

## Wyznaczanie rozkładów natężenia napromienienia promieniowaniem UV na komputerowym modelu 2D ciała człowieka

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano algorytm do wyznaczania mapy rozkładów natężenia napromienienia promieniowaniem UV na modelu 2D ciała człowieka w oparciu o jeden pomiar natężenia napromienienia w otoczeniu spawania łukowego. Algorytm umożliwia wskazanie na ciele człowieka obszarów najbardziej zagrożonych promieniowaniem UV oraz pozwala wyznaczyć dopuszczalny czas ekspozycji poszczególnych obszarów na ciele człowieka w dowolnej odległości od łuku spawalniczego. Omówione zostały problemy geometryczne modelu dotyczące uproszczonego odwzorowania kształtu ciała człowieka oraz rodzaju przyjętej aproksymacji.

**Abstract.** The article presents the algorithm to determine a map of UV irradiance distribution on 2D model of human body based on one measured irradiance value in the neighborhood of arc welding. The algorithm allows pointing out the most threatened by UV radiation parts of human body as well as determines maximal permissible exposure time at any parts of body and at any distance from arc. The geometrical problems concerning simplified representation of human body shape in model and type of approximation functions (**Determination of UV irradiance distribution on computer 2D model of human body**)

**Słowa kluczowe:** symulacje komputerowe, natężenie napromienienia, UV, spawanie łukowe, komputerowy model 2D ciała człowieka.

**Keywords:** computer simulations, irradiance, UV, arc welding, computer 2D model of human body

### Wstęp

Łuk spawalniczy jest jednym z najsilniejszych źródeł sztucznego promieniowania nielaserowego (a zwłaszcza nadfioletowego i widzialnego) w środowisku pracy, a tym samym stanowi potencjalne zagrożenie dla nieosłoniętych oczu i skóry pracowników przebywających w jego otoczeniu [1-10]. W związku z faktem, że promieniowanie optyczne zalicza się do czynników szkodliwych w środowisku pracy, pracodawca jest zobowiązany do oceny ryzyka zawodowego związanego z tym czynnikiem. W tym celu konieczne jest określenie poziomu ekspozycji pracownika i porównanie go z wartościami maksymalnych dopuszczalnych ekspozycji (MDE) [11, 12]. W trakcie oceny poziomu ekspozycji na to promieniowanie określa się najbardziej narażone na to promieniowanie części ciała pracownika tak, aby po porównaniu z wartościami MDE stwierdzić czy konieczne jest podjęcie działań technicznych i/lub organizacyjnych ograniczających ryzyko wystąpienia skutków szkodliwych dla zdrowia w odniesieniu do oczu i skóry. Najczęściej pomiary poziomu ekspozycji na promieniowanie UV wykonuje się zgodnie z metodyką opisaną w normie [13] w punktach położenia oczu, twarzy i rąk pracownika, na które pada bezpośrednie promieniowanie od łuku spawalniczego. Zazwyczaj nie rozpatruje się innych odsłoniętych obszarów skóry, które potencjalnie mogą być narażone na promieniowanie odbite od elementów otoczenia oraz powierzchni pomieszczenia. Promieniowanie odbite od elementów otoczenia również może stanowić o szkodliwości dla zdrowia np. dla obszarów takich jak szyja, kark, uszy czy czubek głowy pracownika. Dodatkowo tego typu problem nie musi dotyczyć jedynie osoby pracującej na danym stanowisku, ale również osób znajdujących się w otoczeniu łuku (nawet w odległości kilku metrów). Ekspozycja na takie promieniowanie może powodować nieznaczne przekroczenia MDE. Jest to jednak wystarczające do wstrzymania wykonywanych w tym miejscu prac, aż do momentu wprowadzenia środków ograniczających narażenie na tych stanowiskach, gdzie stwierdzono takie przekroczenia [12].

