

# FOTOBIOLOŠKA VARNOST NEKATERIH VIROV NEKOHERENTNIH UMETNIH OPTIČNIH SEVANJ

Marta Klanjšek Gunde<sup>1</sup>, Mojca Friškovec<sup>2</sup>, Andrijana Sever Škapin<sup>3</sup>, Janez Bernard<sup>3</sup>

ZNANSTVENI ČLANEK

<sup>1</sup>Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1001 Ljubljana

<sup>2</sup>Cetis, d. d., Čopova 24, 3000 Celje

<sup>3</sup>Zavod za Gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

## POVZETEK

Analizirali smo fotobiološko varnost treh virov nekoherentnih optičnih sevanj glede na določila Uredbe o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem. Izbrali smo tri vire sevanj, ki jih uporabljamo pri raziskovalnem delu: laboratorijski UV-sušilnik, vir sevanja UV-A in ksenonsko svetilko. Na mestih, kjer se pri delu lahko zadržuje oseba, smo izmerili spektralno obsevanost in izračunali stopnjo tveganja za škodljive učinke ultravijoličnega sevanja in vidne svetlobe na oči in kožo. Preverili smo tudi učinkovitost zaščitnih očal, oblačil in rokavic za zaščito pred škodljivimi učinki prekomernega sevanja. Škodljivi učinki modre svetlobe so zanemarljivi za vse analizirane sevalne vire že brez kakršne koli zaščite, medtem ko je oseba z nezavarovano kožo in očmi lahko med delom izpostavljena UV-sevanju le od manj kot pol minute do nekaj minut, odvisno od vrste sevalnega vira in njegove uporabe. Škodljive učinke UV-sevanja pa močno zmanjšamo z zaščitno obleko, rokavicami in očali. Najslabšo zaščito daje tekstil, boljšo pa zaščitne rokavice in očala.

**Ključne besede:** fotobiološka varnost, ultravijolično sevanje, škodljivi učinki modre svetlobe, zaščita pred sevanjem

## Photobiological safety of some non-coherent artificial optical radiation sources

### ABSTRACT

Photobiological safety of three non-coherent optical radiation sources was analysed according to the new Regulation on the protection of workers from risks related to exposure to artificial optical radiation sources. Three sources were analysed, laboratory UV-curing equipment, UV-A radiation source and xenon lamp. Spectral irradiances were measured on positions where a person is likely to be present when working with particular equipment. Exposure levels for skin and eyes were calculated for ultraviolet and visible radiation. The protection ability of the lab coat textile, protective goggles and gloves were analysed. The blue light hazard was found to be negligible for all three radiation sources without any protection. However, a person with unprotected skin and eyes is allowed to be exposed to ultraviolet radiation for up to some minutes, depending on radiation source and its application. Hazardous effects of ultraviolet radiation are greatly diminished by protective cloth, gloves and goggles. Rather poor protection is achieved by textile and better by gloves and goggles.

**Keywords:** photobiological safety, ultraviolet radiation, blue-light hazard, radiation protection

## 1 UVOD

Umetna optična sevanja se pogosto uporabljajo v najrazličnejših postopkih sodobnih tehnologij, med katerimi so najpomembnejši varjenje, različni laserji, fotolitografski in fotokopirni postopki, sterilizacija, sušenje, utrjevanje polimerov in podobno. Neokoherentni viri optičnih sevanj so se v tehnoloških postopkih začeli pogosteje uporabljati šele v zadnjem

času. Splošno so znani le škodljivi učinki ultravijoličnega (UV) sevanja in svetlobe varilnih aparatov, medtem ko se pri uporabi drugih virov nekoherentnih optičnih sevanj do sedaj praviloma ni obravnavalo mogočih škodljivih učinkov.

Skladno z evropsko zakonodajo [1] je v letu 2010 stopila v veljavo *Uredba o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem* [2]. *Uredba* določa mejne vrednosti izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem, obveznosti delodajalca in kazenske določbe. Navedena zakonodaja temelji na izsledkih številnih interdisciplinarnih raziskav s področja fotobiologije, fotofizike, fotokemije in biofizike, ki obravnavajo učinke optičnih sevanj na človeško kožo in oči. Zbiranje in urejanje eksperimentalnih podatkov o učinkih nekoherentnih optičnih sevanj je opravila CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), mednarodna neprofitna strokovna organizacija, ki se ukvarja z različnimi vidiki svetlobe in razsvetljave, z barvami in barvnimi prostori, s slikovnimi tehnologijami ter z biološkimi vplivi nevidne svetlobe [3].

Razloge za uvedbo novega akta na področju varovanja zdravja in najpomembnejša določila *Uredbe* za nekoherentna optična sevanja obravnava predhodni članek [4]. V tem članku pa analiziramo, kaj določila te *Uredbe* pomenijo v praksi. Izbrali smo nekaj virov UV-sevanja, ki jih uporabljamo pri vsakdanjem delu v laboratoriju. Izmerili smo izdatnost njihovega sevanja na tistih mestih, kjer se lahko nahaja operater, in izračunali mejne čase dnevne izpostavljenosti za to sevanje skladno z *Uredbo*. Preverili smo tudi učinkovitost nekaterih zaščitnih ukrepov za zmanjšanje izpostavljenosti škodljivim učinkom sevanja. Študija je osnova za pridobivanje strokovnega znanja za zaščito pred škodljivimi učinki optičnih sevanj, kot jih določa *Uredba*.

