

Zygmunt Bock

METODA POMIARU CZASU ORAZ DAWEK NAŚWIETLANIA CIAŁA LUDZKIEGO PROMIENIOWANIEM ULTRAFIOLETOWYM UV, NA PODSTAWIE POMIARÓW INDEKSÓW UV

Streszczenie. W artykule przedstawiono uogólniony model matematyczny oraz praktyczną metodę wyznaczania czasu oraz dawek naświetlania ciała ludzkiego promieniowaniem ultrafioletowym, w zależności od natężenia promieniowania UV oraz fototypu skóry człowieka. Opracowane wzory umożliwiają obliczanie bezpiecznego czasu ekspozycji skóry na promieniowanie ultrafioletowe oraz odpowiadających im dawek, z wykorzystaniem trzech modeli matematycznych: liniowego, odwrotnie proporcjonalnego oraz wykładniczego. Artykuł zawiera także propozycję wdrożenia metody w systemach informacyjnych i pomiarowych, wykorzystywanych w ochronie zdrowia i środowiska. W niniejszym artykule przedstawiono również metodę obliczania czasów naświetlania oraz dawek naświetlania skóry ludzkiej korzystając z pomiarów natężenia promieniowania ultrafioletowego UV. Podstawą tej metody jest wyprowadzenie, na podstawie przyjętych założeń, wzorów obliczeniowych czasu $T_{Naśw} = f(UV)$ oraz dawek naświetlania $D = f(UV)$, zależnych od indeksów natężenia promieniowania UV, na podstawie których obliczane są czasy oraz dawki naświetlania skóry człowieka.

METHOD OF MEASURING TIME AND DOSES OF EXPOSURE OF THE HUMAN BODY TO ULTRAVIOLET UV RADIATION, BASED ON ON MEASUREMENTS OF UV RADIATION INTENSITY

Summary. This article presents a generalized mathematical model and a practical method for determining the duration and doses of ultraviolet radiation exposure to the human body, depending on UV radiation intensity and skin phototype. The developed formulas enable the calculation of safe skin exposure times to ultraviolet radiation and the corresponding doses, using three mathematical models: linear, inversely proportional, and exponential. The article also proposes implementing the method in information and measurement systems used in health and environmental protection. This article also presents a method for calculating exposure times and doses to human skin using measurements of ultraviolet radiation intensity.

The basis for this method is the derivation, based on the adopted assumptions, of calculation formulas for time $T_{Na\acute{s}w} = f(UV)$ and exposure doses $D = f(UV)$, dependent on UV radiation intensity indices, which are used to calculate exposure times and doses to human skin.

1. Wprowadzenie

Naświetlanie ciała ludzkiego promieniowaniem ultrafioletowym, czyli leczenie światłem słonecznym, poprzez bezpośrednią ekspozycję na jego naturalne światło, to rodzaj fototerapii, znanej już starożytnym cywilizacjom, m.in. w Grecji, Egipcie czy Rzymie, jako helioterapia. Stosowano je powszechnie w przypadku różnych chorób, w tym zapaleń skóry, na odżywienie tkanek organizmu, a także bóle mięśni czy nieżyty dróg oddechowych.

Nowoczesna fototerapia stała się bardzo popularna, szczególnie od końca XIX wieku, w której szczególnie chętnie leczono światłem choroby skóry, jak łuszczyca, trądzik pospolity, egzema czy też trudno gojące się zakażenia ran.

Promieniowanie ultrafioletowe (UV) jest istotnym czynnikiem środowiskowym, mającym bezpośredni wpływ na skórę człowieka. W zależności od długości fali oraz intensywności promieniowania, ekspozycja na promieniowanie UV może powodować zarówno korzystne, jak i szkodliwe skutki biologiczne [1–4]. Do pozytywnych efektów należą m.in. synteza witaminy D₃ w skórze oraz działanie bakteriobójcze [5,6], natomiast nadmierna ekspozycja wiąże się z ryzykiem oparzeń słonecznych, fotostarzenia skóry, a także rozwoju nowotworów skóry [7–9].

Specjaliści zalecają, aby latem odsłaniać swoje ciało, średnio od 5 do 30 minut, przynajmniej dwa razy w tygodniu, przy założeniu, że im ciemniejsza skóra i im słabsze światło słoneczne, tym więcej minut czasu naświetlania jest potrzebnych, aby osiągnąć właściwy cel, czyli produkcję przez ludzki organizm witaminy D₃, pod wpływem promieniowania UV, która według naukowców z brytyjskich uniwersytetów w Surrey i Brighton [10,11] stymuluje układ odpornościowy.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa ekspozycji na promieniowanie UV opracowano liczne normy i wytyczne, w tym m.in. standardy Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) dotyczące dobowych dawek erytemalnych (Standard Erythema Dose, SED) oraz referencyjnych spektrów działania [12,13].

W literaturze opisano wiele metod obliczania dawek promieniowania UV oraz dopuszczalnych czasów ekspozycji w warunkach naturalnych [14–17]. Dotychczasowe modele najczęściej bazowały na stałych wartościach progowych oraz uśrednionych danych meteorologicznych.

Niniejsza praca proponuje natomiast metodę wyznaczania dopuszczalnych czasów naświetlania naświetlania ciała ludzkiego promieniowaniem ultrafioletowym UV oraz odpowiadających im dawek naświetlania, na podstawie rzeczywistych pomiarów natężenia promieniowania UV oraz parametrów indywidualnych dla poszczególnych fototypów skóry.

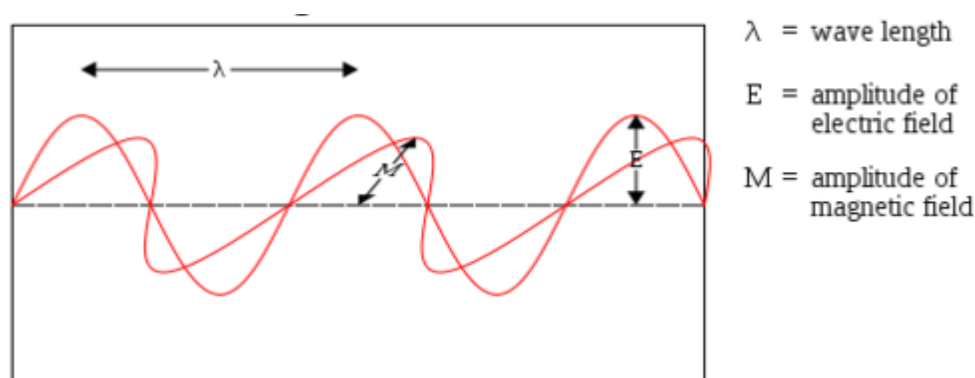
Celem tej pracy jest przedstawienie metody obliczania czasów oraz dawek naświetlania skóry ludzkiej, na podstawie pomiarów natężenia promieniowania ultrafioletowego UV. Podstawą tej metody jest wyprowadzenie wzorów obliczeniowych czasu naświetlania $T_{Naśw}=f(UV)$ oraz dawek naświetlania $D=f(UV)$, wykorzystywanych do tworzenia wykresów na stronach internetowych, informujących o dopuszczalnych czasach i dawkach naświetlania.

1.1. Promieniowanie ultrafioletowe UV

Teoria elektromagnetyczna Maxwell'a to drugi ważny dział fizyki klasycznej [18], obok mechaniki Newtona, dotycząca zjawisk elektrycznych i magnetycznych, które można najlepiej opisać za pomocą pola elektrycznego $\mathcal{E}(\mathbf{x})$ i magnetycznego $\mathcal{H}(\mathbf{x})$. Pola te związane są z gęstościami ładunku elektrycznego i prądu elektrycznego równaniami Maxwell'a, prowadzące do wniosku, iż w przestrzeni swobodnej, zarówno pole elektryczne, jak i magnetyczne spełniają równanie:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) \begin{Bmatrix} \mathcal{E}(\mathbf{x}) \\ \mathcal{H}(\mathbf{x}) \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (1)$$

Z tego równania wynika, że pola te rozchodzą się w przestrzeni, jako fale elektromagnetyczne ze stałą prędkością c . Fala elektromagnetyczna zawiera dwa typy fal, oscylujących w prostopadłych do siebie kierunkach. Jedną z nich jest oscylujące pole magnetyczne, a drugą – pole elektryczne [19]. Wygląda to, jak na poniższym Rys.1:



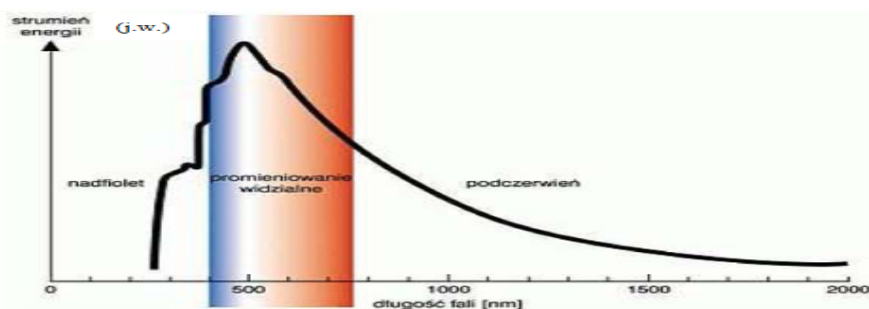
Rys. 1. Fala elektromagnetyczna, zawierająca dwie typy fale, oscylujące w prostopadłych do siebie kierunkach

Fig. 1. An electromagnetic wave containing two types of waves oscillating in directions perpendicular to each other

Falę elektromagnetyczną charakteryzuje częstotliwość ν oraz długość fali λ . Wielkości te są związane ze sobą wzorem: $\nu = c / \lambda$. Promieniowanie elektromagnetyczne ma podwójną naturę: falową i korpuskularną. Oznacza to, że można je opisać również jako zbiór cząstek - fotonów - poruszających się z prędkością światła. Energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali i wynosi: $E = h \cdot \nu = hc / \lambda$

Promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane przez wzbudzone atomy pokrywa tylko część całego widma promieniowania elektromagnetycznego, z którym stykamy się w przyrodzie. W zasadzie dotyczy to promieniowania widzialnego, promieniowania ultrafioletowego (odkrytego przez J. Ritter'a oraz W.H. Wollaston'a na początku XIX wieku) oraz promieniowania rentgenowskiego, o energii od części eV do ok. 120 keV.

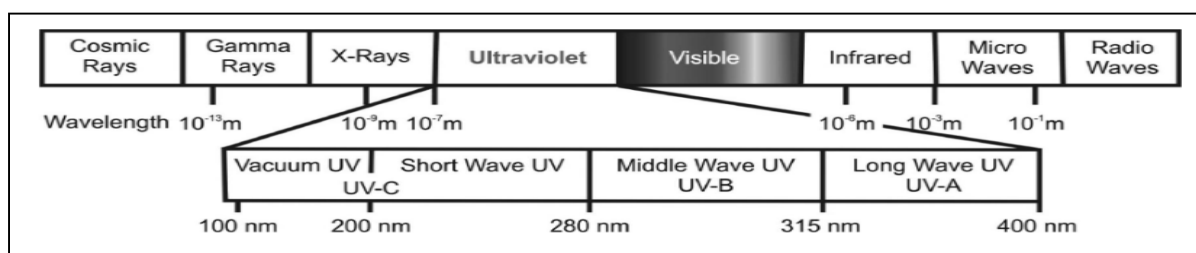
Naturalnymi źródłami promieniowania UV są Słońce, nieboskłon, Księżyc oraz gwiazdy. Widmo emitowane przez Słońce jest zbliżone do widma ciała doskonale czarnego, którego temperatura powierzchni wynosi ok. 6000 K. Promieniowanie optyczne [20], jest częścią widma promieniowania elektromagnetycznego o długościach fal od 100 nm do 1 mm. W skład promieniowania optycznego wchodzi: (1) promieniowanie ultrafioletowe (UV), (2) widzialne - czyli światło (VIS), (3) podczerwone (IR). Widmo emisyjne promieniowania słonecznego przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Widmo emisyjne promieniowania słonecznego

Fig. 2. Emission spectrum of solar radiation

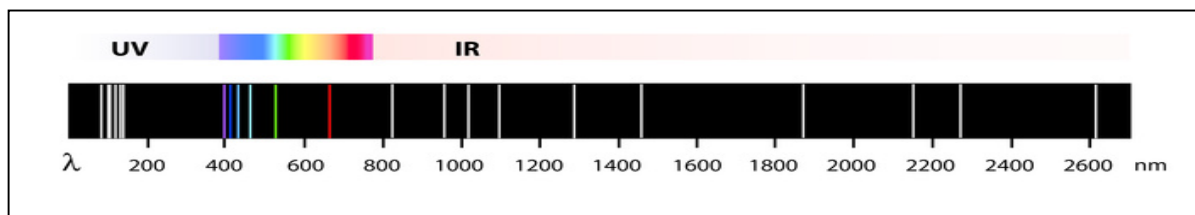
Promieniowanie ultrafioletowe, to promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal mniejszych od długości fali światła fioletowego, co przedstawiono na Rys. 3, czyli skrajnej barwy odbieranej przez człowieka.



Rys. 3. Widmo promieniowania słonecznego z fragmentem ultrafiolet UV

Fig. 3. The spectrum of solar radiation with a UV ultraviolet fragment

Promieniowanie ultrafioletowe jest niewidzialną częścią promieniowania słonecznego [21], składającego się z światła widzialnego odbieranego jest przez człowieka jako światło białe, w zakresie fal od 380-400 do 720-800 nm oraz światła - podczerwonego (IR) – powyżej 720 nm. Energia kwantów promieniowania UV to kilka eV, dlatego jest ono wysokoenergetyczne [22]. Najkrótsza fala ultrafioletu obejmuje długość 10 nm, co pokrywa się z promieniowaniem X. Promieniowanie ultrafioletowe sąsiaduje z widzialną częścią niebieskiego światła, co przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Widmo promieniowania słonecznego; ultrafiolet UV, widzialne oraz podczerwone IR

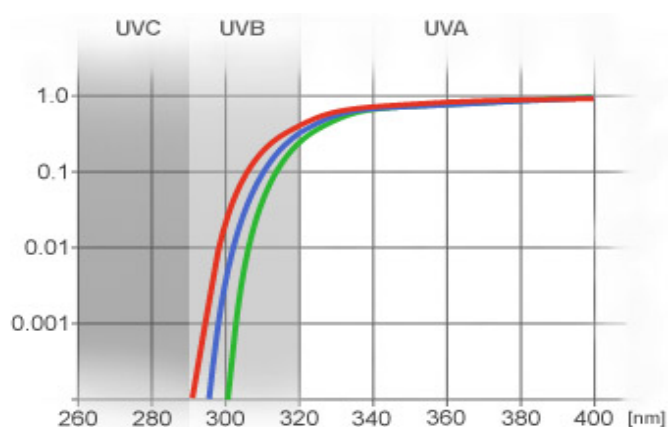
Fig. 4. Spectrum of solar radiation; UV ultraviolet, visible and IR infrared

Promieniowanie UV jest podzielone na trzy zakresy spektralne. Do spektrum promieniowania UV należą fale elektromagnetyczne o długości od 400 do 100 nm, które zgodnie z polską normą PN-90/E-01005 pasma te obejmują następujące długości fal:

- **UV-A** (400-315 nm) - w skali międzynarodowej zakres spektralny UVA wynosi często 400-320 nm,
- **UV-B** (315-280 nm),
- **UV-C** (280-100 nm) - ponieważ powietrze pochłania promieniowanie UVC poniżej 200nm, jest ono często uważane za dolną graniczną długość fali.

Promieniowanie **UV-A** stanowi prawie 95% promieniowania ultrafioletowego i przedostaje się najgłębiej do naszej skóry. Jest rodzajem promieniowania, który dominuje podczas wszystkich pór roku. Promieniowanie **UV-B** stanowi zaledwie 5% promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi i ma bardzo silny wpływ na naszą skórę i zdrowie [23]. Promieniowanie UV-B jest odpowiedzialne za powstawanie rumienia, oparzeń słonecznych, zaczerwienia czy nawet nowotworów skórnych. Promieniowanie **UV-C** nie dociera do powierzchni Ziemi, ponieważ praktycznie całkowicie pochłaniane jest przez warstwę ozonową. Oprócz trzech stref ultrafioletu istnieje jeszcze zakres UVD, który zostaje w całości pochłaniany przez powietrze w wysokich warstwach atmosfery.

Promieniowanie ultrafioletowe UV stanowi zaledwie 6% całego promieniowania świetlnego docierającego do powierzchni Ziemi. Gdy promieniowanie słoneczne przechodzi przez atmosferę, wówczas całe promieniowanie UVC i ok. 90% promieniowania UVB jest absorbowane przez ozon, parę wodną, tlen i CO₂, dlatego promieniowanie UV docierające do powierzchni Ziemi, składa się z UVA i niewielkiej ilości UVB [24], co pokazano na Rys. 5.



Natężenie promieniowania UV pochodzącego ze słońca, na powierzchni Ziemi, w funkcji grubości warstwy ozonowej: 2.0, 2.6, 4.0 (jednostki skali Dobsona). UVC jest równa zero niezależnie od wahań grubości warstwy. UVA jest b. duża i słabo zależy od grubości warstwy. Natężenie UVB bardzo silnie zależy od grubości warstwy ozonowej.

Rys. 5. Skład widmowy promieniowania UV docierający do powierzchni Ziemi

Fig. 5. Spectral composition of UV radiation reaching the Earth's surface

1.2. Jednostki promieniowania ultrafioletowego UV

Biologiczne działanie światła ultrafioletowego na ludzkie ciało różni się w zależności od długości fal promieniowania UV, czym zajmuje się fotobiologia, czyli nauka badająca wpływ promieniowania zjonizowanego na system biologiczny [25]. Ilość energii ultrafioletowego promieniowania jonizującego, która została pochłonięta przez 1 kg materii w układzie SI, to 1 grej: $Gy = 1J/kg$. Stosowaną obecnie jednostką określającą równoważnik dawki pochłoniętej jest siwert (Sv):

$$1 Sv = QF \times 1 Gy \quad (2)$$

gdzie: QF = współczynnik jakości promieniowania.

Zgodnie z pierwszym prawem fotobiologii, pochłonięte przez daną substancję promieniowanie wywołuje w niej zmiany fizyczne lub chemiczne [28]. Aby określić dawkę promieniowania pochłoniętego, można posłużyć się oceną wizualną stanu skóry po jego zadziałaniu, która opiera się na określeniu minimalnej dawki rumieniowej MED (*Minimum Erythemat Dose*), czyli najmniejszej dawki promieniowania, która po 24 godzinach od naświetlania wywoła wyraźny rumień skóry. W celu ujednolicenia wyników wprowadzono standardową dawkę erytemalną SED (*Standard Erythemat Dose*). 1 SED - to napromienienie równe $100 J/m^2$, które jest rumieniowo skuteczne.

Dla pomiaru ilości biologicznie efektywnego słonecznego promieniowania UV w różnych miejscach na powierzchni Ziemi został opracowany Globalny Wskaźnik UVI promieniowania ultrafioletowego (UV) docierającego do powierzchni Ziemi w ciągu dnia, wprowadzony z inicjatywy międzynarodowej organizacji WHO (World Health Organization- WHO) [29] i stosowany od 1994r. Został opracowany wspólnie z pozostałymi organizacjami:

- Światową Organizację Meteorologiczną,
- International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP),
- Program Narodów Zjednoczonych ds. Ochrony Środowiska.

Globalny indeks UVI podaje, jaki jest poziom promieniowania UV na powierzchni Ziemi. Jego wartość rośnie od zera w górę. Im wyższa, tym większe niebezpieczeństwo uszkodzenia skóry i oczu oraz tym krótszy powinien być czas przebywania na słońcu. Powinien być on podany jako średnia wartość z okresu czasu, co najmniej 30 minut. Powinna to być pojedyncza wartość, zaokrąglona do najbliższej liczby całkowitej.

1.2.1. Definicja Globalnego Indeksu UVI

Globalny indeks UVI, który można zmierzyć lub obliczyć, to ustandaryzowany sposób przedstawiania ilości promieniowania UV docierającego do Ziemi w określonym czasie i miejscu [29-31]. Indeks UVI (ISO 17166:1999/CIES 007/E-1998), został opracowany na podstawie Międzynarodowej Komisji ds. Oświetlenia, jako referencyjne widmo działania dla rumienia wywołanego promieniowaniem UV na ludzkiej skórze. Indeks UVI jest to miara promieniowania UV, która jest wielkością bezwymiarową o wartościach całkowitych w zakresie od 0 do 16, dotycząca jego oddziaływania na skórę człowieka i wywołująca jej rumień. Równanie do obliczenia indeksu UVI, który podaje WHO, jest następujące:

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

gdzie:

- I_{UV} - to indeks UVI, zmierzony lub obliczony,
- E_{λ} - oznacza intensywność widmową Słońca w $[W/(m^2 \cdot nm)]$, zmierzona lub obliczona przy długości fali λ ,
- $S_{er}(\lambda)$ - oznacza skuteczność rumieniową, przy długości fali λ ,
- k_{er} - jest stałą, równą $40 \text{ m}^2/W$.

