvutusparameetrid

ICNIRP-i loetelu kohane parameeter	Kehtiv spektrivahemik (nm)	Väärtus
C_A	$\lambda < 700$	$C_A = 1,0$
	700–1050	$C_A = 10^{0,002(\lambda-700)}$
	1050–1400	$C_A = 5,0$
C_B	400–450	$C_B = 1,0$
	450–700	$C_B = 10^{0,02(\lambda-450)}$
C_C	700–1150	$C_C = 1,0$
	1150–1200	$C_C = 10^{0,018(\lambda-1150)}$
	1200–1400	$C_C = 8,0$
T_1	$\lambda < 450$	$T_1 = 10 \text{ s}$
	450–500	$T_1 = 10 \cdot [10^{0,02(\lambda-450)}] \text{ s}$
	$\lambda > 500$	$T_1 = 100 \text{ s}$
ICNIRP-i loetelu kohane parameeter	Kehtiv bioloogilise toime korral	Väärtus
α_{\min}	kõik termilised mõjud	$\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$
ICNIRP-i loetelu kohane parameeter	Kehtiv nurgavahemik (mrad)	Väärtus
C_E	$\alpha < \alpha_{\min}$	$C_E = 1,0$
	$\alpha_{\min} < \alpha < 100$	$C_E = \alpha / \alpha_{\min}$
	$\alpha > 100$	$C_E = \alpha^2 / (\alpha_{\min} \cdot \alpha_{\max}) \text{ mrad}$ kui $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$
T_2	$\alpha < 1,5$	$T_2 = 10 \text{ s}$
	$1,5 < \alpha < 100$	$T_2 = 10 \cdot [10^{(\alpha-1,5)/98,5}] \text{ s}$
	$\alpha > 100$	$T_2 = 100 \text{ s}$
ICNIRP-i loetelu kohane parameeter	Kehtiv kokkupuuteaeg (s)	Väärtus
γ	$t \leq 100$	$\gamma = 11 \text{ [mrad]}$
	$100 < t < 10^4$	$\gamma = 1,1 t^{0,5} \text{ [mrad]}$
	$t > 10^4$	$\gamma = 110 \text{ [mrad]}$

Tabel 2.6: Korduva kokkupuutumise parandustegurid

Kõiki kolme järgnevat üldreeglit tuleb kohaldada kõikide korduvate kokkupuudete korral, mis tekivad kordavas režiimis töötavate impulsslaserite või skaneerivate lasersüsteemide puhul.

1. Impulsside rea igast üksikust impulsist põhjustatud kokkupuude ei tohi ületada sellise impulsi kestusega üksikimpulsi kokkupuute piirnormi.
2. Igasuguse impulsside rea (või impulsside rea alarühma) tekitatud kokkupuude aja t jooksul ei tohi ületada kokkupuute piirväärtust aja t jaoks.
3. Impulsside rea igast üksikust impulsist põhjustatud kokkupuude ei tohi ületada üksikimpulsi kokkupuute piirnormi, mis on korrutatud kumulatiivse termilise toime parandusteguriga $C_p=N^{-0,25}$, kus N on impulsside arv. See reegel kohaldub vaid kokkupuute termilise kahjustuse piirnormide suhtes, kusjuures kõik vähem kui T_{\min} jooksul antud impulsse käsitletakse ühe impulsina.

Parameeter	Kehtiv spektrivahemik (nm)	Väärtus
T_{\min}	$315 < \lambda \leq 400$	$T_{\min} = 10^{-9} \text{ s} (= 1 \text{ ns})$
	$400 < \lambda \leq 1050$	$T_{\min} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ s} (= 18 \text{ } \mu\text{s})$
	$1050 < \lambda \leq 1400$	$T_{\min} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ s} (= 50 \text{ } \mu\text{s})$
	$1400 < \lambda \leq 1500$	$T_{\min} = 10^{-3} \text{ s} (= 1 \text{ ms})$
	$1500 < \lambda \leq 1800$	$T_{\min} = 10 \text{ s}$
	$1800 < \lambda \leq 2600$	$T_{\min} = 10^{-3} \text{ s} (= 1 \text{ ms})$
	$2600 < \lambda \leq 10^6$	$T_{\min} = 10^{-7} \text{ s} (= 100 \text{ ns})$

Hanno Pevkur
Sotsiaalminister