## 2 VIRI NEKOHERENTNIH OPTIČNIH SEVANJ

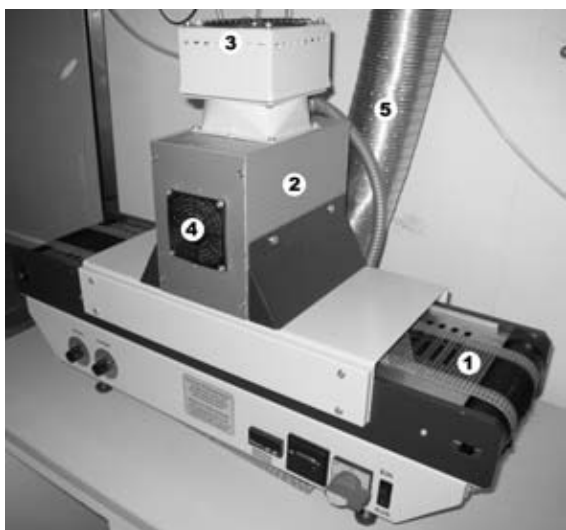
Določila *Uredbe* smo preverili za vire sevanj, ki jih uporabljamo pri vsakdanjem delu v laboratoriju: (a) srednjetačno živosrebrovo, (b) visokotlačno živosrebrovo in (c) ksenonovo svetilko. V vseh teh virih nastane primarno sevanje zaradi razelektritve v plinu. To sevanje daje črtast spekter pri prehodih med

značilnimi elektronskimi stanji plina v razelektritveni cevi. Svetilki (b) in (c) imata tudi zvezni spekter; zanj je odgovorna plast luminiscenčne snovi na notranji steni cevi, ki je lahko iz različnih stekel ali kremenca. Luminiscenčne snovi oddajajo širokopasovno zvezno sevanje, ki nastane zaradi vzbujanja s primarno svetlobo. Različni plini imajo različne značilne črte v spektru, različne luminiscenčne snovi pa različne zvezne spektre. Vsi obravnavani viri sevanja vsebujejo vidno in UV-sevanje.

Spektralno obsevanost ( $E_{\lambda}$ ) smo merili na izbranem mestu med uporabo posameznega vira sevanja. Za merjenje smo uporabili spektrometar USB2000+RAD (OceanOptics, ZDA). To je miniaturni prenosni spektrometar, ki meri absolutne vrednosti spektralne gostote svetlobnega toka, ki pade nanj iz katere koli smeri, torej spektralno obsevanost  $E_{\lambda}$ . Merilno območje je krog s premerom 7 mm. Detektor zajema spektralno območje 200–850 nm, optična resolucija pa je 0,3–10 nm. Spektrometar je prenosljiv in omogoča merjenje praktično na poljubnem mestu v prostoru. Zato ga lahko uporabimo za merjenje obsevanosti  $E_{\lambda}$  in s tem podatkom izračunamo vrednosti, ki jih za UV- in vidno svetlobo zahteva Uredba.

### 2.1 Laboratorijski UV-sušilnik

Laboratorijski sušilnik Aktiprint L (Technigraf, Nemčija) uporabljamo za polimerizacijo UV-sušičih se tiskarskih barv in drugih tankih plasti svetlobno občutljivih polimerov na poljubnih podlagah (slika 1). Vir sevanja je srednjetačna živosrebrena svetilka z močjo 120 W na vsak cm dolžne cevi. Za svetilko so parabolna polprepustna IR-zrcala, ki zberejo UV- in vidno sevanje na vzorcu. Vzorec se postavi na tekoči



**Slika 1:** Laboratorijski sušilnik Aktiprint L: 1 – tekoči trak, 2 – UV-enota, 3 – ventilator za hlajenje svetilke in odvajanje plinov, 4 – odprtina za dovod zraka, 5 – izpušna cev za odvajanje plinov. Spektralno obsevanost smo merili pravokotno na odprtino za dovod zraka na razdalji 12 cm.

trak širine 120 mm, kjer prečka sevanje. Količino svetlobe, ki pade na vzorec, uravnavamo s stopnjo moči svetilke (40–100 %) in s hitrostjo tekočega traku (3–35 m/min). Svetilka je zračno hlajena. Zrak se odesava tudi iz prostora nad tekočim trakom, kar je pomembno zaradi odvajanja ozona in mogočih produktov reakcije, ki lahko nastanejo pod vplivom UV-sevanja v prostoru okoli vzorca in na njem.

Iz sušilnika se širi svetloba skozi odprtine za vstop in izstop vzorca ter pri režah mrežice, ki pokriva odprtino za dovod zraka na ohišju UV-enote in ventilatorja na vrhu. Ta svetloba kaže, da svetilka poleg UV-sevanja oddaja tudi vidno svetlobo. Pri delu z laboratorijskim UV-sušilnikom stoji delavec na ustrezni razdalji pred aparaturom. Za človeka, ki dela z aparaturom, je lahko kritična svetloba, ki se širi iz odprtine za dovod zraka na ohišju UV-enote. Zato smo izmerili spektralno obsevanost na mestu največje svetlosti pred odprtino za zrak na oddaljenosti 12 cm. Merilno območje spektrometra je bilo postavljeno vzporedno z odprtino. Meritev smo izvedli pri 80-odstotni moči svetilke. Izmerjena spektralna obsevanost je prikazana na sliki 4.

