

dr inż. RAFAŁ HRYNYK

b. pracownik naukowy CIOP-PIB

prof. dr hab. inż. IWONA FRYDRYCH

Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej, konsultant naukowy CIOP-PIB

dr inż. AGNIESZKA CICHOCKA

Instytut Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej

Kontakt: iwona.frydrych@p.lodz.pl

DOI: 10.5604/01377043.1194452

# Wykorzystanie technik skanowania 3D w celu lepszego dopasowania ŚOI

## – na przykładzie sprzętu ochrony układu oddechowego



Fot. Bestdesign36/Bigstockphoto

Środki ochrony indywidualnej zgodne z wymaganiami UE powinny zapewniać ich dopasowanie do wymiarów użytkownika. Projektowanie elementów ŚOI na podstawie uśrednionych wartości zarejestrowanych wymiarów antropometrycznych może skutkować niedopasowaniem wyrobów do większej grupy użytkowników. Z tego względu w artykule przedstawiono metodologię projektowania masek lub półmasek ochronnych dopasowanych do określonych typoszeregów użytkowników lub wyrobów przeznaczonych dla indywidualnego klienta. Wykorzystano do tego celu skaner ręczny 3D, którym zmierzono wymiary twarzy populacji 55 ratowników.

*Słowa kluczowe: skaner ręczny 3D, wymiary twarzy, pomiary antropometryczne, dopasowanie*

### Application of 3D scanning as a way of improving PPE fitting – on the example of the respiratory system protection equipment

Personal Protection Equipment (PPE), which are in agreement with the EU requirements, should assure their fitting to the user dimensions. Designing PPE elements on the basis of mean values of registered anthropometric dimensions can be the reason that those products don't fit to the large group of users.

Therefore, there is presented a methodology of designing masks or half-masks fitting to the given group of users or products, which are dedicated for the individual client. 3D body scanner was used for this purpose. 55 rescue persons were examined.

*Keywords: manual scanner 3D, face dimensions, anthropometric measurements, fitting*

## Wstęp

Środki ochrony indywidualnej (ŚOI) stosowane w celu zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom na stanowiskach pracy, oprócz spełnienia wymagań zasadniczych dyrektywy 89/686/EWG [1], rozporządzenia Ministra Gospodarki [2] oraz zharmonizowanych norm przedmiotowych, powinny zapewniać możliwość ich dopasowania do wymiarów użytkownika.

Wytwarzanie masek i półmasek należących do grupy sprzętu ochrony układu oddechowego ma podstawy w procesach technologicznych, związanych z formowaniem elementów na wzór szablonów, jakimi są tzw. „kopyta” twarzy/głowy. W związku z tym najważniejszym etapem projektowania środków tych rodzajów ochrony indywidualnej jest zaprojektowanie „kopyt”

zgodnych z rzeczywistymi wymiarów twarzy użytkowników. Technika skanowania 3D [3-7] pozwala w łatwy i precyzyjny sposób zarejestrować wymiary antropometryczne użytkowników i, po ustaleniu warunków stopniowania „kopyt” w odniesieniu do danej grupy użytkowników, przygotować ich cyfrowe modele, dzięki którym opracowane zostaną fizyczne formy w postaci „kopyt” twarzy.

Projektowanie elementów konstrukcyjnych ŚOI na podstawie uśrednionych wartości zarejestrowanych wymiarów antropometrycznych może skutkować niedopasowaniem wyrobów do większej grupy użytkowników, ze względu na możliwość występowania w badanej populacji osobników charakteryzujących się istotnymi odstępstwami w zakresie jednego lub kilku wymiarów antropometrycznych [8].

W związku z tym najlepszym rozwiązaniem jest wydzielenie w badanej grupie użytkowników charakterystycznych typów antropometrycznych i ustalenie odpowiedniego zakresu stopniowania rozmiarów „kopyt” z wykorzystaniem możliwie jak najszerszego zakresu parametrów.

Należy przy tym zwrócić szczególną uwagę na osoby charakteryzujące się wyraźnymi odstępstwami w zakresie poszczególnych wymiarów antropometrycznych. W takim przypadku zalecane jest opracowanie osobnego wzoru dla użytkowników, wykazujących znaczne odstępstwa od średniej. Pozwala to na zmniejszenie całkowitej liczby „kopyt” stanowiących podstawę projektowania i wytwarzania dedykowanych środków ochrony indywidualnej, tj. masek i półmasek o cechach ochronnych.



