

**Akademia Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego
w Poznaniu**

mgr Katarzyna Rosicka

Rozprawa doktorska

**„Zastosowanie urządzenia MyotonPRO do oceny
parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych ludzkiej
skóry”**



Promotor:

prof. AWF dr hab. Włodzimierz Mrówczyński

Poznań 2021

Poznan University of Physical Education

Katarzyna Rosicka, MSc

Doctoral dissertation

**Application of MyotonPRO in skin biomechanical
and viscoelastic properties assessment**



Supervisor:

Włodzimierz Mrówczyński, PhD, Assoc. Prof.

Poznań 2021

Spis treści

I. Autoreferat	4
II. Dissertation summary	18
III. Streszczenie / Abstract	35
IV. Załączniki / Appendices.....	38

I. AUTOREFERAT

Przedłożona dysertacja doktorska to cykl prac pod wspólnym tytułem „Zastosowanie urządzenia MyotonPRO do oceny parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych ludzkiej skóry”. Na cykl składają się dwa artykuły naukowe:

1. Rosicka K, Mierzejewska-Krzyżowska B, Mrówczyński W. *Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women*. Skin Research and Technology, 2020, doi: 10.1111/srt.12946., IF: 2.365; punktacja MEiN: 70 pkt
2. Rosicka K, Mierzejewska-Krzyżowska B, Mrówczyński W. *Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body*. Skin Research and Technology, 2021, doi: 10.1111/srt.13116., IF: 2.365; punktacja MEiN: 70 pkt

Łącznie IF: 4.73; MEiN: 140 pkt.

Prace opublikowane poza cyklem:

1. Rosicka K, Arlet J, Bukowska D, Mierzejewska-Krzyżowska B. *Ultrasound elastography in clinical diagnostics and in scientific research on muscles*. Central European Journal of Sport Sciences and Medicine, 2019, doi: 10.18276/cej.2019.3-07, punktacja MEiN: 40 pkt.
2. Rosicka K, Hill M, Wdowski M. *Skin anisotropy: Finding the optimal incision line for volar forearm in males and females*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104805, IF: 3.902, punktacja MEiN: 100 pkt.
3. Hill M, Rosicka K, Wdowski M. *Effect of sex and fatigue on quiet standing and dynamic balance and lower extremity muscle stiffness*. European Journal of Applied Physiology, 2021; doi: 10.1007/s00421-021-04831-0, IF: 3.078, punktacja MEiN: 100 pkt.

Łącznie IF: 11,71 ; MEiN: 380

WSTĘP

Skóra jest największym narządem ludzkiego organizmu, którego funkcje ochronne, regulacyjne, wydzielnicze oraz czuciowe umożliwiają prawidłowe działanie całego organizmu. Ze względu na powierzchowne położenie oraz łatwą dostępność, ocena stanu skóry wykonywana przez dermatologów, opiera się w praktyce głównie na subiektywnej ocenie wizualnej lub wywiadzie medycznym¹. W badaniach diagnostycznych dotyczących skóry, postęp technologiczny¹⁻⁶, umożliwił wprowadzenie nowych narzędzi badawczych dostępnych obecnie nie tylko naukowcom, ale również praktykom w ich codziennej pracy. Przykładem urządzenia obecnie szeroko stosowanego w dermatologii jest dermatoskop, który między innymi umożliwia wczesne wykrycie zmian nowotworowych rozwijających się w obrębie skóry^{7, 8}. Wykorzystanie nowych urządzeń pomiarowych oraz zastosowanie obiektywnych metod diagnostycznych jako standardowej procedury badawczej w ocenie zmian skórnych pozwala na wykonanie precyzyjnej diagnozy, prowadzi do lepszego określenia stopnia zaawansowania wielu chorób skóry¹ i co najważniejsze umożliwia szybsze zastosowanie odpowiedniej terapii.

Obecnie są już dostępne liczne urządzenia umożliwiające zobiiektywizowany pomiar biomechanicznego i wiskoelastycznego stanu skóry, które jednak wykorzystują odmienne technologie badawcze, a dodatkowo różnią się między sobą zarówno mierzonymi parametrami jak i kierunkiem siły lub obciążenia wykorzystanym do przeprowadzania pomiarów (horyzontalny, pionowy, liniowy). Dla przykładu - Indentometer mierzy sztywność (ang. stiffness) i odkształcalność (ang. compliance) skóry^{9, 10}, CutiScan – wiskoelastyczność (ang. viscoelasticity) oraz anizotropię (ang. anisotropy)^{11, 12}, Reviscometer opisuje twardość skóry za pomocą akustycznej fali uderzeniowej (ang. acoustical shock wave hardness)^{6, 13-15}, Frictiometer określa tarcie (ang. friction)^{6, 14, 16}, a Ballistometer ocenia elastyczność (ang. elasticity) i twardość (ang. hardness)¹⁷⁻²⁰. Natomiast elastografia ultrasonograficzna określa sztywność tkanki (ang. stiffness) na podstawie modułu Younga^{6, 21-26}, DermaLab/ DermaLab Combo - elastyczność skóry (ang. elastic properties)²⁷⁻³², z kolei SkinFibrometer mierzy stwardnienie (ang. induration)^{6, 33-36}, a najczęściej wykorzystywany Cutometer - właściwości elastyczne (ang. elastic) i wiskoelastyczne skóry (ang. viscoelastic properties)^{6, 14, 17, 33, 37-41}.

Mnogość parametrów mierzonych przez wymienione urządzenia, wykorzystanie zróżnicowanych technik badawczych, oraz przedstawianie zmierzonych parametrów w odmiennych jednostkach, często uniemożliwia prawidłowe porównanie uzyskanych parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych opisujących stan skóry, oraz utrudnia

jednoznaczną interpretację uzyskanych wyników⁶. W związku z tym wydaje się konieczne, aby do badań diagnostycznych dotyczących właściwości skóry, wprowadzić nowe urządzenie, które umożliwi szybką, nieinwazyjną, obiektywną i jednoczesną ocenę wielu parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry. Praktyczne zastosowanie takiego urządzenia może doprowadzić nie tylko do precyzyjnej oceny skóry i idącej za tym rzetelniejszej diagnozy, ale również do stworzenia obiektywnej metody oceny stanu skóry dla celów diagnostycznych w przypadku różnych chorób dermatologicznych.

MyotonPRO to urządzenie umożliwiające przeprowadzenie tzw. cyfrowej palpacji czyli obiektywnego pomiaru oceny stanu biomechanicznego niektórych tkanek biologicznych. Jak dotąd MyotonPRO wykorzystywano przede wszystkim do oceny stanu mięśni szkieletowych oraz ścięgien⁴²⁻⁴⁸ mierząc za jego pomocą sztywność (ang. dynamic stiffness), elastyczność (ang. logarithmic decrement) oraz napięcie tkanek (ang. oscillation frequency). W nielicznych badaniach wykorzystano pełne możliwości tego urządzenia mierząc nie tylko sztywność, elastyczność, napięcie tkanek, ale również czas relaksacji (ang. mechanical stress relaxation time) i odkształcalność (ang. creep)^{47, 48} badanych tkanek.

Podjęto zaledwie dwie próby zastosowania MyotonPRO do badań skóry określając jej sztywność w zdrowej populacji⁴⁹ oraz u osób z przewlekłą chorobą przeszczep przeciw gospodarzowi⁵⁰, jak również porównując parametry skóry bez blizny oraz skóry z blizną po cięciu cesarskim⁵¹. Jednak, jak dotąd nie wykonano żadnych systematycznych badań, których celem była ocena zdolności MyotonPRO do pomiaru stanu tkanki skórnej u człowieka.

HIPOTEZY I CELE BADAŃ

Głównym celem badań opisanych w obu artykułach było sprawdzenie czy MyotonPRO jest urządzeniem, które nadaje się do obiektywnej oceny parametrów biomechanicznych oraz wiskoelastycznych zdrowej ludzkiej skóry, które łącznie odzwierciedlają jej właściwości.

W pierwszej publikacji (*Artykuł nr 1*) założono hipotezę, że końcówki pomiarowe typu L-shape będą odpowiednie do oceny pojedynczego parametru opisującego skórę człowieka tj. sztywności.

Natomiast celem pracy było zweryfikowanie tej hipotezy poprzez porównanie wartości tego parametru (średnie i zakresy) uzyskanego przez zastosowanie czterech różnych końcówek pomiarowych używanych przez Myoton PRO: tj. końcówki małej typu L-shape, końcówki

średniej typu L-shape, końcówki standardowej z nakładką oraz końcówki standardowej używanej do badania mięśni i ścięgien.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników, pomiarów sztywności dokonano w trzech różnych obszarach ludzkiej skóry - w okolicach obojczyka (clavicular), okolicach przedramienia po stronie brzusznej (volar forearm) oraz w okolicach kości piszczelowej (shin), które charakteryzują się odmienną proporcją tkanek powierzchniowych oraz głębokich.

W drugiej publikacji (*Artykuł nr 2*) przyjęto hipotezę, że powtarzalność występowania identycznych korelacji między badanymi parametrami w trzech różnych obszarach zdrowej skóry będzie świadczyła o poprawności pomiarów prowadzonych przez MyotonPRO, co pozwoli określić praktyczną przydatność tego urządzenia do oceny parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry.

Natomiast celem badań było zmierzenie i porównanie wartości wszystkich możliwych parametrów skóry mierzonych jednocześnie przez MyotonPRO [sztywność (ang. dynamic stiffness), elastyczność (ang. logarithmic decrement) napięcie tkanek (ang. oscillation frequency) czas relaksacji (ang. mechanical stress relaxation time) i odkształcalność (ang. creep)].