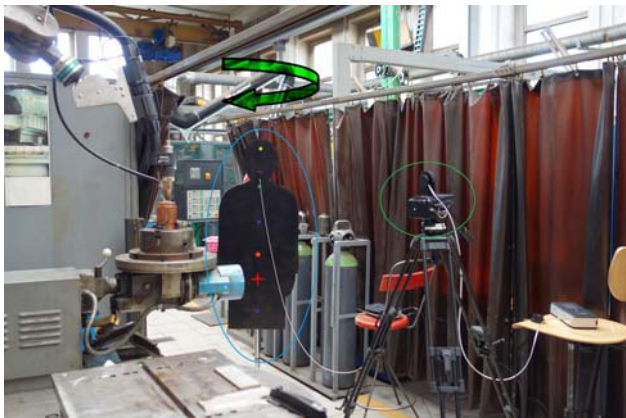
Aby rozważyć w szerszym aspekcie potencjalne zagrożenie promieniowaniem nadfioletowym odbitym występujące na różnych stanowiskach pracy w otoczeniu stanowisk spawalniczych wymagane byłoby wykonanie

szeregu pomiarów dla różnych przypadków ustawienia człowieka w danym pomieszczeniu. W takim przypadku dla każdego nowego stanowiska wymagane byłoby, aby wykonywać pomiary potencjalnego narażenia na promieniowanie UV. Z praktycznego oraz ekonomicznego punktu widzenia takie rozwiązanie jest niewygodne, dlatego warto posiłkować się metodami komputerowymi umożliwiającymi analizę i symulację potencjalnych zagrożeń. Celem artykułu jest przedstawienie algorytmu obliczeniowego pozwalającego na oszacowanie rozkładu natężenia napromienienia promieniowaniem UV na komputerowym dwuwymiarowym modelu ciała człowieka.

### Dane pomiarowe, jako podstawa do opracowania algorytmu

Zaproponowany algorytm powstał w oparciu o analizę rzeczywistych pomiarów natężenia napromienienia UV łuku spawalniczego wykonanych w specjalnie do tego przystosowanym laboratorium Instytutu Spawalnictwa. Pomiary natężenia napromienienia wykonano z zastosowaniem dwóch spektrometrów Spectis 5.0 Touch produkcji GL Optic. Detektor spektrometru został wykonany w technologii CCD, a układy wejściowe głowic pomiarowych posiadały korekcję kosinusową klasy A [14, 15]. Mierzonym parametrem było widmowe natężenie napromienienia w zakresie promieniowania 200–400 nm. Jeden spektrometr, nazywany dalej pomiarowym służył do zbierania danych w różnych położeniach głowicy pomiarowej tak, aby realizować pomiary w różnych punktach na powierzchni modelu ciała człowieka. Aby ułatwić wyznaczanie punktów pomiaru podczas badań wykonano płaski model postaci człowieka z blachy stalowej naklejonej na sklejkę drewnianą, na którym zaznaczono punkty pomiaru. Przykładowe punkty pomiaru rozmieszczone w linii pionowej na płaskim modelu człowieka przedstawiono na rysunku 1 (kolorowe kółka). Obudowa głowicy pomiarowej wykonana jest z magnesu neodymowego, dzięki czemu można ją było wygodnie i szybko umieszczać w wyznaczonych punktach na powierzchni płaskiego modelu człowieka. Na podstawie modelu była umieszczona podziałka kątowna, co umożliwiała obracanie powierzchni modelu wokół osi pionowej o dowolny kąt z zakresu od 0° do 360°. Drugi spektrometr, nazywany

dalej odniesieniowym, służył do ciągłego pomiaru emisji łuku spawalniczego w czasie wykonywanych pomiarów (monitoringu zmian emisji łuku w czasie), przy niezmiennym położeniu (położeniu) jego głowicy pomiarowej umieszczonej na statywie (rys. 1). Zielona strzałka wskazuje kierunek obrotu (wokół pionowej osi symetrii manekina) podczas pomiarów, natomiast czerwony znak „plus” położenie punktu „0” pomiaru (punkt na powierzchni manekina: na pionowej osi symetrii, 104 cm od podłogi). Kąt 0° obrotu manekina wokół osi obrotu/symetrii oznacza takie ustawienie manekina, że wektor normalny do jego powierzchni jest skierowany w kierunku łuku spawalniczego.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego przy stanowisku spawalniczym z zaznaczonymi głowicami spektrometrii

Wykorzystanie drugiego takiego samego przyrządu pomiarowego tj. spektrometrii było konieczne, aby określić zmiany emisji łuku zachodzące podczas kolejnych cykli spawania, kiedy głowica pomiarowa znajdowała się w różnych położeniach na modelu ciała człowieka. W ten sposób możliwe było późniejsze zweryfikowanie wyników pomiarów w poszczególnych punktach pomiaru tak, aby uwzględniały zmiany emisji łuku w czasie.