Fot. 1. Skaner ręczny 3D użyty w badaniach  
Photo 1. Manual 3D scanner used for measurements



Fot. 2. Cyrkiel kabłąkowy do pomiarów twarzy  
Photo 2. Beam compasses for the face measurement

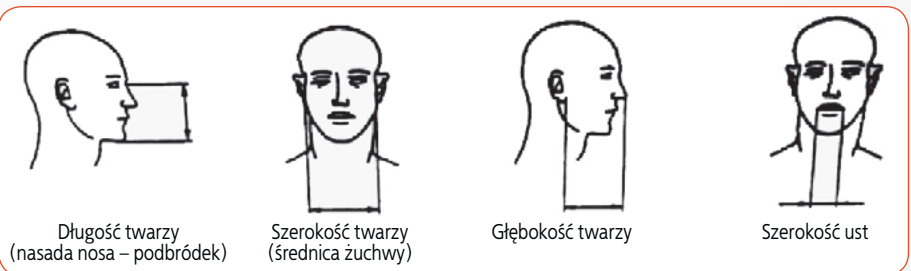
Opisane w artykule badania polegały na ocenie wymiarów antropometrycznych użytkowników masek i półmasek twarzowych, ze szczególnym uwzględnieniem służb ratowniczych (straż pożarna, ratownictwo chemiczne i górnicze). Badania wykonano z użyciem przenośnego skanera 3D oraz aplikacji komputerowych w stosunku do łącznej grupy 55 ratowników w wieku od 31 do 56 lat. Uzyskane wyniki potwierdziły znacznie większą dokładność pomiarów cyfrowych w porównaniu z klasycznymi metodami pomiaru wykorzystującymi przymiary liniowe i kątomierze kabłąkowe. Ocena wpływu zmiany wymiarów antropometrycznych (w wyniku wysiłku) w odniesieniu do twarzy nie wykazała istotnych statystycznie różnic.

Sposób oceny dopasowania wyrobów do wymiarów antropometrycznych użytkowników uwzględniał porównanie zarejestrowanych wymiarów antropometrycznych z modelami głów, stosowanymi do oceny sprzętu ochrony układu oddechowego, zgodnie z wymaganiami normy ISO/TS 16976-2:2010 [8]. W celu określenia największego podobieństwa głowy badanego ochotnika do zastosowanych wzorców wykorzystano analizę skupień przy jednoczesnym użyciu metody Wardana [9]. Na tej podstawie, w odniesieniu do wymiarów twarzy, zaproponowano podział ochotników na typoszeregi najbliższe badanym wzorcom twarzy. Następnie, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów antropometrycznych, wytypowano liczbę oraz rozmiary masek w odniesieniu do poddanej badaniom grupy użytkowników.

## Przyrządy stosowane do rejestracji wymiarów twarzy

Użyty w badaniach ręczny skaner 3D (rys. 1.) umożliwił rejestrację i łączenie skanów w czasie rzeczywistym bez konieczności użycia znaczników. Skanowanie odbywa się na podstawie identyfikacji i rejestracji geometrii kształtu oraz tekstury skanowanego obiektu w czasie rzeczywistym, bez użycia dodatkowych markerów, z rozdzielczością 0,5 mm i dokładnością wyznaczenia punktu 3D o rozmiarze 0,1 mm.

Urządzenie pozwala na skanowanie obiektów w odległości od 40 cm do 100 cm przy minimalnym polu widzenia o formacie A4, tj. 21 x 29,7 cm.



Rys. 1. Parametry wymiarów twarzy wg PN-EN 140:2001 [10]  
Fig. 1. Face parameters according to PN-EN 140:2001 [10]

Cyrkiel kabłąkowy, pozwalający na pomiar z dokładnością 0,5 cm, używany do rejestracji wymiarów twarzy metodą tradycyjną, przedstawiono na rys. 2.

### Oprogramowanie

Skaner ręczny 3D wyposażony został w kilka rodzajów oprogramowania. Pierwsze z nich umożliwiło wykonywanie skanów, ich automatyczne łączenie w czasie rzeczywistym, edycję i naprawę plików oraz pomiar odpowiednich odległości charakterystycznych dla wymiarowania twarzy przedstawionych na rys. 3. i 4. Oprogramowanie filtruje ewentualne ruchy obiektu skanowanego bez utraty jakości danych. Dzięki możliwości zapisu do formatu .stl wykonane skany można od razu wczytać do innych programów w celu ich dalszej obróbki.