W celu uzyskania wiarygodnych wyników, podobnie jak w *Artykule 1*, pomiary wykonywano w trzech różnych obszarach ludzkiej skóry - w okolicach obojczyka (clavicular), okolicach przedramienia po stronie brzusznej (volar forearm) oraz w okolicach kości piszczelowej (shin). Ponadto, w wymienionych powyżej obszarach badawczych (clavicular, volar forearm and shin) sprawdzano czy pomiędzy niektórymi badanymi parametrami występują korelacje, które następnie porównywano pomiędzy trzema badanymi obszarami sprawdzając, czy są one identyczne pomimo odmiennych wartości uzyskiwanych parametrów (średnie, zakresy) w każdym z badanych trzech obszarów.

METODY

Badania eksperymentalne polegały na wykonaniu pomiarów wartości parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry mierzonych przy pomocy urządzenia MyotonPRO (Myoton AS, Estonia).

Szacowanie wielkości próbki

Wielkość próbki była oszacowana na podstawie wyliczeń programu G - Power software (v.3.1.9.4) dla testu ANOVA z powtarzalnymi pomiarami przy założeniach (power =0.95, alpha =0.05, effect size=0.60), co pozwoliło ustalić, iż grupa składająca się z minimum 28 osób będzie reprezentatywna do wykonania badań. Jednak zalecenia EEMCO (the European Group on Efficacy Measurement and Evaluation of Cosmetics and other Products) sugerują, że grupa wystarczająca do wykonania wiarygodnych badań dotyczących oceny parametrów skóry powinna liczyć 30 osób ⁶.

Uczestnicy badania

Badania wykonano na młodych kobietach - wolontariuszkach, które wypełniały kwestionariusz w celu kwalifikacji do udziału w badaniu. Kryteriami wykluczającymi z badań były: choroby skóry, palenie papierosów oraz rany, blizny i tatuaże w miejscach pomiarowych. Ostatecznie, po analizie danych uzyskanych w kwestionariuszach, 32 zdrowe kobiety polskiego pochodzenia, w wieku 19-25 (średnia: 20.6±1.7), wskaźnik BMI od 18.3 do 29.3 (średnia: 22.5±2.7) zostały zrekrutowane do badań wśród studentek fizjoterapii Akademii Wychowania Fizycznego im. E. Piaseckiego w Poznaniu, w Filii w Gorzowie Wielkopolskim. Wolontariuszki zostały poinformowane o procedurze badania oraz wyraziły pisemną zgodę na udział w badaniu.

Protokół badań

W celu aklimatyzacji przed wykonaniem pomiarów każda z uczestniczek spędziła 5 minut w pomieszczeniu, gdzie przeprowadzono badania. MyotonPRO ustawiono na program Multi-Scan, składający się z pięciu pojedynczych pomiarów (urządzenie wysyła pięć krótkich impulsów mechanicznych), które automatycznie przedstawiane są jako uśredniony wynik. Ponadto, każdy pomiar powtórzono pięciokrotnie. Do analizy wykorzystano średnią wartość ze wszystkich pięciu pomiarów wykonanych w trybie Multi-Scan. Pojedynczy pomiar Multi-Scan zajmował ok 5 sekund, natomiast wykonanie wszystkich pomiarów w każdym z trzech miejsc badawczych zajmowało mniej niż minutę. Uczestniczki przyjmowały pozycję leżącą w celu oceny skóry w okolicy przedramienia i kości piszczelowej oraz pozycję siedzącą w celu wykonania pomiarów w okolicy obojczyka. Wszystkie pomiary były przeprowadzane przez tą samą osobę z dwuletnim doświadczeniem obsługi urządzenia MyotonPRO w stałych godzinach (8.00- 12.00).

Pomiary były rejestrowane w trzech oznaczonych miejscach - w okolicy obojczyka (clavicular), przedramienia po stronie brzusznej (volar forearm) oraz okolicy kości piszczelowej (shin), na dominującej kończynie dolnej lub górnej. Okolica obojczyka oraz kości piszczelowej zostały wybrane do badań ze względu na relatywnie cienką warstwę tkanki podskórnej. Natomiast przedramię po stronie brzusznej wybrano ze względu na fakt, że jest to miejsce bardzo często wykorzystywane w badaniach z zakresu dermatologii i oceny właściwości skóry³⁸.

Pomiary w okolicy obojczyka zostały przeprowadzone w połowie długości trzonu obojczyka - w miejscu, gdzie nie ma przyczepów mięśniowych. Ocena skóry przedramienia po stronie brzusznej została dokonana w 1/3 części proksymalnej przedramienia. Natomiast, pomiary w okolicy kości piszczelowej były prowadzone w miejscu najbardziej wyczuwalnym palpacyjnie wzdłuż brzegu przedniego kości piszczelowej.

Eksperymenty były przeprowadzone zgodnie z etycznymi wytycznymi Deklaracji Helsińskiej, a protokół badawczy został zatwierdzony przez Komisję Bioetyczną przy Uniwersytecie Medycznym im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu (zgoda nr 59/20).

MyotonPRO

MyotonPRO umożliwia pomiary następujących parametrów:

- (1) napięcia tkanki (ang. oscillation frequency) [Hz] ,
- (2) sztywności (ang. dynamic stiffness) [N/m], czyli oporu stawianego przez tkanki przed deformującą je siłą zewnętrzną
- (3) elastyczności (ang. logarithmic decrement) która określa zdolność powrotu tkanki do stanu pierwotnego po usunięciu deformującej jej siły zewnętrznej
- (4) czasu relaksacji (ang. mechanical stress relaxation time) [ms], który określa czas potrzebny do powrotu do pierwotnego kształtu
- (5) odkształcalności (ang. creep), która przedstawia stosunek czasu trwania danego procesu przetwórczego - w tym wypadku stopniowego wydłużania do czasu relaksacji.

Parametry 2 i 3 są typowymi parametrami określającymi właściwości biomechaniczne a parametry 4 i 5 parametrami opisującymi właściwości viskoelastyczne skóry.

Urządzenie w sposób automatyczny (tj. bez wpływu nacisku ze strony badającego) aplikuje stałą siłę (0.18 N) w celu lekkiej kompresji tkanki podskórnej albo w przypadku pomiarów skóry tj. pomiarów w płaszczyźnie horyzontalnej delikatnego wstępnego napięcia tkanki. Następnie, przy standardowej procedurze, urządzenie wysyła krótki (15 ms) mechaniczny impuls (0.4 N), w celu wywołania odpowiedzi tkanki w formie wytłumionej

oscylacji. Każdy impuls jest wysyłany w 0,8 s. odstępie czasowym. Takie ustawienia, rekomendowane przez firmę Myton SA, były wykorzystane w czasie pomiarów standardową końcówką jak i obiema końcówkami typu L-shape. Natomiast, przy zastosowaniu standardowej końcówki wraz z nakładką skrócono czas wysyłanego impulsu z 15 do 7 ms⁴⁹ w celu oceny tkanek powierzchniowych a nie mięśni.

Cztery różne końcówki pomiarowe zostały wykorzystane w celu oceny sztywności skóry: końcówka typu L-shape o krótkim ramieniu 15 mm (ang. short arm length - SAP), końcówka typu L-shape o średnim ramieniu 20 mm (ang. medium arm length - MAP) wraz z nakładką w kształcie dysku o średnicy 10 mm (obie dedykowane do oceny skóry), końcówka standardowa z nakładką w kształcie dysku o średnicy 10 mm oraz końcówka prosta standardowa o średnicy 3 mm do oceny mięśni (*Artykuł nr 1*). Przy prostopadłym ustawieniu urządzenia do miejsca pomiaru (standardowa końcówka z/bez nakładki) MyotonPRO wysyła impuls w głąb tkanki. W przypadku pomiarów z wykorzystaniem końcówek typu L-shape impuls wysyłany jest horyzontalnie, a urządzenie ułożone jest równolegle względem mierzonego obszaru. W celu uniknięcia ześlizgnięcia się końcówki w trakcie pomiarów stosowane są cienkie (0,1 mm) dwustronne naklejki (o średnicy 10 mm).

Natomiast pomiary pozostałych parametrów biomechanicznych oraz wiskoelastycznych skóry (*Artykuł nr 2*) były rejestrowane wyłącznie przy użyciu obu wyżej opisanych obu końcówek typu L-shape. W celu zapewnienia lepszego kontaktu pomiędzy skórą a dyskiem również wykorzystano dwustronne naklejki.

Analiza statystyczna

Analizy statystycznej dokonano przy użyciu programu Statistica 13 (Statsoft, Kraków, Polska). Normalność rozkładu danych została oszacowana przy użyciu testu Shapiro–Wilka (*Artykuł nr 1 i 2*).

Test ANOVA Friedmana wraz z testem post- hoc Tukey'a był użyty w celu porównania wartości sztywności tkanek zmierzonymi przez wszystkie cztery końcówki (*Artykuł nr 1*) oraz celu porównania wartości wszystkich parametrów zmierzonych przy pomocy końcówek typu L-shape (*Artykuł nr 2*).

Współczynnik korelacji rang Spearmana był wykorzystany do sprawdzenia korelacji występujących pomiędzy parametrami (*Artykuł nr 2*). Korelacje były klasyfikowane jako: korelacja nikła (0–0.1), korelacja słaba (0.1–0.3), korelacja przecięta (0.3–0.5), korelacja wysoka (0.5–0.7) korelacja bardzo wysoka (0.7–0.9), korelacja prawie pełna (>0.9) oraz

korelacja pełna (1.0). Różnice uznawano za istotne statystyczne przy wartości $p < 0.05$ (Artykuł nr 1 i 2).

Uzyskano wysoki współczynnik korelacji wewnątrzklasowej (ang. intraclass correlation coefficients - ICC) oraz niski współczynnik zmienności (ang. coefficients of variation - CV) dla wszystkich parametrów oraz dla obu końcówek badając rzetelność przeprowadzonych pomiarów (Artykuł nr2).

Wykresy Bland–Altmana wraz z przedziałem zgodności zostały wykonane w celu porównania wyników zebranych przez końcówki typu SAP i MAP w przypadku tego samego parametru w każdym z badanych miejsc (Artykuł nr2).