Procedura wykonywania badań dla jednego wybranego procesu spawania o stałych parametrach spawania (prąd spawania, materiał spawany, gaz osłonowy itp.) była następująca:

- Wykonywanie pomiarów spektrometrii odniesieniowym usytuowanym w jednym (niezmiennym) punkcie pomiaru w celu obserwacji zmian emisji łuku w czasie całych pomiarów; kolejne wyniki pomiarów tym spektrometrii były zawsze odnoszone do pierwszego pomiaru „punkt początkowy 0” ( $E_{r0}$ ).
- Wykonanie jednoczesnych pomiarów natężenia napromienienia przy niezmiennym położeniu głowicy odniesienia ( $E_{ri}$ ) i przy różnych położeniach głowicy pomiarowej na płaskim modelu człowieka ( $E_{pi}$ ).
- Punkty pomiarowe, w których umieszczano głowicę pomiarową wyznaczono tak, aby była możliwość przeprowadzenia aproksymacji wartości między kolejnymi punktami. Oznacza to, że punkty zostały umieszczone w liniach w taki sposób, aby możliwe było przeprowadzenie między nimi aproksymacji. Widok tego rozkładu punktów pokazany został na rysunku 2.

Wartości natężeń napromienienia w poszczególnych punktach pomiaru były mnożone przez współczynnik korekcyjny  $K_i$ , określający zmiany emisji łuku w czasie.

$$(1) \quad k_i = \frac{E_{ri}}{E_{r0}}$$

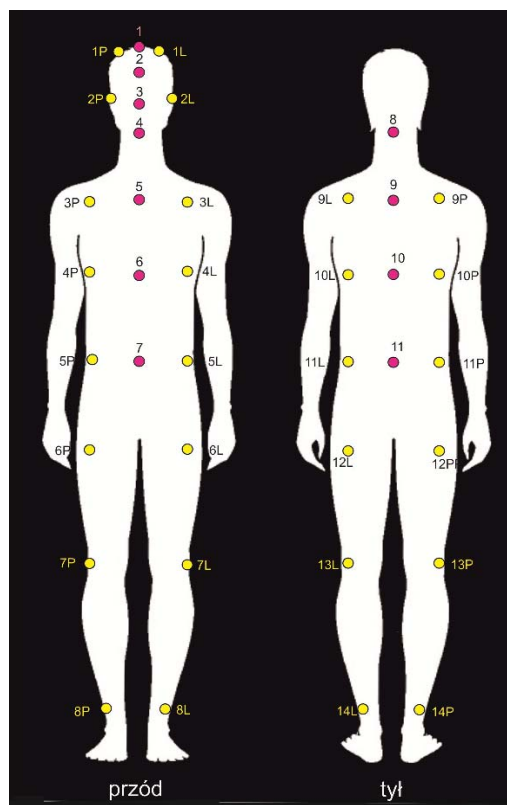
gdzie:  $K_i$  – współczynnik korekcyjny dla  $i$ -tego punktu pomiaru, uwzględniający zmiany emisji łuku w czasie

względem pomiaru w „punkcie początkowym 0”;  $E_{ri}$  – skuteczne aktywnie natężenie napromienienia w punkcie odniesieniowym podczas wykonywania  $i$ -tego pomiaru;  $E_{r0}$  – skuteczne aktywnie natężenie napromienienia w punkcie odniesieniowym podczas wykonywania pomiaru „0”

Zweryfikowaną wartość natężenia napromienienia w  $i$ -tym punkcie pomiarowym  $E_{zpi}$  jest wyznaczana ze wzoru:

$$(2) \quad E_{zpi} = k_i \cdot E_{pi}$$

gdzie:  $E_{pi}$  – wyznaczona z pomiarów spektrometrii pomiarową wartość skutecznego aktywnie natężenia napromienienia w  $i$ -tym punkcie pomiaru.



Rys. 2. Rozkład punktów pomiarowych na dwóch rzutach płaskich (przód i tył) modelu 2D ciała człowieka

### Podstawy algorytmu do modelowania rozkładu napromienienia na modelu 2D ciała człowieka

Działanie algorytmu opiera się na analizie wartości w kilkudziesięciu punktach pomiarowych (w tym wartościach brzegowych) zaimplementowanych w programie w postaci macierzy pomiarów. Wszystkie elementy tej macierzy opisują stosunek procentowy wartości pomiarowych.