Do obliczania indeksu UVI, którego wartość jest zależna m.in. od: (1) pory roku, (2) wysokości nad poziomem morza, (3) stopnia zacienienia, (4) pory dnia, (5) szerokości geograficznej, wykorzystywany jest:

- model komputerowy - odnoszący natężenie promieniowania nadfioletowego do: (1) wysokości nad poziomem morza, (2) ilości chmur, (3) poziomu ozonu, który wynika z grubości jego warstwy, (4) kąta nachylenia słońca,
- lub pomiary natężenia promieniowania UV.

Indeks UVI jest zdefiniowany jako efektywne natężenie promieniowania UV [32], otrzymane w wyniku całkowania natężenia UV, pomnożonego przez parametr wagowy erytemelnej funkcji skuteczności widmowej do 400 nm, znormalizowane do 1, dla długości fali 297 nm.

Do ilościowego określenia promieniowania ultrafioletowego stosuje się różne wielkości i jednostki, w tym natężenie napromieniowania ultrafioletowego, wyrażone w

[W/m²]. Na podstawie równania (3), do obliczenia wskaźnika UVI, według artykułu autorstwa [33], *UVIndex* wyrażony jest iloczynem uśrednionego w czasie efektywnego biologicznie natężenia napromieniowania N_{Prom} [W/m²] oraz współczynnika $k_{er} = 40$ m²/W,

$$UVIndex = k_{er} \times N_{Prom} \quad (4)$$

gdzie:

- N_{Prom} - natężenie promieniowania UV, zmierzone lub obliczone,
- $k_{er} = 40$ m²/W.

Przykłady:

1. Jaki *UVIndex*, odpowiada natężeniu promieniowania UV o wartości $N_{Prom} = 0,1$ W/m²

$$\text{Odp.: } UVIndex = k_{er} \times N_{Prom} = 40 \text{ m}^2/\text{W} \times 0,1 \text{ W/m}^2 = 4 \text{ UVI}$$

2. Jakie natężenia promieniowania N_{Prom} odpowiada indeksowi *UVI* = 1

$$\text{Odp.: } N_{Prom} = UVIndex / k_{er} = 1 / 40 [\text{m}^2/\text{W}] = 0,025 \text{ W/m}^2$$

Zakres wartości Indeksu *UVI* rozciąga się od zera wzwyż [32], co pokazano w Tab. 1.

Niski	2 i mniej	Zielony
Umiarkowany	3-5	Żółty
Wysoki	6-7	Pomarańczowy
Bardzo wysoki	8-10	Czerwony
Ekstremalny	11 i więcej (do 16)	Fioletowy

Tab. 1. Zakresy natężenia promieniowania UV w jednostkach indeksu *UVI*

Table 1. UV radiation intensity ranges in *UVI* index units

Im wyższa wartość *UVI*, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia rumienia i poparzeń skóry i tym szybszy czas ich pojawienia się. Indeks *UVI*, o wartości od 6 do 7 stwarza wysokie oraz bardzo wysokie zagrożenie podczas dłuższego przebywania na Słońcu. Warto ograniczyć czas przebywania na Słońcu w godzinach 11÷16. W Polsce w okresie letnim, w godzinach około południowych oraz w bezpośrednim Słońcu, promieniowanie ultrafioletowe przyjmuje wartości wysokiego (6÷7) i bardzo wysokiego (8÷10) *UVI*. Największe wartości *UVI* rejestrowane są w obszarze równikowym [34], co pokazano na poniższym Rys. 6.

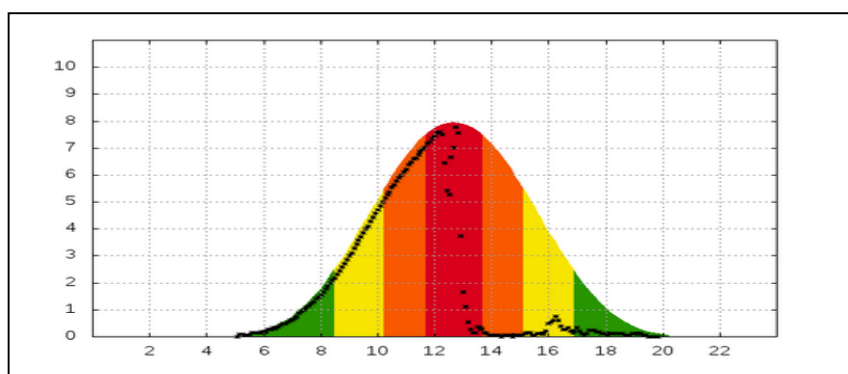


Rys. 6. UVI rejestrowane są w obszarze równikowym

Fig. 6. UVI are recorded in the equatorial area

1.2.2. Intensywność promieniowania słonecznego

Ilość promieniowania ultrafioletowego UV Słońca docierająca do powierzchni Ziemi i związana z nią wartość indeksu UVI zależą od kilku czynników, z których najważniejsze to pora roku oraz pora dnia. Na tle prognozy ze stacji Zakopane, z 16 czerwca 2019, pomiar indeksu UVI, pokazany na Rys. 7, obrazuje redukcję promieniowania UV z wysokich wartości niemal do zera przez chmury burzowe [35], gdzie czarne punkty oznaczają dane pomiarowe, a kolorowe pola – prognozowane na ten dzień wartości indeksu UVI.



Rys. 7. Indeks UV, Zakopane, pomiar i prognoza

Fig. 7. UV index, Zakopane, measurement and forecast

1.2.3. Monitoring promieniowania UV-B w Polsce

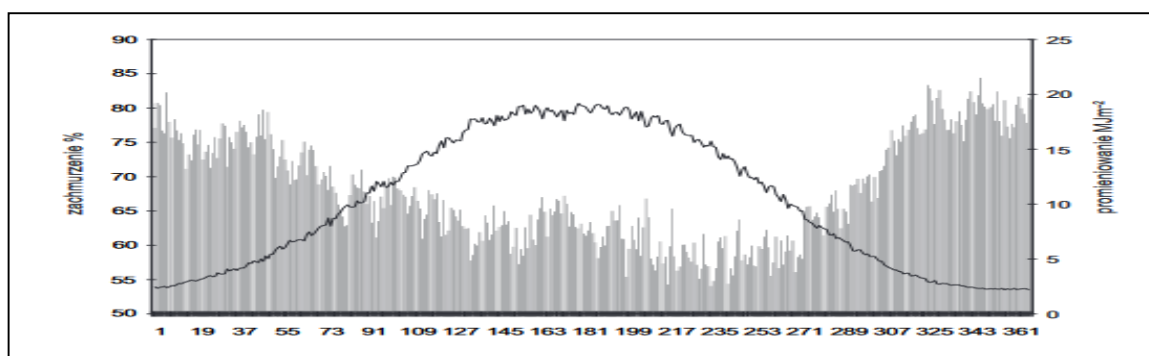
W Polsce, podobnie jak innych państwach, prowadzony jest ciągły pomiar natężenia promieniowania ultrafioletowego przez dwa centralne ośrodki badawcze [33]:

1. *Centralne Obserwatorium Geofizyczne Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk*, gdzie od 1975 r. jest rejestrowane biologicznie czynne ultrafioletowe promieniowanie słoneczne, za pomocą aparatury o czułości widmowej zbliżonej do czułości erytemalnej, odpowiadającej tworzeniu rumienia skóry człowieka.

2. *Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Hydrosfery i Atmosfery*, rejestrujący poziom UVB w Polsce, od połowy 1993 r. Z opublikowanych raportów wynika, że w 2015 r. najwyższą wartość indeksu UVI = 9.5, zarejestrowano w lipcu w Zakopanem.

1.2.4. Czas naświetlania skóry człowieka

Całkowite promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię Ziemi jest sumą promieniowania przychodzącego od Słońca oraz promieniowania rozproszonego dochodzącego od całego nieboskłonu. Obserwowane na niebie zachmurzenie może się składać z chmur jednego rodzaju lub kilku rodzajów tworzących pewne układy i typy charakterystyczne dla sytuacji synoptycznej [36]. Wpływ zachmurzenia na całkowite promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi jest doskonale widoczny w rozkładzie sum dziennych promieniowania w ciągu roku, co pokazano na Rys. 8.

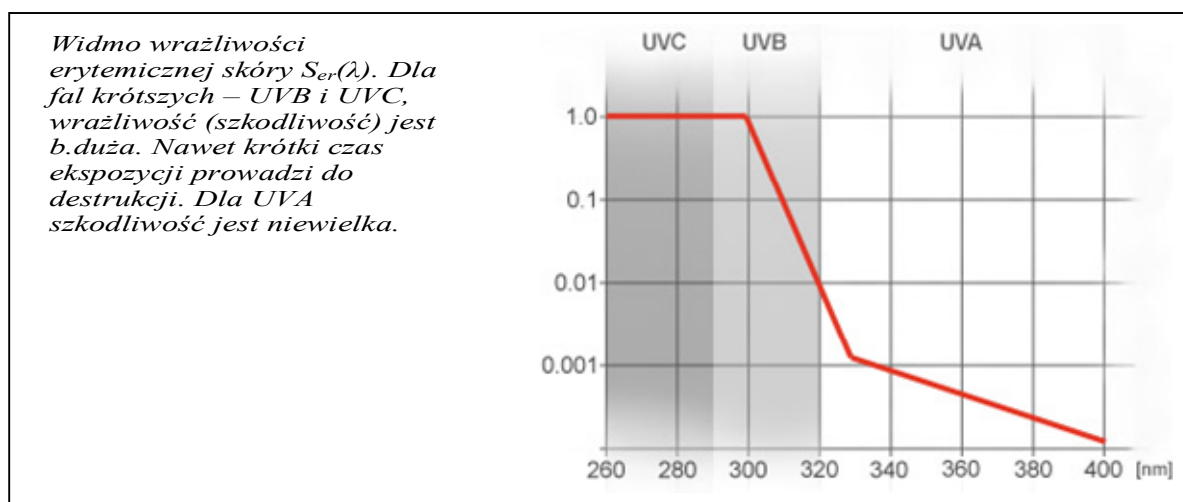


Rys. 8. Wpływ zachmurzenia na całkowite promieniowanie słoneczne dochodzące do Ziemi

Fig. 8. The influence of cloud cover on the total solar radiation reaching the Earth
Podczas naświetlania skóry człowieka promieniowaniem słonecznym, pasmo UVA nie powoduje widocznych i bolących oparzeń, ale przyczynia się do przyspieszenia procesu starzenia się skóry. Pasma UVB, poza negatywnym wpływem na zdrowie, jest dla ludzkiego

organizmu bardzo ważne, gdyż odpowiada za syntezę w skórze witaminy D₃, do której wyprodukowania, w słoneczny letni dzień, zalecanej dziennej dawki witaminy D₃, wystarczy zaledwie kilkanaście minut ekspozycji na promieniowanie UV.

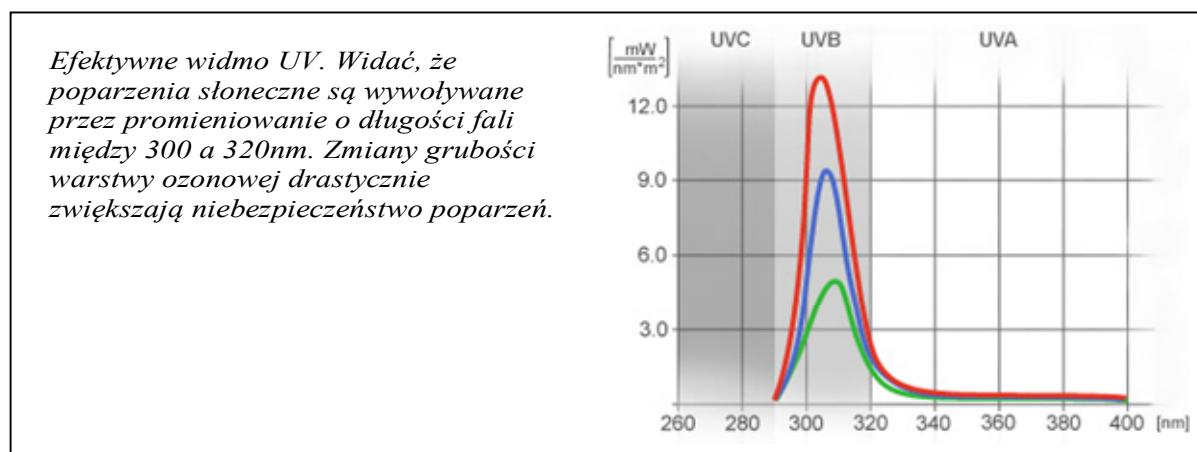
Czułość skóry człowieka na działanie promieni UV, czyli wrażliwość erytemiczna, bardzo silnie zależy od długości fali, a nie tylko od czasu naświetlania. Objawem zbyt dużej dawki jest zaczerwienienie lub oparzenie skóry [24-27], co pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Widmo wrażliwości erytemicznej skóry $S_{er}(\lambda)$

Fig. 9. Erythemic skin sensitivity spectrum $S_{er}(\lambda)$

Efektywne widmo UV jest iloczynem widma wrażliwości erytemicznej skóry i widma promieniowania UV pochodzącego ze Słońca [24], które pokazuje w jakim stopniu efekt poparzenia skóry zależy od długości fali UV, co pokazano na Rys. 10.



Rys. 10. Efektywne widmo UV - iloczyn widma wrażliwości erytemicznej skóry i widma UV

Fig. 10. Effective UV spectrum - the product of the skin erythema sensitivity spectrum and the UV spectrum

2. Metoda określenia czasu oraz dawek naświetlania skóry człowieka, w zależności od natężenia promieniowania UV

Jak napisano we wstępie tego artykułu, jego celem jest przedstawienie metody obliczania czasów oraz dawek naświetlania skóry ludzkiej, na podstawie pomiarów natężenia promieniowania ultrafioletowego UV. Podstawą tej metody jest wyprowadzenie, na podstawie przyjętych założeń, wzorów obliczeniowych czasu naświetlania $T_{Naśw} = f(UV)$ oraz dawek naświetlania $D = f(UV)$, zależnych od natężenia promieniowania ultrafioletowego UV.

2.1. Wyprowadzenie wzoru ogólnego czasu naświetlania skóry człowieka $T_{Naśw}=f(UV)$, w zależności od natężenia promieniowania UV

Na czas naświetlania skóry człowieka wpływ mają grupy rodzajów skóry, tzw. fototypy. Główne fototypy występujące w Polsce, wraz z czasem naświetlania, to: (1) celtycki - 10 min., (2) północnoeuropejski - od 10 do 20 min., (3) środkowoeuropejski - od 20 do 30 min., (4) południowoeuropejski - pow. 30 min. Podstawą do wyznaczenia wzoru ogólnego czasu naświetlania $T_{Naśw}=f(UV)$ skóry człowieka jest opinia specjalistów z helioterapii, którzy zalecają, aby latem odsłaniać, pomiędzy godziną 11:00 a godziną 13:00, swoje ciało średnio do 30 minut w fototypie środkowoeuropejskim [34,37]. Niestety w tych artykułach nie określono, jakie powinno być natężenie UVI podczas 30 minutowego naświetlania, aby nie przekroczyć dopuszczalnych dawek naświetleń. Jak wcześniej wspomniano, z opublikowanych raportów Warszawskiego Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej [33], w lipcu roku 2015, najwyższą wartość indeksu UVI zarejestrowano w Zakopanem na poziomie 9.5 UVI. W celu realizacji metody obliczeniowej w zakresie obliczania czasu oraz dawek naświetlania, w zależności od natężenia UVI, przyjęto dodatkowe poniższe założenie:

Odsłanianie ludzkiego ciała, średnio do 30 minut, ma miejsce w okresie, kiedy pomiar maksymalnego natężenie promieniowania ultrafioletowego wykonano w połowie roku, w dniu przesilenia letniego, w słoneczne południe wynosi 10 UVI.

2.1.1. Fototypy oraz modele naświetleń

Na podstawie powyższych informacji i mojego powyższego założenia, dla głównych fototypów występujących w Polsce wynika, że dla dwóch skrajnych poziomów indeksu UVI,

tj. UVI=10 oraz UVI=1, Maksymalne Dawki Naświetlenia MDN w jednostkach Im (Indekso-minuty; 1Im = 1UVI x 1 min.), pomiędzy godziną 11:00 a godziną 13:00:

- dla fototypu północnoeuropejskiego: w ciągu 20 minut, **MDN₂₀** wynoszą:

1. dla indeksu UVI=10, to: $MDN_{20} = 10 \text{ UVI} \times 20 \text{ min} = 200 \text{ Im}$
 2. dla indeksu UVI=1, to: $MDN_{20} = 1 \text{ UVI} \times 200 \text{ min} = 200 \text{ Im}$
- Zatem, zakłada się, że **MDN₂₀** jest dawką stałą, wynoszącą **200 Im**

- dla fototypu środkowoeuropejskiego: w ciągu 30 minut, **MDN₃₀** wynoszą:

1. dla indeksu UVI=10, to: $MDN_{30} = 10 \text{ UVI} \times 30 \text{ min} = 300 \text{ Im}$
 2. dla indeksu UVI=1, to: $MDN_{30} = 1 \text{ UVI} \times 300 \text{ min} = 300 \text{ Im}$
- Zatem, zakłada się, że **MDN₃₀** jest dawką stałą, wynoszącą **300 Im**

- dla fototypu południowoeuropejskiego: w ciągu 40 minut, **MDN₄₀** wynoszą:

1. dla indeksu UVI=10, to: $MDN_{40} = 10 \text{ UVI} \times 40 \text{ min} = 400 \text{ Im}$
 2. dla indeksu UVI=1, to: $MDN_{40} = 1 \text{ UVI} \times 400 \text{ min} = 400 \text{ Im}$
- Zatem, zakłada się, że **MDN₄₀** jest dawką stałą, wynoszącą **400 Im**

Na podstawie powyższych danych mamy dwa punkty referencyjne (dla UV=1 i UV=10), które służą do wyznaczenia parametrów funkcji czasów naświetlania $T_{naśw}=f(UV)$ dla różnych fototypów oraz różnych modeli naświetleń. Mamy następujące modele: 1. Liniowy, 2. Ekspozycyjno-dawkowe (MED / SED), 3. Modele odwrotnie proporcjonalne, 4. Krzywe logarytmiczno-wykładnicze.

ad1) Model liniowy - oparty na dwóch punktach referencyjnych (dla indeksów UV=1 i UV=10), co daje prostą, czytelną zależność. Takie modele są stosowane m.in. w systemach UV - tj.: monitoringowych, aplikacjach pogodowych oraz systemach ostrzegania przed nadmiernym promieniowaniem UV (np. WHO UV Index Guidelines czy EPA UV Alert). Model liniowy jest dobrym przybliżeniem w zakresie umiarkowanych indeksów i dla populacji ogólnej. Czas naświetlania opisuje funkcja liniowa:

$$T_{Naśw} = f(UV) = y(x) = -ax + b \quad (5)$$

która określa zależność czasu naświetlania ciała ludzkiego (w minutach) od aktualnego natężenia promieniowania UV. Jest to funkcja liniowa malejąca, co jest zgodne z logiką biologiczną i dermatologiczną (im wyższe UV, tym krótszy bezpieczny czas ekspozycji), która jest zgodna z podejściem stosowanym w modelowaniu prostych zależności "UV–czas".

Oprócz modelu liniowego istnieją bardziej złożone metody stosowane w profesjonalnej fotodermatologii i biofizyce medycznej, które nie zawsze zakładają liniowość zależności czasu naświetlania od natężenia UV. Stosuje się wtedy alternatywne modele, tj.: 2) Ekspozycyjno-dawkowe (MED/SED), 3) Modele odwrotnie proporcjonalne, 4) Krzywe logarytmiczno-wykładnicze. Poniżej omówiono szczegóły alternatywnych modeli.

ad2) Model Ekspozycyjno-Dawkowy MED (Minimal Erythema Dose)

W medycynie używa się jednostki MED, tj. ilość energii w $[J/m^2]$, która powoduje minimalny rumień na skórze po 24h od naświetlenia. Czas ekspozycji oblicza się ze wzoru:

$$T_{MED} = \frac{MED}{E_{eff}} \quad (6)$$

gdzie:

- E_{eff} - efektywna moc napromieniania (W/m^2), uwzględniająca widmową skuteczność rumieniotwórczą.

Wtedy zamiast natężenia UV, jako indeksu, używa się rzeczywistej mocy promieniowania w danej lokalizacji i godzinie.

ad3) Modele odwrotnie proporcjonalne.