WYNIKI

Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women (Artykuł nr1)

Nie wykazano istotnych statystycznie różnic pomiędzy badanymi wartościami sztywności uzyskanymi przy pomocy obu końcówek typu L-shape we wszystkich badanych lokalizacjach. Natomiast odnotowano istotne statystycznie różnice pomiędzy wartościami tego parametru zmierzonymi przez standardową końcówkę, oraz standardową końcówkę wraz z nakładką, a obu końcówkami typu L-shape. Ponadto, wyniki sztywności uzyskane przez standardową końcówkę różniły się istotnie od tych zebranych przez standardową końcówkę wraz z nakładką.

Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body (Artykuł nr 2)

Nie znaleziono istotnych statystycznie różnic pomiędzy wartościami wszystkich parametrów uzyskanymi przy pomocy obu końcówek typu L-shape we wszystkich lokalizacjach. Natomiast występowały istotnie statystycznie różnice pomiędzy średnimi wartościami prawie wszystkich parametrów w zależności od miejsca badanego (za wyjątkiem elastyczności). Pomimo widocznych różnic pomiędzy średnimi wartościami badanych parametrów, zauważono występowanie powtarzalnych korelacji, pomiędzy poszczególnymi parametrami w różnych obszarach ludzkiej skóry.

DYSKUSJA

Z przeprowadzonych badań wynikają dwa główne wnioski:

(1) dwie z czterech końcówek pomiarowych desygnowanych dla MyotonPRO (tj. obie końcówki typu L-shape) umożliwiają wykonywanie rzetelnych pomiarów parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych ludzkiej skóry

(2) występują identyczne lub niemal identyczne korelacje pomiędzy niektórymi badanymi parametrami biomechanicznymi i wiskoelastycznymi we wszystkich trzech badanych miejscach ludzkiej skóry u zdrowych osobników

Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women (Artykuł nr 1)

Wcześniejsze badania wykazały że urządzenie MyotonPRO umożliwia precyzyjne i powtarzalne pomiary sztywności mięśni oraz ścięgien, które są wyrażone w jednostce układu SI - N/m^{42, 43, 44, 45, 46, 47}. Natomiast, dane uzyskane przez nasz zespół sugerują, że MyotonPRO wyposażony w końcówki typu L-shape może być skutecznym narzędziem do przeprowadzanie pomiarów sztywności skóry ludzkiej. Wskazują na to trzy przesłanki.

Po pierwsze, we wszystkich badanych obszarach (okolice obojczyka, kości piszczelowej oraz przedramienia) występowały istotnie statystycznie różnice w wartościach sztywności skóry uzyskanych przez końcówki do mierzenia tkanek powierzchniowych tj. pomiędzy końcówkami typu L-shape a standardową końcówką z nakładką oraz końcówką standardową, przeznaczoną do oceny mięśni i ścięgien. Wymienione różnice były szczególnie widoczne w okolicy obojczyka, gdzie wykazano wyraźną dysproporcję pomiędzy “niskimi” a “wysokimi” wartościami sztywności skóry zarejestrowanymi przez wyżej wymienione końcówki. Podobna, chociaż mniej wyraźna różnica w wartościach sztywności była również widoczna w obszarze kości piszczelowej. Takie wyniki sugerują, że w przypadku pomiarów wszystkimi końcówkami w okolicy obojczyka i kości piszczelowej, które charakteryzują się bardzo cienką warstwą tkanek powierzchniowych/skóry⁵², końcówki standardowe (zarówno ta z nakładką, jak i ta bez nakładki) rejestrowały bardzo wysokie wartości sztywności, które są niemożliwe do uzyskania w przypadku tkanek miękkich. Istnieje więc prawdopodobieństwo iż takie wartości określają właściwości biomechaniczne kości^{53,54} na obu badanych obszarach. Z drugiej strony, we wszystkich badanych miejscach końcówki typu L-shape prezentowały wartości sztywności odpowiednie dla skóry, ponieważ były one podobne to tych zebranych przy użyciu MyotonPRO przez Dellalana i in.⁴⁹ oraz Chen i in.⁵⁰ na zdrowej grupie kontrolnej

w podobnej okolicy badawczej (okolica obojczyka). Natomiast, w przeciwieństwie do okolic obojczyka i kości piszczelowej, na przedramieniu najniższe wartości sztywności zostały zarejestrowane przez standardową końcówkę reprezentującą sztywność mięśni. Wcześniejsze badania przeprowadzone na materiale zwierzęcym (skóra świni) wykazały, że wartości sztywności warstwy rogowej naskórka są trzykrotnie wyższe w porównaniu ze skórą właściwą⁵⁵. Ponadto badanie z wykorzystaniem ultrasonografii wysokich częstotliwości wykazało iż wartość sztywności naskórka jest wyższa w odniesieniu do skóry właściwej²¹. W związku z tym nasze wyniki potwierdzają wcześniejsze doniesienia, wskazując iż mierząc bardziej powierzchowne warstwy skóry w okolicy przedramienia uzyskuje się wyższe wartości sztywności. Pomimo dostosowania parametrów urządzenia tj. zmniejszenie czasu trwania impulsu z 15 na 7 ms, wyniki zebrane przez standardową końcówkę wraz z nakładką były znacząco wyższe w porównaniu z tymi zebranymi przez końcówki typu L-shape.

Po drugie, uderzająco podobne wartości sztywności (zarówno średnie jak i zakresy) zostały uzyskane przy użyciu obu końcówek typu L-shape we wszystkich badanych miejscach. Należy podkreślić, iż pomimo różnicy w długości ramienia obu końcówek wyniki przez nie zebrane są nieomal identyczne. To wskazuje iż obie końcówki mogą być z równym powodzeniem wykorzystane do pomiarów sztywności skóry. Jednak ze względu na aspekt praktyczny czyli wygodę w użytkowaniu, końcówka o średniej długości ramienia (MAP) wydaje się lepsza do badań właściwości skóry. Wynika to z faktu dłuższego ramienia tej końcówki, które zapewnia lepszy dostęp do badanego obszaru i umożliwia wygodniejsze wykonanie pomiarów oraz ułatwia obsługę urządzenia.

Po trzecie, zarówno średnie jak i zakresy wartości uzyskanych przez wszystkie cztery końcówki w trzech testowanych miejscach różnią się istotnie od siebie. Zatem, każda z końcówek mierzyła odmienną sztywność tkanki, zależną od badanej lokalizacji, (które różniły się strukturą, średnicą, i składem tkanki, co przekładało się na ich odmienne właściwości biomechaniczne^{34, 39, 49, 43, 44, 53}. W związku z tym wykonane badania potwierdziły, że każda końcówka urządzenia MyotonPRO ma inne zastosowanie i umożliwia pomiary w obrębie różnych tkanek (np. skóra, mięśnie).

Należy również wspomnieć, iż w naszym badaniu kierunek wysyłanego impulsu z wykorzystaniem końcówek typu L-shape były w poprzek (przedramię i kość piszczelowa) oraz po przekątnej (okolica obojczyka) w stosunku do linii Langerera. Karl Langer był pionierem zajmującym się badaniem właściwości biomechanicznych skóry^{56, 57, 58, 59}, który opisał oraz wskazał miejsce oraz kierunek (opierając swoje wyniki na ułożeniu włókien kolagenowych i elastycznych w skórze) linii zmniejszonego mechanicznego napięcia skóry.

Kierunek linii Langera może być istotnym czynnikiem wpływającym na wyniki zebrane przez MyotonPRO

Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body (Article 2)

Wykazano istotne statystycznie różnice pomiędzy wartościami (średnie, zakresy) napięcia tkanek oraz sztywności rejestrowanymi przez obie końcówki typu L-shape w trzech badanych miejscach. Wartości napięcia tkankowego w tych trzech obszarach nie były wcześniej badane, natomiast wartości sztywności zebrane przy użyciu końcówek L-shape w obszarze obojczyka, przedramienia po stronie brzusznej i okolic kości piszczelowej są zbliżone do tych zebranych przy użyciu MyotonPRO przez Dellalana i in. ⁴⁹ oraz Chen i in. ⁵⁰ na zdrowej grupie kontrolnej.

Należy podkreślić, że najwyższe wartości obu tych parametrów odnotowano w okolicy kości piszczelowej, niższe na przedramieniu, a najniższe w okolicy obojczyka. Stopień napięcia tkanek określa napięcie wewnątrzkomórkowe, podczas gdy sztywność wskazuje opór stawiany przez tkanki przeciwko deformującej ją zewnętrznej sile. Wyższe wartości tych parametrów wskazują na wyższe napięcie tkanki oraz sztywniejszą tkankę ⁴⁸. Taki układ zebranych wyników w trzech testowanych obszarach może być związany z potrzebą kompensacji zwiększonego ciśnienia hydrostatycznego w kończynach dolnych w porównaniu z kończyną górną. Taka zależność została uprzednio powiązana ze sztywnością skóry ⁴. Przedramię pod stronie brzusznej jest mniej narażone na działanie promieni słonecznych, przez co wpływ fotostarzenia się skóry w tym obszarze jest niższy ¹³, co w konsekwencji oznacza, że w tym miejscu skóra nie jest tak gruba jak w innych obszarach ¹⁷. W przypadku kobiet grubość skóry w okolicy przedramienia po stronie brzusznej wynosi ok. 1.12 mm a w przypadku goleni ok. 1.34 mm ⁶⁰. Wcześniejsze badania udowodniły, iż parametry biomechaniczne skóry u białych kobiet z części północnych Europy różnią się w zależności od ekspozycji obszaru na światło słoneczne ⁶¹. Ponadto występują różnice w pH skóry, w okolicy przedramienia wynosi ono od 5.4 do 5.9, a w przypadku goleni od 4.8 do 5.5 ⁶². Wszystkie wymienione powyżej zależności mogą skutkować różnicami w parametrach biomechanicznych skóry w zależności od badanego obszaru.