### 2.2 Svetilka s sevanjem UV-A

Kot vir sevanja UV-A najpogosteje uporabljamo svetilko Osram Eversun, ki seva večinoma le v spektralnem območju od 315 nm do 400 nm. Gre za visokotlačno živosrebreno svetilko, ki ima na notranji strani steklenega ohišja plast fotoluminiscenčne snovi. Svetilke Osram Eversun so namenjene zlasti rabi v solarijih, pa tudi v dermatologiji, za UV-polimerizacijo in pri raziskavah UV-fotosenzibilnih snovi. Velika prednost takih svetilk je, da med delovanjem ne segrevajo okolice in zato hlajenje ni potrebno. V našem laboratoriju tako svetilko najpogosteje uporabljamo pri raziskavah fotokatalitsko aktivnih snovi.



**Slika 2:** UV-A-svetilki v komori, namenjeni za raziskave fotokatalitsko aktivnih snovi; spektralno obsevanost smo merili na razdalji 20 cm od svetilke na vodoravni površini.

Uporabljamo dve svetilki z močjo 40 W, ki sta nameščeni v posebni komori (slika 2). Vzorce za analizo postavimo v komoro na primerno razdaljo (navadno 20 cm) od svetilk in jih obsevamo od 1 do 24 ur. Spektralno obsevanost smo izmerili na vodoravni površini, pravokotno na žarke svetlobe na razdalji 20 cm, in je prikazana na sliki 4.

### 2.3 Ksenonska svetilka

Sevalni spekter ksenonske svetilke je podoben spektru sončne svetlobe, zato se navadno uporablja pri pospešenem staranju kot umetni vir sončne svetlobe. Gre za razelektrivno cev, ki je napolnjena s čistim ksenonom. Svetilko Oriol 6258, ki je nameščena v ohišju Newport 66902, uporabljamo v reaktorskem sistemu za določevanje fotokatalitske aktivnosti materialov s simulacijo sončne svetlobe na prostem (slika 3).

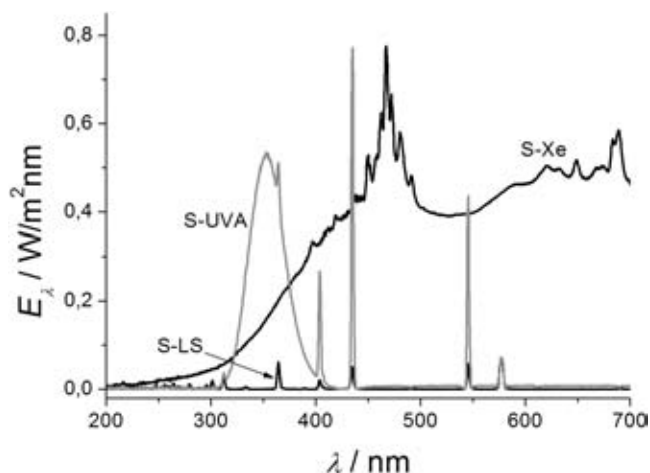
Svetilka oddaja sevanje skozi IR-filter in prek zrcala in kremenovega stekla na vzorec, ki ga postavimo v vodoravno lego v reaktor na razdalji 6 cm od konca ohišja. Spektralno obsevanost vodoravne površine pravokotno na žarke na razdalji 6 cm prikazuje slika 4.

Ksenonske svetilke pa zaradi podobnosti njenega spektra sončni svetlobi uporabljamo tudi pri pospešenem staranju materialov. V takem primeru vzorce izpostavimo sevanju svetilke za določen čas in izmerimo kritične lastnosti pred in po tem, na primer mehanske lastnosti in barvne vrednosti. Del vzorcev prekrijemo z aluminijasto folijo. S tem zagotovimo, da pokrita mesta niso izpostavljena sevanju in lahko primerjamo videz obsevanih delov z neobsevanimi.

Svetilke, ki delujejo po principu razelektritve v plinu, potrebujejo določen čas, da se stabilizira njihovo



**Slika 3:** Reaktorski sistem za določevanje učinkovitosti fotokatalitskih materialov pri dnevni svetlobi z uporabo ksenonske svetilke; spektralno obsevanost te svetilke smo merili na razdalji 6 cm.



**Slika 4:** Spektralna obsevanost analiziranih sevalnih virov: UV-svetilka v laboratorijskem sušilniku, merjeno na navpični ploskvi, ki je 12 cm oddaljena od odprtine za zrak (S-LS), UV-A-svetilka na oddaljenosti 20 cm (S-UVA) in ksenonska svetilka na oddaljenosti 6 cm (S-Xe).

vo sevanje. Ker vsako prižiganje in ugašanje skrajšuje njihovo trajnostno dobo, jih ne ugašamo, če to ni nujno potrebno. Da bi zagotovili enakomerno obsevanost vseh vzorcev, jih moramo večkrat premeščati. Ker ostane svetilka prižgana, je delavec med tem opravilom izpostavljen sevanju.