Czas ekspozycji jest odwrotnie proporcjonalny do aktualnego UV, co daje bardziej dynamiczną zmianę przy wysokich UV, gdzie linearność może zaniżać ryzyko rumienia.

$$T = \frac{k}{UV} \quad (7)$$

gdzie k - to stała zależna od fototypu i progu bezpieczeństwa (np. przyjętego MED/ SED) - Maksymalna Dawka Naświetlania MDN: dla fototypu północnoeuropejskiego **MDN₂₀**, dla fototypu środkowoeuropejskiego **MDN₃₀**, dla fototypu południowoeuropejskiego **MDN₄₀**. Mamy zatem, dla poszczególnych typów fototypów, następujące czasy naświetlania:

- dla fototypu północnoeuropejskiego: $T_{200} = f(UV) = MDN_{20} / UV = 200 / UV$,
- dla fototypu środkowoeuropejskiego: $T_{300} = f(UV) = MDN_{30} / UV = 300 / UV$,
- dla fototypu południowoeuropejskiego: $T_{400} = f(UV) = MDN_{40} / UV = 400 / UV$.

ad4) Modele logarytmiczno-wykładnicze

Modele *logarytmiczno-wykładnicze* są dokładniejsze przy poziomie $UV > 8$, gdzie linearność przestaje być wiarygodna. W badaniach dermatologicznych, czas reakcji skóry wykazuje wykładniczy spadek przy wzroście UV:

$$T = a \cdot e^{-b \cdot UV} \quad (8)$$

gdzie: a, b - są stałymi parametrami dopasowanymi dla danego fototypu.

W przypadku fototypu *środkowoeuropejskiego*, w celu obliczenia parametrów a i b dla indeksu $UVI=1$ oraz dla indeksu $UVI=10$, mamy: $T(UVI=1) = 300$ oraz $T(UVI=10) = 30$,

zatem mamy układ równań:

$$\begin{cases} 300 = a \cdot e^{-b \cdot 1} \\ 30 = a \cdot e^{-b \cdot 10} \end{cases}$$

Dzielimy jedno równanie przez drugie i otrzymujemy:

$$\frac{300}{30} = \frac{e^{-b \cdot 1}}{e^{-b \cdot 10}}$$

Po rozwiązaniu tego równania otrzymujemy parametr b :

$$b = \frac{\ln 10}{9} \approx 0.2558$$

Podstawiamy parametr b do 1

$$300 = a \cdot e^{-0.2558}$$

i otrzymujemy parametr a :

$$a = \frac{300}{e^{-0.2558}} \approx 387.24$$

Ostatecznie, dla modelu logarytmiczno-wykładniczy oraz dla fototypu *środkowoeuropejskiego* wyprowadzony jest wzór:

$$T(UV) = 387.24 \cdot e^{-0.2558 \cdot UV} \quad (9)$$

W przypadku fototypu *północnoeuropejskiego*, po obliczeniu parametrów a i b dla indeksów $UVI=1$, $UVI=10$, mamy: $T(UVI=1) = 200$, $T(UVI=10) = 20$, zatem otrzymujemy wzór:

$$T(UV) = 258.16 \cdot e^{-0.2558 \cdot UV} \quad (10)$$

W przypadku fototypu *południowoeuropejskiego*, po obliczeniu parametrów a i b dla indeksów $UVI=1$, $UVI=10$ mamy: $T(UVI=1) = 400$, $T(UVI=10) = 40$, i otrzymujemy wzór:

$$T(UV) = 516.32 \cdot e^{-0.2558 \cdot UV} \quad (11)$$

Kiedy stosujemy model liniowy, a kiedy modele alternatywne?

- *Model liniowy* — dla indeksów $UV \leq 10$, populacji ogólnej, w aplikacjach pogodowych, systemach edukacyjnych, systemach ostrzegania.
- *Model odwrotny lub wykładniczy* — w fototerapii, przy UV-C, w dermatologii klinicznej, dla $UV > 10$, lub w przypadku precyzyjnych aplikacji medycznych.

2.1.2. Wyprowadzenie, dla modelu liniowego, wzoru szczegółowego funkcji liniowej

$$T_{Naśw} = f(UV)$$

Na podstawie powyższych informacji, dla modelu liniowego mamy dwa punkty referencyjne (dla $UV=1$ i $UV=10$), które służą do wyznaczenia parametrów funkcji liniowej:

$T_{Naśw} = f(UV) = y(x) = -ax + b$, tj. współczynnika kierunkowego a oraz parametru b dla trzech fototypów, tj.:

- dla fototypu środkowoeuropejskiego

dla czasu naświetlania 30 min.

$$y_1 = y(1) = 300 = -a \cdot 1 + b$$

$$y_{10} = y(10) = 30 = -a \cdot 10 + b$$

dla czasu naświetlania 60 min.

$$y_1 = y(1) = 600 = -a \cdot 1 + b$$

$$y_{10} = y(10) = 60 = -a \cdot 10 + b$$

Po rozwiązaniu powyższych układów równań, otrzymujemy:

współczynnik: $a=30$

parametr: $b=330$

współczynnik: $a=60$

parametr: $b=660$

zatem funkcje liniowe mają postać:

$$y(x) = -30 \cdot x + 330$$

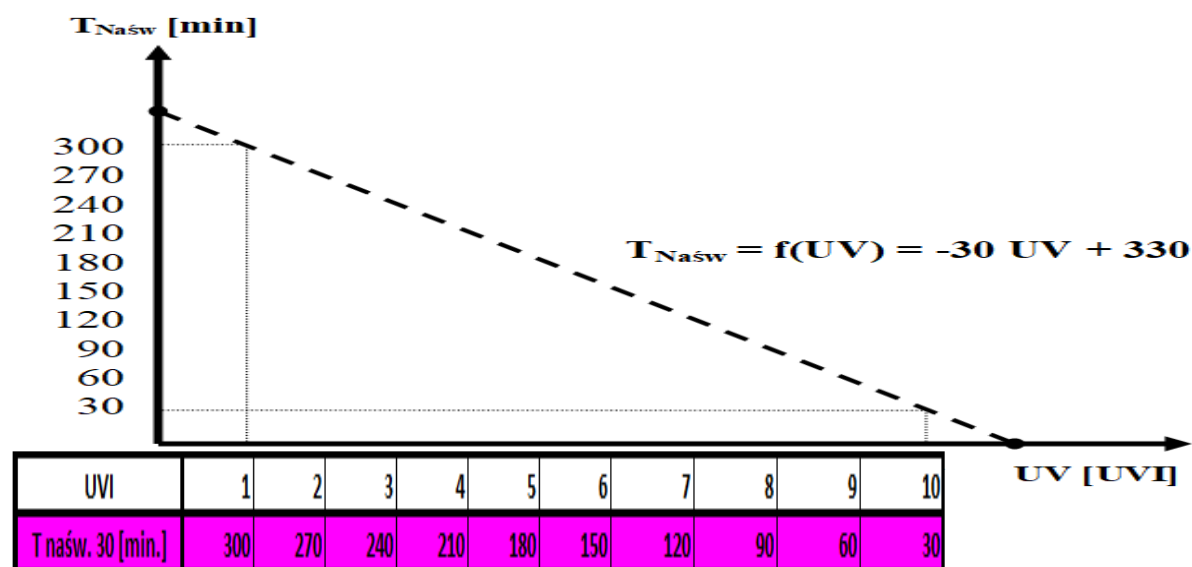
$$y(x) = -60 \cdot x + 660$$

Ostatecznie,

$$T_{Naśw. 30} = f(UV) = -30 \cdot UV + 330$$

$$T_{Naśw. 60} = f(UV) = -60 \cdot UV + 660 \quad (12)$$

Wykres tej funkcji $T_{\text{Naśw. 30}} = f(\text{UV})$ pokazano na poniższym Rys. 11.



Rys. 11. Funkcja $T_{\text{Naśw. 30}} = f(\text{UV})$ określająca zależność czasu naświetlania od natężenia promieniowania ultrafioletowego UV

Fig. 11. $T_{\text{Naśw. 30}} = f(\text{UV})$ function determining the dependence of exposure time on the intensity of ultraviolet UV radiation

Na powyższym rysunku, funkcja liniowa jest poprawna i sensowna w kontekście: aplikacji publicznych UV, monitoringu osobistego oraz systemów ostrzegania dla $\text{UVI}=1\div 10$.

- dla fototypu północnoeuropejskiego

$$y_1 = y(1) = 200 = -a * 1 + b$$

$$y_{10} = y(10) = 20 = -a * 10 + b$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań, otrzymujemy: współczynnik: $a=20$, parametr: $b=220$, zatem funkcja liniowa ma postać: $y(x) = -20 * x + 220$

Ostatecznie,

$$T_{\text{Naśw. 20}} = f(\text{UV}) = -20 * \text{UV} + 220 \quad (13)$$

- dla fototypu południowoeuropejskiego

$$y_1 = y(1) = 400 = -a * 1 + b$$

$$y_{10} = y(10) = 40 = -a * 10 + b$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań, otrzymujemy: współczynnik: $a=40$, parametr: $b=440$, zatem funkcja liniowa ma postać: $y(x) = -40 * x + 440$.

Ostatecznie,

$$T_{Naśw. 40} = f(UV) = -40 * UV + 440 \quad (14)$$

2.1.3. Wyprowadzenie wzoru ogólnego na obliczanie czasu naświetlania $T_{Naśw} = f(UV)$

Do wyprowadzenia wzoru ogólnego na obliczanie czasu naświetlania, posłużono się parametrem $M = \text{Max}(UV)$, czyli maksymalnym natężeniem promieniowania UV, w dniu przesilenia letniego. Mamy zatem wkład do układu dwóch równań, o następującej postaci:

- dla fototypu północnoeuropejskiego

$$\begin{cases} y_1 = y(x_1=1) = 200 = -a * 1 + b \\ y_{10} = y(x_{10}=M) = 20 = -a * M + b \end{cases}$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań, otrzymujemy: współczynnik: $a = 180/(M-1)$, parametr: $b = 200 + 180/(M-1)$, zatem:

$$T_{Naśw} = f(UV) = (1 - UV) * 180/(M-1) + 200$$

ostatecznie:

$$T_{Naśw. 20} = f(UV) = 200 - 180 * (UV - 1)/(M-1) \quad (15)$$

- dla fototypu środkowoeuropejskiego

$$\begin{cases} y_1 = y(x_1=1) = 300 = -a * 1 + b \\ y_{10} = y(x_{10}=M) = 30 = -a * M + b \end{cases}$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań, otrzymujemy: współczynnik: $a = 270/(M-1)$, parametr: $b = 300 + 270/(M-1)$, zatem: $T_{Naśw. 30} = f(UV) = (1 - UV) * 270/(M-1) + 300$

ostatecznie:

$$T_{Naśw. 30} = f(UV) = 300 - 270 * (UV - 1)/(M-1) \quad (16)$$

- dla fototypu południowoeuropejskiego

$$\begin{cases} y_1 = y(x_1=1) = 400 = -a * 1 + b \\ y_{10} = y(x_{10}=M) = 40 = -a * M + b \end{cases}$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań, otrzymujemy: współczynnik: $a = 360/(M-1)$, parametr: $b = 400 + 360/(M-1)$, zatem: $T_{Naśw. 40} = f(UV) = (1 - UV) * 360/(M-1) + 400$ zatem ostatecznie:

$$T_{Naśw. 40} = f(UV) = 400 - 360 * (UV - 1)/(M-1) \quad (17)$$

2.1.4. Wyprowadzenie wzoru, w wersji uogólnionej, na czas naświetlania $T_{Naśw} = f(UV)$, dla dowolnego fototypu

Na podstawie wzorów (15), (16), (17), mamy następujące parametry w funkcjach liniowych:

- **a** — współczynnik kierunkowy funkcji liniowej, wynoszący:
180 - dla fototypu północnoeuropejskiego,
270 - dla fototypu środkowoeuropejskiego,
360 - dla fototypu południowoeuropejskiego,
- **b** — wyraz wolny funkcji liniowej, wynoszący:
200 - dla fototypu północnoeuropejskiego,
300 - dla fototypu środkowoeuropejskiego,
400 - dla fototypu południowoeuropejskiego,
- **M** — maksymalne natężenia UV [UVI], w dniu przesilenia letniego, w słoneczne południe, **UV** — aktualny poziom natężenia UV.

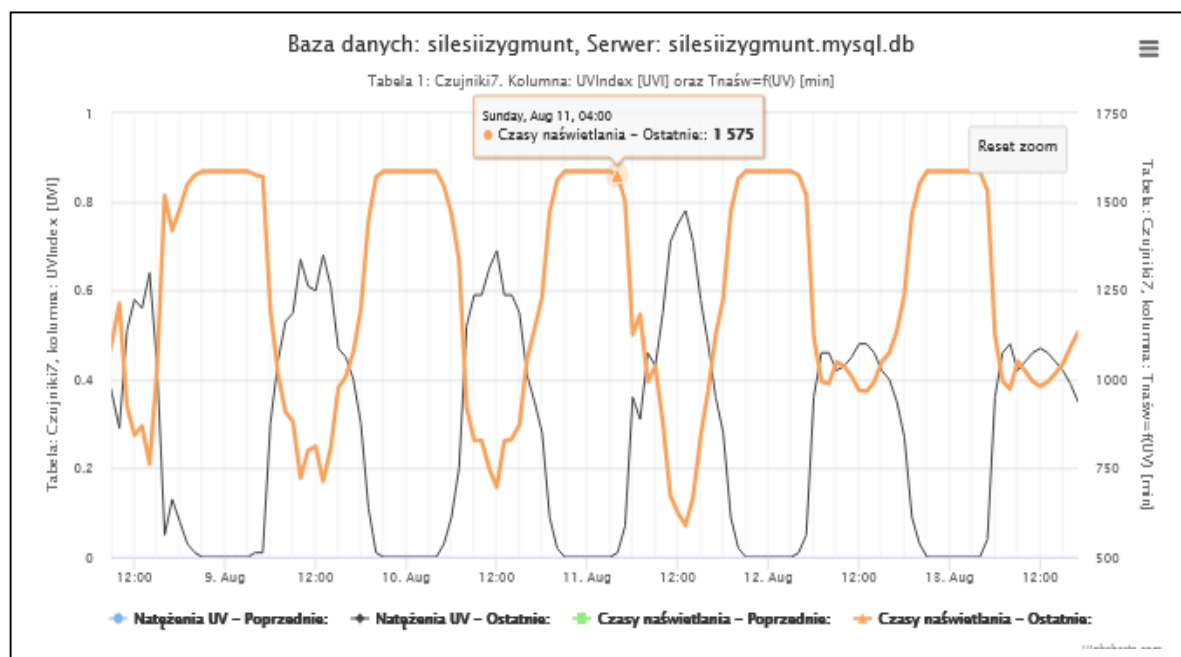
Ostatecznie mamy wzór na czas naświetlania $T_{Naśw} = f(UV) = T(UV)$, w wersji ogólnej, dla dowolnego fototypu:

$$T(UV) = b - a * \frac{(UV - 1)}{M - 1} \quad (18)$$

Korzystając z powyższego wzoru ogólnego (18), dla fototypu środkowoeuropejskiego mamy parametry $a=270$, $b=300$, zatem otrzymujemy wzór:

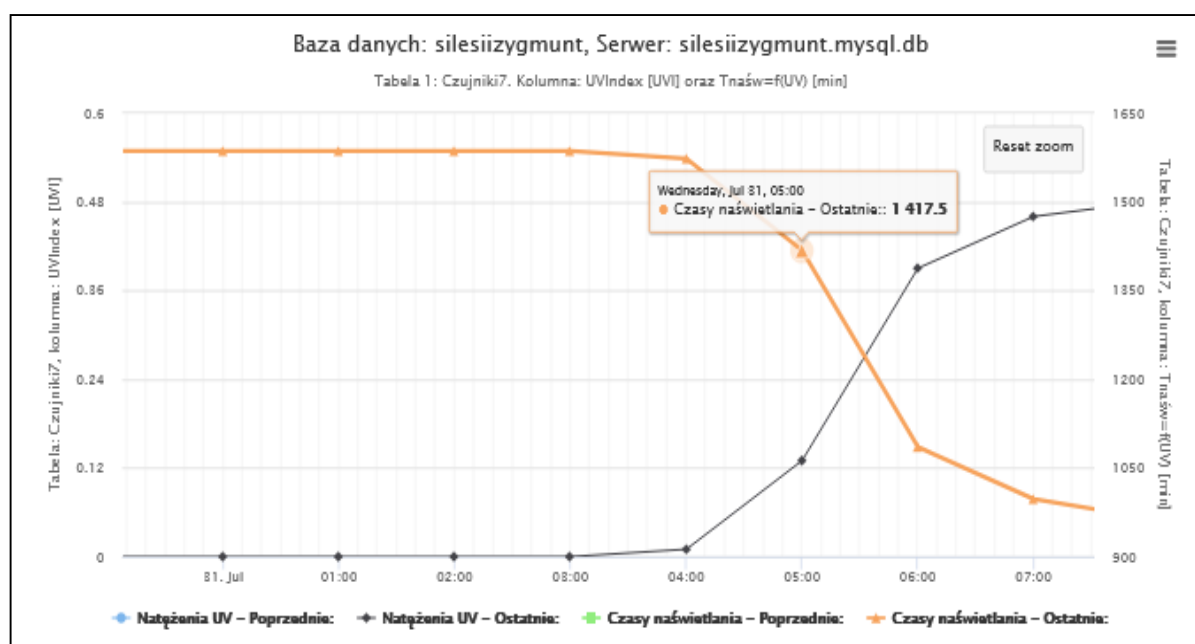
$$T_{Naśw.30} = f(UV) = T(UV) = b - a * (UV - 1)/(M-1) = 300 - 270 * (UV - 1)/(M-1) \quad (19)$$

Korzystając z powyższego wzoru $T_{Naśw.30}$, dla fototypu środkowoeuropejskiego, na podstawie pomiarów natężenia promieniowania UV, w czasie wyświetlania wykresu, w sposób dynamiczny obliczano, odpowiadający pomiarom natężenia UV, czas naświetlania skóry człowieka, co pokazano na poniższych rysunkach: Rys. 12, Rys. 13.



Rys. 12. Wykresy natężenia UV oraz czasów naświetlania z kilku dni

Fig. 12. Graphs of UV intensity and exposure times for several days



Rys. 13. Wykresy natężenia UV oraz czasów naświetlania ciała człowieka z kilku godzin

Fig. 13 Graphs of UV intensity and exposure times of the human body over several hours

2.2. Wyprowadzenie wzoru ogólnego na obliczanie dawki naświetlania skóry człowieka $D_I = f(UV)$, w zależności od natężenia promieniowania UV

2.2.1. Definicja dawki naświetlania, dla fototypu środkowoeuropejskiego, w zależności od natężenia promieniowania UV

Podstawą do wyprowadzenia wzoru ogólnego dla obliczania dawki naświetlania skóry człowieka, na podstawie indeksu promieniowania UV są:

A. Definicja dawki promieniowania UV:

$$\text{Dawka_UV} = \text{Moc_promieniowania_UV} \times \text{czas}$$

B. Ogólny wzór czasu naświetlania skóry człowieka:

B.1. Dla modelu liniowego, bez ograniczania dawek naświetlania:

$$T_{Naśw.30} = f(UV) = 300 - 270 \cdot (UV - 1) / (M - 1) \quad (20)$$

gdzie $M = \text{Max}(UV)$

B.2. Dla modelu odwrotnie proporcjonalnego, ograniczania dawek naświetlania do poziomu $MDN_{30} = 300 \text{ Im}$

$$T_{300} = f(UV) = MDN_{30} / UV = 300 / UV \quad (21)$$

B.3. Dla modelu wykładniczego:

$$T(UV) = 387.24 \cdot e^{-0.2558 \cdot UV} \quad (22)$$

Na podstawie powyższych wzorów naświetleń, wartości czasów naświetleń dla tych trzech modeli pokazano w tabeli porównawczej Tab. 2 oraz na wykresie przedstawionym na Rys. 14., którego opis jest następujący:

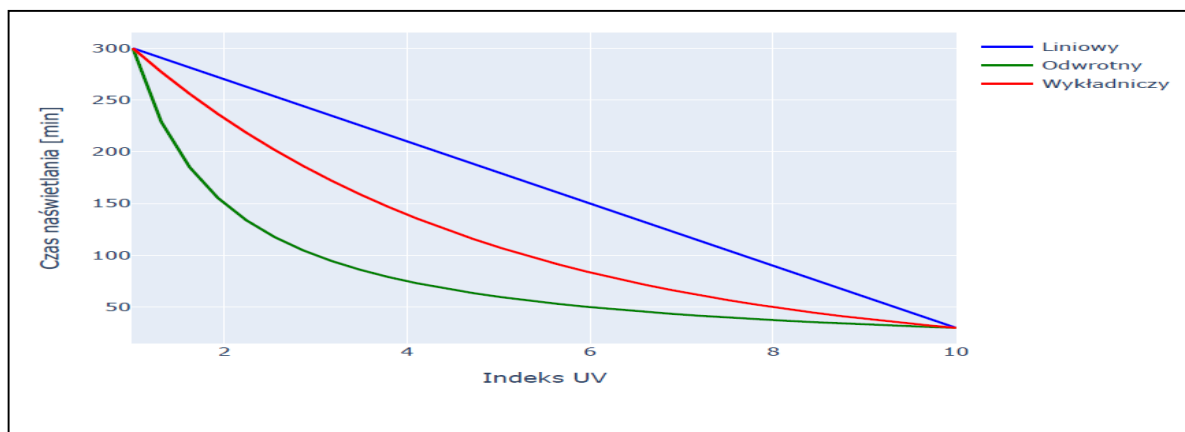
- Model liniowy — prosty spadek, szybki przy małych UV, zaniżający przy $UV > 7$,
- Model odwrotny — dynamiczny spadek przy małych UV, powolniejszy przy dużych,
- Model wykładniczy — bardzo realistyczny przebieg: szybki spadek na początku, łagodny przy UV 7–10.