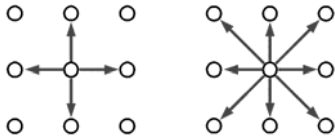
Można założyć, że przy zmianie jedynie mocy spawania, rozkład natężeń napromienienia mierzony w danym punkcie powinien być jedynie wyższy (lub niższy) co do wartości. Natomiast proporcje promieniowania docierające z różnych punktów powinny być zachowane dla wszystkich punktów pomiarowych.

Po zaimplementowaniu odpowiednich wartości w macierzach, program uruchamiał moduł odpowiedzialny za tworzenie konturu człowieka. Wykreowanie konturu było konieczne z dwóch powodów:

- Wyznaczenie pozycji dla określenia warunków brzegowych.
- Zwizualizowanie wyników na końcu pomiaru.

Wstępna binaryzacja wybranego obrazu pomagała w jego dalszej obróbce oraz w przypisywaniu danych do

odpowiednich miejsc. Zasadniczym problemem występującym podczas binaryzacji jest odpowiednie określenie sąsiedztwa kolejnych punktów na obrazie. Zastosowanie standardowego sąsiedztwa 4-spójnego spowoduje, że elementy konturu będą miejscami pogrubione, a tym samym mogą sprawiać problemy w dalszej obróbce. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie sąsiedztwa 8-spójnego, które pozwala na wyeliminowanie nadmiarowych elementów konturu. Przykład obszarów spójności między sąsiednimi pikselami obrazu zaprezentowany został na rysunku 3. Widoczne na rysunku okręgi reprezentują sąsiadujące piksele, strzałki – sąsiedztwo o określonej spójności.

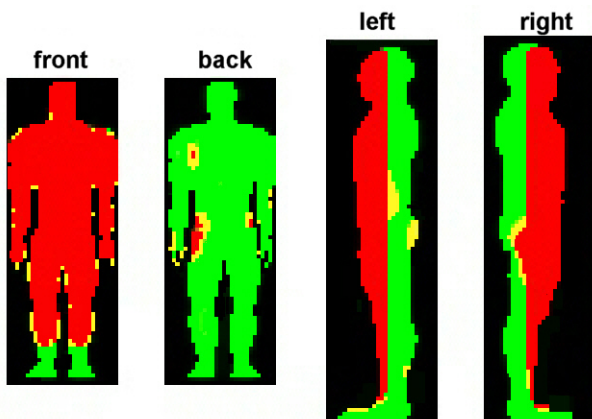


Rys. 3. Rozważane obszary sąsiedztwa na obrazach binarnych, z lewej sąsiedztwo 4-spójne, z prawej 8-spójne.

W celu dobrej reprezentacji danych zostały stworzone 4 modele, odpowiadające rzutom z przodu, z tyłu, z prawej i lewej strony człowieka. Każdy rzut odpowiadał przybliżonej sylwetce mężczyzny z 50 centyla populacji.

W następnym kroku dodawane były wartości brzegowe na modelu wyznaczone pomiarowo. Wartości te były następnie aproksymowane w celu wyznaczenia teoretycznego rozkładu na obrysie oraz określenia granic w ramach, których działają ma interpolacja.

Kolejnym krokiem algorytmu było dodanie na obrysie punktów z wynikami pomiarów. Na podstawie tych punktów były następnie wyznaczone linie pionowe, których kolejne wartości były aproksymowane względem 2 najbliższych (w linii pionowej), punktów pomiarowych. Wykorzystana do tego celu została aproksymacja liniowa. Po wykonaniu kroków związanych z aproksymacją linii pionowych wzdłuż punktów pomiarowych program przystępował do aproksymacji punktów poziomych wypełniając brakujące przestrzenie wzdłuż całego modelu. Na tym etapie kolejnym rzutom 2D, dodawano odpowiednie wartości we wszystkich punktach modelu wyznaczając tym samym teoretyczną mapę rozkładu natężeń napromienienia promieniowaniem UV.



Rys. 4. Przykładowy wynik dla różnych rzutów modelu ciała człowieka.