Należy podkreślić, że kierunek wysyłanego przez MyotonPRO impulsu może mieć wpływ na uzyskane wyniki. Pomiary w okolicy kości piszczelowej i przedramienia (gdzie wartości parametrów były wyższe) zostały wykonane w poprzek linii Langera ^{56,59,63,64}, podczas gdy pomiary w okolicy obojczyka (gdzie uzyskano niższe wartości parametrów) były zbierane

po przekątnej w stosunku do linii Langerera. Ze względu na zjawisko anizotropii skóry, a zatem różnic w reakcji tkanki w zależności od kierunku aplikowanej siły^{4,59} znajomości linii napięcia jest niezbędna w trakcie planowania procedury pomiarów.

We wszystkich badanych miejscach zaobserwowano bardzo wysoką lub prawie pełną pozytywną korelację pomiędzy sztywnością a napięciem tkanek. Z jednej strony wyniki te mogą prowadzić do bardziej uogólnionej konkluzji, iż sztywność skóry ma tendencję wzrostową wraz z wyższymi wartościami napięcia wewnątrzkomórkowego. Z drugiej strony wyniki te świadczą o stałych zależnościach między tymi parametrami niezależnie od miejsca badanego czy rodzaju końcówki (SAP czy MAP)

Elastyczność określa umiejętność tkanki do powrotu do pierwotnego kształtu po usunięciu deformującej jej siły. Należy podkreślić, że w wykonywanych pomiarach rejestrowano logarytmiczny dekrement tłumienia, który jest parametrem odwrotnie proporcjonalnym do elastyczności, co oznacza, że większa wartość tego parametru wskazuje na mniejszą elastyczność tkanki.

Nasze wyniki sugerują, iż wartości tego parametru (średnie i zakresy) mierzone przez obie końcówki typu L-shape, są zbliżone do siebie we wszystkich badanych obszarach skóry. Brak różnic w elastyczności skóry w trzech różnych miejscach może być związana z jednorodnością grupy względem wieku (kobiety w wieku 19-25). Wcześniejsze badania udowodniły że elastyczność skóry jest ściśle związana z wiekiem^{13, 20, 38, 39, 41}, co oznacza iż różnice w elastyczności mogą być bardziej widoczne w przypadku porównania różnych grup wiekowych między sobą.

Pomimo występowania wysokiej lub przeciętnej korelacji pomiędzy elastycznością a niektórymi parametrami, nie zauważono powtarzalności występujących zależności. Wskazuje to na fakt iż elastyczność skóry różni się mniej w zależności od obszaru ciała w grupach jednolitych pod względem płci i wieku.

Czas relaksacji wskazuje czas potrzebny do powrotu do pierwotnego kształtu po usunięciu deformującej siły zewnętrznej. Natomiast odkształcalność jest określana stosunkiem deformacji do czasu relaksacji i reprezentuje całkowite zachowanie skóry tzn. właściwości wiskoelastyczne skóry. Podczas badania parametru odkształcalności, kiedy skóra zostaje poddana działaniu nagłej siły zewnętrznej, możemy wyróżnić następujące fazy: wyłącznie elastyczną (faza I), deformację wiskoelastyczną (faza II) i późną deformację lub fazę lepłą (ang. viscous) (faza III)^{4,5}. Oba parametry są ze sobą ściśle powiązane.

W prezentowanych badaniach, najniższe wartości odkształcalności oraz czasu relaksacji występowały w okolicy kości piszczelowej, nieco wyższe na przedramieniu i najwyższe

w okolicy obojczyka. Stąd, im szybciej tkanka powracała do pierwotnego kształtu (mniejsza wartość czasu relaksacji), tym mniejsza wartość wskaźnika odkształcalności. Dotychczasowe badania na mięśniach udowodniły iż mniejsza wartość odkształcalności charakteryzuje zdrowsze i młodsze tkanki ⁴⁸, skąd istnieje możliwość iż takie wnioski można przełożyć również na właściwości skóry. Ponadto, zaobserwowano bardzo wysoką lub pełną pozytywną korelację pomiędzy odkształcalnością a czasem relaksacji we wszystkich badanych obszarach skóry oraz przez obie końcówki.

Podsumowując, wyniki wskazują że, wyższe wartości napięcia tkanki związane są ze zwiększoną sztywnością, ponadto taka tkanka szybciej powraca do pierwotnego kształtu po usunięciu deformującej siły zewnętrznej oraz charakteryzuje się mniejszą wartością odkształcalności. Wyżej wspomniane zależności pomiędzy biomechanicznymi i wiskoelastycznymi właściwościami skóry są identyczne lub niemalże identyczne we wszystkich badanych obszarach wśród grupy badanej. Taki wynik dowodzi, że MyotonPRO wyposażony w końcówki typu L-shape (SAP lub MAP) umożliwia jednoczesny pomiar najważniejszych parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych, które w kompleksowy sposób opisują właściwości skóry.

OGRANICZENIA BADAŃ

W przedstawionych badaniach opisano parametry biomechaniczne i wiskoelastyczne ludzkiej skóry w trzech odmiennych obszarach ciała tj. w okolicy obojczyka, przedramienia po stronie brzusznej oraz okolice kości piszczelowej na grupie młodych, zdrowych kobiet. Takie badanie jest zaledwie pierwszym krokiem do oceny przydatności MyotonPRO dla celów diagnostycznych.

Wynika to z faktu, że wyniki naszych badań mogą być wykorzystane do oceny stanu zdrowej skóry u relatywnie młodych kobiet. Natomiast nie są one reprezentatywne w odniesieniu do starszej wiekowo grupy populacyjnej, ponieważ wykazano że większość parametrów opisujących stan skóry ulega zmianom wraz z wiekiem – dla przykładu takim parametrem jest elastyczność, która została opisana jako zależna od wieku ^{13,20,38,39,41}. Ponadto, podobne badania powinno zostać przeprowadzone również na reprezentatywnej grupie mężczyzn w celu wykazania różnic międzypłciowych.

Prezentowane badania dotyczyły jedynie skóry zlokalizowanej w trzech obszarach ludzkiego ciała, stąd w przyszłości wykorzystując MyotonPRO, należy się skupić się na innych niż prezentowane w przedstawianych publikacjach, lokalizacjach w celu lepszego zrozumienia

ewentualnych różnic we właściwości biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry wynikających z jej nieco odmiennej struktury.

Ponadto, podczas ustalania protokołu badań należy uwzględnić charakter skóry tj. zjawisko anizotropii, gdyż część parametrów wydaje się być silnie zależna od kierunku aplikowanej przez urządzenie badawcze siły.

Jednak najważniejszym kierunkiem przyszłych badań powinno być bezpośrednio wykazanie różnic pomiędzy właściwościami biomechanicznymi oraz wiskoelastycznymi zdrowej skóry oraz skóry zajętej przez proces chorobowy w określonej lokalizacji ciała. Takie badanie będzie jednoznaczną weryfikacją przydatności urządzenia MyotonPRO do wykonywania pomiarów diagnostycznych.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że urządzenie MyotonPRO wyposażone w jedną z dwóch końcówek typu L- shape tj. SAP lub MAP można wykorzystać do wiarygodnej oceny parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry. Taki wniosek wynika z faktu występowania identycznych korelacji pomiędzy niektórymi badanymi parametrami, które jak wykazano są niezależnie od testowanego obszaru zdrowej ludzkiej skóry.

Dodatkowo zauważono, że ze względów praktycznych (dłuższe ramię, które umożliwia lepszy dostęp do badanego obszaru) końcówka o średniej długości ramienia (MAP) sprawdza się lepiej podczas badań na pacjentach.

II. DISSERTATION SUMMARY

This doctoral dissertation was carried out as a series of studies under the common title: "Application of MyotonPRO in skin biomechanical and viscoelastic properties assessment" The cycle consists of the following two scientific articles.

1. *Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women.* Skin Research and Technology, 2020, doi: 10.1111/srt.12946., IF: 2.365; ministerial score = 70 points
2. *Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body.* Skin Research and Technology, 2021, doi: 10.1111/srt.13116., IF: 2.365; ministerial score = 70 points.

Total IF: 5.903; ministerial score: 140 pkt.

Papers published outside the series:

1. Rosicka K, Arlet J, Bukowska D, Mierzejewska- Krzyżowska B. *Ultrasound elastography in clinical diagnostics and in scientific research on muscles.* Central European Journal of Sport Sciences and Medicine, 2019, doi: 10.18276/cej.2019.3-07, ministerial score: 40 points.
2. Rosicka K, Hill M , Wdowski Maximilian. *Skin anisotropy: Finding the optimal incision line for volar forearm in males and females.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104805, IF: 3.902, ministerial score: 100 points
3. Hill M, Rosicka K, Wdowski M. *Effect of sex and fatigue on quiet standing and dynamic balance and lower extremity muscle stiffness.* European Journal of Applied Physiology, 2021; doi: 10.1007/s00421-021-04831-0, IF: 3.078, ministerial score: 100 points

Total IF: 11,71 ; ministerial score: 380

INTRODUCTION

The skin is the largest and most easily accessible human organ that performs many tasks necessary for proper functioning of the entire body. As a result of its superficial position, many dermatologists assess skin condition and base their diagnosis on completely subjective interpretation, visual evaluation or questionnaires¹, which are easy to perform. Meanwhile, in skin research metrology has been studied for years¹⁻⁶ and due to development of new technologies images or results obtained by different devices can be interpreted not exclusively by researchers but more importantly by practitioners. Moreover, using objective methods to evaluate skin condition leads to more precise and early diagnose, but also helps to understand progression of skin diseases¹. The example of progress made in diagnostic procedure is dermatoscopy, currently considered as a gold standard for early diagnostic of neoplastic skin lesions^{7,8}.