W praktyce model wykładniczy najlepiej oddaje fizjologię skóry, bo czas bezpiecznego naświetlania maleje wykładniczo wraz ze wzrostem UV.

UV	Liniowy (min)	Odwrotny (min)	Wykładniczy (min)
1	300	300	300
2	270	150	231
3	240	100	178
4	210	75	137
5	180	60	106
6	150	50	82
7	120	42.86	63
8	90	37.5	48
9	60	33.33	37
10	30	30	30

Tab. 2. Wartości czasów naświetleń dla modeli: liniowego, odwrotnego i wykładniczego

Table 2. Exposure time values for linear, inverse and exponential models



Rys. 14. Czasy naświetleń dla modeli: liniowego, odwrotnego i wykładniczego

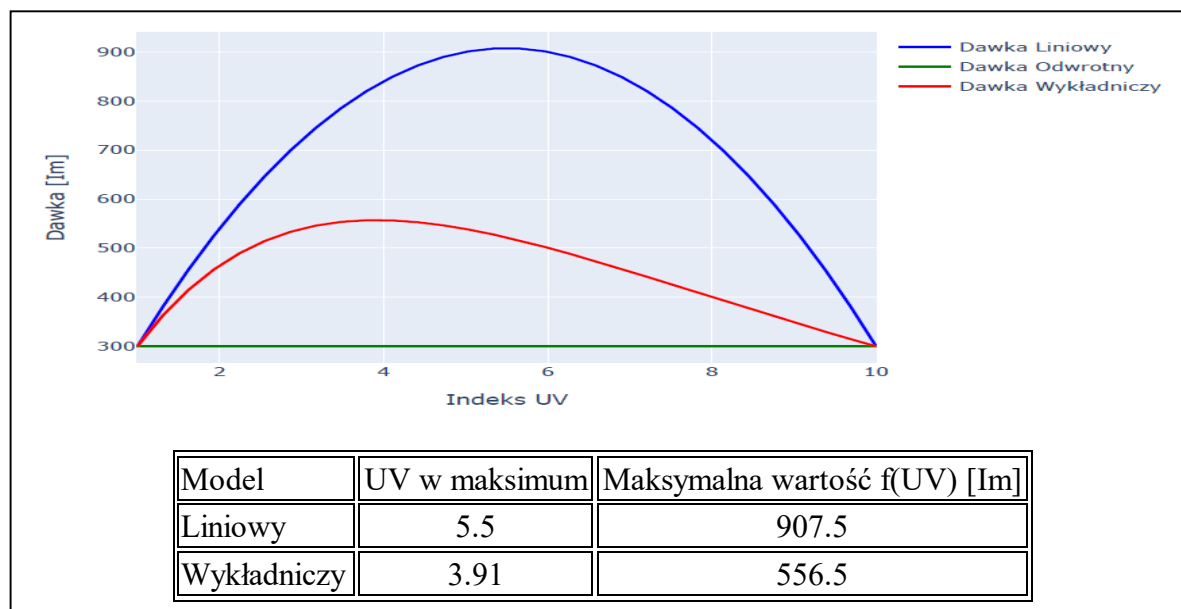
Fig. 14. Exposure times for linear, inverse and exponential models

Korzystając z powyższych wzorów, dla zakresu UVI od 1 do 10, możemy obliczyć wartości dawek naświetleń UV według wzoru: $Dawka_UV = UV * T_{Naśw}(UV)$.

Wtedy otrzymujemy poniższe wzory dawek naświetleń:

- dla modelu liniowego: $Dawka_UV_{Lin.} = UV * (a * UV + b) = a(UV)^2 + b$, którego wykresem jest parabola.
- dla modelu odwrotnie proporcjonalnego: $Dawka_UV_{Odw\ proporc.} = UV * k/UV = k$, którego wykres jest linią prostą,
- dla modelu wykładniczego: $Dawka_UV_{Wykl.} = UV * A * e^{-bUV}$. Jest to funkcja mająca maksimum przy pewnym UV , potem jest malejącą (co ma biologiczny sens, bo przy bardzo

dużym UV czas ekspozycji spada niemal do zera), której wykres przedstawiono na Rys. 15., pokazujący wykresy dawek naświetleń *UV* dla modelu liniowego (maksimum przy $UVI \approx 5-6$), odwrotnie proporcjonalnego (stała wartość 300 Im) i wykładniczego (maksimum przy $UVI \approx 3.3$) dla fototypu środkowoeuropejskiego ($MDN_{30} = 300 \text{ Im}$).



Rys. 15. Wykresy dawek naświetleń dla fototypu środkowoeuropejskiego ($MDN_{30} = 300 \text{ Im}$)

Fig. 15. Exposure dose charts for the Central European phototype ($MDN_{30} = 300 \text{ Im}$)

Na poniższym wykresie Rys. 16., przedstawiono teoretyczne poziomy dawek naświetlania skóry człowieka: **Dawka MDN30** oraz **Dawka D300**:

1. Dla modelu liniowego, bez ograniczania dawek naświetlania - $T_{\text{naśw.30}}$ - kreujący wykres Dawka MDN30, o teoretycznej wartości maksymalnej 900 Im.
2. Dla modelu odwrotnie proporcjonalnego, ograniczania dawek naświetlania - T_{300} - kreujący wykres Dawka D300

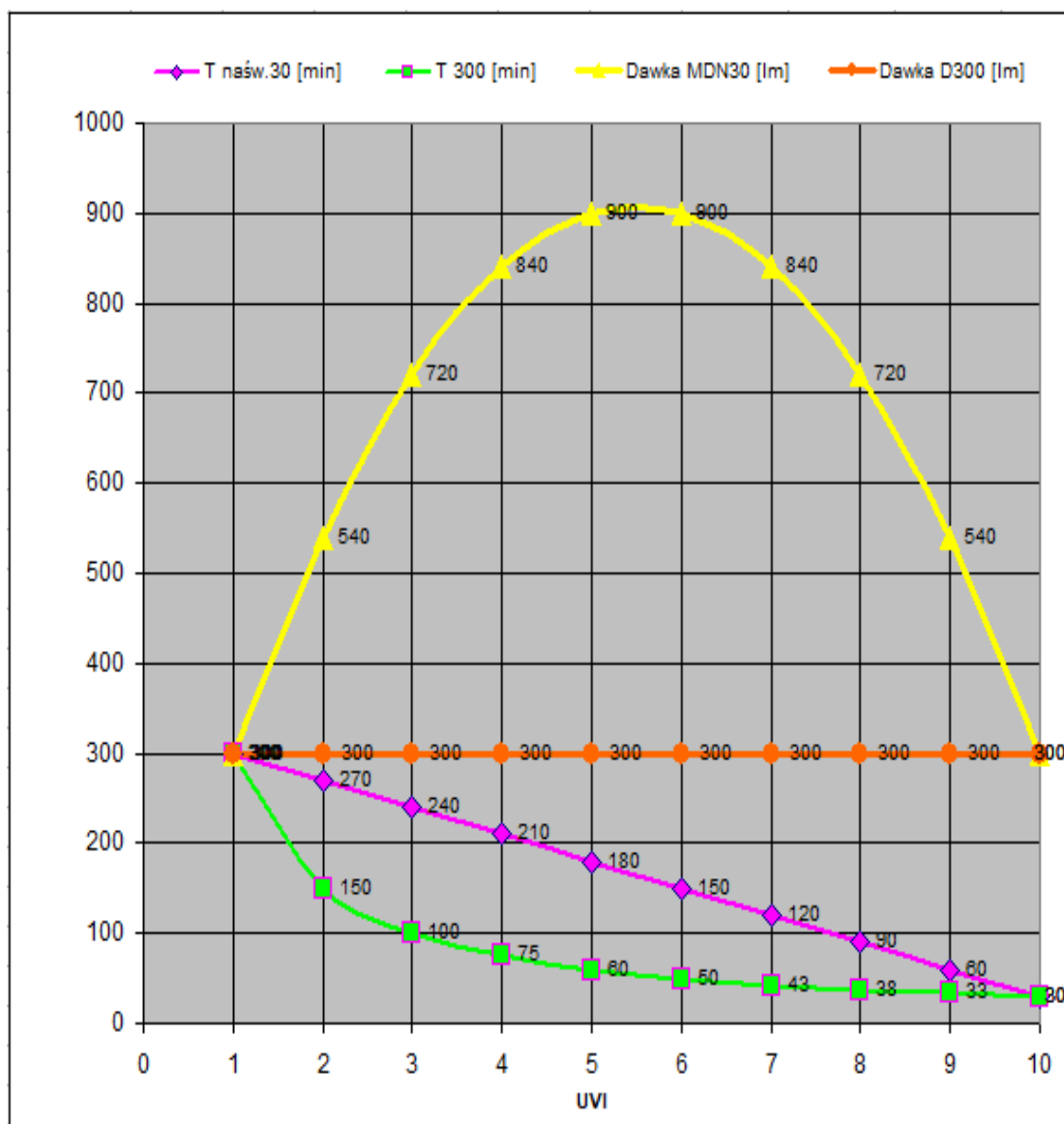
W przypadku modelu liniowego, dla czasu naświetlania $T_{\text{Naśw. 30 [min.]}}$, określonego wzorem:

$$T_{\text{Naśw. 30}} = f(UVI) = -30 * UVI + 330 \quad (23)$$

dawki naświetlania, obliczone w trzecim wierszu (żółty) poniższej tabelki, pokazane są na wykresie, w postaci paraboli, jako **Dawka MDN30 [Im]**, o teoretycznej maksymalnej wartości **900 Im**.

W przypadku modelu odwrotnie proporcjonalnego, dla czasu naświetlania **T 300**, dawki naświetlania, obliczone w czwartym wierszu (brązowy) poniższej tabelki, pokazane są na wykresie, w postaci brązowej linii prostej, jako **Dawka D300 [Im]**.

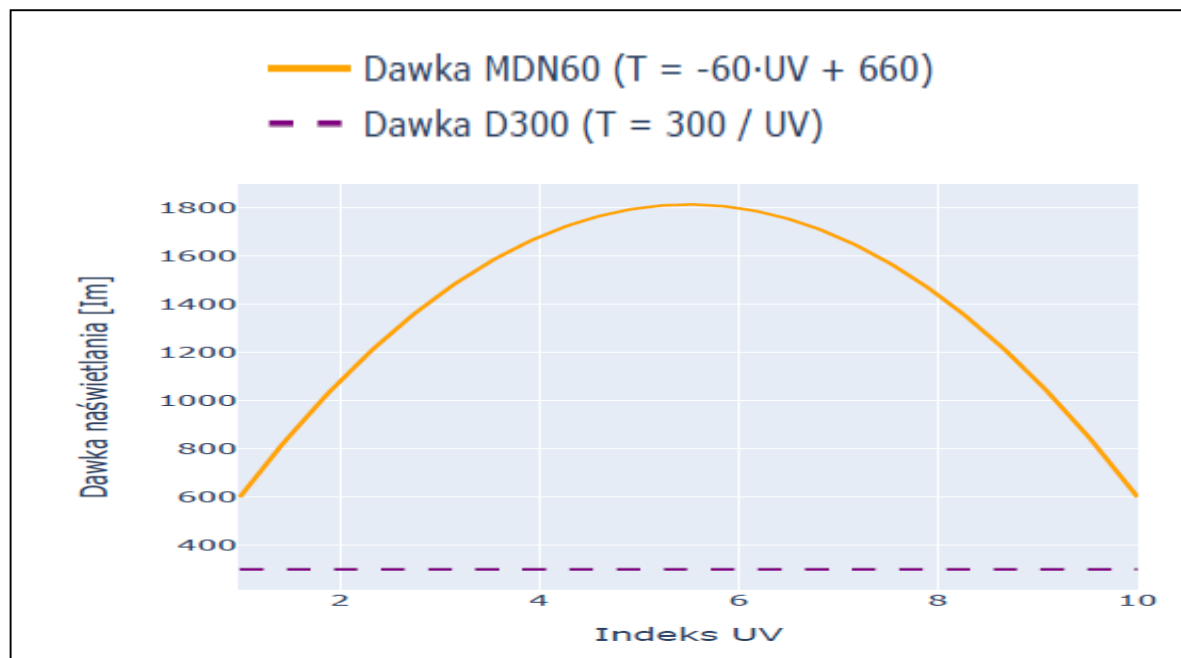
UVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T naśw. 30 [min.]	300	270	240	210	180	150	120	90	60	30
Dawka MDN30 [Im]	300	540	720	840	900	900	840	720	540	300
T 300 [min]	300	150	100	75	60	50	43	38	33	30
Dawka D300 [Im]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300



Rys. 16. Teoretyczne poziomy dawek naświetlania skóry człowieka: Dawka MDN30 oraz Dawka D300 wraz z ogólnymi wykresami czasu naświetlania skóry człowieka.

Fig. 16. Theoretical dose levels for human skin irradiation: Dose MDN30 and Dose D300, along with general graphs of human skin irradiation time.

Poniżej, na Rys. 17., przedstawiono symulację dawek naświetlenia skóry **Dawka MDN60** i **Dawka D300** dla modelu liniowego i odwrotnie proporcjonalnego:



Rys. 17. Dawki naświetlenia skóry dla modelu liniowego i odwrotnie proporcjonalnego

Fig. 17. Skin exposure doses for the linear and inversely proportional models.

Z kolei, na wykresie pokazanym na Rys. 18., przedstawiono teoretyczne poziomy dawek naświetlania skóry człowieka: **Dawka MDN60** oraz **Dawka D300**.

1. dla modelu liniowego bez ograniczania dawek naświetlania - T naśw.60 - kreujący wykres Dawka MDN60, o teoretycznej wartości maksymalnej 1800 Im.
2. dla modelu odwrotnie proporcjonalnego, ograniczania dawek naświetlania - T 300 - kreujący wykres Dawka D300

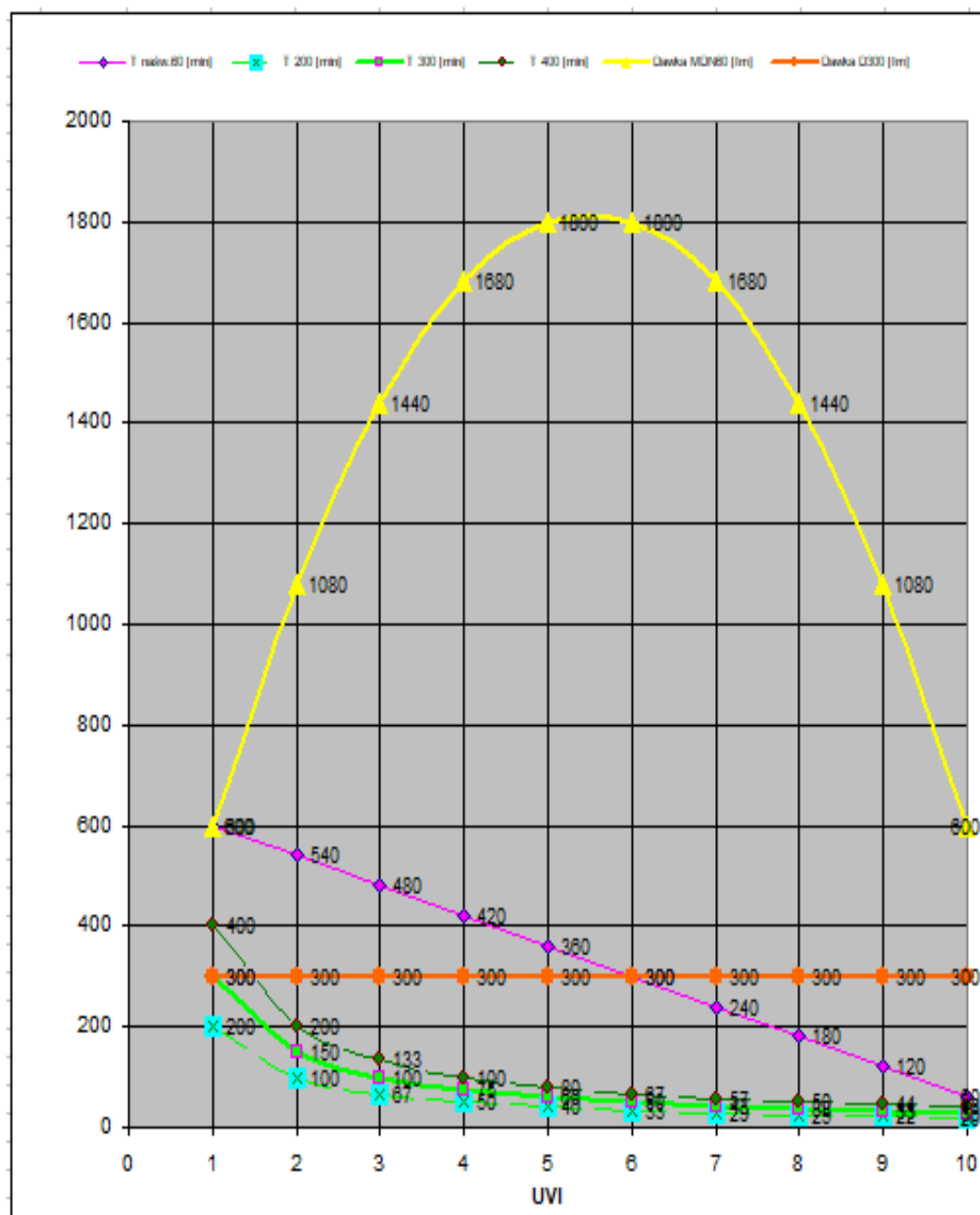
W przypadku modelu liniowego, dla czasu naświetlania $T_{Naśw. 60 [min]}$, określonego wzorem:

$$T_{Naśw. 60} = f(UVI) = -60 * UVI + 660 \quad (24)$$

dawki naświetlania, obliczone w trzecim wierszu (żółty) poniższej tabelki, pokazane są na wykresie jako **Dawka MDN60 [Im]**, o teoretycznej wartości maksymalnej 1800 Im.

W przypadku modelu odwrotnie proporcjonalnego, dla czasu naświetlania **T 300**, dawki naświetlania, obliczone w czwartym wierszu poniższej tabelki (brązowy), w postaci brązowej linii prostej, jako **Dawka D300 [Im]**.