Drugi rodzaj oprogramowania umożliwia nakładanie powierzchni parametrycznych. Posiada kilka strategii budowy geometrii CAD (*Computer Aided Design*), pozwala na edycję i naprawę zeskanowanych modeli siatek trójkątów, porównywanie modelu CAD z siatką trójkątów, tworzenie mapy odchyłek, przekrojów m.in. przez płaszczyznę, promieniowo, wzdłuż krzywej oraz na import plików .stl, .obj, .ascii i inne oraz eksport do formatu CAD: STEP, IGES. Są to standardowe formaty plików cyfrowych służące do zapisu danych ze skanera 3D. Umożliwiają import przez różne aplikacje komputerowe do dalszej obróbki cyfrowej oraz obliczeń.

Trzeci rodzaj oprogramowania pozwala na modelowanie, za pomocą standardowych metod opartych o szkic i historię, projektowanie 3D, import plików z innych systemów CAD poprzez pliki neutralne (STEP, IGES, Parasolid).

Dodatkowo, narzędzia do inżynierii odwrotnej pozwalają na pracę z chmurą punktów, zmianę chmury punktów XYZ na powierzchnię oraz edycję plików STL (odkształcanie STL).

### Badania twarzy

W celu zidentyfikowania odchyłań osobniczych wobec wymiarów antropometrycznych twarzy zaplanowano pomiary przed i po wysiłku – 20-minutowym marszu po bieżni z założoną maską twarzową i ustaloną prędkością 5 km/h. Badania polegające na rejestracji obrazów trójwymiarowych twarzy przeprowadzono na 55 mężczyznach, będących przedstawicielami trzech grup ratowników, w tym górniczych (25 ochotników z CSRG S.A.), chemicznych (14 ochotników z PKN Orlen S.A.) oraz straży pożarnej (16 ochotników z Komendy Miejskiej Państwowej Straży Pożarnej w Łodzi).

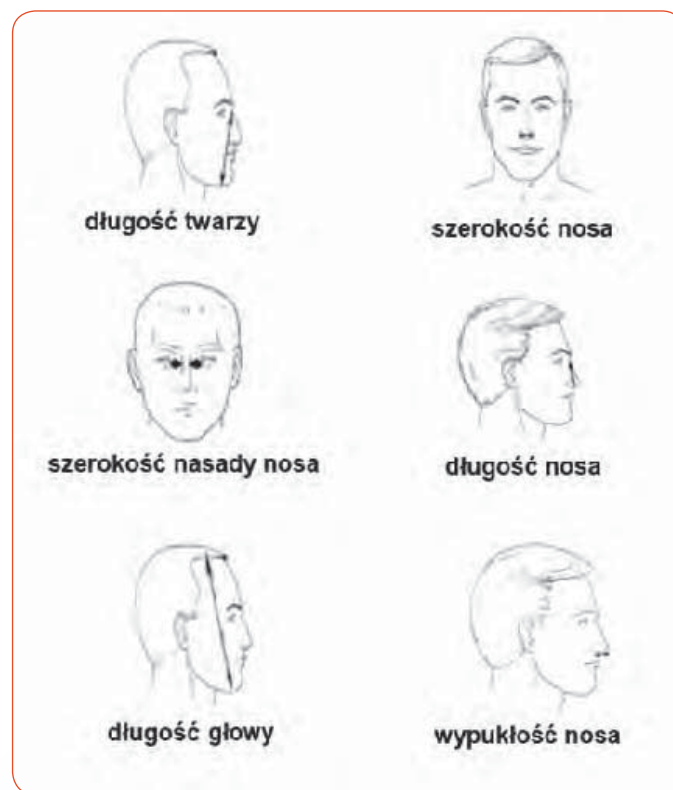
Ocena wpływu wysiłku na zmianę parametrów antropometrycznych twarzy ochotników była prowadzona w odniesieniu do środków ochrony indywidualnej stosowanych przez poszczególne grupy.

### Parametry określające wymiary twarzy

Sposoby pomiaru parametrów antropometrycznych twarzy określa, w bardzo zawężonym zakresie, PN-EN 140:2001, odnosząc się do 4 wymiarów twarzy [10]. Znacznie szerszy zakres podany został w normie ISO/TS 16976-2:2010: 12 wymiarów [8]. Należy zwrócić uwagę, że PN-EN 140:2001 traktuje tożsamą szerokość twarzy i średnicę żuchwy, podczas gdy norma ISO/TS 16976-2:2010 je rozróżnia. W opisywanych badaniach zastosowano metodykę pomiarów twarzy zgodną z normą ISO/TS 16976-2:2010.