### 3 IZRAČUN DNEVNE IZPOSTAVLJENOSTI ZA UV-SEVANJE IN VIDNO SVETLOBO

Največjo efektivno izpostavljenost UV-sevanju ( $H_{\text{eff}}$ ) smo izračunali iz:

$$H_{\text{eff}} = t \cdot \int_{180}^{400} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Kjer je  $S(\lambda)$  funkcija tveganja za UV-sevanje (slika 5),  $t$  pa čas izpostavitve. Spektralna obsevanost  $E_{\lambda}$  je največja možna izpostavljenost sevanju pri delu s posameznim virom sevanja. Predpostavimo, da se  $E_{\lambda}$  s časom ne spreminja. Pri našem računu smo lahko upoštevali le območje 200–400 nm, saj uporabljeni merilnik ne meri pod 200 nm. Po določilih Uredbe je največja dopustna dnevna izpostavljenost 30 J/m<sup>2</sup>.

Izpostavljenost sevanju UV-A izračunamo iz:

$$H_{\text{UV-A}} = t \cdot \int_{315}^{400} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

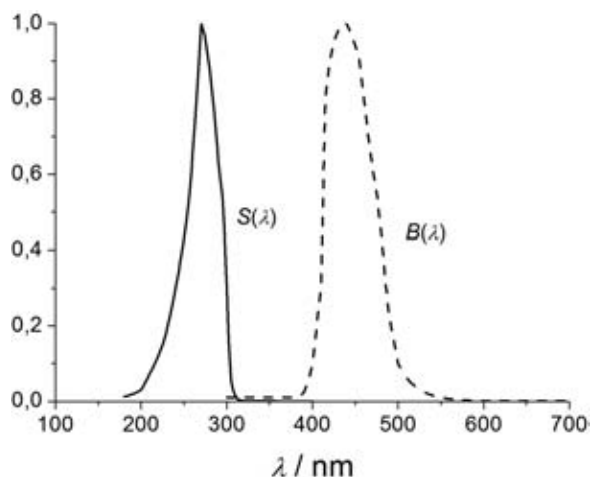
Največja dopustna dnevna izpostavljenost sevanju UV-A je 10<sup>4</sup> J/m<sup>2</sup>.

Efektivno sevnost za modro svetlobo ( $L_B$ ) določimo iz:

$$L_B = \int_{300}^{700} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda, \quad L_{\lambda}(\lambda) = \frac{E_{\lambda}(\lambda)}{\Omega} \quad (3)$$

kjer je  $\Omega$  prostorski kot merjenja spektralne obsevanosti,  $B(\lambda)$  pa funkcija tveganja za vidno svetlobo. Za osvetlitve pri zornem kotu nad 11 mrad, ki so daljše od





Slika 5: Funkciji tveganja za UV-sevanje,  $S(\lambda)$ , in za vidno svetlobo,  $B(\lambda)$  [1–4].

10 000 s (2,78 h), je največja dopustna učinkovna sevnost  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ .

## 4 REZULTATI

### 4.1 Stopnja fotobiološke varnosti sevalnih virov brez zaščite

Z izmerjenimi spektralnimi obsevanostmi (slika 4) smo izračunali, kako dolgo bi lahko bil delavec med enim delovnim dnevom izpostavljen UV- in UV-A-sevanju teh virov ter razmerje dejanske in največje dopustne učinkovne sevnosti za modro svetlobo. Pri računu smo uporabili enačbe (1)–(3) in pripadajoče največje dopustne vrednosti, ki jih določa Uredba. Rezultati so zbrani v tabeli 1.

Čas največje dopustne učinkovne izpostavljenosti UV-sevanju ( $t_{\max,UV}$ ) upošteva funkcijo tveganja za UV-sevanje  $S(\lambda)$ , ki je določena na območju 180–400 nm in ima največje vrednosti med 200 nm in 300 nm (slika 5). Ta funkcija podaja tveganje za poškodbe oči in kože. Glede na to tveganje je najkrajši čas zadrževanja dopuščen pri ksenonski svetilki, najdaljši pa pri UV-A-svetilki. V UV-A-spektralnem območju, kjer merimo tveganje za poškodbe globljih tkiv kože, je najkrajši čas obsevanja dopuščen za UV-A-svetilko, najdaljši pa za laboratorijski sušilnik.

Tveganje za poškodbe oči, ki jih povzročata zlasti modra svetloba, določa funkcija tveganja  $B(\lambda)$ . V tej funkciji ima največjo utež vidna svetloba z valovnimi dolžinami med 400 nm in 500 nm. Ker gre za tveganje fotokemijskih poškodb očesne mrežnice, je pomembna spektralna sevnost vira in ne spektralna obsevanost površine. Pri računu smo upoštevali največjo dopustno sevnost razsežnega vira (zorni kot nad 11 mrad) za daljše osvetlitve (nad 10 000 s). Rezultate smo podali kot razmerje dejanske in največje dopustne sevnosti vidne svetlobe ( $L_B/L_{B,max}$ ). Največje razmerje daje ksenonska svetilka, manjše laboratorijski sušilnik in zelo majhno UV-A-svetilka.

Rezultate analiziranih sevalnih virov, ki so zbrani v tabeli 1, lahko pričakujemo že na podlagi primerjave spektrov obsevanosti na sliki 4 ob upoštevanju funkcij tveganja  $S(\lambda)$  in  $B(\lambda)$ . Hitro pa ugotovimo, da tveganja niso linearno odvisna od spektralne obsevanosti. Najstrožje omejitve so glede poškodb kože in oči s svetlobo v UV-področju, tveganje za poškodbe očesne mrežnice zaradi učinkov modre svetlobe pa je razmeroma majhno.