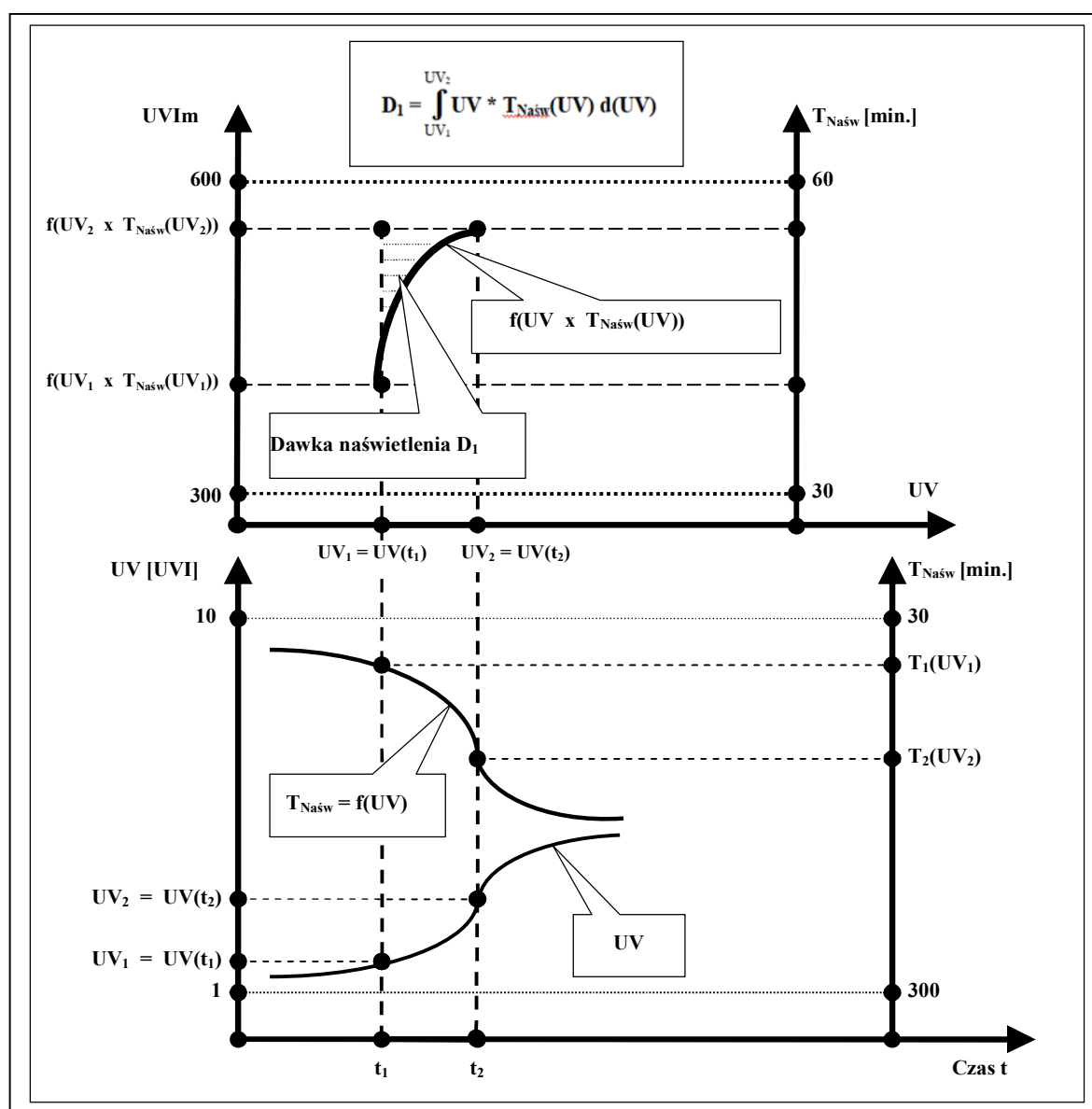
fototyp śródktowoeuropejski										
UVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T naśw. 60 [min.]	600	540	480	420	360	300	240	180	120	60
Dawka MDN60 [Jm]	600	1080	1440	1680	1800	1800	1680	1440	1080	600
T 300 [min.]	300	150	100	75	60	50	43	38	33	30
Dawka D300 [Jm]	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300



Rys. 18. Teoretyczne poziomy dawek naświetlania skóry człowieka: Dawka MDN60 oraz Dawka D300 wraz z ogólnymi wykresami czasu naświetlania skóry człowieka.

Fig. 18. Theoretical dose levels for human skin irradiation: Dose MDN60 and Dose D300 along with general graphs of human skin irradiation time.

Na podstawie Rys. 9 oraz Rys. 10., które wyjaśniają efektywne widmo UV, będące iloczynem widma wrażliwości erytemicznej skóry i widma UV pochodzącego ze Słońca, w podobny sposób opisano wykres funkcji: $f(UV, T_{Naśw}(UV)) = f(UV \times T_{Naśw}(UV)) = UV \times T_{Naśw}(UV)$, będącej iloczynem indeksu UV i zależnym od niego czasu naświetlania. W fizyce i fotobiologii, iloczyn natężenia promieniowania UV i czasu naświetlania daje dawkę energii, a więc wykres tej funkcji ma sens fizyczny i biologiczny. Taka metoda wykorzystywana jest w dermatologii i badaniach nad ochroną przeciwsłoneczną do oceny ekspozycji skóry. Wykres funkcji $f(UV \times T_{Naśw}(UV))$ pokazano w górnej części poniższego Rys. 19.

Rys. 19. Dawka naświetlania D_1 skóry człowiekaFig. 19. Irradiation dose D_1 of human skin

C. Definicja dawki D_1 naświetlania skóry człowieka promieniowniem UV:

Na podstawie powyższych informacji, czyli: *definicji dawki promieniownia, ogólnego wzoru czasu naświetlania, ogólnej funkcji $f(UV, T_{Naśw})$* oraz informacji zawartych na Rys.19, w zależności od indeksu promieniowania UV, dawka D_1 naświetlania skóry człowieka jest równa obszarowi pod wykresem funkcji $f(UV, T_{Naśw}(UV)) = UV \times T_{Naśw}(UV)$, od punktu $UV_1 = UV_1(t_1)$ do punktu $UV_2 = UV_2(t_2)$. Tak więc, definicja dawki naświetlania D_1 skóry człowieka jest następująca:

$$D_1 = \int_{UV_1}^{UV_2} UV * T_{Naśw}(UV) d(UV) \quad (25)$$

C.1. Wyprowadzenie wzoru ogólnego na obliczanie dawki naświetlania $D_1 = f(UV)$ skóry człowieka, na podstawie wzoru na czas naświetlania $T(UV)$ w wersji ogólnej, dla modelu liniowego oraz dowolnego fototypu

Po przesunięciu układu współrzędnych do punktu (1), mamy $t_1=0$, $UV_1(t_1) = 0$ oraz korzystając z wcześniej wyznaczonego wzoru (18) na czas naświetlania $T(UV)$ dla dowolnych fototypów, otrzymujemy zmodyfikowaną definicję dawki naświetlania D_1 :

$$D_1 = \int_0^{UV_2} UV \cdot T(UV) dUV \quad (26)$$

Podstawiając do powyższego wzoru ogólnego na dawkę D_1 wyznaczony wcześniej ogólny wzór na czas naświetlania $T(UV)$ dla dowolnych fototypów mamy:

$$D_1 = \int_0^{UV_2} UV \left(b - a \cdot \frac{(UV - 1)}{M - 1} \right) dUV \quad (27)$$

Po rozwinięciu powyższego wzoru otrzymujemy:

$$b \int_0^{UV_2} UV dUV - a \cdot \frac{1}{M - 1} \int_0^{UV_2} UV (UV - 1) dUV \quad (28)$$

W powyższym wzorze (28) są 3 całki. Poniżej pokazano wyniki obliczeń każdej z nich:

$$\begin{aligned}
 \int UV \, dUV &= \frac{UV^2}{2} \\
 \int UV^2 \, dUV &= \frac{UV^3}{3} \\
 \int UV \, dUV &= \frac{UV^2}{2}
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Podstawiając powyżej obliczone całki (29) do powyższego wzoru (28), mamy uogólniony wzór na dawkę D_1 , dla modelu liniowego oraz dowolnego fototypu:

$$D_1 = b \cdot \frac{UV_2^2}{2} - a \cdot \frac{1}{M-1} \left(\frac{UV_2^3}{3} - \frac{UV_2^2}{2} \right)
 \tag{30}$$

C.2. Wyznaczenie wzoru dawki naświetlania, dla fototypu środkowoeuropejskiego:

C.2.1. Bez ograniczania dawek naświetlania:

Na podstawie powyższego wyprowadzonego uogólnionego wzoru (30) na dawkę D_1 , dla modelu liniowego, dowolnego fototypu oraz uogólnionego wzoru (18) czasu naświetlania $T(UV)$ oraz korzystając z parametrów dla fototypu środkowoeuropejskiego, tj.:

$a = 270$, $b = 300$, M - dowolne (np.10), otrzymujemy poniższy wzór na dawkę D_1 ,

$$D_1 = (150 + 135/(M-1)) \cdot (UV_2)^2 - 90/(M-1) \cdot (UV_2)^3
 \tag{31}$$

gdzie czas naświetlania określony jest wzorem: $T_{Naśw.30} = 300 - 270 \cdot (UV - 1)/(M-1)$

C.2.2. Ograniczanie dawek naświetlania do poziomu: $MDN_{30} = 300 \text{ Im}$, używając poniższego wzoru (32) dla modelu odwrotnie proporcjonalnego, uzyskujemy wzór (33):

$$T_{300} = f(UV) = MDN_{30} / UV = 300 / UV
 \tag{32}$$

$$D_2 = \int_{UV_1}^{UV_2} UV \cdot T_{300} f(UV) \, d(UV) = 300 \cdot UV_2
 \tag{33}$$

C.3. Wyprowadzenie wzoru ogólnego na obliczanie dawki naświetlania $D_3 = f(UV)$ skóry człowieka, dla modelu wykładniczego oraz dowolnego fototypu

Korzystając z definicji dawki naświetlania skóry człowieka, tj. ze wzoru (25):

$$D = \int_{UV_1}^{UV_2} UV \times T_{\text{naśw}}(UV) dUV \quad (34)$$

oraz ze wzoru (8) na czas naświetlania $T(UV)$ dla modelu wykładniczego, dla dowolnych fototypów, tj.:

$$T_{\text{naśw}}(UV) = a \cdot e^{-b \cdot UV} \quad (35)$$

gdzie: a , b - są stałymi parametrami dopasowanymi dla danego fototypu, otrzymujemy zmodyfikowaną definicję dawki naświetlania D_I :

$$D = \int_{UV_1}^{UV_2} UV \times a \cdot e^{-b \cdot UV} dUV \quad (36)$$

czyli:

$$D = a \int_{UV_1}^{UV_2} UV \cdot e^{-b \cdot UV} dUV \quad (37)$$

Aby obliczyć tę całkę, należy skorzystać ze wzoru na całkowanie przez części, czyli:

$$\int u dv = uv - \int v du \quad (38)$$

W związku z tym, mamy:

$$\begin{array}{ll} \bullet u = UV & \text{wtedy} \bullet du = dUV \\ \bullet dv = e^{-bUV} dUV & \bullet v = \frac{-1}{b} e^{-bUV} \end{array}$$

Podstawiamy do wzoru całkowania przez części i otrzymujemy:

$$D = a \left[UV \cdot \frac{-1}{b} e^{-bUV} \Big|_{UV_1}^{UV_2} - \int_{UV_1}^{UV_2} \frac{-1}{b} e^{-bUV} dUV \right] \quad (39)$$

Przy obliczaniu drugiej całki, otrzymujemy:

$$\int e^{-bUV} dUV = \frac{-1}{b} e^{-bUV} \quad (40)$$

Podstawiając ją do powyższego wzoru otrzymujemy:

$$\begin{aligned} D &= a \left[\frac{-UV}{b} e^{-bUV} \Big|_{UV_1}^{UV_2} - \frac{-1}{b} \cdot \frac{1}{b} e^{-bUV} \Big|_{UV_1}^{UV_2} \right] \\ &= \frac{a}{b} \left[(-UV \cdot e^{-bUV}) \Big|_{UV_1}^{UV_2} + \frac{1}{b} (e^{-bUV}) \Big|_{UV_1}^{UV_2} \right] \end{aligned} \quad (41)$$

Upraszczając, mamy:

$$= \frac{a}{b} \left[(-UV_2 \cdot e^{-bUV_2} + UV_1 \cdot e^{-bUV_1}) + \frac{1}{b} (e^{-bUV_2} - e^{-bUV_1}) \right]$$

Po przesunięciu układu współrzędnych na Rys. 19 do punktu (1), mamy $t_1=0$, $UV_1(t_1) = 0$.

Zatem końcowy wzór na dawkę naświetlnia D_3 , dla modelu wykładniczego oraz dla dowolnych fototypów jest następujący:

$$D_3 = \frac{a}{b^2} [(1 - b \cdot UV_2) \cdot e^{-bUV_2} - 1] \quad (42)$$

C.4. Zastosowanie modeli dawek UV

1. Model liniowy:

- w zastosowaniach przemysłowych i laboratoryjnych, gdzie zakres UV jest ograniczony (np. $UV = 1-6$)
- w aplikacjach wewnętrznych, np. monitorowanie dawek UV-C do dezynfekcji
- w niektórych systemach prognozowania UV w miastach, gdzie dopuszcza się liniowe uproszczenia

2. Model odwrotny (hiperboliczny):

- w sytuacjach, gdzie czas naświetlania maleje proporcjonalnie do wzrostu UV

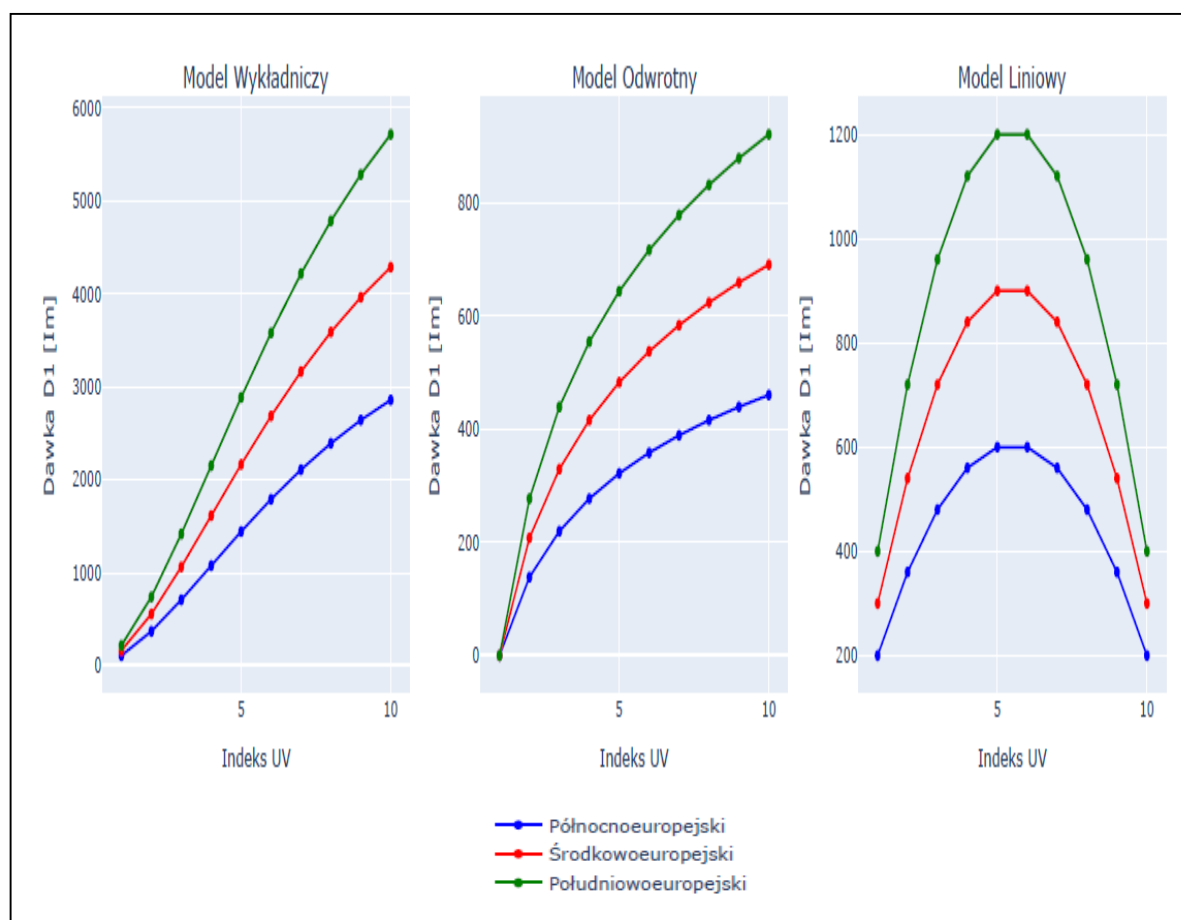
- informacyjne tablice pogodowe, proste aplikacje mobilne dla społeczeństwa
- szybkie szacowanie ryzyka oparzenia przy braku dokładnych danych biologicznych

3. Model wykładniczy:

- tam, gdzie intensywność UV i jego biologiczna skuteczność nie rośnie liniowo, lecz saturuje się wraz ze wzrostem indeksu UV
- w aplikacjach medycznych i dermatologicznych — terapię UVB 311 nm i ekspozycje kontrolowane (np. leczenie łuszczycy, bielactwa)
- w pomiarach dawki w kabinach UV, gdzie urządzenie emituje stałe natężenie, ale efekt biologiczny jest tłumiony przy dłuższej ekspozycji

C.5. Wykresy porównawcze dla trzech modeli dawek oraz trzech fototypów

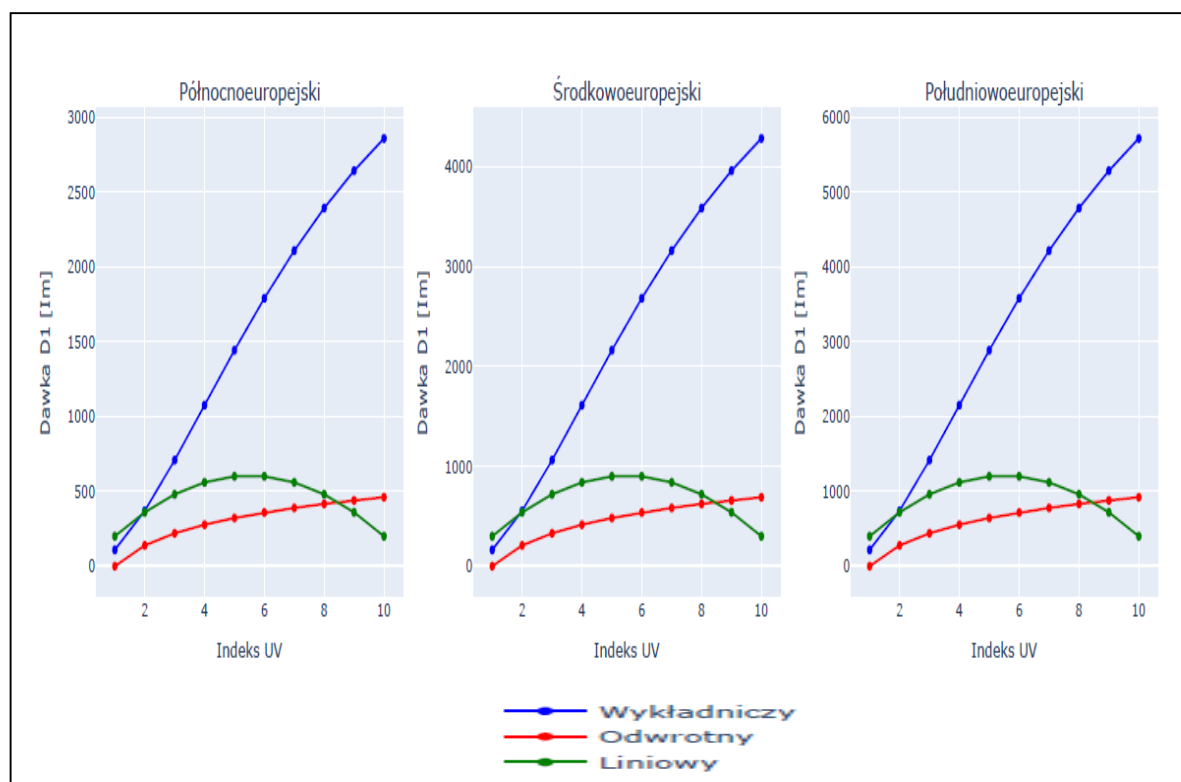
C.4.1. Porównanie modeli dawek D dla trzech fototypów skóry



Rys. 20. Porównanie modeli dawek D dla trzech fototypów skóry

Fig. 20. Comparison of D dose models for three skin phototypes

C.4.2. Porównanie modeli dawek D dla poszczególnych fototypów skóry



Rys. 21. Porównanie modeli dawek D dla poszczególnych fototypów skóry

Fig. 21. Comparison of D dose models for individual skin phototypes

2.2.2. Obliczenie teoretycznych dawek naświetlania, dla modelu liniowego oraz fototypu środkowoeuropejskiego, w zależności od natężenia promieniowania UV