Rys. 2. Parametry wymiarów twarzy wg ISO/TS 16976-2:2010 (część 1) [8]  
Fig. 2. Face parameters according to ISO/TS 16976-2:2010 (part 1) [8]



Rys. 3. Parametry wymiarów twarzy wg ISO/TS 16976-2:2010 (część 2) [8]  
Fig. 3. Face parameters according to ISO/TS 16976-2:2010 (part 2) [8]

Parametry wg PN-EN 140:2001 [10] (rys. 3) to:  
– długość twarzy (nasada nosa – podbródek)  
– szerokość twarzy (średnica żuchwy)  
– głębokość twarzy  
– szerokość ust.

Parametry wg ISO/TS 16976-2:2010 [8] (rys. 4 i rys. 5.) to:  
– szerokość żuchwy  
– szerokość twarzy  
– szerokość głowy  
– długość głowy  
– rozstaw źrenic  
– szerokość ust  
– szerokość czoła  
– długość twarzy  
– szerokość nasady nosa  
– szerokość nosa  
– długość nosa  
– wypukłość nosa.

### Ocena wymiarów twarzy

Ocenę parametrów antropometrycznych twarzy przeprowadzono przy użyciu metody klasycznej, z wykorzystaniem urządzeń manualnych, takich jak przymiar i cykiel kabłąkowy oraz metody cyfrowej, z zastosowaniem skanera 3D i aplikacji komputerowych. Wyniki badań parametrów twarzy zrelaksowanej (tj. przed wysiłkiem) przedstawiono w tabeli 1.

Kolejna seria badań dotyczyła zarejestrowania zmian parametrów antropometrycznych twarzy po wysiłku. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

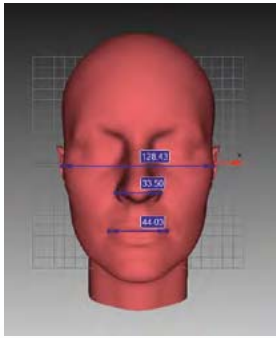
Ocenę różnic w wymiarach twarzy ochotników przed i po wysiłku przeprowadzono na podstawie porównania uśrednionych wartości liczbo-

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów antropometrycznych twarzy przed wysiłkiem  
Table 1. Results of face anthropometric parameter measurements before an effort

Lp.	Parametry podstawowe	Pomiar klasyczny		Pomiar cyfrowy	
		Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
1.	szerokość żuchwy [mm]	131	13	131,52	12,64
2.	szerokość twarzy [mm]	150	6	148,59	5,90
3.	szerokość głowy [mm]	160	3	157,34	3,92
4.	długość głowy [mm]	210	10	211,26	9,44
5.	rozstaw źrenic [mm]	65	5	66,27	4,61
6.	szerokość ust [mm]	57	6	56,92	5,63
7.	szerokość czoła [mm]	114	6	114,68	6,65
8.	długość twarzy [mm]	123	7	122,79	7,04
9.	szerokość nasady nosa [mm]	32	3	31,54	3,26
10.	szerokość nosa [mm]	41	5	40,43	4,81
11.	długość nosa [mm]	56	3	56,97	3,32
12.	wypukłość nosa [mm]	24	4	23,58	3,26

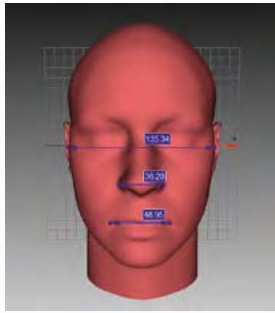
Tabela 2. Wyniki pomiarów parametrów antropometrycznych twarzy po wysiłku  
Table 2. Results of face anthropometric parameter measurements after the effort

Lp.	Parametry podstawowe	Pomiar klasyczny		Pomiar cyfrowy	
		Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
1.	szerokość żuchwy [mm]	132	13	132,42	13,23
2.	szerokość twarzy [mm]	151	6	151,21	6,74
3.	szerokość głowy [mm]	158	4	157,15	4,13
4.	długość głowy [mm]	211	10	212,04	9,84
5.	rozstaw źrenic [mm]	66	5	66,04	4,95
6.	szerokość ust [mm]	57	6	57,43	6,02
7.	szerokość czoła [mm]	114	7	114,22	6,87
8.	długość twarzy [mm]	124	7	123,57	7,39
9.	szerokość nasady nosa [mm]	32	4	31,94	3,68
10.	szerokość nosa [mm]	41	5	41,87	4,97
11.	długość nosa [mm]	56	3	57,03	3,24
12.	wypukłość nosa [mm]	24	3	23,69	3,10