**Tabela 1:** Čas največje dopustne učinkovne izpostavljenosti UV-sevanju ( $t_{\max,UV}$ ), čas največje izpostavljenosti UV-A-sevanju ( $t_{\max,UV-A}$ ) in delež največje dovoljene učinkovne sevnosti za modro svetlobo ( $L_B/L_{B,max}$ ). Vsi rezultati veljajo za čas enega delovnega dneva (8 h) pri izpostavljenosti sevanju laboratorijskega UV-sušilnika (S-LS), UV-A-vira (S-UVA) in ksenonske svetilke (S-Xe).

vir sevanja	$t_{\max,UV}/\text{min}$	$t_{\max,UV-A}/\text{min}$	$L_B/L_{B,max}$
S-LS	2,6	677	$5 \cdot 10^{-3}$
S-UVA	5,1	7,4	$2 \cdot 10^{-6}$
S-Xe	0,4	10,7	$2 \cdot 10^{-2}$

### 4.2 Sredstva za zaščito pred sevanjem in njihova učinkovitost

Rezultati analize škodljivih učinkov sevanja, ki so zbrani v tabeli 1, veljajo za golo kožo in proste oči. Izračuni so narejeni za položaj, kjer bi bila oseba maksimalno obsevana. V realnih razmerah se to praviloma nikoli ne zgodi. Oseba se le redko zadržuje na tem mestu daljši čas, oči in kožo pa praviloma varujejo zaščitna obleka, rokavice in očala. Zato nas je zanimalo, kako učinkovito se z njimi zaščitimo pred škodljivimi učinki nekoherentnih sevanj umetnih virov svetlobe. Za zaščito kože smo analizirali laboratorijsko haljo in zaščitne rokavice, za oči pa laboratorijska in navadna korekcijska očala.

Spektralno prepustnost zaščitnih sredstev  $T(\lambda)$  smo izmerili v območju 200–700 nm na integracijski krogli Pela 1000 spektrofotometra Perkin-Elmer Lambda 950. Vzorce smo postavili na vhodno odprtino krogle, kar pomeni, da smo izmerili celotno prepustnost ne glede na smer žarkov prepuščenega sevanja.

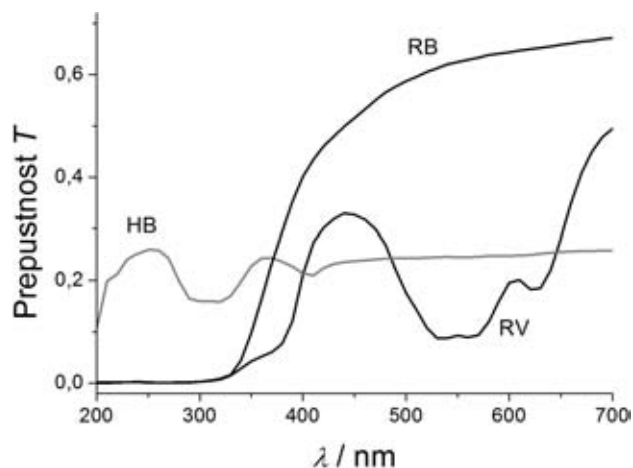
Prepustnost zaščitnih sredstev filtrira sevanje, zato je spektralna obsevanost enaka  $E_\lambda^Z$ :

$$E_\lambda^Z(\lambda) = E_\lambda(\lambda) \cdot T(\lambda) \quad (4)$$

V takih primerih namesto  $E_\lambda$  v enačbah (1)–(3) nastopa  $E_\lambda^Z$ .

### 4.3 Zaščita kože

Kožo ščiti zaščitna obleka in rokavice. Prepustnost rokavic je odvisna od materiala in debeline. Prepustnost tkanine, iz katere je halja, je odvisna od materiala in debeline niti ter od gostote in načina tkanja [5,6]. Spektri prepustnosti tkanine za navadno belo bom-



Slika 6: Spektralna prepustnost bele bombažne delovne halje (HB) ter belih (RB) in vijoličnih zaščitnih rokavic (RV).

bažno laboratorijsko haljo in dve vrsti zaščitnih rokavic so prikazani na **sliki 6**. Uporabili smo dve različni vrsti zaščitnih rokavic: bele iz lateksa (PFE) in sintetične (nitril, brez lateksa) v vijolični barvi.

Zaščita kože je pomembna za zaščito pred UV-sevanjem, torej za  $H_{\text{eff}}$  in  $H_{\text{UV-A}}$ , ne pa tudi za vidno svetlobo. Zato smo izmerjene prepustnosti upoštevali le pri izračunu teh dveh vrednosti. Rezultati so zbrani v **tabeli 2**.

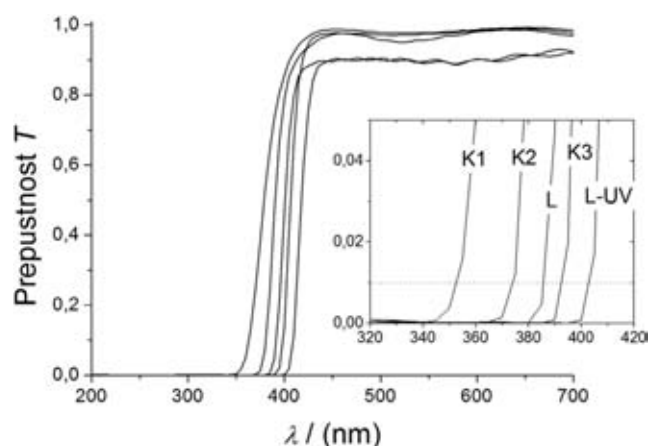
Z uporabo katerega koli od analiziranih zaščitnih sredstev se močno zmanjša tveganje zaradi škodljivih učinkov sevanja na kožo. Najslabšo zaščito daje tkanina, rokavice pa bistveno večjo; vijolične rokavice so nekoliko boljše kot bele.