Ostatnim etapem działania modelu było naniesienie odpowiedniej reprezentacji kolorystycznej do oceny ryzyka zawodowego narażenia poszczególnych części ciała człowieka, poprzez ich odzwierciedlenie odpowiednim kolorem w każdym punkcie modelu. W tym kroku algorytmu

wyznaczano dla przyjętego czasu ekspozycji wartości napromienienia, a następnie uzyskaną wartość napromienienia dzielono przez wartość MDE ( $30 \text{ J/m}^2$ ) [11]. Otrzymano w ten sposób krotności MDE –  $K_{MDE}$  i zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny ryzyka zawodowego [16] określono poziomy ryzyka przypisywany był odpowiedni kolor, zgodnie z zasadą:

- $K_{MDE} > 1$  – kolor czerwony – ryzyko duże.
- $0,7 \leq K_{MDE} \leq 1$  – kolor żółty – ryzyko średnie.
- $K_{MDE} < 0,7$  – kolor zielony – ryzyko małe.

Ostra granica zmiany na rysunku 4 (left, right) wynika w pewnym stopniu z niedokładności zastosowanej metody aproksymacji oraz z faktu, że wartości przedziału w zakresie ryzyka średniego obejmują dla danego przypadku bardzo mały zakres wartości. W przypadku niektórych punktów udało się wykryć wartości napromienienia z zakresu  $0,7 - 1 K_{MDE}$  dla podanego przypadku. Generalnie jednak dla większości przypadków, w których wartości napromienienia są wartościami środkowymi (czasu, natężenia napromienienia lub odległości), wartości modelu będą raczej przyjmować wartości skrajne i w nielicznych przypadkach wskazywać na wartości  $K_{MDE}$  z zakresu średniego.

Dzięki temu wyznaczone mapy poziomu ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na promieniowanie UV mogą wizualnie wskazywać na obszary najbardziej zagrożone. Informacja zawarta w takiej prezentacji wyników symulacji może zasugerować osobom zajmującym się przygotowaniem miejsc pracy, że w niektórych rejonach można spotykać się z większym niż normalnie narażeniem na sztuczne promieniowanie UV. Przykładowo wyznaczone mapy natężenia napromienienia promieniowaniem UV dla modelu człowieka zaprezentowano na rysunku 4. Wartości, dla których zasymulowany został rozkład natężenia napromienienia promieniowaniem UV, są wartościami obliczonymi dla spawania metodą MAG [17, 18].

Główne zalety zastosowania, modelu 2D to:

- Prostota w reprezentacji danych – złożoność algorytmu spada ze zmniejszeniem liczby rozważanych punktów pomiarowych, a liczba rozważanych punktów odnosi się jedynie do wybranych rzutów (w przypadku tego algorytmu stosowane są 4 rzuty).
- Szybkość działania – obliczenia zastosowane dla rozważanej powierzchni są realizowane jedynie w dwóch płaszczyznach (a nie na dowolnej powierzchni jak w przypadku modeli trójwymiarowych).
- Efektywność algorytmu, wystarczająca do szybkiego określenia (oszacowania) obszarów najbardziej narażonych na wpływ promieniowania UV.

Jednakże pomimo zalet możemy wymienić kilka niedoskonałości modelu wykonanego w obecnej formie:

- Podstawą działania algorytmu jest aproksymacja liniowa, która może nie oddawać dokładnie charakteru, rozkładu natężenia napromienienia promieniowaniem UV na ciele człowieka (nie uwzględnia lokalnych zmian).
- Brak uwzględnienia prawdziwej powierzchni ciała człowieka, uproszczenie w postaci reprezentacji różnych rzutów w postaci płaszczyzny wprowadza na początku błąd pomiarowy, wynikający z innej rzeczywistej odległości różnych elementów ciała.

W algorytmie można przeliczyć maksymalną wartość wynikającą z pomiarów, a następnie na jej podstawie określić maksymalny czas ekspozycji. Po drobnej modyfikacji kodu programu, użytkownik jest w stanie wybrać interesujący go punkt i określić, jaki będzie maksymalny czas ekspozycji w tym konkretnym punkcie. Dzięki temu możliwe jest dostosowywanie do własnych potrzeb i obliczeń w algorytmie. Oprogramowanie zostało napisane uruchomione w środowisku MatLab.

## Wyniki działania programu

W przypadku działania programu możemy wyróżnić kilka parametrów aby pokazać możliwości symulacyjne programu. Na początku użytkownik musi wprowadzić parametry takie jak:

- Natężenie napromienienia promieniowaniem UV mierzone w punkcie początkowym („0”).
- Czas ekspozycji (wyrażany w minutach).
- Odległość pracownika od łuku.