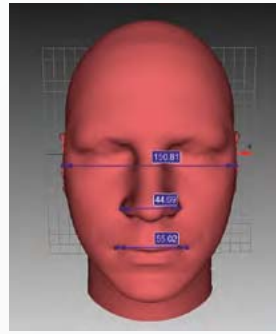
Rys. 4. Przykład obliczania wymiarów dla modelu 3D twarzy, typ A: twarz mała

Fig. 4. Example of face dimension calculating for the 3D face model, the type A, small face



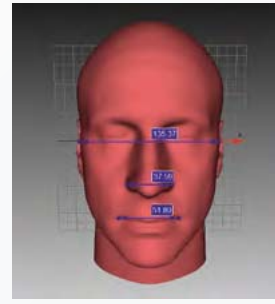
Rys. 5. Przykład obliczania wymiarów dla modelu 3D twarzy, typ B: twarz średnia

Fig. 5. Example of face dimension calculating for the 3D face model, the type B, medium face



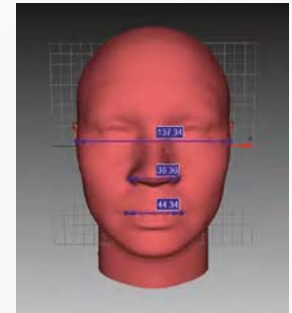
Rys. 6. Przykład obliczania wymiarów dla modelu 3D twarzy, typ C: twarz duża

Fig. 6. Example of face dimension calculating for the 3D face model, the type C, big face



Rys. 7. Przykład obliczania wymiarów dla modelu 3D twarzy, typ D: twarz długa i wąska

Fig. 7. Example of face dimension calculating for the 3D face model, the type D, long and narrow face



Rys. 8. Przykład obliczania wymiarów dla modelu 3D twarzy, typ E: twarz krótka i szeroka

Fig. 8. Example of face dimension calculating for the 3D face model, the type E, short and wide face

wych, określono również istotność statystyczną różnic pomiędzy porównywanymi wartościami średnimi za pomocą testu t-Studenta. Różnice wyników przed i po wysiłku, uwzględniające wartości zarejestrowane z wykorzystaniem metody cyfrowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wpływ wysiłku na wymiary twarzy

Table 3. Effort influence on the face dimensions

Lp.	Parametry podstawowe	Różnice	
		bez-względne	istotność
1.	szerokość żuchwy [mm]	0,90	1,01
2.	szerokość twarzy [mm]	2,62	0,90
3.	szerokość głowy [mm]	-0,19	0,25
4.	długość głowy [mm]	0,78	1,04
5.	rozstaw źrenic [mm]	-0,23	0,61
6.	szerokość ust [mm]	0,51	0,93
7.	szerokość czoła [mm]	-0,46	0,65
8.	długość twarzy [mm]	0,78	0,74
9.	szerokość nasady nosa [mm]	0,40	1,10
10.	szerokość nosa [mm]	1,44	2,01
11.	długość nosa [mm]	0,06	0,12
12.	wypukłość nosa [mm]	0,11	1,16

Uzyskane na podstawie zarejestrowanych obrazów 3D wymiary antropometryczne twarzy ochotników badań wymagały wcześniejszego przygotowania obrazów cyfrowych, czyli przetworzenia otrzymanych ze skanera danych numerycznych w postaci chmury punktów do obiektów 3D, a następnie przeprowadzenia ich wieloetapowej obróbki cyfrowej (co szczegółowo opisano dalej).

## Ocena dopasowania

Ocena dopasowania wyrobów do wymiarów antropometrycznych użytkowników powinna uwzględniać ułożenie elementów konstrukcyjnych wyrobów na użytkownika po uprzednim ich dopasowaniu i wyregulowaniu. Elementy tworzące sprzęt ochrony układu oddechowego charakteryzują się elastycznością, co ma zapewnić ich dopasowanie do użytkownika i zapewnienie mu ochrony. Maski i półmaski, które nie zostały założone przez użytkowników, wykazują istotne

odstępstwa od anatomicznego kształtu twarzy i przyjmują właściwy kształt dopiero po ich założeniu i wyregulowaniu. Fakt ten ma kluczowe znaczenie w przypadku oceny wymiarów konstrukcji masek i półmasek twarzowych. W związku z tym ocena dopasowania wyrobów do wymiarów twarzy użytkowników ma sens w przypadku porównania wymiarów antropometrycznych twarzy do wymiarów wzorców stosowanych jako matryce do wytwarzania tego typu sprzętu. „Kopyta” używane do wytwarzania masek i półmasek twarzowych przez producentów nie są jednakowe, stąd różnorodność form i kształtów sprzętu ochronnego dostępnego na rynku.