**Tabela 2:** Učinek zaščitnih sredstev pred škodljivimi učinki UV- in UV-A-sevanja laboratorijskega sušilnika (S-LS), UV-A-svetilke (S-UVA) in ksenonske svetilke (S-Xe). Rezultati so podani kot razmerje med dejansko in maksimalno dopuščeno efektivno izpostavljenostjo UV-sevanju ( $H_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}^{\text{max}}$ ) ter UV-A-sevanju ( $H_{\text{UV-A}}/H_{\text{UV-A}}^{\text{max}}$ ), ki ju določa Uredba za golo kožo, ter za kožo, ki je zaščiten z belo bombažno delovno haljo (HB), belimi (RB) in vijoličnimi zaščitnimi rokavicami (RV).

zaščita	$H_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}^{\text{max}}$			$H_{\text{UV-A}}/H_{\text{UV-A}}^{\text{max}}$		
	S-LS	S-UVA	S-Xe	S-LS	S-UVA	S-Xe
–	183	95	1156	0,709	74,3	51,6
HB	41,3	21,4	244,8	0,166	16,5	11,5
RB	0,235	0,535	2,4	0,132	10,4	11,65
RV	0,317	0,267	1,6	0,0385	3,53	4,15

#### 4.4 Zaščita oči

Na oči vpliva sevanje v UV- in vidnem področju prek  $H_{\text{eff}}$ ,  $H_{\text{UV-A}}$  in  $L_B$ . V naši študiji smo preverili stopnjo zaščite, ki jo dajejo laboratorijska zaščitna očala iz prozornega polikarbonata, UV-zaščitna antistatična laboratorijska očala ter tri različna korekcijska očala, ki jih uporabljamo soavtorji tega članka. Spektralne prepustnosti očal  $T(\lambda)$  so prikazane na **sliki 7**. Ker je



Slika 7: Spektralna prepustnost očal v UV- in vidnem delu spektra (polne črte): laboratorijska zaščitna (L), laboratorijska UV-zaščitna (L-UV) in korekcijska (K1, K2, K3). Manjša slika prikazuje način določanja vrednosti  $\lambda_{(0,01)}$ .

delež največje dovoljene efektivne sevnosti za modro svetlobo zanemarljiv že pri nezaščitenih očeh (**tabela 1**,  $L_B/L_{B, \text{max}}$ ), smo analizirali le zaščitne učinke očal za sevanje v celotnem UV-področju.

V UV-področju, kjer ima funkcija  $S$  zelo majhno vrednost ( $<0,001$ ), je prepustnost vseh očal manjša od 0,001. Na prehodu med UV- in vidno svetlobo se prepustnost hitro poveča in je v vidnem delu spektra približno konstantna. Za zaščito pred UV-A-sevanjem je posebej pomembno, pri kateri valovni dolžini zaščitno sredstvo preide iz neprepustnega v prepustno. Pojav je znan kot absorpcijski rob. Opredelili smo ga z valovno dolžino, pri kateri se prepustnost dvigne nad 0,01 (**slika 7**). Podatki za analizirana očala so zbrani v **tabeli 3**.

Vsa zaščitna očala zelo učinkovito zmanjšajo tveganje pred škodljivimi učinki UV-sevanja na oči in kožo. To kažejo rezultati, zbrani v **tabeli 3**. Efekt se kaže v razmerju med efektivno dnevno izpostavljenostjo sevanju in največjo dopustno dnevno izpostavljenostjo, kot jo določa Uredba za UV ( $H_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}^{\text{max}}$ ). To razmerje za vse analizirane vire sevanj po prehodu očal pade pod 1. Drugače je s tveganji za UV-A-sevanje, kar podaja razmerje  $H_{\text{UV-A}}/H_{\text{UV-A}}^{\text{max}}$ . To razmerje pada s pomikom absorpcijskega roba očal proti večjim  $\lambda$ , kot prikazuje **slika 8**. Za sevanje laboratorijskega sušilnika je že brez uporabe zaščitnih očal  $H_{\text{UV-A}}/H_{\text{UV-A}}^{\text{max}} < 1$ , z očali pa se še dodatno zmanjša. UV-A- in ksenonska svetilka imata bistveno bolj izrazito UV-A-sevanje. Dnevna količina pade pod maksimalno dovoljeno za UV-A-svetilko pri  $\lambda_{(0,01)} > 380$  nm, pri ksenonski svetilki pa šele pri  $\lambda_{(0,01)} > 380$  nm. Popolno zaščito pred škodljivimi učinki sevanj vseh treh analiziranih virov dajejo UV-laboratorijska zaščitna očala in ena od korekcijskih (K3). Navadna laboratorijska zaščitna očala ne omogočajo popolne dnevne

zaščite pred UV-A-sevanjem ksenonske svetilke, korekcijska očala K1 in K2 pa so še slabša, saj ne dajejo popolne dnevne zaščite za ksenonsko in UV-A-svetilko.