Na podstawie wzoru (20) służącego do obliczania czasu naświetlania:

$$T_{Naśw.30} = f(UV) = 300 - 270 \cdot (UV - 1) / (M - 1)$$

oraz wyprowadzonego wzoru (31), służącego do obliczania dawki naświetlania D_1 skóry człowieka dla fototypu środkowoeuropejskiego:

$$D_1 = (150 + 135 / (M - 1)) \cdot (UV_2)^2 - 90 / (M - 1) \cdot (UV_2)^3$$

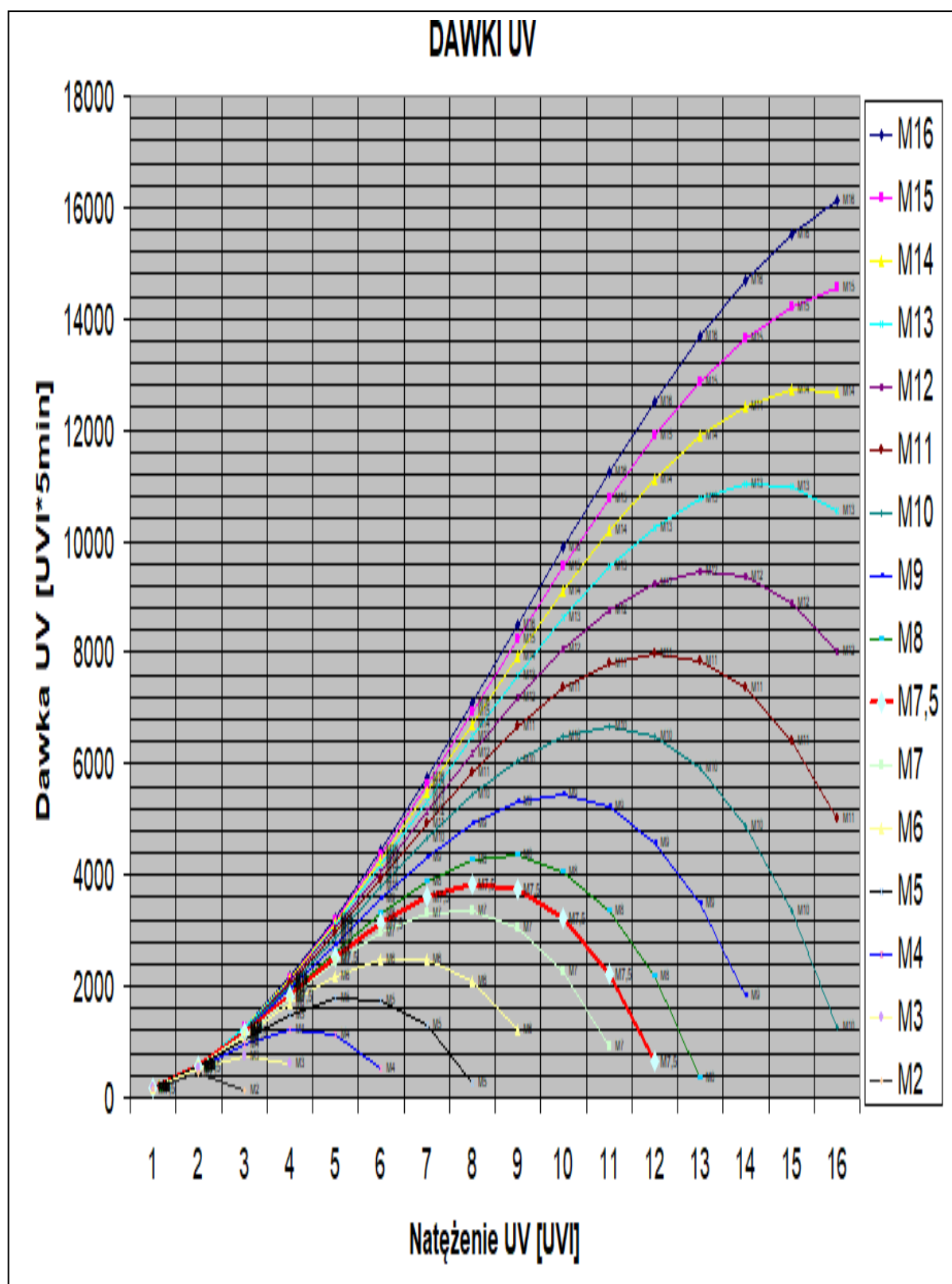
w poniższej tabeli Tab. 3, obliczono teoretyczne wartości dawek naświetlania, w zależności od wartości natężenia promieniowania UV . W przypadku $t_1=0$, $t_2=5\text{min}$ mamy $UV_1(t_1)=0$, czyli cała oznaczona do obliczania dawki naświetlania D_1 obliczana jest od: $UV_1 = 0$ do $UV_2(t_2=5\text{min.})$.

$\text{DAWKI UV} = \int \text{UV} * \text{Tnaśw.}(\text{UV}) d(\text{UV})$																
Jest to całka oznaczona, od UV1(t1) do UV2(t2).																
W przypadku t1=0, t2=5min zatem UV1(t1)=0, czyli całka oznaczona jest od UV1=0 do UV2(t2=5min.)																
gdzie $\text{Tnaśw}(\text{UV}) = (300 - 270 * (\text{UV} - 1)) / (M - 1)$																
$\text{DAWKI UV} = ((150 * M - 15) * \text{UV} * \text{UV} - 90 * \text{UV} * \text{UV} * \text{UV}) / (M - 1)$																
M = MaxUV	UV															
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2	195	420	135	-1200												
3	173	510	743	600	-188	-1890										
4	165	540	945	1200	1125	540	-735	-2880								
5	161	555	1046	1500	1781	1755	1286	240	-1519							
6	159	564	1107	1680	2175	2484	2499	2112	1215	-300	-2541					
7	158	570	1148	1800	2438	2970	3308	3360	3038	2250	908	-1080	-3803			
7,5	157	572	1163	1846	2538	3157	3618	3840	3738	3231	2234	665	-1560			
8	156	574	1176	1886	2625	3317	3885	4251	4339	4071	3371	2160	362	-2100		
9	156	578	1198	1950	2766	3578	4318	4920	5316	5438	5218	4590	3486	1838	-422	-3360
10	155	580	1215	2000	2875	3780	4655	5440	6075	6500	6655	6480	5915	4900	3375	1280
11	155	582	1229	2040	2963	3942	4925	5856	6683	7350	7805	7992	7859	7350	6413	4992
12	154	584	1240	2073	3034	4075	5145	6196	7180	8045	8745	9229	9449	9355	8898	8029
13	154	585	1249	2100	3094	4185	5329	6480	7594	8625	9529	10260	10774	11025	10969	10560
14	153	586	1257	2123	3144	4278	5484	6720	7944	9115	10192	11132	11895	12438	12721	12702
15	153	587	1263	2143	3188	4359	5618	6926	8245	9536	10760	11880	12856	13650	14223	14537
16	153	588	1269	2160	3225	4428	5733	7104	8505	9900	11253	12528	13689	14700	15525	16128

Tab. 3. Teoretyczne dawki naświetlania

Tab. 3. Theoretical doses of radiation

Na podstawie obliczonych teoretycznych dawek naświetlania, pokazanych w Tab. 2, w zależności od natężenia promieniowania UV, na poniższym Rys. 22 przedstawiono teoretyczne wykresy dawek naświetlania, w zależności od poziomu $M = \text{Max}(\text{UV})$.



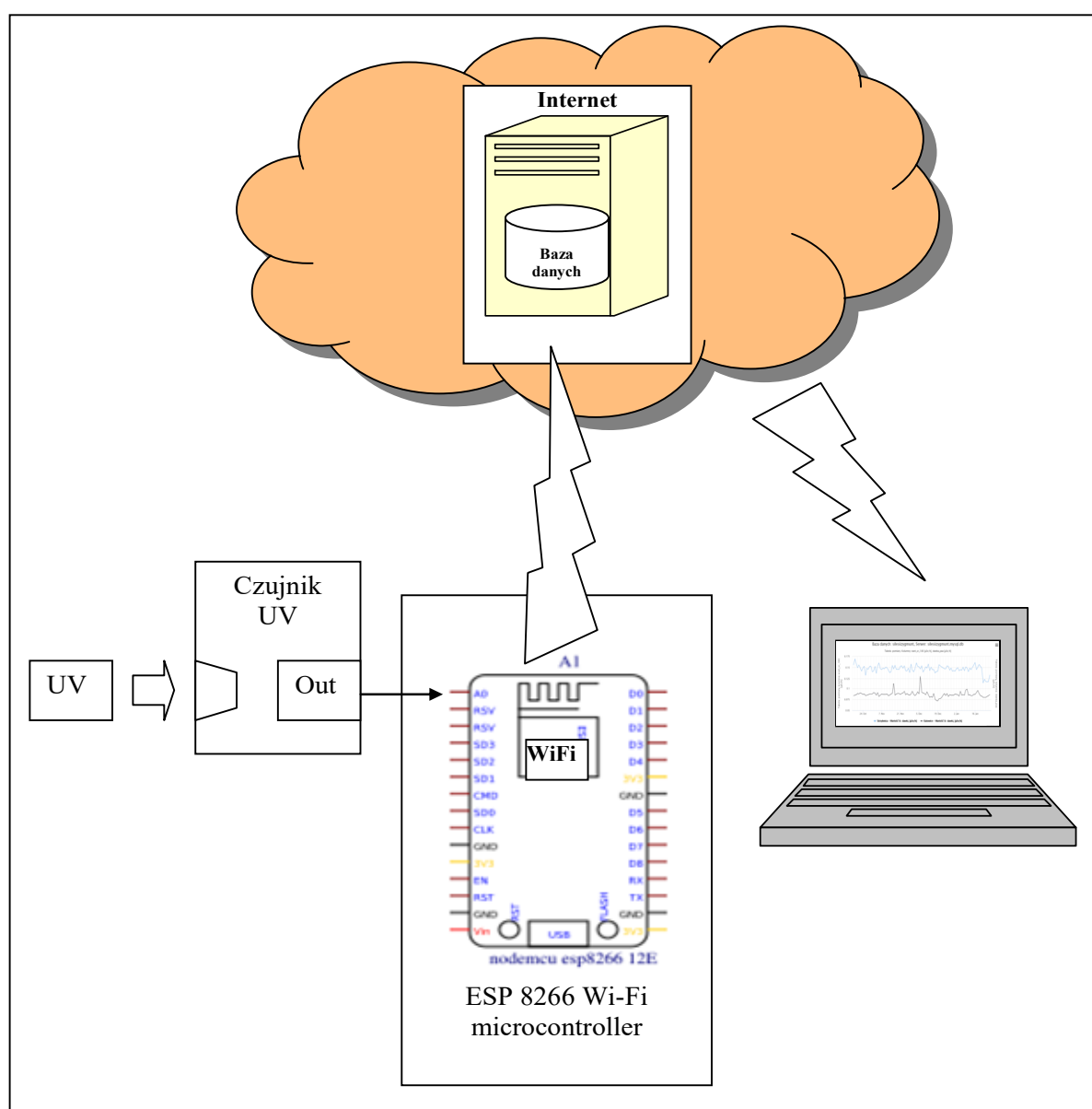
Rys. 22. Teoretyczne wykresy dawek naświetlania
 Fig. 22. Theoretical charts of radiation doses

3. Pomiary natężenia promieniowania nadfioletowego UV

W celu realizacji metody pomiarów czasów naświetlania oraz dawek naświetlania dla skóry ludzkiej, na podstawie pomiarów indeksów UVI promieniowania UV, w niniejszej pracy korzystano z amatorskiego przyrządu do pomiaru promieniowania UV [38].

3.1. Schemat logiczny amatorskiego przyrządu pomiarowego promieniowania UV.

Na poniższym Rys. 23, przedstawiono schemat logiczny amatorskiego przyrządu pomiarowego promieniowania UV.



Rys. 23. Schemat logiczny amatorskiego przyrządu pomiarowego promieniowania UV

Fig. 23. Logical diagram of an amateur UV radiation measuring device

3.2. Moduły składowe przyrządu pomiarowego UV

3.2.1. Mikrokomputer Mikrobot, Moduł WIFI ESP8266, NodeMCU V3

Moduł *WiFi ESP8266 + NodeMCU V3* - to wszechstronny mikrokontroler oparty na układzie *ESP8266*, który pokazano na Rys. 24. Umożliwia prostą realizację projektów na platformie *Arduino*, *MicroPython*, *Lua*. Dzięki kompaktowym rozmiarom i wbudowanemu *WiFi*, jest idealny do tworzenia systemów, ze zdalnym monitorowaniem urządzeń pomiarowych.

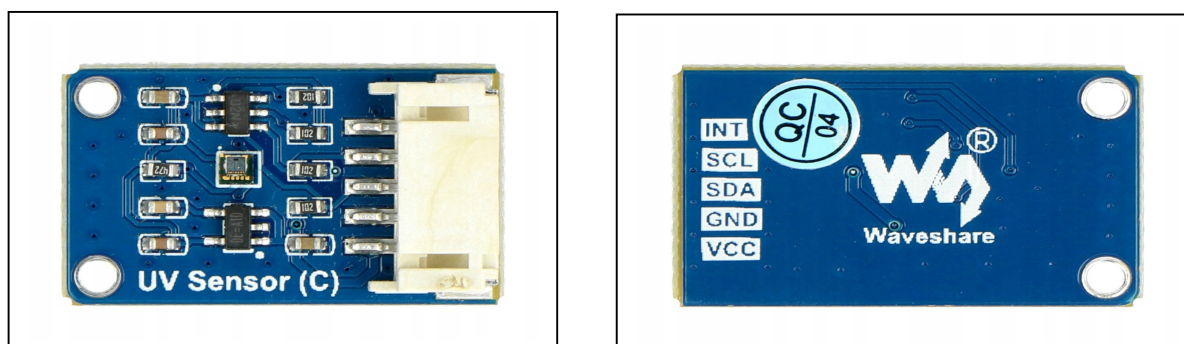


Rys. 24. Mikrokontroler oparty na module *WiFi ESP8266* oraz *NodeMCU V3*

Fig. 24. Microcontroller based on the *ESP8266 WiFi* module and *NodeMCU V3*

3.2.2. Czujnik światła ultrafioletowego UV - *LTR390-UV I2C*

Czujnik światła ultrafioletowego UV - *LTR390-UV I2C*, przedstawiony na Rys. 25, przeznaczony jest do pomiaru promieniowania ultrafioletowego i światła widzialnego.



Rys. 25. Moduł z cyfrowym czujnikiem UV wyposażonego w układ *LTR390*

Fig. 25. Module with a digital UV sensor equipped with the *LTR390* system

Charakteryzuje się wysoką czułością i szybką reakcją. Pozwala na łatwą integrację z innymi urządzeniami. Umożliwia pomiar UV, UVIndex, o długości fali w zakresie od 280÷430 nm.

3.3. Prezentowanie wyników pomiarów na komputerze użytkownika

Pomiary promieniowania UV, z pomocą amatorskiego przyrządu pomiarowego, dokonywane są za pomocą czujnika *LTR390*, a następnie, za pomocą sieci *Wi-Fi* oraz sieci komputerowej, w pierwszym etapie przekazywane są do tabeli bazy danych, znajdującej się na internetowym serwerze bazodanowym. W drugim etapie, za pomocą oprogramowania zapisanego w plikach typu *.php, na komputerze użytkownika korzystającego z przeglądarki internetowej, pobierane są z tej bazy danych wyniki pomiarów, a następnie w trakcie wyświetlania ich wykresów są dynamicznie obliczane czasy oraz dawki naświetleń.

Podstawą do wyświetlania wykresów dynamicznych jest pakiet oprogramowania "*Highcharts-10.3.2*". *Highcharts*, to biblioteka oprogramowania do tworzenia wykresów, napisana w języku *JavaScript* (<https://www.highcharts.com/>).

Podstawowe pliki tej biblioteki są następujące:

```
<script src="code/highcharts.js"></script>
<script src="code/modules/boost.js"></script>
<script src="code/modules/exporting.js"></script>
<script src="code/modules/accessibility.js"></script>
```

W zależności od ilości wyświetlanych na wykresie serii wyników pomiarowych, w pierwszym kroku, w pliku typu *.php, definiowane są właściwe polecenia SELECT:

```
<?php
//-----WYKRESY SERII POMIAROWYCH -----
//----- Indeks UVI -----
//----- 1 seria -----
$tabela_1='Czujniki5';

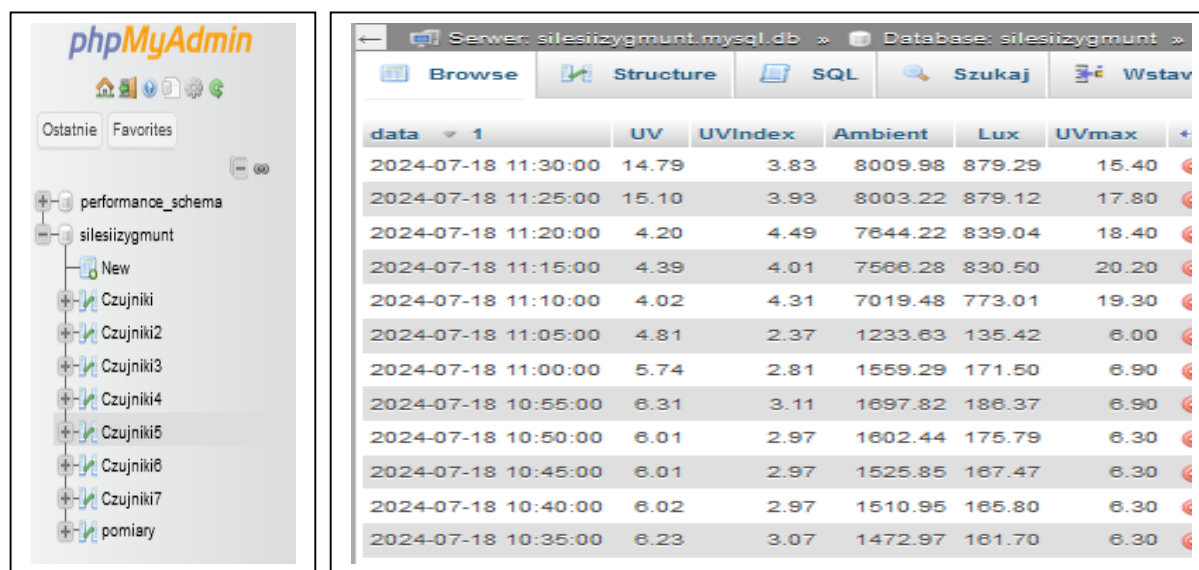
$kol_11='data';      $nazwa_11='Data';      $jedm_11='[]';   $opis_11='[]';
$kol_12='UVIndex';   $nazwa_12='Natężenie UV';   $jedm_12='[UVI]'; $opis_12='Natężenia UV - Poprzednie: ';
$kol_13='UVIndex';   $nazwa_13='Natężenie UV';   $jedm_13='[UVI]'; $opis_13='Natężenia UV - Ostatnie: ';

$Natezenie_Dawki_Pomiarowe="ROUND((AVG($kol_13)), 2)";
$okresOd0=date('YmdHis',$USEkundy - $delta);
$okresOd1=date('YmdHis',$USEkundy-$delta-$delta); // -1 dzień lub tydzień lub miesiąc, pomniejszone o dzień , tydzień, miesiąc
$query_Recordset1 = "SELECT floor(UNIX_TIMESTAMP($kol_11)/$Wsp)*$Wsp, $Natezenie_Dawki_Pomiarowe
FROM $tabela_1
WHERE $kol_13<>-888 AND $kol_13>=0 AND $kol_11 between $okresOd1 and $okresOd0
GROUP BY 1
ORDER BY $kol_11";
```

W drugim kroku wyznaczane są wszystkie dane oraz parametry, które niezbędne są do wyświetlenia wykresu(ów), a w trzecim kroku przekazywane są do procedury wyświetlającej wykresy - *Highcharts.chart('container', { ... })*.

3.4. Pomiary indeksów UVI oraz czasów i dawek naświetleń promieniowaniem UV

Jak opisano w paragrafie 2.4.1. "Schemat logiczny amatorskiego przyrządu pomiarowego promieniowania UV", pomiary promieniowania UV, z pomocą amatorskiego przyrządu pomiarowego, dokonywane są za pomocą czujnika LTR390 co 5 min, a następnie za pomocą sieci Wi-Fi oraz sieci komputerowej przekazywane są do tabeli bazy danych, pokazanej na poniższym Rys. 26, znajdującej się na internetowym serwerze bazodanowym firmy OVH.