Sposób oceny dopasowania wyrobów do wymiarów antropometrycznych użytkowników przedstawiono na przykładzie porównania zarejestrowanych wymiarów antropometrycznych użytkowników z modelami 5 głów stosowanymi do oceny sprzętu ochrony układu oddechowego zgodnie z wymaganiami normy ISO/TS 16976-2:2010 [8].

W celu określenia największego podobieństwa badanego ochotnika do wzorców twarzy wykorzystano analizę skupień (*cluster analysis*), polegającą na określeniu największych podobieństw ze zbioru użytkowników, a następnie przypisano ich do ustalonych grup (5 grup dla twarzy identyfikowanych na podstawie 12 równoważnych parametrów), stosując algorytm hierarchiczny. Zastosowano metodę Wardana, wykorzystującą przy wyodrębnianiu skupisk zasadę minimalizacji wariancji.

Modele twarzy uwzględniają 5 typów: A – mała, B – średnia, C – duża, D – długa i wąska, E – krótka i szeroka. W odniesieniu do wszystkich obliczono parametry, zgodnie z metodyką przyjętą do oceny parametrów antropometrycznych twarzy ochotników. Zdjęcia obrazujące obliczanie wymiarów w odniesieniu do 5 typów twarzy przedstawiono na rysunkach 4.-8.

Przynależność do jednego z 5 typów twarzy, określoną na podstawie analizy skupień, opisano następująco:

- model twarzy typu A (mała) – 7 ratowników
- model twarzy typu B (średnia) – 14 ratowników
- model twarzy typu C (duża) – 18 ratowników
- model twarzy typu D (długa i wąska) – 6 ratowników

– model twarzy typu E (krótka i szeroka) – 10 ratowników.

Wytwarzany przez producentów sprzęt ochrony układu oddechowego uwzględnia tylko 1 typ „kopyta” głowy w odniesieniu do masek i półmasek. Ocena komfortu użytkowania masek przez ochotników przeprowadzono zatem przy użyciu jednego dostępnego rozmiaru maski. Aż 42 z 55 ochotników potwierdziło dyskomfort związany ze stosowaniem maski podczas marszu. Niedogodności dotyczyły zbyt dużego nacisku na poszczególne elementy twarzy, w szczególności na kości policzkowe, żuchwę oraz brodę, co potwierdziły liczne odciski na twarzy użytkowników po zdjęciu maski.

W tabeli 4. przedstawiono optymalną liczbę „kopyt” twarzy, uzyskaną na podstawie analizy skupień przy dwóch rodzajach stopniowania, z różnym krokiem, co znaczy, że poszczególne wymiary twarzy i/lub głowy zwiększono co 5 i co 10 mm.

Tabela 4. Optymalna liczba „kopyt” twarzy dla badanej grupy 55 ochotników

Table 4. The optimum number of stereotypes (forms) of faces for the examined group of 55 volunteers

Lp.	Parametr	Proponowana liczba stopniowania rozmiarów „kopyt”	
		Stopniowanie co 5 mm	Stopniowanie co 10 mm
1.	szerokość żuchwy	6	4
2.	szerokość twarzy	4	3
3.	szerokość głowy	3	2
4.	długość głowy	5	3
5.	rozstaw źrenic	3	2
6.	szerokość ust	3	2
7.	szerokość czoła	4	2
8.	długość twarzy	4	3
9.	szerokość nasady nosa	2	2
10.	szerokość nosa	3	2
11.	długość nosa	2	2
12.	wypukłość nosa	2	2

Największe zróżnicowanie i liczbę rozmiarów „kopyt” twarzy uzyskano na podstawie takich parametrów, jak szerokość żuchwy i długość głowy,

co jest zgodne z oceną dyskomfortu stosowanych masek, przeprowadzoną w formie wywiadu z ochotnikami. Maski zrealizowane na podstawie stopniowania „kopyt” głowy co 10 mm pozwoliłyby uzyskać poprawę komfortu w stosunku do wyjściowego jednego rozmiaru maski.

Jednak liczba uzyskanych rozmiarów byłaby mniejsza niż przy stopniowaniu co 5 mm, a uzyskany stopień dopasowania dla stopniowania co 10 mm byłby również mniejszy niż dla stopniowania co 5 mm. Po analizie stopniowania masek co 5 i 10 mm, uwzględniając kompromis pomiędzy stopniem dopasowania a względami ekonomicznymi, wybrano „kopyta” głowy ze stopniowaniem co 5 mm. Przyjmując przy stopniowaniu rozmiarów „kopyt” zmianę co 5 mm w stosunku do ocenianych parametrów, zalecana liczba „kopyt” w odniesieniu do badanej grupy ochotników wynosi 6.