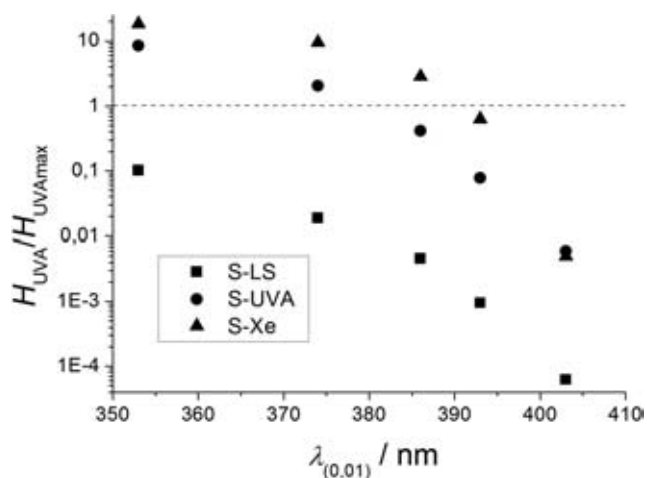
**Tabela 3:** Zaščita oči pred škodljivimi učinki sevanj z laboratorijskimi zaščitnimi očali (L), laboratorijskimi UV-zaščitnimi očali (L-UV) in s korekcijskimi očali (K1, K2, K3). Lastnosti očal v UV-A-delu spektra opišemo z valovno dolžino, nad katero postanejo prepustna  $\lambda_{(0,01)}$ . Podano je razmerje med efektivno dnevno izpostavljenostjo sevanju in največjo dopustno izpostavljenostjo, kot jo določa uredba za UV- ( $H_{UV}/H_{UV}^{\max}$ ) in UV-A-sevanje ( $H_{UVA}/H_{UVA}^{\max}$ ). Navedene so tudi vrednosti brez zaščite.

zaščita	$\lambda_{(0,01)}$ /nm	$H_{\text{eff}}/H_{\text{eff}}^{\max}$			$H_{UVA}/H_{UVA}^{\max}$		
		S-LS	S-UVA	S-Xe	S-LS	S-UVA	S-Xe
–	–	183	95	1156	0,709	74,3	51,6
L	386	0,053	0,032	0,419	0,005	0,418	2,839
L-UV	403	0,015	0,008	0,094	<0,001	0,006	0,005
K1	353	0,018	0,202	0,394	0,102	8,509	18,377
K2	374	0,053	0,057	0,511	0,019	2,060	9,550
K3	393	0,015	0,009	0,100	<0,001	0,077	0,626

## 5 SKLEP

Analizirali smo fotobiološko varnost treh virov nekoherentnih optičnih sevanj in stopnjo zaščite oči in kože, ki jo dajejo nekatera zaščitna sredstva. Vsi viri sevanj in vsa zaščitna sredstva so navadno v rabi v raziskovalnih, razvojnih in tehnoloških laboratorijih.

Vsi obravnavani viri sevanj so plinske razelektrove cevi, v katerih poteka razelektrove v plinu, kar povzroči nastanek črtastega spektra. Dva vira uporabljata tudi luminiscenčne snovi, ki oddajajo zvezni spekter na širšem spektralnem območju. Svetilka s črtastim spektrom je nameščena v UV-enoti laboratorijskega UV-sušilnika, ki ga uporabljamo za UV-poli-



**Slika 8:** Stopnja zaščite analiziranih očal pred škodljivimi učinki UV-A-sevanja v odvisnosti od valovne dolžine, nad katero postanejo očala prepustna ( $\lambda_{(0,01)}$ ). Rezultati so podani za laboratorijski UV-sušilnik (kvadrati, S-LS), UV-A-svetilko (krogci, S-UVA) in ksenonsko svetilko (trikotniki, S-Xe).

merizacijo tankih plasti. Svetilko, ki ima zvezni spekter v UV-A-področju, uporabljamo pri raziskavah fotokatalitsko aktivnih snovi, svetilko s širokim zveznim spektrom, ki zajema celotno UV-A- in vidno področje, pa za simulacijo sončnega sevanja, torej kot laboratorijski vir sončne svetlobe.

Spektralno obsevanost smo merili na najbližjih mestih, kjer se lahko nahaja oseba pri delu z aparaturo. Zaradi dejanske konfiguracije naših aparatov in izbire merilnih mest je ta obsevanost po intenziteti najmanjša pri laboratorijskem sušilniku. Tu je svetilka zaprta v kovinskem ohišju UV-enote, sevanje pa prihaja skozi odprtino za zrak, ki je zaprta s črno plastično mrežo. Sevalni tok, ki pada na merilno mesto pred odprtino, ne prihaja direktno od vira, ampak po nekaj odbojih znotraj UV-enote. Pri uporabi drugih dveh svetilk se oseba lahko nahaja na mestu za obsevanje preizkusnih vzorcev. To se dogaja zlasti pri menjavanju položaja vzorcev, s čimer dosežemo enakomernejše obsevanje. Med takim delom ne ugašamo svetilke, saj bi s tem skrajšali njeno trajnostno dobo. Položaj osebe, ki opravlja to delo, je zelo blizu sevalnega vira, sevanje pa pade nanjo neposredno in nezastrito. Zato je sevanje teh dveh virov bistveno intenzivnejše od tistega iz laboratorijskega sušilnika.