Przyjmując, że 2 z 3 parametrów są stałe, zasymulowano wpływ każdego z nich na potencjalne narażenie na promieniowanie UV. Pierwszym z analizowanych parametrów był parametr natężenia napromienienia promieniowaniem UV (mierzone w punkcie początkowym pomiaru („0”). Wyniki wpływu wartości natężenia napromienienia na liczbę punktów na modelu człowieka, w których występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości, pokazano w tabeli 1. Analiza obejmowała 76270 punktów składających się na symulowany model 2D

Tabela 1. Wpływ zmiany natężenia napromienienia na liczbę punktów, w których występuje przekroczenie MDE na płaszczyźnie modelu

Natężenie napromienienia a [mW/m <sup>2</sup> ]	Maksymalna wartość napromienienia a [J/m <sup>2</sup> ]	Liczba punktów wskazujących na przekroczenie	Procent punktów w modelu [%]
10	0,3607	0	0
20	0,7213	0	0
40	1,4426	36600	47,99
90	3,2459	51101	67
150	5,4098	56766	74,43
200	7,2131	59183	77,6

Tabela 2. Wpływ zmiany czasu ekspozycji na liczbę punktów, w których występuje przekroczenie MDE na płaszczyźnie modelu

Czas [minuty]	Maksymalna wartość napromienienia [J/m <sup>2</sup> ]	Liczba punktów wskazujących na przekroczenie	Procent punktów w modelu [%]
5	0,4809	0	0
10	0,9617	0	0
15	1,4426	36600	47,99
30	2,8852	49545	64,96
100	9,6175	61285	80,35
480	46,164	68629	89,98

Drugim z analizowanych parametrów był czas przebywania osoby w danym miejscu pracy gdzie istnieje ryzyko narażenia na negatywny wpływ promieniowania UV. Parametr ten został dodany, gdyż osoby postronne, których praca w pobliżu stanowiska spawania nie koniecznie musi oznaczać przebywanie w czasie pełnych 8 godzin (może to być zarówno krócej jak dłużej). Wyniki symulacji zaprezentowano w tabeli 2.

Trzeci z parametrów określa odległość pracownika od łuku. Parametr ten został dodany, aby określić wpływ odległości na działanie algorytmu, przy założeniu stałości rozkładu promieniowania odbitego we wszystkich odległościach. Wyniki symulacji zostały przedstawione w tabeli 3.

Algorytm zweryfikowano również poprzez porównanie wyników symulacji dla innego punktu odniesienia („0”) i innej metody spawania. Wybrano metodę MAG, a porównania wartości symulowane zostały porównane z wartościami rzeczywistymi zmierzonymi na stanowisku. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4.

Wartość odstająca dla punktu na wysokości 84 cm wynikała z warunków panujących na stanowisku. Fakt prawie całkowitego zasłonięcia łuku w tej pozycji powodował, że dla zaimplementowanych w modelu

wartości z innych pomiarów nastąpiła duża rozbieżność w symulowanych wartości. Dane dla wartości zaimplementowanych w programie zakładały, że łuk będzie zasłonięty przez podstawę niżej niż 84 cm – stąd duża rozbieżność między wartością zmierzoną i symulowaną.

Tabela 3. Wpływ zmiany odległości od łuku na liczbę punktów, w których występuje przekroczenie MDE na płaszczyźnie modelu

Odległość od źródła [m]	Maksymalna wartość napromienienia [J/m <sup>2</sup> ]	Liczba punktów wskazujących na przekroczenie	Procent punktów w modelu [%]
0,5	92,328	70550	92,5
1	23,0820	66187	86,78
2	5,7705	57353	75,2
5	0,9233	0	0
10	0,2308	0	0
30	0,0256	0	0

Tabela 4. Wyniki pomiaru i symulacji dla innego punktu odniesienia (punktu „0” pomiaru).