Na podstawie uzyskanych wyników stopniowania „kopyt” twarzy do wytwarzania masek i półmasek można stwierdzić, że zaproponowanych w normie ISO/TS 16976-2:2010 [8] pięć modeli głów powinno zapewnić wystarczające zróżnicowanie i komfort użytkownika tego typu sprzętu.

### Procedura projektowania ŚOI z zastosowaniem techniki skanowania 3D

Procedura projektowania spersonalizowanych ŚOI z wykorzystaniem techniki skanowania 3D powinna uwzględniać następujące etapy:

- przygotowanie obiektu do cyfrowej rejestracji:
  - sprawdzenie oświetlenia
  - ustawienie optymalnych parametrów skanowania 3D
  - wykonanie próbnego zapisu
  - rejestracja części ciała z wykorzystaniem skanera 3D
    - przygotowanie obrazu cyfrowego 3D do dalszej obróbki numerycznej
    - analiza wymiarów antropometrycznych na podstawie zapisanych obrazów 3D
    - wytypowanie kluczowych elementów konstrukcyjnych projektowanych ŚOI
    - opracowanie tabeli rozmiarów dla elementów konstrukcyjnych ŚOI
    - zaprojektowanie elementów konstrukcyjnych ŚOI
    - skalowanie elementów konstrukcyjnych na podstawie istniejących szablonów projektowanych ŚOI z uwzględnieniem zarejestrowanych rozmiarów
    - opracowanie form odlewniczych/wtryskowych dla elementów konstrukcyjnych ŚOI:
      - cyfrowa transformacja chmury punktów 3D do formatu typu CAD z zastosowaniem narzędzi inżynierii odwrotnej
      - ocena jakości łączenia zaprojektowanych elementów konstrukcyjnych ŚOI (eliminacja punktów i krawędzi kolizyjnych).

### Dyskusja wyników

Zarejestrowane obrazy trójwymiarowe oraz ich cyfrowa obróbka umożliwiły porównanie dokładności wymiarów antropometrycznych uzyskanych tradycyjnie (analogowo, z użyciem

narzędzi manualnych) oraz cyfrowo, z wykorzystaniem skanera 3D. Jakość technik cyfrowych w porównaniu z analogowymi metodami pomiarów jest istotnie wyższa w przypadku rejestrowania parametrów antropometrycznych, co potwierdziły przedstawione badania, jak również – dostępne w literaturze – omówienia innych autorów. Rejestracja parametrów twarzy i głowy z wykorzystaniem skanera 3D umożliwia przeprowadzenie korekty pomiaru i ponowną analizę w przypadku wykrycia tzw. błędów grubych lub istotnie zauważalnych odstępstw, podczas gdy pomiary antropometryczne wykonane urządzeniami analogowymi w przypadku wykrycia odstępstw muszą być odrzucone.

Zaproponowana metodyka badań, uwzględniająca rejestrację obrazów 3D masek, pozwoliła na ocenę zmian wymiarów antropometrycznych twarzy w wyniku obciążenia fizycznego. Ponadto rejestracja obrazów 3D twarzy po wysiłku umożliwiła identyfikację odształceń twarzy, które – mimo że nie mają wpływu na zmianę wymiarów antropometrycznych – wskazują na stopień dopasowania i komfort użytkownika sprzętu. Wyniki pomiarów antropometrycznych przed i po wysiłku twarzy, pomimo zauważalnych zmian po wysiłku, nie wykazały istotnych statystycznie różnic wartości średnich w zakresie badanych parametrów. Zauważalne są jednak zakresy zmian poszczególnych parametrów, co wskazuje na konieczność stosowania przez użytkowników wyrobów o różnych rozmiarach i kształtach.

Dyskomfort spowodowany był stosowaniem przez wszystkich ochotników badań jednego rozmiaru maski. Poddane badaniom maski wykazały nienależyte dopasowanie do wymiarów twarzy ochotników. W szczególności elementy tworzonego sprzętu ochrony układu oddechowego projektowane i wytwarzane przez producentów na podstawie jednego „kopyta” nie spełniają oczekiwań użytkowników. Stosowanie jednego „kopyta” do formowania elementów twarzowych skutkuje koniecznością mocniejszego dociągnięcia pasów regulujących w celu zapewnienia szczelności, a co za tym idzie, zmniejsza komfort użytkownika tego sprzętu.