Devices used for skin evaluation vary by direction of the force/load used for measurement i.e. horizontal, vertical, linear, as well as for measurement of biomechanical properties. Indentometer measures skin compliance/stiffness^{9, 10}, CutiScan measure viscoelasticity and anisotropy^{11, 12}, Reviscometer describes acoustical shock wave hardness^{6, 13-15}, Frictiometer defines skin friction^{6, 14, 16}, Ballistometer evaluates skin elasticity and hardness¹⁷⁻²⁰, ultrasound elastography uses Young's modulus to describe tissue stiffness^{6, 21-26}, DermaLab/ DermaLab Combo define elastic properties²⁷⁻³², SkinFibrometer measures skin induration^{6, 33-36} and most commonly used Cutometer measures skin elastic and viscoelastic properties^{6, 14, 17, 33, 37-41}.

Due to wide range of devices available on market, various technologies are based on as well as differences in parameters measured by each device and/or values obtained, often are not compatible to others devices, results are difficult to compare and interpret their relevance and clinical perception⁶. Hence, it is necessary to develop a device dedicated for a practical clinical use that will enable the quick and accurate non-invasive assessment of skin biomechanical properties. Such approach will contribute to considerably more accurate assessment of skin condition and as a result to reliable diagnosis of its state.

MyotonPRO device seems to offer innovative solution for objective palpation. Till now, it was widely tested mainly on muscles, tendons and ligaments⁴²⁻⁴⁸. Although the most commonly used parameters for muscle measurements were stiffness, elasticity and tone, few research contain all five parameters (oscillation frequency, dynamic stiffness, logarithmic

decrement, mechanical stress relaxation time and creep) included in MyotonPRO technology^{47, 48}.

It should be emphasized that MyotonPRO can also be used to measure the biomechanical and viscoelastic properties of the skin. Previous studies using MyotonPRO for measuring skin stiffness only in healthy subjects⁴⁹ and in patients with cutaneous chronic graft-versus-host-disease (cGVHD) to evaluate cutaneous sclerosis⁵⁰. Furthermore it was used for the assessment of post caesarean section scars and obtained results were compared with unscarred skin⁵¹. However, based on our knowledge, there was no systematic research concerning MyotonPRO ability to measure skin biomechanical and viscoelastic properties.

Study aim and hypothesis:

The aim of the study was to validate MyotonPRO as a reliable device for assessment of skin biomechanical and viscoelastic properties.

Therefore, the main purpose of first study (*Article No.1*) was to compare usefulness of probes used to measure stiffness of superficial tissues with probe which is used regularly to measure muscles and ligaments stiffness. In order to obtain the most reliable results, this study was performed in three different areas of human body (clavicular, volar forearm and shin), having different proportion of superficial and deeper tissues. The research hypothesis was that L-shape probes are appropriate for skin stiffness measurements.

Furthermore, the aim of second study (*Article No.2*) was to establish the reference values (mean, ranges) of all five parameters (oscillation frequency, dynamic stiffness, logarithmic decrement, mechanical stress relaxation time and creep), simultaneously recorded by MyotonPRO in three different areas of human body, which are characterized by different proportion of superficial and deeper tissues (Clavicula, Volar forearm and Shin). The secondary goal was to compare obtained values of all collected parameters, among three locations investigated. Moreover, correlations occurring between all studied parameters were also examined in each investigated place and compared in order to verify if relationship of parameters is constant. We assumed that establishing the reproducibility of the correlations between parameters in different skin locations will provide strong evidence that MyotonPRO can be considered as a reliable device for skin assessment.

Research hypothesis:

- I. MyotonPRO equipped with any of L-shape probes i.e. short arm or medium arm probe can be considered as a skin biomechanical/viscoelastic properties assessment device.
- II. Same or nearly the same correlations between parameters occurs in different locations.

MATERIALS AND METHODS

Study was focused on evaluation of skin biomechanical and viscoelastic properties using MyotonPRO (Myoton AS, Estonia).

Sample size estimation

Sample size was estimated using an a priori power analysis (G - Power software v.3.1.9.4) for repeated measures ANOVA using the following parameters (power =0.95, alpha =0.05, effect size=0.60) and revealed that a minimum of 28 participants would be sufficient. Moreover, sample size was estimated according to EEMCO guidance for the in vivo assessment of Biomechanical Properties of the Human Skin i.e., minimal number of participants is 30 ⁶.

Subjects

All subjects initially completed a health screening questionnaire to assess eligibility for the study. As a result 32 healthy Polish women at the age 19-25(mean age: 20.6±1.7) and with BMI ranged from 18.3 to 29.3 (mean BMI: 22.5±2.7) were recruited across physiotherapy students (Faculty of Physical Culture in Gorzów Wielkopolski, University of Physical Education in Poznań). Non-smokers were exclusively selected for the study, without skin diseases, scars, tattoos and wounds on the examined skin areas. Subjects were fully informed about the procedures and potential risks involved in the experiment and provided written consent to participate in the experiment.

Experimental design

Each participant spent 5 minutes in examination room in order to acclimatize before measurements were taken. Multi scan measurement contains five single measurements (device delivers five short mechanical impulses) and it is automatically presented as the average of this consecutive measurements. Moreover multi scan measurements were repeated five times in all three examined areas in each patient. Average over the five repetitions was used in subsequent analysis Multi scan measurement for one reference point took about 5 sec, while the total

examination time for one probe in each location was less than a minute. During measurements each subject, laid supine in relaxed and comfortable position on the exam table for shin and volar forearm measurements and sit for clavicular measurements. Each examination session was held between 8 and 12 am and was performed by observer who has two years' experience with using MyotonPRO.

Measurements were conducted on three marked sites – clavicular, volar forearm and shin, preferably on dominant upper and lower limb. Clavicular and shin area were analysed due to its relatively thin hypodermis layer. Volar forearm was chosen, because it is one of the most investigated area in skin research³⁸. The measurement site for clavicular was in the corpus clavicularae area, where muscles has no its origin or insertion. The measure spot on the volar forearm was taken in the upper third of forearm. The measurement site for shin was on margo anterior in most palpable area.

This study was performed in accordance with ethical guidelines of Helsinki Declaration, all participants provided written, informed consent prior to participation in the study. The study was approved by the independent Bioethics Committee of Poznań Medical University, Poland (no. 59/20).

MyotonPRO

MyotonPRO enables to measure following parameters:

- (1) oscillation frequency [Hz] which represents tissue's intrinsic structural state of tension on cellular level
- (2) dynamic stiffness [N/m], which indicates the resistance to an external force which deforms tissue from its initial shape
- (3) logarithmic decrement of tissue's natural oscillation, which describes its elasticity and dissipation of mechanical energy when tissue recovers from being deformed,
- (4) mechanical stress relaxation time [ms], which indicate the time needed for tissue to recover to its initial shape after removal of an external force
- (5) creep, which indicates a gradual elongation of tissue over time, while it is under constant tensile stress.

Parameters 2 and 3 represents biomechanical properties while parameters 4 and 5 reflects viscoelastic properties of skin.

The device's probe applies automatically and user independently controlled constant pre-load force (0.18 N) to lightly compress subcutaneous tissues or in case of horizontal skin measurements it applies slight pre-tension. In standard configuration the device delivers under

constant pre-load a brief (15 ms) mechanical impulse (0.4N), eliciting tissue response in a form of damped oscillation. The interval's time between each impulse is 0,8 s. Those parameters are recommended by Myton SA as default values for muscle and tendon measurements. Same settings were used also while using L-shape probes and standard probe. In order to measure superficial tissues while using standard probe with disc attachment impulse delivery time was decreased from default 15 ms to 7 ms. This adjustment were made according to previous published paper by Dellalana et al.⁴⁹.

Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women (Article No.1)

Four different probes were used in order to measure skin biomechanical properties: L-shape probe in two sizes (short arm length 15mm-SAP and medium arm length 20mm-MAP) with disc attachment (10 mm diameter) designed by Myoton AS and dedicated to skin measurements, standard probe with disc attachment (10 mm diameter) and standard flat end probe (3mm diameter) for muscle measurement. Standard probe alone and standard probe with disc attachment is placed perpendicular to the skin, which results in delivering light impulse into the tissues. L- shape probes distribute impulses horizontally along with skin surface, as device is placed parallel to the skin. In order to obtain firm contact of the L-shape probes and skin a thin (0,1mm) double- sided stickers (10 mm diameter sticker attached to the disc) were used.

Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body (Article No.2)

The biomechanical and viscoelastic properties of the skin in the above-mentioned places were examined with two L-shaped probes i.e. short arm probe (SAP) - length 15 mm and medium arm probe (MAP) - length 20 mm with a disc attachment (diameter 10 mm) designed by Myoton AS and designed specifically for measuring human skin. In order to obtain firm contact of the probe and skin a thin (0,1 mm) double-sided stickers (10 mm diameter) were used.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using Statistica 13 software (Statsoft, Poland, Cracow). The normality of the distributions was assessed with the Shapiro–Wilk test. When the same parameters between different locations measured by both L-shape probes were compared and the data distribution was normal, a parametric test - repeated measures ANOVA with Tukey's HSD post-hoc was used. . On the other hand, when the relationships between various recorded parameters were examined - nonparametric analysis (Spearman rank order

correlation) was used to evaluate the monotonic relationship / as designed to analyse of the data with not normal distribution. Correlations were classified as trivial (0–0.1), small (0.1–0.3), moderate (0.3–0.5), large (0.5–0.7), very large (0.7–0.9), nearly perfect (>0.9), and perfect (1.0). The differences were set as significant at $p < 0.05$

Reliability (Article No.2)

We found high intraclass correlation coefficients and low coefficients of variation for all parameters for both probes.

The Bland–Altman plots with limit of agreement (LoA) were used to compare measurements with short arm probe (SAP) vs. medium arm probe (MAP) of the same parameter of each site.