Za merjenje spektralne obsevanosti smo uporabili merilnik, ki zajema podatke v UV- in vidnem spektralnem področju, med 200 nm in 850 nm. Za ugotavljanje ustreznosti sevalnih virov po vseh določenih Uredbe je potrebno poznanje spektralne obsevanosti na območju med 180 nm in 3000 nm. Zaradi premajhnega merilnega območja našega merilnika nismo mogli analizirati določil za škodljive učinke naših virov v IR-območju (nad 700 nm). Na podlagi ugotovitev glede škodljivih učinkov vidne svetlobe sklepamo, da je IR-sevanje najverjetneje zanemarljivo. V območju UV-sevanja smo upoštevali nekoliko ožje območje kot ga zahteva Uredba, le 200–400 nm. Ker uporabljeni viri ne sevajo pri valovnih dolžinah manjših od 250 nm, smo s tem napravili zanemarljivo napako.

Ugotovili smo, da so škodljivi učinki modre svetlobe zanemarljivi za vse analizirane sevalne vire že brez kakršne koli zaščite. Največji delež dopuščene sevnosti modre svetlobe ima ksenonska svetilka (2 %), nekoliko manjšo laboratorijski sušilnik (0,5 %), za UV-A-svetilko pa je praktično nič. Povsem drugače je z UV- in UV-A-sevanjem. Oseba z nezavarovano kožo in očmi je lahko izpostavljena UV-sevanju le nekaj minut ali celo manj (pri ksenonski svetilki le 0,4) v celem delavniku. Laboratorijski sušilnik nima škodljivih učinkov UV-A-sevanja, nevarna pa je ksenonska in še bolj UV-A-svetilka.

Škodljive učinke lahko močno zmanjšamo z zaščitno obleko, rokavicami in očali. Najslabšo zaščito

daje tekstil, saj velik del sevanja preide tudi skozi luknjice v tkanju; bistveno boljše so zaščitne rokavice. Vsa zaščitna očala, ki smo jih preverili, dajo dovolj dobro zaščito pred škodljivimi učinki UV-sevanj za celodnevno delo z vsemi analiziranimi viri sevanj. Drugače je za UV-A-sevanje. Stopnja zaščite za UV-A-sevanje je močno odvisna od valovne dolžine, kjer postanejo očala prepustna, to je od t. i. absorpcijskega roba. Za delo z vsemi tremi sevalnimi viri so povsem ustrezna laboratorijska UV-zaščitna očala, navadna laboratorijska zaščitna očala pa ne zadoščajo za celodnevno delo s ksenonsko svetilko. Zanimivo je, da so popolnoma ustrezna tudi ena od analiziranih korekcijskih očal.

Temeljita analiza fotobiološke varnosti nekoherentnih sevalnih virov je obsežno delo. Zlasti je pomembna spektralna porazdelitev sevanja v prostoru okoli vira sevanja, česar naša analiza ne obravnava. Geometrija odbojev sevanja iz aparature je lahko precej zapletena, pa tudi intenziteta se pri tem lahko močno spreminja, k sreči se kvečjemu zmanjšuje. Take študije so posebno pomembne za prostore s premočnim sevanjem, ki ga je treba zmanjšati. Analiza je pokazala, da lahko sevanje uspešno zmanjšamo z ustreznimi zasloni. Poudariti je treba tudi, da ima vsak sevalni vir drugačno spektralno obsevanost in sevnost, ki se pa med trajnostnim ciklom svetila zmanjšujeta.

Uredba o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem je začela veljati maja 2010. V praksi to pomeni, da bo treba v razmeroma kratkem času analizirati fotobiološko varnost vseh obstoječih sevalnih virov in po potrebi

izvesti tudi vse potrebne varnostne ukrepe. Po nam znanih podatkih pri nas takšne študije še niso bile opravljene.

## Zahvala

Mojca Friškovec se zahvaljuje Tehnološki agenciji Slovenije za sofinanciranje programa raziskovalnega usposabljanja v sklopu Mladi raziskovalci iz gospodarstva. Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

## 6 Literatura

- [1] Direktiva 2006/25/EC Evropskega parlamenta in Sveta z dne 5. aprila 2006 o minimalnih zdravstvenih in varnostnih zahtevah v zvezi z izpostavljenostjo delavcev tveganjem, ki nastanejo zaradi fizikalnih dejavnikov (umetnih optičnih sevanj) (19. Posebna direktiva v smislu člena 16(1) Direktive 89/391/EGS), Uradni list Evropske Unije L 114/38, 27. 4. 2006
- [2] Uredba o varovanju delavcev pred tveganji zaradi izpostavljenosti umetnim optičnim sevanjem, Uradni list Republike Slovenije št. 34/2101 z dne 30. 4. 2010, str. 4892
- [3] Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems, CIE S 009/E:2002/IEC 62471:2006, Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 2002
- [4] M. Klanjšek Gunde, *Vakuumist*, 30 (2010) 3, 12–16
- [5] R. Urbas, F. Sluga, I. Bartenjev, *Tekstilec*, 47 (2004) 9/12, 308–314
- [6] R. Urbas, Analiza zaščitnega učinka tekstilij pred negativnimi vplivi ultravijoličnih žarkov na kožo, doktorska disertacija, Ljubljana, 2005