Rejestracja wymiarów antropometrycznych uczestników badań pozwoliła na wydzielenie podstawowych typów „kopyt” pod względem budowy twarzy. Kluczowym etapem tego typu prac jest ustalenie kroku stopniowania poszczególnych parametrów „kopyt”, stanowiących podstawę projektowania i wytwarzania masek i półmasek o cechach ochronnych. Zaproponowane w normie ISO/TS 16976-2:2010 różne modele głów, podobnie jak uzyskane w ramach pracy wyniki, wskazują na potrzebę stopniowania „kopyt” w odniesieniu do tego samego typu masek i półmasek, z uwzględnieniem rzeczywistych wymiarów antropometrycznych twarzy. Uzyskane na podstawie badań rozmiary „kopyt” twarzy/głowy gwarantują odpowiednie dopasowanie masek do wymiarów antropometrycznych badanej grupy ochotników. W przypadku poddanej badaniom grupy 55 ochotników, będących przedstawicielami grup ratowniczych, jest to odpowiednio 6 rozmiarów „kopyt” twarzy.

### Podsumowanie

Projektowanie elementów konstrukcyjnych części twarzowych sprzętu ochrony układu oddechowego z wykorzystaniem technik skanowania 3D może uwzględniać również dopasowanie sprzętu do indywidualnych wymiarów użytkownika, dając możliwość wytworzenia wyrobu spersonalizowanego i idealnie dopasowanego do wymiarów konkretnego użytkownika. Taki schemat postępowania, pomimo wysokich nakładów finansowych, jest stosowany w przypadku np. sportowców, u których jakość dopasowania sprzętu wpływa na uzyskiwane wyniki. Nadrzędny cel, jakim jest bezpieczeństwo podczas pracy, w szczególności ratowników, uzasadnia wytwarzanie spersonalizowanych środków ochrony indywidualnej i może mieć istotny wpływ zarówno na komfort, jak również na skuteczność prowadzonych akcji ratowniczych.

Głównym kosztem wytwarzania wyrobów spersonalizowanych (masek i półmasek) z zastosowaniem skanowania 3D jest nakład pracy, wynikający z przygotowania rejestrowanych obrazów 3D, na podstawie numerycznej obróbki. Jednakże rozwój narzędzi komputerowych może w istotny sposób skrócić ten czas, dając możliwość całkowitego zautomatyzowania procesu rejestracji obrazów 3D twarzy, obróbki plików cyfrowych oraz obliczania parametrów.

Projektowanie środków ochrony indywidualnej z wykorzystaniem technik skanowania 3D może uwzględniać projektowanie i wytwarzanie „kopyt” stanowiących matryce do formowania i profilowania sprzętu w procesie wtryskiwania, wulkanizacji, czy zszywania. Obrazy 3D części ciała mogą też być podstawą do wytwarzania pojedynczych elementów składowych środków ochrony indywidualnej.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Dyrektywa 89/686/EWG dotycząca środków ochrony indywidualnej
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla środków ochrony indywidualnej (Dz. U. Nr 259, poz. 2173)
- [3] Peng F., Sweeney D., Delamore P. *Digital Innovation in Fashion How to 'Capture' the User Experience in 3D Body Scanning*. IJEM, 2012, Vol. 3, No 4: 233-240
- [4] Kyung SH. and Ashdown S.P. *An Exploratory Study of the Validity of Visual Fit Assessment From Three-Dimensional Scans*. "Clothing & Textiles Research Journal" 2010, Vol. 28, No. 4
- [5] Galantucci LM., Percoco G., Di Gioia E. *Photogrammetric 3D Digitization of Human Faces Based on Landmarks*. Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists Vol. I, IMECS 2009, March 18 – 20, Hong Kong 2009
- [6] Koutny D., Palousek D., Koutecky T., Zatočilova A., Rosický J., Janda M. *3D Digitalization of the Human Body for Use in Orthotics and Prosthetics*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2012, 6:12-21
- [7] <http://www.e-prototypy.pl/oferta/skanowanie3d>
- [8] ISO/TS 16976-2:2010 Respiratory protective devices -- Human factors -- Part 2: Anthropometrics
- [9] Jeffrey O., Stull G. *When it comes to PPE, size matters*. "Fire Rescue News" 2012, 25, 10 (<http://www.firerescue1.com/print.asp?act=print&vid=1359841-when-it-comes-to-ppe-size-matters>, dostęp online 29.10.2014)
- [10] PN-EN 140:2001 Sprzęt ochrony układu oddechowego -- Półmaski i ćwierćmaski -- Wymagania, badanie, znakowanie
- [11] [www.statsoft.pl/czytelnia.html](http://www.statsoft.pl/czytelnia.html)