RESULTS

Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women (Article No.1)

There was no significant difference between stiffness values obtained with L-shape short and L-shape medium arm probes in all investigated areas. Stiffness values recorded by standard probe and standard probe with disc attachment differ significantly from those collected with L-shape probes. There was also significant difference between values of stiffness obtained by standard with disc attachment and standard probes.

Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body (Article No.2)

There were no statistically significant differences between the mean values of five measured parameters obtained with both probes in all investigated areas. However, statistically significant differences of mean values of almost all parameters measured (except for logarithmic decrement) among three places examined were found. Despite considerable differences in mean values of obtained parameters, there were visible strong correlations between some studied parameters, which occurs in all three investigated areas of skin.

DISCUSSION

The main findings of this study are :

(1) L-shape probes designed for MyotonPRO enable measurements of biomechanical and viscoelastic properties of the skin

(2) that nearly the same correlations between parameters occurs in different areas of human body.

Comparison of different MyotonPRO probes for skin stiffness evaluation in young women (Article no.1)

Earlier studies performed on muscles and tendons showed that MyotonPRO is able to reproduce and repeat the data with high accuracy as well as present them in SI units (N/m) ^{42, 43, 44, 45, 46, 47,} which is necessary for greater reliability. Moreover this device provides immediate evaluation and allows interpretation of results without special training. The data obtained by us suggest that MyotonPRO equipped with L-shaped probes can be successfully used for reliable assessment of human skin stiffness in order to the initial diagnosis of its condition. This suggestion is based on several facts resulted from our experiment.

First, in all three studied locations (Clavícula, Volar forearm and Shin) significant differences in mean values as well as considerably various ranges of stiffness were found between probes used to measure stiffness of superficial tissues i.e. both L-shape probes and standard probe with disc attachment. Moreover, there was a significant difference between L-shape probes and standard probe, which is designed for measuring stiffness of muscles and ligaments. Such difference is particularly well visible in Clavícula area, where there is even a wide gap between “low” and” high” range of skin stiffness. Similar difference, however less spectacular is also evident in Shin area. This result indicates that while using all four probes on Clavícula or Shin area, which have very thin superficial layer⁵², both standard probes with and without disc attachment record very high stiffness values that are unreliable for soft tissues. There is a possibility that these values represent bone biomechanical properties ^{53,54}. On the other hand, in these investigation areas L-shape probes demonstrate more reliable results for skin stiffness measurement. Moreover, values of skin stiffness obtained by us (mean values and ranges) for Clavicular (which can be referred to Upper Arm), Volar Forearm and Shin areas are similar to these noted by MyotonPRO in studies by Dellalana et al. ⁴⁹ and Chen et al. ⁵⁰ in healthy controls groups. In contrast to Clavicular and Shin area - in Volar Forearm the lowest values of stiffness where recorded by standard probe, which represent muscle stiffness. Research conducted on porcine skin shows that stratum corneum elastic modulus is approximately three times higher comparing to the dermis ⁵⁵. Furthermore study performed with high-frequency ultrasound elastography reveals that stiffness of the epidermis is higher in comparison to the dermis ²¹. Therefore, our data confirms earlier results indicating that higher values of stiffness are obtained when measuring surface layers of the skin in Volar forearm area. Despite the fact that during measurement obtained with standard probe with disc

attachment delivery time was decreased from 15 to 7 ms the results were higher comparing to those recorded by both L-shape probes.

Secondly, strikingly similar values of stiffness (either ranges or mean) were recorded by both L-shape probes in each of three tested places (Clavícula, Volar forearm and Shin). It should be stressed that although these probes differ from each other with the length of the probe arm, they are able to perform measurements with very high mutual compatibility. This last result undoubtedly indicates usefulness of both probes for testing skin stiffness. However, based on convenience, the medium arm L-shaped probe is better for measuring skin stiffness rather than the short arm L-shaped probe. From a practical point of view, the longer probe arm provides better access to the test area and allows more convenient use and smoother operation of the device.

Thirdly, both mean values and ranges of stiffness measured by each of the four probes tested at three different locations (Clavícula, Volar Forearm and Shin) differed considerably between each other. Thus, each studied probe was able to record varied values of stiffness depending on its location in specific area of human body, which have different biological structure, composition, thickness, tissue content and biomechanical properties^{34, 39, 49, 43, 44, 53}. Therefore, this result confirms the selective properties of each probe used by MyotonPRO, indicating their ability to make accurate measurements of stiffness of specific tissues i.e. skin, muscle.

It should also be mentioned that in our study direction of impulse of L-shape probes was across (in volar forearm and shin area) and diagonal (in clavicular area) to Langer's line. Karl Langer was a pioneer of research on skin biomechanical properties^{56, 57, 58, 59} who described location and direction (determined by intradermal bundles of collagen and elastin fibres) of decreased tension lines in skin, which should be consider as an important factor affecting the results of MyotonPRO measurements.

Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body (Article 2)

Our result indicated on significant differences in values (means, ranges) of oscillation frequency and dynamic stiffness in the three examined locations. Values of skin oscillation frequency in three location studied by us were not reported previously, while values of skin stiffness obtained by L-shape MyotonPRO probes in our study for Clavícula (which can be referred to Upper Arm), Volar Forearm and Shin areas seems to be very similar to these noted by MyotonPRO in studies by Dellalana et al.,⁴⁹ Chen et al.⁵⁰ in healthy controls groups.

It should be stress that, in the case of these both parameters, their highest values were noted in the shin area, lower in volar forearm area, while the lowest in the clavícula area. Oscillation frequency represents the internal structural tension of the tissue, while dynamic stiffness indicates the resistance to an external force that deforms the tissue from its initial shape. Higher values of these both parameter means the higher intrinsic tension within the tissue as well greater stiffness of tissue ⁴⁸. Such an order in magnitude of the collected values in these three studied sites could be related to the need to compensate for the increased hydrostatic pressure in lower limbs (calf) comparing to upper extremities (forearm). Such a role has been previously reported in relation to the skin stiffness ⁴. Volar forearm area is less exposed to sunlight therefore the impact of photo-aging process is lower ¹³ and as a consequence is not as thick as other areas of the body ¹⁷. In females skin thickness on volar forearm is approximately 1.12 mm in contrast to shin area i.e. 1.34 mm. ⁶⁰ It was previously reported that skin's biomechanical properties in white Northern Europeans varies among body sites depending on sun exposure.⁶¹ Furthermore, there is a difference in skin pH between volar forearm - 5.4 - 5.9 and shin 4.8 - 5.5 ⁶². All above mentioned differences in biological and physical features might contribute to differences in biomechanical properties among different body sites.

It should be taken into consideration that method of performing measurements (direction of the impulse specifically) might also influence on the values of parameters recorded by MyotonPRO. It should be mentioned that measurement on shin area and volar forearm (higher values obtained) were performed across Langer's tension line ^{56,59,63,64}, while measurement on the clavícula area (lover values obtained) were collected diagonally to Langer's line. Therefore the knowledge of tension lines in skin is essential while planning experimental procedures, since skin is an anisotropic tissue and consequently it behaves differently depending on direction of applied force ^{4,59}.

It should be stress that very large or nearly perfect positive correlations were observed between dynamic stiffness and oscillation frequency in all three studied places. On the one hand, these results lead to the more general conclusion that the dynamic stiffness of the skin has the tendency of increasing along with increasing values of tension within skin. One the other hand, results show that such relationship between studied parameters is permanently present in each location studied and with both probes.

Logarithmic decrement of a tissue's natural oscillation indicates its elasticity and the dissipation of mechanical energy when tissue recovers from being deformed. Elasticity characterises the tissues ability to return to its initial shape when the external force is removed.

It should be mentioned that logarithmic decrement is inversely proportional to elasticity, which means the higher the value of logarithmic decrement, the lower the elasticity.

Our result suggest that values of this parameter (means and ranges) recorded by both L-shape probes were comparable to each other in all three studied locations. The absence of differences of the skin elasticity in three different places studied can be explained by the homogeneity of the age of studied group (women at the age 19-25). It was already reported that elasticity of skin is age related parameter^{13, 20, 38, 39, 41}, which can be more diverse while comparing skin of younger and older groups participants.

Despite the fact that our study demonstrated large and/or moderate correlations between logarithmic decrement and other parameters in some areas (see Table 2 for details) there was no repeatability with those correlations. It indicates that logarithmic decrement and as a consequence skin elasticity varies less among different areas of the skin especially in people of the same sex within similar age range.

Mechanical stress relaxation time indicates the displacement recovery time when external force of deformation is removed. In other-hand, creep that is indicated by ratio of deformation and recovery time, represents total behaviour of skin i.e. viscoelastic properties of skin. During creep test, when skin is submitted to sudden and sustained strain, following phases are found: immediate deformation, purely elastic nature (phase I), viscoelastic deformation (phase II) and late deformation or viscous (phase III)^{4, 5}. Both parameters are related to each other

In our study, the lowest values of creep and mechanical stress relaxation time were recorded by both L-shape probes in shin area, slightly higher in volar forearm area and the highest in clavícula area.. Therefore the faster tissue recovers to its initial shape (smaller values of mechanical stress relaxation time) the smaller was creep value. It was reported on muscles that the smaller values of creep parameter characterises healthier and younger tissues⁴⁸, hence it is possible that such regularity is also characteristic for the skin. Moreover, very large and perfect positive correlations were noted between mechanical creep and mechanical stress relaxation time in all investigated areas and with both probes.

To sum up collected data suggest that the higher intrinsic tension of the skin the higher dynamic stiffness, moreover such tissue recovers faster to its initial shape and it's characterized by smaller creep value. The above-mentioned correlations between biomechanical and viscoelastic properties of the skin of participants were almost identical in all three examined locations. Such data strongly suggest that MyotonPRO equipped with any of L-shape probes

precisely measures all five skin parameters, that together comprehensively describe its properties.