The screenshot shows the phpMyAdmin interface. On the left, the database structure is visible, including a table named 'Czujniki5'. The main window displays the 'Czujniki5' table with the following data:

data	UV	UVIndex	Ambient	Lux	UVmax
2024-07-18 11:30:00	14.79	3.83	8009.98	879.29	15.40
2024-07-18 11:25:00	15.10	3.93	8003.22	879.12	17.80
2024-07-18 11:20:00	4.20	4.49	7644.22	839.04	18.40
2024-07-18 11:15:00	4.39	4.01	7566.28	830.50	20.20
2024-07-18 11:10:00	4.02	4.31	7019.48	773.01	19.30
2024-07-18 11:05:00	4.81	2.37	1233.63	135.42	6.00
2024-07-18 11:00:00	5.74	2.81	1559.29	171.50	6.90
2024-07-18 10:55:00	6.31	3.11	1697.82	186.37	6.90
2024-07-18 10:50:00	6.01	2.97	1602.44	175.79	6.30
2024-07-18 10:45:00	6.01	2.97	1525.85	167.47	6.30
2024-07-18 10:40:00	6.02	2.97	1510.95	165.80	6.30
2024-07-18 10:35:00	6.23	3.07	1472.97	161.70	6.30

Rys. 26. Tabela "Czujniki5" z pomiarami *UVIndex*, za pomocą czujnika LTR390

Fig. 26. Table "Czujniki5" with *UVIndex* measurements, using the LTR390 sensor

Z tej tabeli "Czujniki5", zawierającej w kolumnie *UVIndex* pomiary *UVI*, za pomocą oprogramowania zapisanego w plikach typu *.php, pobierane są dane z pomiarami indeksu *UVI*, w określonym czasie, a następnie obliczane są czasy naświetleń (wzór 20) oraz dawki naświetleń (wzór 31). W celu wyświetlania dynamicznego wykresu dawek naświetleń, pokazanych poniżej, korzysta się z SQL-owej komendy SELECT.

```
//----- DAWKI UV -----
$okresOd0=date('YmdHis',$USEkundy - $delta);
$okresOd1=date('YmdHis',$USEkundy-$delta-$delta);

$Dawki_Pomiarowe_UV = "ROUND((((150$M-15)*($kol_13*$kol_13) - 90*($kol_13*$kol_13*$kol_13))/($M-1))/5,0)";

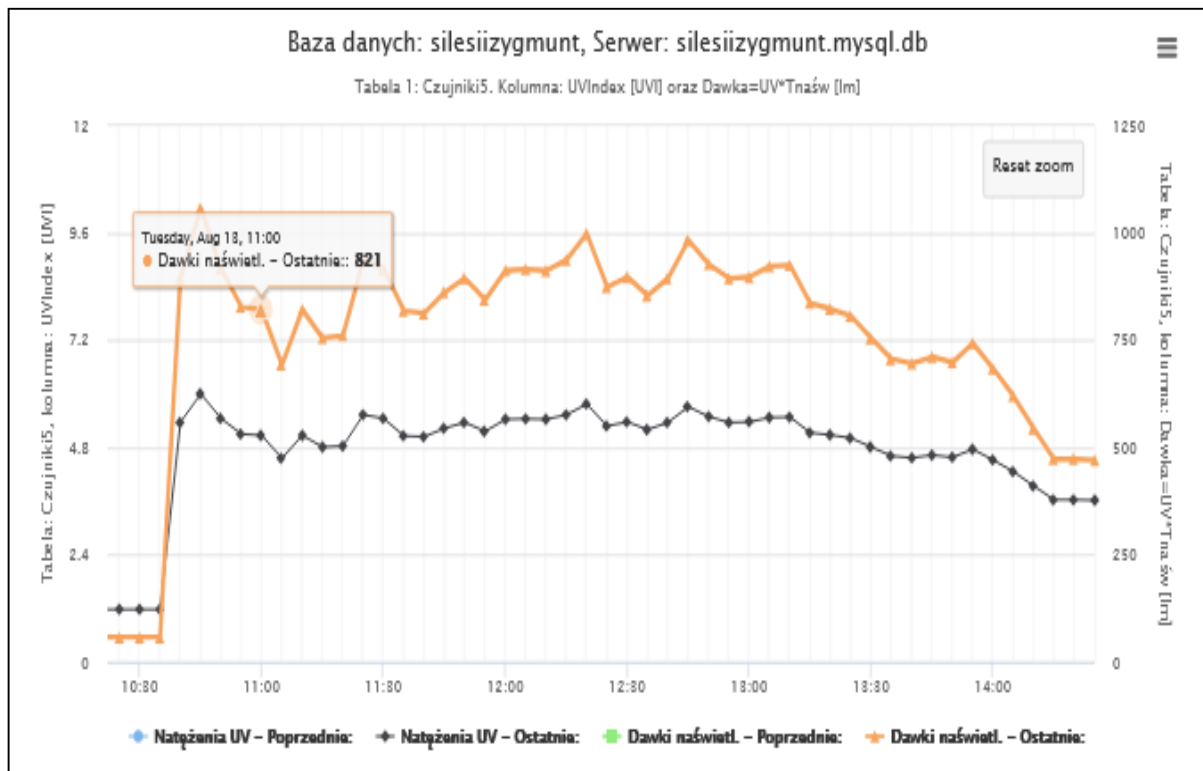
$query_Recordset3 = "SELECT floor(UNIX_TIMESTAMP($kol_11)/$Wsp)*$Wsp, $Dawki_Pomiarowe_UV
FROM $tabela_1
WHERE $kol_13<>-888 AND $kol_13>=0 AND $kol_11 between $okresOd1 and $okresOd0
GROUP BY 1
ORDER BY $kol_11";
```

W celu wyświetlania dawek naświetleń D_I , dla określonej godziny, pokazanych poniżej, skorzystano z poniższej SQL-owej komendy SELECT:

```
//----- Dawki od 09-10 -----
$CzasPomiaru_calk = 5; //min.
$DataCzas_Od_09 = "$data 09";
$DataCzas_Do_10 = "$data 10";
$Dawki_calkowe = "FORMAT(AVG((((150*$M-15)*($kol_13*$kol_13)-90*($kol_13*$kol_13*$kol_13))/($M-1)))/$CzasPomiaru_calk, 0)";

$mysqli_Recordset200_query="SELECT left($kol_11,13),
                                $Dawki_calkowe AS Dawka_calk_09_10
                                FROM $tabela_1
                                WHERE $kol_13<>-888 AND $kol_13>=0
                                AND $kol_11 between '$DataCzas_Od_09' AND '$DataCzas_Do_10'
                                GROUP BY 1
                                ORDER BY $kol_11";
```

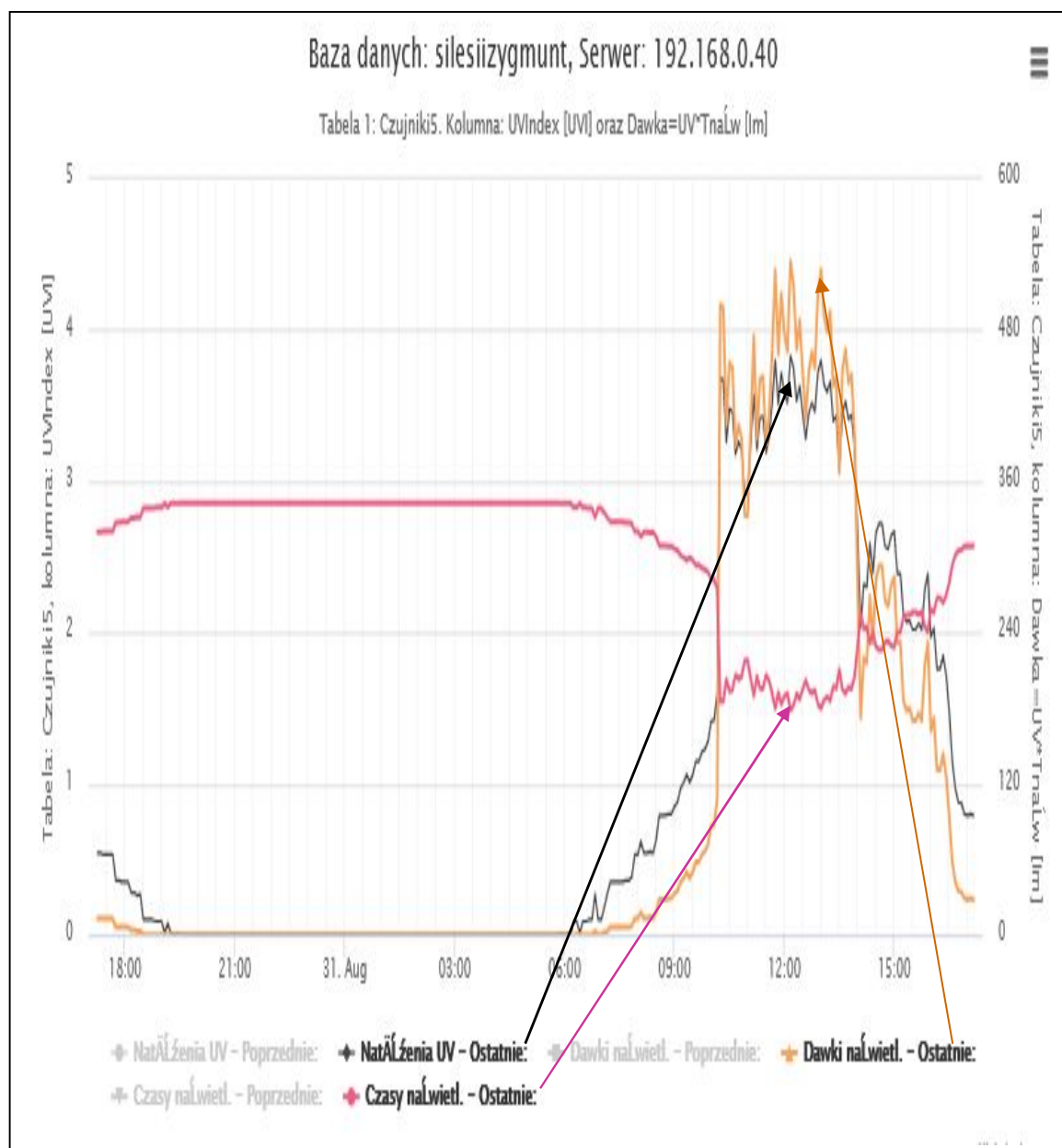
Korzystając ze wzoru (31), na podstawie pomiarów natężenia promieniowania UV, w czasie wyświetlania wykresu na stronie internetowej, w sposób dynamiczny obliczano dawki naświetlania skóry człowieka odpowiadające pomiarom indeksu UVI, pokazane na Rys. 27.



Rys. 27. Dynamiczny wykres dawek naświetlania, na podstawie pomiarów UV

Fig. 27. Dynamic graph of irradiation doses, based on UV measurements

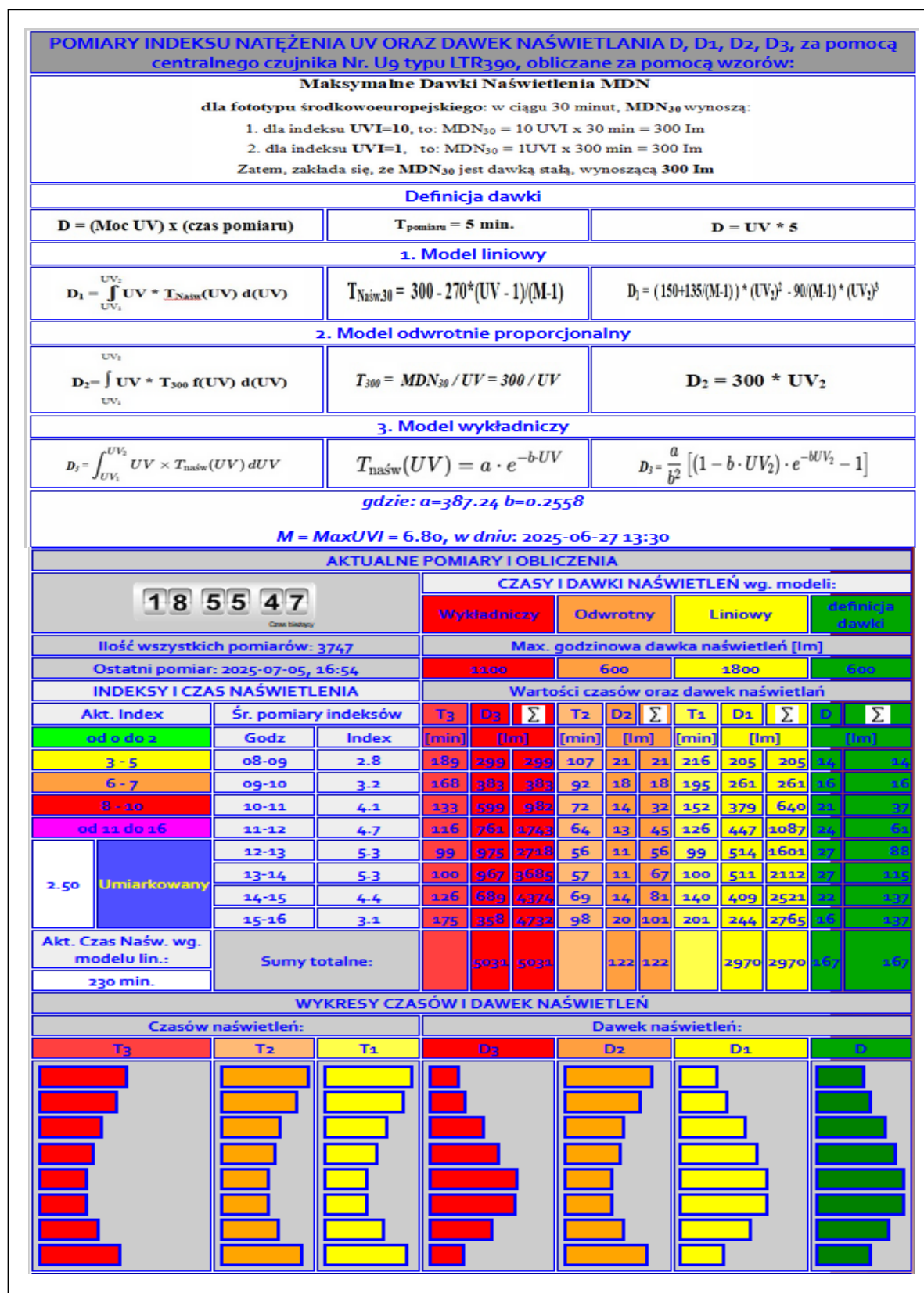
Wykres pomiarów indeksów UVI, jak również dynamicznie obliczonych czasów naświetleń (wzór 20) oraz dawek naświetleń (wzór 31) przedstawiono na Rys. 28.



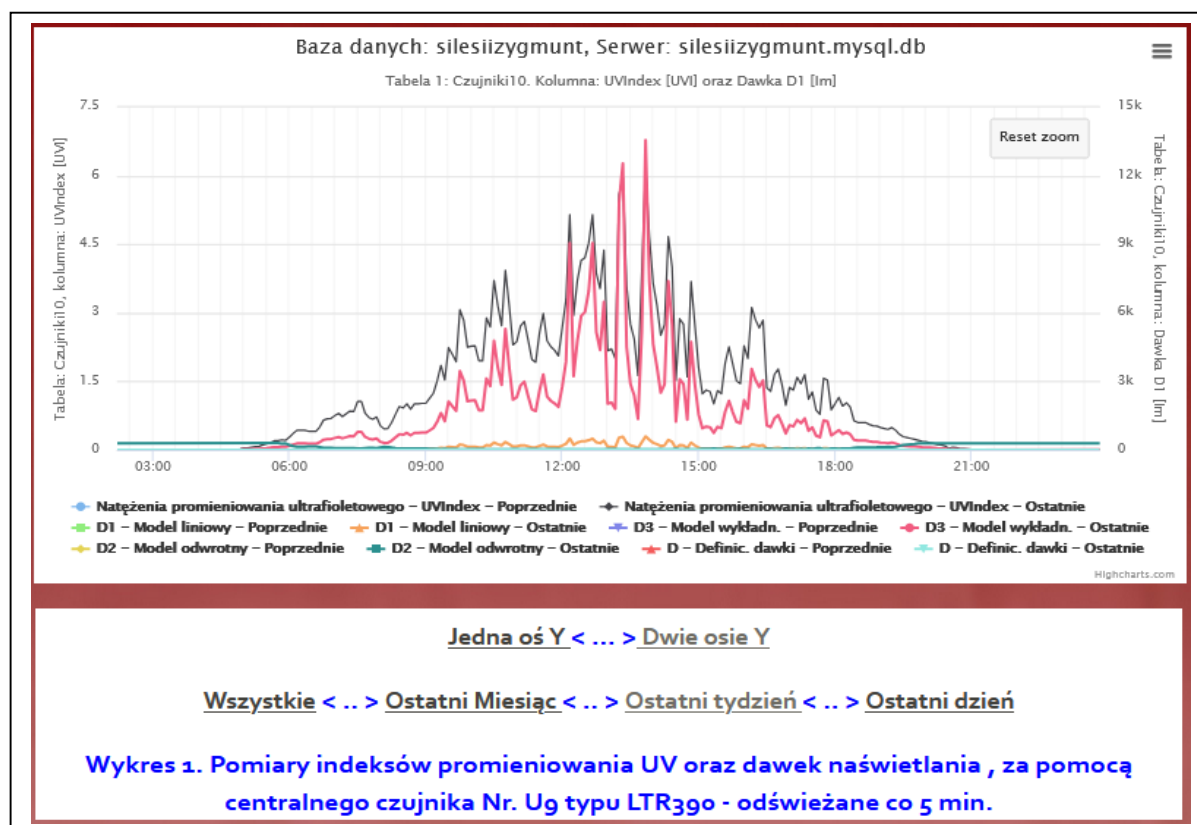
Rys. 28. Pomiary wartości indeksów UVI, czasów oraz dawek naświetlania

Fig. 28. Measurements of UVI index values, exposure times and doses

Na poniższym Rys. 29 przedstawiono skan strony internetowej z dnia 05.07.2025r., na której wykonano w Strzybnicy, na bezchmurnym i błękitnym nieboskłonie, pomiary wartości natężenia UVI, czasów T_1, T_2, T_3 oraz dawek naświetleń D, D_1, D_2, D_3 , według definicji dawki, modelu liniowego, odwrotnego oraz wykładniczego, w godzinach od 08 do 16.

Rys. 29. Pomiary dawek D, D_1, D_2, D_3 w godzinach od 08 do 16Fig. 29. Measurements of doses D, D_1, D_2, D_3 from 08:00 to 16:00

Z kolei, na poniższym Rys. 30 przedstawiono skan strony internetowej z wykresami wartości natężenia UVI oraz dawek D , D_1 , D_2 , D_3 , według definicji dawki, modelu liniowego, odwrotnego oraz wykładniczego.