Położenie punktu „0” wysokość pomiaru [cm]	Wynik pomiaru [mW/m <sup>2</sup> ]	Wynik symulacji [mW/m <sup>2</sup> ]	Różnica względna [%]
84	36,3	313,73	88,4
104	395,59	365,53	-8,2
124	368,81	376,76	2,1
144	411,3	370,86	-10,9
<b>164</b>	<b>348</b>	<b>348</b>	<b>0</b>

Początkowo zakładano, że program będzie jedynie prezentować potencjalne możliwości obliczeniowe, a nie skupiać się na kreowaniu bardziej złożonego modelu. Jednak dodano opcję wizualizacji wyników z odpowiednio przygotowaną mapą kolorów. Umożliwia to wskazanie odpowiednich obszarów, na które należałoby zwrócić uwagę podczas projektowania stanowisk pracy. Dodatkowa opcja umożliwiająca określenie obszaru najbardziej narażonego oraz dopuszczalnego czasu ekspozycji pozwala jednocześnie stwierdzić jak dużym problemem jest promieniowanie UV w danym miejscu.

Mimo przedstawionych zalet zaprezentowanego rozwiązania, w kolejnym rozwinięciu programu będzie wykorzystywany model 3D dający o wiele lepsze możliwości symulacyjne. Wśród zalet takiego (nowego) rozwiązania należy przede wszystkim wymienić:

- Dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego ciała człowieka w porównaniu z modelem 2D.
- Możliwość uzyskania dużo większej zgodności wyników symulacji z pomiarami.
- Lepsza reprezentacja danych i brak konieczności tworzenia okien dla różnych rzutów (użytkownik może je wygenerować, ale nie musi).
- Możliwość zaimplementowania odpowiednich algorytmów do symulacji rozkładu natężenia napromienienia w różnych pomieszczeniach.
- Brak konieczności wyznaczania pomiarowej wartości brzegowej modelu, gdyż wartości brzegowe są zawsze wartościami wchodzącymi w skład obliczeń.

Model 3D nie jest pozbawiony jednak wad. Najważniejszą z nich jest bez wątpienia poziom skomplikowania obliczeń oraz czas potrzebny na ich wykonanie. Skomplikowaniu ulega również problem doboru odpowiednich modeli do symulacji. Ważnym aspektem, który wymaga rozważenia jest również sposób prowadzenia aproksymacji wartości między kolejnymi punktami, a to musi być oparte o analizę kształtu powierzchni w 3D.



## Podsumowanie

Biorąc pod uwagę dotychczasowe możliwości symulacyjne w zakresie promieniowania UV zaprezentowane oprogramowanie (oraz jego przyszłe rozwinięcia) zapewnia możliwość oszacowania położenia obszarów niebezpiecznych na ciele człowieka. Zaproponowany algorytm analizy oraz program napisany na jego podstawie w obecnej formie wymagają, aby przeprowadzone zostały pomiary natężeń napromienienia przynajmniej w kilku punktach. Początkowo opracowany program pozwalał symulować tylko proste rozkłady bez możliwości złożonej reprezentacji wyników pomiarów. Główną zaletą była prostota i szybkość działania dla ściśle określonego rzutu. Zasadniczy problem stanowił w tym przypadku brak możliwości wykorzystania rzutowania na inne płaszczyzny bez konieczności zmiany kodu źródłowego. Innym problemem był nieintuicyjny proces wprowadzania danych. Rozszerzenie funkcji programu pozwoliło uzyskać możliwość lepszego reprezentowania wyników symulacji. Jednocześnie został zweryfikowany sposób dodawania większej liczby płaszczyzn pomiaru. W symulacji w dalszym ciągu wykorzystuje się rzutowanie na płaszczyznę, jednak uwzględnienie kilku różnych płaszczyzn daje możliwość lepszej symulacji rzeczywistego obiektu 3D, jakim jest ciało pracownika. Kolejnym krokiem, będącym jednocześnie naturalnym następstwem ewolucji oprogramowania symulacyjnego będzie wprowadzenie modelu 3D do badań. Zastosowanie modelu przestrzennego pozwoli na rozwiązanie problemów niedopasowania geometrycznego, jakie występują w przypadku korzystania z modeli 2D. Dodatkowo będą rozważane dowolne powierzchnie i punkty pomiarowe oraz właściwości stanowiska pracy. Docelowo przewidywane jest także uwzględnienie promieniowania odbitego od ścian (i innych powierzchni) w obliczeniach symulacyjnych rozkładu natężenia napromienienia UV.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej, Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