LIMITATIONS AND FUTURE DIRECTIONS

This research is the first step to evaluating biomechanical and viscoelastic properties of human skin as we examined above mentioned parameters of the clavicle area, volar forearm, and shin area skin in young healthy females. It should be stressed that our results may have limited generalisability to older or clinical populations, as it was previously reported that elasticity (logarithmic decrement) is age-related feature^{13,20,38,39,41}. Furthermore, similar study should be conducted on a representative group of males. Moreover, while designing research protocol, some aspects of skin mechanical behaviour should be taken into consideration i.e., skin anisotropy, since some parameters seem to depend strongly on force direction. Finally, our research examined only limited areas of skin and future research should focus on different areas of the human body to provide improved understanding of skin biomechanical and viscoelastic properties.

CONCLUSION

Conducted research demonstrated that MyotonPRO equipped with any of L-shape probes i.e. short arm or medium arm probe can be considered as a skin biomechanical/viscoelastic properties assessment device. This conclusion resulted from fact, that MyotonPRO has ability to perform precise and reliable measurements of five various parameters of skin that together enable to describe its biomechanical and viscoelastic properties. Moreover despite examined location correlations between biomechanical and viscoelastic properties of the skin were almost identical. In addition, medium arm L-shape probe can be considered as more convenient probe for clinical use due to longer arm, which provides better access to the tested area.

REFERENCES:

1. Agache P. Measurements of the Human Skin: Why and How? In: *Agache's Measuring the Skin: Non-Invasive Investigations, Physiology, Normal Constants*. Springer; 2017:6-14.
2. Piérard GE, EEMCO Group. EEMCO guidance to the in vivo assessment of tensile functional properties of the skin. Part 1: relevance to the structures and ageing of the skin and subcutaneous tissues. *Skin Pharmacol Appl Skin Physiol*. 1999;12:352-362.
3. L Rodrigues , EEMCO Group. EEMCO guidance to the in vivo assessment of tensile functional properties of the skin. Part 2: instrumentation and test modes. *Skin Pharmacol Appl Skin Physiol*. 2001;14:52-67.
4. Agache P, Vatchon D. Skin Mechanical Function. In: *Agache's Measuring the Skin: Non-Invasive Investigations, Physiology, Normal Constants*. Springer; 2017.
5. Agache P, Vatchon D. Mechanical Behaviour Assessment of the Skin. In: *Agache's Measuring the Skin: Non-Invasive Investigations, Physiology, Normal Constants*. Springer; 2017:964-984.
6. Rodrigues LM., Fluhr JW.; the EEMCO Group. EEMCO Guidance for the in vivo Assessment of Biomechanical Properties of the Human Skin and Its Annexes: Revisiting Instrumentation and Test Modes. *Skin Pharmacol Physiol*. 2020;33(1):44-60.
7. Philipp Weber, Philipp Tschandl, Christoph Sinz, Harald Kittler,. Dermatoscopy of Neoplastic Skin Lesions: Recent Advances, Updates, and Revisions. *Curr Treat Options Oncol*. 19. doi:10.1007/s11864-018-0573-6
8. Abhishek Bhattacharya, , Albert Young , Andrew Wong , Simone Stalling , Maria Wei, Dexter Hadley. Precision Diagnosis Of Melanoma And Other Skin Lesions From Digital Images. *AMIA Jt Summits Transl Sci Proc*. Published online 2017:220-226.
9. J. Jachowicz R. McMullen D. Prettypaul. Indentometric analysis of in vivo skin and comparison with artificial skin models. *Skin Res Technol*. 2007;13(3):299-309.
10. Shujun Xin Wenyan Man Joachim W. Fluhr Shunpeng Song Peter M. Elias Mao-Qiang Man. Cutaneous resonance running time varies with age, body site and gender in a normal Chinese population. *Skin Res Technol*. 2010;16(4):413-421.
11. Silva H, Rego F, Rosado C, Rodrigues LM. Novel 3D “active” representations of skin biomechanics. *Biomed Biopharm Res*. 2016;13(2):219-227.
12. Rosado C, Antunes F, Barbosa R, Fernando R, Rodrigues LM. Cutiscan® - A new system of biomechanical evaluation of the skin in vivo - comparative study of use depending on the anatomical site. *Biomed Biopharm Res*. 12(1):49-57.
13. Nomura M, Velleman D, Pierre J, et al. Quantitating the lateral skin stiffness by a new and versatile electro-mechanical instrument. Preliminary studies. *Skin Res Technol*. 2017;23:272-282.

14. Neto P, Ferreira M, Bahia F, et al. Improvement of the methods for skin mechanical properties evaluation through correlation between different techniques and factor analysis. *Skin Res Technol.* 2013;19:405-416.
15. Janiš R, Pata V, Egner P, et al. Comparison of metrological techniques for evaluation of the impact of a cosmetic product containing hyaluronic acid on the properties of skin surface. *Biointerphases.* 2017;12(2). doi:10.1116/1.4985696
16. Zhu YH, Song SP, Luo W, Elias PM, Man MQ. Characterization of skin friction coefficient, and relationship to stratum corneum hydration in a normal Chinese population. *Skin Pharmacol Physiol.* 2011;24(2):81-86.
17. Woo MS, Moon KJ, Jung HY, et al. Comparison of skin elasticity test results from the Ballistometer® and Cutometer®. *Skin Res Technol.* 2014;20:422-428.
18. Anderson KR, Oleson JJ, Anthony TR. Variability in coefficient of restitution in human facial skin. *Skin Res Technol.* 2014;20(3):355-362.
19. Tosti A, Compagno G, Fazzini ML, Villardita S. A ballistometer for the study of the plasto-elastic properties of skin. *J Invest Dermatol.* 1977;69(3):315-317.
20. Jemec GB, Selvaag E, Agren M, Wulf HC. Measurement of the mechanical properties of skin with ballistometer and suction cup. *Skin Res Technol.* 2001;7(2):122-126.
21. Nagaoka R, Kobayashi K, Saijo Y. Measurement of Skin Elasticity Using High Frequency Ultrasound Elastography with Intrinsic Deformation Induced by Arterial Pulsation. In: *Interface Oral Health Science.* Springer Japan; 2015:245-255.
22. DeJong HM, Abbott S, Zelesco M, et al. The validity and reliability of using ultrasound elastography to measure cutaneous stiffness, a systematic review. *Int J Burn Trauma.* 2017;7:124-141.
23. Yang Y, Yan F, Wang L, et al. Quantification of skin stiffness in patients with systemic sclerosis using real-time shear wave elastography: a preliminary study. *Clin Exp Rheumatol.* 2018;36 Suppl.113:118-125.
24. Santiago T, Santiago M, Rauro B, et al. Ultrasonography for the assessment of skin in systemic sclerosis: a systematic review. *Arthrit Care Res.* 2019;71:563-574.
25. Guo R, Xiang X, Wang L, et al. Quantitative Assessment of Keloids Using Ultrasound Shear Wave Elastography. *Ultrasound Med Biol.* 2020;46(5):1169-1178.
26. Huang SY, Xiang X, Guo RQ, et al. Quantitative assessment of treatment efficacy in keloids using high-frequency ultrasound and shear wave elastography: a preliminary study. *Sci Rep.* 2020;10(1):1375. doi:10.1038/s41598-020-58209-x.
27. Kirsten Peperkamp Arico C, Verhulst Hanneke J. P, Tielemans Harm Winters Demi van Dalen Dietmar J. O, Ulrich. The inter-rater and test-retest reliability of skin thickness and skin elasticity measurements by the DermaLab Combo in healthy participants. *Skin Res Technol.* 25(6):787-792.

28. T U Gankande , J M Duke , P L Danielsen , H M DeJong , F M Wood , H J Wallace. Reliability of scar assessments performed with an integrated skin testing device - the DermaLab Combo(®). *Burns*. 2014;40(8):1521-1529.
29. T U Gankande , J M Duke, F M Wood , H J Wallace. Interpretation of the DermaLab Combo® pigmentation and vascularity measurements in burn scar assessment: an exploratory analysis. *Burns*. 2015;41(6):1176-1185.
30. W Hua , L-M Fan , R Dai , M Luan , H Xie , A-Q Li , L Li. Comparison of two series of non-invasive instruments used for the skin physiological properties measurements: the DermaLab ® from Cortex Technology vs. the series of detectors from Courage & Khazaka. *Skin Res Technol*. 2017;23(1):70-78.
31. Deng H, Li-Tsang CWP, Li J. Measuring vascularity of hypertrophic scars by dermoscopy: Construct validity and predictive ability of scar thickness change. *Skin Res Technol*. 2020;26(3):369-375. doi:<https://doi.org/10.1111/srt.12812>
32. Owczarczyk-Saczonek A, Czerwińska J, Wygonowska E, Kasproicz-Furmańczyk M, Placek W. D-chiro-inositol as a treatment in plaque psoriasis: a randomized placebo-controlled clinical trial. *Dermatol Ther*. n/a(n/a):e14538. doi:<https://doi.org/10.1111/dth.14538>
33. Kim MA, Kim EJ, Lee HK. Use of SkinFibrometer® to measure skin elasticity and its correlation with Cutometer® and DUB® Skinscanner. *Skin Res Technol*. 2018;24:466-471.
34. Seo SR, Kang NO, Yoon MS, et al. Measurements of scar properties by SkinFibroMeter®, SkinGlossMeter®, and Mexameter® and comparison with Vancouver Scar Scale. *Skin Res Technol*. 2017;23:295-302.
35. Sun D, Yu Z, Chen J, et al. The Value of Using a SkinFibroMeter for Diagnosis and Assessment of Secondary Lymphedema and Associated Fibrosis of Lower Limb Skin. *Lymphat Res Biol*. 2017;15(1):70-76.
36. Douglass J, Graves P, Gordon S. Intrarater Reliability of Tonometry and Bioimpedance Spectroscopy to Measure Tissue Compressibility and Extracellular Fluid in the Legs of Healthy Young People in Australia and Myanmar. *Lymphat Res Biol*. 2017;15(1):57-633.
37. Cortes H, Magaña JJ, Reyes-Hernández OD, Zacula-Juárez N, et al. Non-invasive analysis of skin mechanical properties in patients with lamellar ichthyosis. *Skin Res Technol*. 2019;25:375-381.
38. Mazzarello V, Ferrari M, Ena P. Werner syndrome: quantitative assessment of skin aging. *Clin Cosmet Investig Dermatol*. 2018;11:397-402.
39. Ohshima H, Kinoshita S, Oyobikawa M, et al. Use of Cutometer area parameters in evaluating age-related changes in the skin elasticity of the cheek. *Skin Res Technol*. 2013;19:238-242.
40. Algiert-Zielińska B, Mucha P, Rotsztein H. Effects of lactobionic acid peel, aluminium oxide crystal microdermabrasion, and both procedures on skin hydration, elasticity, and

transepidermal water loss. *J Cosmet Dermatol*. Published online 2019.
doi:10.1111/jocd.12859