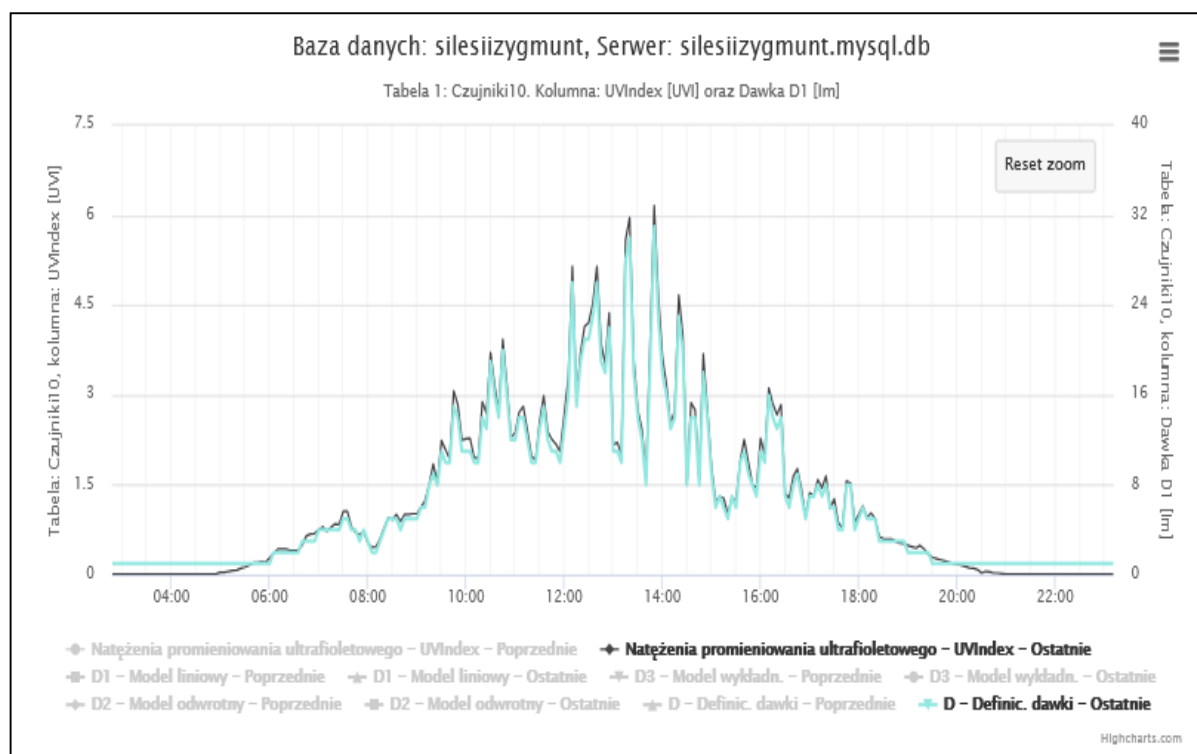
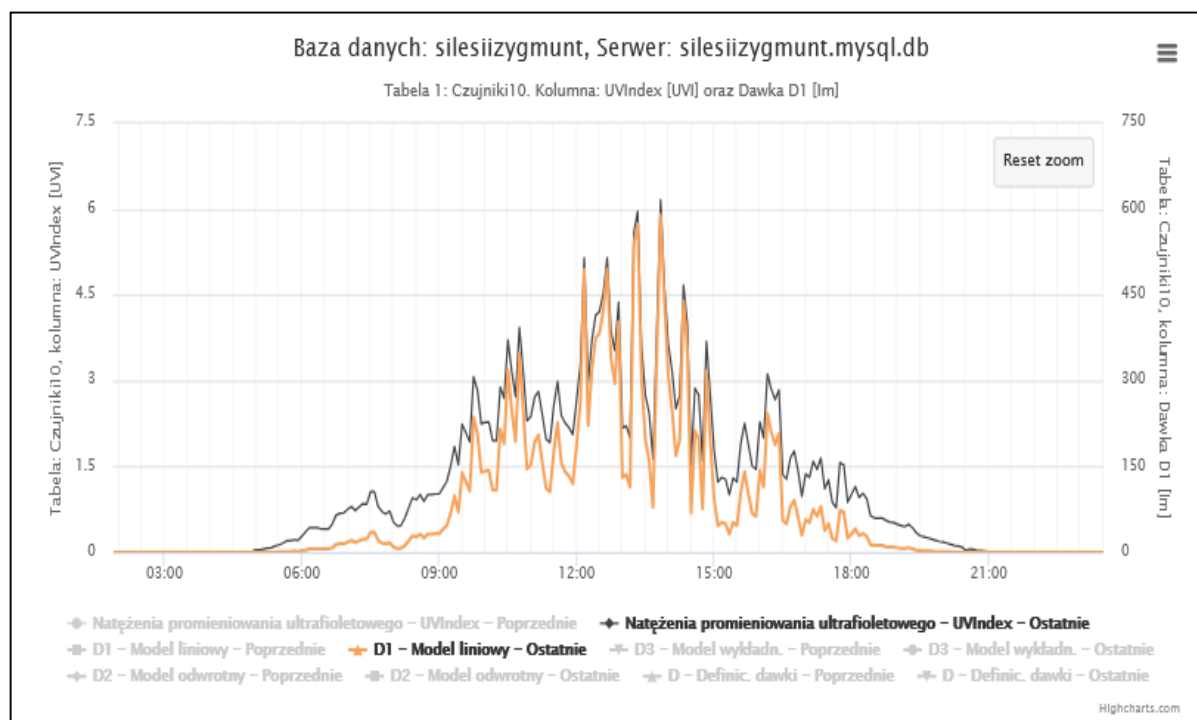


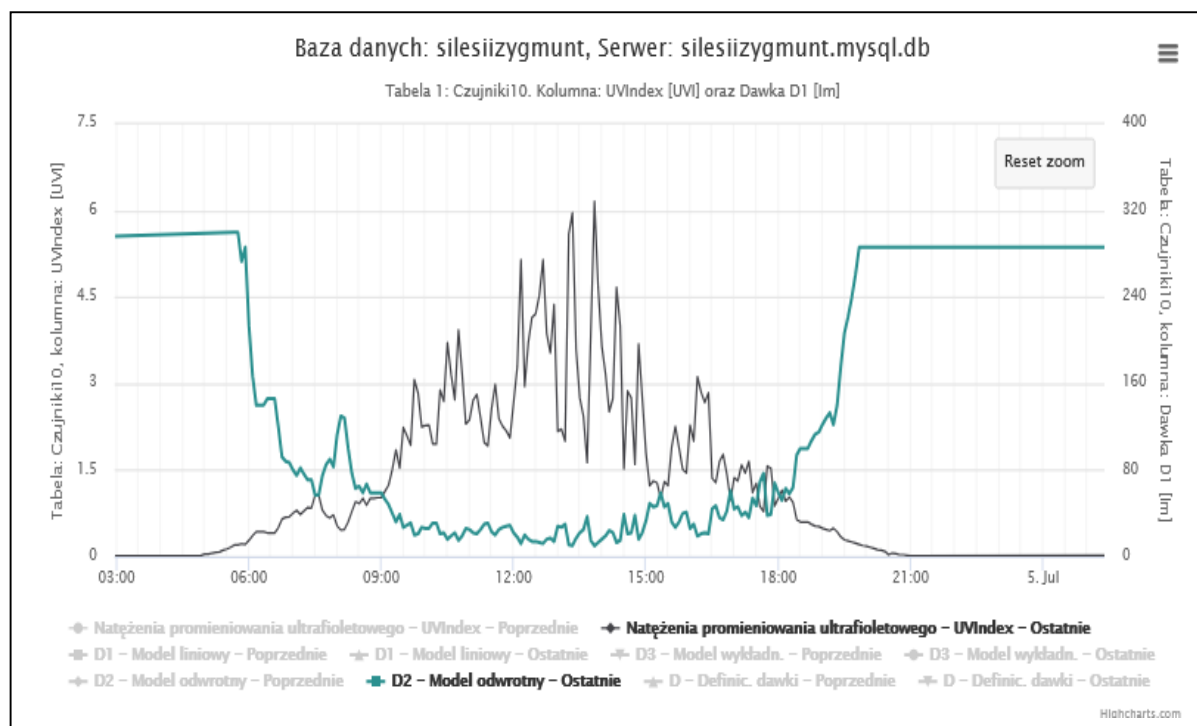
Rys. 30. Wykresy wartości natężenia UVI oraz dawek D , D_1 , D_2 , D_3

Fig. 30. Graphs of UVI intensity values and doses D , D_1 , D_2 , D_3 according to dose definition, linear, inverse and exponential models

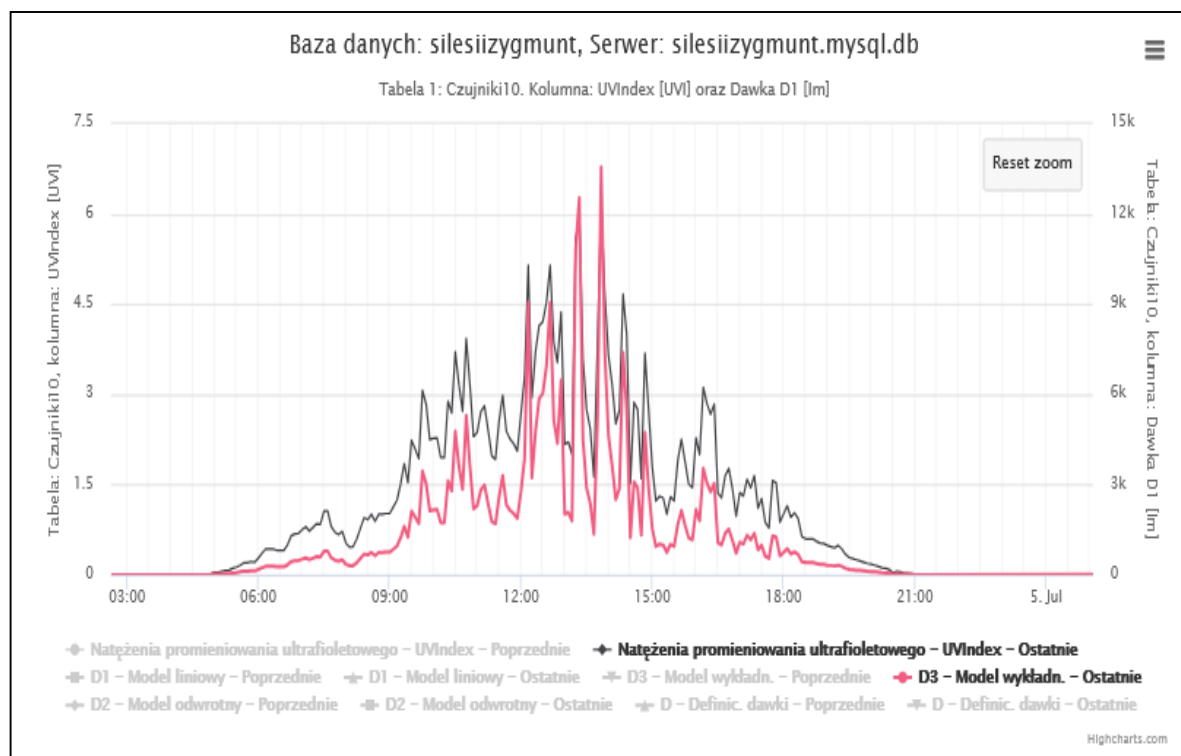
Bardziej szczegółowe wykresy, tj. natężenia UVI oraz dawek naświetlania D , D_1 , D_2 , D_3 , według definicji dawki, modelu liniowego, odwrotnego oraz wykładniczego przedstawiono na poniższych rysunkach Rys. 31, 32, 33, 34, tj.:

- Na Rys. 31. przedstawiono pomiary natężenia UVI oraz dawki D , według definicji dawki,
- Na Rys. 32. przedstawiono pomiary natężenia UVI oraz dawki D_1 , według modelu liniowego,
- Na Rys. 33. przedstawiono pomiary natężenia UVI oraz dawki D_2 , według modelu odwrotnego,
- Na Rys. 34. przedstawiono pomiary natężenia UVI oraz dawki D_2 , według modelu wykładniczego.

Rys. 31. Pomiary natężenia UVI oraz dawki D , według definicji dawkiFig. 31. Measurements of UVI intensity and dose D , according to the dose definitionRys. 32. Pomiary natężenia UVI oraz dawki D_1 , według modelu liniowegoFig. 32. Measurements of UVI intensity and D_1 dose according to the linear model



Rys. 33. Pomiary natężenia UVI oraz dawki D_2 , według modelu odwrotnego
 Fig. 33. Measurements of UVI intensity and D2 dose according to the inverse model



Rys. 34. Pomiary natężenia UVI oraz dawki D_3 , według modelu wykładniczego
 Fig. 34. Measurements of UVI intensity and D_3 dose according to the exponential model

4. WNIOSKI

Na podstawie dokonanych obliczeń i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowana metoda umożliwia szybkie i precyzyjne wyznaczanie dopuszczalnych czasów naświetlania oraz dawek promieniowania UV dla różnych fototypów skóry w zależności od aktualnego natężenia promieniowania.
2. Zastosowanie trzech modeli matematycznych (liniowego, odwrotnego i wykładniczego) pozwala na elastyczne dostosowanie obliczeń do zmiennych warunków środowiskowych oraz indywidualnych potrzeb użytkowników.
3. Modele odwrotny i wykładniczy wykazały większą precyzję w obliczeniach dla wysokich wartości indeksu UV, co sugeruje ich przewagę w warunkach silnego nasłonecznienia.
4. Opracowane wzory i wykresy mogą być z powodzeniem wdrożone w systemach pomiarowych, aplikacjach mobilnych oraz serwisach internetowych informujących o bieżących zagrożeniach UV.
5. Wdrożenie metody może istotnie przyczynić się do podniesienia bezpieczeństwa zdrowotnego społeczeństwa poprzez precyzyjne informowanie o dopuszczalnych czasach ekspozycji skóry na promieniowanie UV.
6. Teoretyczne wykresy dawek naświetlania są zależne od natężenia UV oraz $M = \text{Max}(UV)$.
7. Dla danego poziomu $M = \text{Max}(UV)$, teoretyczne dawki naświetlania rosną, począwszy od wartości minimalnej UV, następnie osiągają wartość maksymalną, po czym maleją.
8. Około południowe godzinowe dawki naświetlania, dla umiarkowanego poziomu indeksu UVI, osiągają wartości mniejsze niż maksymalne wartości teoretyczne, czyli 600 Im.
9. Czas bezpiecznego naświetlania skóry ludzkiej, dla umiarkowanego poziomu indeksu $UVI=3\div5$, w godzinach od 12÷14 wynosi 0.5h, w którym skóra ludzka pochłania dawkę promieniowania ultrafioletowego 1/2 teoretycznej wartości maksymalnej, czyli 300 Im.

5. LITERATURA

- [1] Diffey, B.L. (2004). Climate change, ozone depletion and the impact on ultraviolet exposure of human skin. *Physics in Medicine & Biology*, 49(1), R1–R11.
- [2] Lucas, R.M., McMichael, A.J., Smith, W.T., & Armstrong, B.K. (2006). Estimating the global disease burden due to ultraviolet radiation exposure. *International Journal of Epidemiology*, 35(4), 1096–1108.
- [3] Sliney, D.H. (2001). Photoprotection of the eye – UV radiation and sunglasses. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 64(2–3), 166–175.
- [4] CIE. (1998). Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. CIE Standard S 007/E-1998.
- [5] Piazena, H. (1997). The role of ultraviolet radiation in the development of malignant melanoma. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 13(5–6), 120–127.
- [6] Holick, M.F. (2007). Vitamin D deficiency. *New England Journal of Medicine*, 357(3), 266–281.
- [7] CIE. (2006). *UV Radiation Guidelines*. CIE Technical Report 171:2006.
- [8] Wacker, M., & Holick, M.F. (2013). Sunlight and Vitamin D: A global perspective for health. *Dermato-Endocrinology*, 5(1), 51–108.
- [9] McKinlay, A.F., & Diffey, B.L. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6(1), 17–22.
- [10] Narayanan, D.L., Saladi, R.N., & Fox, J.L. (2010). Ultraviolet radiation and skin cancer. *International Journal of Dermatology*, 49(9), 978–986.
- [11] "Witamina D a odporność. Naukowcy odkryli znaczące różnice między witaminą D3 a D2", Puls Medycyny, 03.03.2022, <https://pulsmedycyny.pl/witamina-d-a-odpornosc-naukowcy-odkryli-znaczące-roznice-miedzy-witamina-d3-a-d2-1143094>.
- [12] Colin P. Smith, Louise R. Durrant, Carla Möller-Levet, Kathryn H. Hart, Susan A. Lanham-New, Giselda Bucca, Laura Tripkovic, John C. Mathers, Andrew Hesketh, Huihai Wu, Ruan M. Elliott: "Vitamins D2 and D3 Have Overlapping But Different Effects on the Human Immune System Revealed Through Analysis of the Blood Transcriptome", *Front. Immunol.*, 24 February 2022, <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2022.790444/full>.
- [13] Schuetz, R., et al. (2023). Sunscreens can preserve human skin microbiome upon erythema UV exposure. *Int. J. Cosmetic Science*, 46(1), 71–84.
- [14] Paulo, M.S., et al. (2023). Digitally measuring solar ultraviolet radiation in outdoor workers. *Frontiers in Public Health*, 11, 1140903.

- [15] Klotz, B., et al. (2024). Combining a ground-based UV network with satellite maps: A case study for Germany. arXiv:2404.05749.
- [16] Jiang, Y., et al. (2024). A 10 km daily-level ultraviolet-radiation-predicting dataset. *Earth Syst. Sci. Data*, 16(10), 4655–4675.
- [17] Stump, T.K., et al. (2023). Objectively-Assessed Ultraviolet Radiation Exposure and Sunburn Occurrence. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20(7), 5234.
- [18] Matthews P.T.: Wstęp do mechaniki kwantowej. PWN, Warszawa 1977.
- [19] Khan Academy: "Wstęp do fali elektromagnetycznych",
<https://pl.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>.
- [20] Pościk A., Wolska A., Owczarek G.: "Ocena narażenia na promieniowanie nadfioletowe z zastosowaniem indywidualnych fotochromowych dozymetrów", Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2009,
https://www.zus.pl/documents/10182/167730/Dozymetry_UV.pdf/a6bb5f56-d6ab-47d3-849c-23fa8703065e.
- [21] "ICNIRP STATEMENT ON PROTECTION OF WORKERS AGAINST ULTRAVIOLET RADIATION", International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *HEALTH PHYSICS* 99(1):66-87, 2010,
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPUVWorkersHP.pdf>.
- [22] Błaszczak A., Karolewska J., Jenerowicz D., Czarnecka M.: "Działanie promieniowania ultrafioletowego – aktualna wiedza w aspekcie dermatologicznym i alergologicznym.", *Alergologia Polska - Polish Journal of Allergology*, Volume 2, Issue 1, January–March 2015, Pages 21-27,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2353385415000034>.
- [23] Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. Springer; 2009.
- [24] Konspekt: "Promieniowanie słoneczne-całkowita składowa UV (global UVI)", Wydział Chemii Uniwersytet Jagielloński,
http://www2.chemia.uj.edu.pl/~czarniec/OchronaSrodowiska/UVI/UV_konspekt.doc.
- [25] CIE (Commission Internationale de l'Eclairage). International Standard ISO 17166: Erythema Reference Action Spectrum and Standard Erythema Dose. Vienna: CIE; 1999.
- [26] Fiolet D., Wolska K., Adamski Z.: Wpływ promieniowania UV na skórę człowieka. *Dermatologia Kliniczna*. 2021;23(1): 45–50.
- [27] SCIENTIFIC COMMITTEE ON CONSUMER PRODUCTS SCCP. "Opinion on Biological effects of ultraviolet radiation relevant to health with particular reference to sunbeds for cosmetic purposes" (2006),
http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_sccp/docs/sccp_o_031b.pdf.

- [28] Śpiewak R.: "Minimalna dawka rumieniowa (MED)", <http://www.dermatopedia.pl/art/2013pl005.html>.
- [29] "UV Index, Global Solar Ultraviolet Index (UVI)", International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection, <https://www.icnirp.org/en/applications/uv-index/uv-index.html>.
- [30] WHO. Global Solar UV Index: A Practical Guide. Geneva: World Health Organization; 2002.
- [31] Geis P., Deventer E., Green A.C.: "Review of the Global Solar UV Index 2015 Workshop Report", Health Physics, 114(1):p 84-90, January 2018, https://journals.lww.com/health-physics/Fulltext/2018/01000/Review_of_the_Global_Solar_UV_Index_2015_Workshop.12.aspx.
- [32] Biszczyk-Jakubowska J., Curyło A, Kobis B., Zabłocki B.: "SYSTEM INFORMACYJNY O SŁONECZNYM PROMIENIOWANIU UV W IMGW-PIB", Ośrodek Aerologii, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt. 255, 2012, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPS2-0065-0071/c/biszczyk144286.pdf>.
- [33] Skórska E.: "ODDZIAŁYWANIE SŁONECZNEGO PROMIENIOWANIA ULTRAFIOLETOWEGO NA ORGANIZM CZŁOWIEKA", Tom 65 2016, Numer 4 (313), Strony 657–667, Katedra Fizyki i Agrofizyki Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, <http://kosmos.icm.edu.pl/PDF/2016/657.pdf>.
- [34] "Global Solar UV Index", World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environment Programme International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPWHOSolarUVI.pdf>.
- [35] Biszczyk-Jakubowska J.: "UV – niebezpieczny dar od słońca", IMGWPIB/Zakład Monitorowania Jakości Powietrza, <https://obserwator.imgw.pl/2020/07/26/uv-niebezpieczny-dar-od-slonca/>.
- [36] Matuszko D.: "Wpływ zachmurzenia na osłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne", Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 2009, <https://core.ac.uk/download/pdf/232008296.pdf>.
- [37] Wieczorek-Szukała K.: Helioterapia – co to jest? Wskazania, przeciwwskazania, efekty leczenia słońcem", 10 maja 2023, <https://wylecz.to/uroda/helioterapia-co-to-jest-wskazania-przeciwwskazania-efekty-leczenia-slancem/>.
- [38] Bock Z.: "Amatorski Przyrząd Pomiarowy", <http://silesiaart.ovh/pomiary/Amatorski%20przyrz%C4%85d%20pomiarowy%20UV.pdf>.

Recenzent:

Wpłynęło do Redakcji 5 sierpnia 2025 r.

Abstract

The article presents a generalized mathematical model and a practical method for determining the time and doses of exposure of the human body to ultraviolet radiation, depending on the intensity of UV radiation and the human skin phototype. The developed formulas enable the calculation of the safe time of skin exposure to ultraviolet radiation and the corresponding doses, using three mathematical models: linear, inversely proportional and exponential. The article also contains a proposal for implementing the method in information and measurement systems used in health and environmental protection. This article presents a method for calculating exposure times and doses of human skin based on measurements of the intensity of ultraviolet UV radiation. The basis of this method is the derivation, based on the adopted assumptions, of calculation formulas for time $T_{Naśw} = f(UV)$ and exposure dose $D = f(UV)$, depending on the intensity of UV radiation, on the basis of which exposure times and doses are calculated, based on measurements of ultraviolet radiation indices, which are used to create charts on websites informing about permissible times and doses of exposure of human skin. Experts recommend exposing the body for an average of 5 to 30 minutes at least twice a week in summer, assuming that the darker the skin and the weaker the sunlight, the more minutes of exposure are needed to achieve the real goal, i.e. the production of vitamin D₃ by the human body.