**Autorzy:** mgr Inż. Mariusz Wiselka, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Technik Bezpieczeństwa, Pracownia Promieniowania Optycznego, Czerniakowska 16 budynek A 507, 00-701 Warszawa, E-mail: marwi@ciop.pl;

dr hab. inż. Agnieszka Wolska, prof. instytutu, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Technik Bezpieczeństwa, Pracownia Promieniowania Optycznego, Czerniakowska 16 budynek A 509, 00-701 Warszawa, E-mail: agwol@ciop.pl;

dr hab. inż. Dariusz Sawicki, prof. uczelni, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informacyjno-Pomiarowych, Zakład Systemów Informacyjno-Pomiarowych, ul. Koszykowa 75 / GE 216, 00-662 Warszawa, E-mail: dariusz.sawicki@ee.pw.edu.pl;

## LITERATURA

- [1] Hietanen M., von Nandelstadh P. Measurements of optical radiation emitted by welding arc. In Matthes R., Sliney D. eds. Measurements of optical radiation hazards. ICNIRP 1998; 6/98: 553-557.
- [2] Nakashima H, Utsunomiya A, Fujii N, Okuno T. hazard of ultraviolet radiation emitted in gas tungsten arc welding of aluminium alloys. *Ind health* 2016, 54, 149-56, doi:10.2486/indhealth.2015-0141.
- [3] Okuno T., Ojima J., Saito H. Ultraviolet radiation emitted by CO<sub>2</sub> arc welding. *Annals of Occupational Hygiene* 2001, 45, 597-601.
- [4] Dixon AJ, Dixon BF. Ultraviolet radiation from welding and possible risk of skin and ocular malignancy. *The Medical Journal of Australia*, 2004, 181(3), 155-157.
- [5] Emmet EA, Buncher RR, Suskind RB, Rowe KW. Skin and eye diseases among arc welders and those exposed to welding operations. *Journal of Occupational Medicine* 23(2), 1981, 85-905.
- [6] Falcone LM, Zeidler-Erdely PC. Skin cancer and welding. 2018, British Association of Dermatologists, *Clinical and Experimental Dermatology*, 1-5. Doi: 10.1111/ced.13783
- [7] Garcia-Guinea J, Correcher V, Lombardero M, Gonzalez-martin R. Study of the ultraviolet emission of the electrode coating of arc welding. *Int J. of Environmental Health Research*, 2004, 14(4), 285-294.
- [8] Gourzoulidis A., Achpis A., Topalis FV, Kazasidis ME, Pantelis D., Markoulis A., Kappas C., Bourousis CA. Artificial optical radiation photobiological hazards in arc welding. *Physica Medica*, 2016, 32, 981-986.
- [9] Rybczyński A, Wolska A., Wiselka M, Matusiak J, Pfeifer T. Welding arc ignition and photobiological hazard evaluation. 2018, *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/ICOS Europe)*, IEEE, 2018, 1-6.
- [10] Rybczyński A, Wolska A., Wiselka M, Matusiak J, Pfeifer T., Ignition of welding arc and UV actinic hazard evaluation, *Energies* 2019, 12, 512.
- [11] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (DzU z 2014 poz. 817)
- [12] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 27 maja 2010 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z ekspozycją na promieniowanie optyczne w środowisku pracy (DzU nr 100, poz 643, Dz U 2013, poz. 1619, tekst jedn.)
- [13] PN-EN 14255-1: 2010, Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 1: Promieniowanie nadfioletowe emitowane przez źródła sztuczne na stanowisku pracy.
- [14] Rybczyński A., Wolska A. Selected measurement problems during the evaluation of occupational exposure to UV radiation emitted by the welding arc. Proceedings of VI IEEE Lighting Conference of Visegrad Countries LUMEN V4, Karpacz, 2016, str. 149-155.
- [15] GL Spectis 5.0 Touch <http://gloptic.com/products/gl-spectis-5-0-touch/?lang=pl>
- [16] Wolska A., Pawlak A., Promieniowanie optyczne w Ryziko zawodowe. *metodyczne podstawy oceny pod red. WM Zawieski*, CIOP –PIB, Warszawa, 2007, 201-216.
- [17] Wiselka M., Wolska A., Sawicki D., Rybczyński A. Rozkład natężenia napromienienia promieniowania UV na powierzchni modelu człowieka w otoczeniu stanowiska spawania łukowego, 209- 220, XXVI Krajowa konferencja oświetleniowa Technika Świetlna 2017r., Warszawa 19-20.06 2017.
- [18] Wiselka M., Model Pracownika dla potrzeb oceny bezpieczeństwa pracy. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Warszawska 2017 Warszawa.