41. Krueger N, Luebberding S, Oltmer M, treker M, Kercher M. Age- related changes in skin mechanical properties: a quantitative evaluation of 120 female subjects. *Skin Res Technol*. 2011;17(2):141-148.
42. Hu X, Lei D, Li L, et al. Quantifying paraspinal muscle tone and stiffness in young adults with chronic low back pain: a reliability study. *Sci Rep*. 2018;8.
doi:10.1038/s41598-018-32418-x
43. Kelly JP, Koppenhaver SL, Michener LA, et al. Characterization of tissue stiffness of the infraspinatus, erector spinae, and gastrocnemius muscle using ultrasound shear wave elastography and superficial mechanical deformation. 2018;J Electromyogr Kinesiol.(38):73-80.
44. Sohirad S, Wilson D, Waugh C, et al. Feasibility of using a hand-held device to characterize tendon tissue biomechanics. *PLOS One*. 2017;12(9).
doi:0.1371/journal.pone.0184463
45. Liu ChL, Li YP, Wang XQ, et al. Quantifying the Stiffness of Achilles Tendon: Intra- and Inter-Operator Reliability and the Effect of Ankle Joint Motion. *Med Sci Monit*. 2018;24:4876-4881.
46. Mullix J, Warner M, Stokes M. Testing muscle tone and mechanical properties of rectus femoris and biceps femoris using a novel hand held MyotonPRO device: relative ratios and reliability. *Work Pap Health Sci*. 2012;1:1-8.
47. Ko CY, Choi HJ, Ryu J, et al. Between-day reliability of MyotonPRO for the non-invasive measurement of muscle material properties in the lower extremities of patients with a chronic spinal cord injury. *J Biomech*. 2018;73:60-65.
48. Schneider S, Peipsi A, Stokes M, Knicer A, Abeln V. Feasibility of monitoring muscle health in microgravity environments using Myoton technology. *Med Biol Eng Comput*. 53:57-66.
49. Dellalana LE, Chen F, Vain A, et al. Reproducibility of the durometer and myoton devices for skin stiffness measurement in healthy subjects. *Skin Res Technol*. 2018;25(3):289-293.
50. ChenF, Dellalana LE, Gandelman JS, et al. Non- invasive measurement of sclerosis in cutaneous cGVHD patients with the handheld device Myoton: a cress- sectional study. *Bone Marrow Transpl*. 2018;54(4):616-619.
51. Gilbert I, Gaudreault N, Gaboury I. Intra- and inter-evaluator reliability of the MyotonPRO for the assessment of the viscoelastic properties of caesarean section scar and unscarred skin. *Skin Res Technol*. n/a(n/a). doi:https://doi.org/10.1111/srt.12956
52. Larsson S. Clavicle fractures: considerations when plating. *Injury*. 2018;49 Suppl. 1:S24-S28.

53. Boughton OR , Ma S, Zhao S. Measuring Bone Stiffness Using Spherical Indentation. *PLOS One*. Published online 2018.
54. Patton DM , Bigelow EMR, Schlecht SH et al. The Relationship Between Whole Bone Stiffness and Strength Is Age and Sex Dependent. *J Biomech*. 83:125-133.
55. Jee T, Komvopoulos K. In vitro measurement of the mechanical properties of skin by nano/microindentation methods. *J Biomech*. 2014;(47):1186-1192.
56. Carmichael SW. The Tangled Web of Langer's Lines. *Clin Anat*. 2014;27:162-168.
57. Capek L, Flynn C, Molitor M et al. Graft orientation influences meshing ratio. *Burns*. 2018;44:1439-1445.
58. Włodarkiewicz A, Michajłowski I, Sobjanek M et al. Linie napięcia i wyboru kierunków nacięć skóry w kontekście jej biomechanicznych właściwości. *Dermatol Klin*. 2009;11:125-127.
59. Byard RW, Gehl A, Tsokos M. Skin tension and cleavage lines (Langer's lines) causing distortion of ante- and postmortem wound morphology. *Int J Leg Med*. 2005;119:226-230.
60. Agache P. Main Skin Biological Constants. In: Humbert P, Fanian F, Maibach HI, Agache P, eds. *Agache's Measuring the Skin: Non-Invasive Investigations, Physiology, Normal Constants*. Springer International Publishing; 2017:1579-1605. doi:10.1007/978-3-319-32383-1_156
61. Langton AK, Graham HK, McConnell JC, Sherratt MJ, Griffiths CEM, Watson REB. Organization of the dermal matrix impacts the biomechanical properties of skin. *Br J Dermatol*. 2017;177(3):818-827. doi:https://doi.org/10.1111/bjd.15353
62. Agache P. Main Skin Physical Constants. In: Humbert P, Fanian F, Maibach HI, Agache P, eds. *Agache's Measuring the Skin: Non-Invasive Investigations, Physiology, Normal Constants*. Springer International Publishing; 2017:1607-1622. doi:10.1007/978-3-319-32383-1_157
63. LANGER K. Zur Anatomie und Physiologie der Haut. *Sitzungsbericht Math-Naturwissenschaftlichen Cl Kais Acad Wiss*. 1861;44:19-48.
64. Langer K. On the anatomy and physiology of the skin: I. The cleavability of the cutis. *Br J Plast Surg*. 1978;31(1):3-8.
65. Graham HK, McConnel JC, LimbertG, et al. How stiff is skin? *Exp Dermatol*. 2019;28(Suppl.1):4-9.

III. STRESZCZENIE/ABSTRACT

STRESZCZENIE

Cel: Celem przeprowadzonych badań była ocena zastosowania urządzenia MyotonPRO do oceny parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry. W tym celu porównano cztery końcówki do oceny sztywności skóry oraz zbadano stosowność wykorzystania MyotonPRO do pomiarów parametrów biomechanicznych oraz wiskoelastycznych skóry tj. napięcia tkanek, sztywności, elastyczności, czasu relaksacji oraz odkształcalności.

Materiał i metody: Oceny sztywności skóry u 30 młodych kobiet dokonano przy użyciu czterech różnych końcówek tj. L-shape w dwóch rozmiarach (krótkie ramie, średnie ramie), standardowej końcówki oraz standardowej końcówki wraz z okrągłą nakładką. Pomiarów dokonano na trzech obszarach: obojczyk (clavicular area), przedramię (volar forearm) oraz kość piszczelowa (shin). Natomiast na grupie 32 młodych kobiet ocenie zostały poddane parametry biomechaniczne i wiskoelastyczne skóry zmierzone w ww. miejscach. Sprawdzone rzetelność pomiarów oraz porównano wyniki (średnie) uzyskane w trzech badanych miejscach. Ponadto sprawdzono korelacje występujące pomiędzy wszystkimi parametrami.

Wyniki: Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic pomiędzy pomiarami sztywności skóry z wykorzystaniem obu końcówek typu L-shape we wszystkich badanych miejscach. Wartości uzyskane przy pomocy standardowej końcówki wraz z nakładką różniły się w stopniu istotnym statystycznie w porównaniu z wartościami zebranymi przez końcówki typu L-shape. Zaobserwowano również istotnie statystycznie różnice między wynikami uzyskanymi przez standardową końcówkę a standardową końcówkę z nakładką. Ponadto nie zaobserwowano różnic istotnych statystycznie pomiędzy wynikami zebranymi przez obie końcówki L-shape wszystkich pięciu parametrów we wszystkich badanych obszarach. Jednakże zaobserwowano istotnie statystyczne różnice (za wyjątkiem elastyczności) pomiędzy pomiarami w trzech badanych miejscach. Pomimo widocznych różnic w średnich wartościach mierzonych parametrów uzyskanych w różnych miejscach, zaobserwowano widoczne korelacje pomiędzy parametrami we wszystkich lokalizacjach.

Wnioski: Obie końcówki typu L-shape mogą być wykorzystane do rzetelnych pomiarów parametrów biomechanicznych i wiskoelastycznych skóry. W związku z tym MyotonPRO może być uznany za wiarygodne narzędzie do oceny skóry. Ponadto badanie wykazało, iż wyższe wartości napięcia tkanki korelują z wyższymi wartościami sztywności, co więcej tkanka taka szybciej powraca do pierwotnego kształtu i charakteryzuje się mniejszą wartością

odkształcalności. Wyniki te wskazują na istnienie identycznych zależności występujących pomiędzy parametrami na różnych obszarach ludzkiej skóry. Zatem możemy uznać MyotonPRO jako urządzenie umożliwiające ocenę parametrów biomechanicznych oraz wiskoealstycznych skóry.

ABSTRACT

Aim: The aim of the study was to evaluate MyotonPRO application for skin biomechanical and viscoelastic properties assessment. For this reason, in those studies, we compared different probes for skin evaluation and we investigated the suitability of the MyotonPRO for the assessment of skin biomechanical and viscoelastic parameters such as oscillation frequency, dynamic stiffness, logarithmic decrement, mechanical stress relaxation time and creep.

Materials and methods: Four replaceable probes of MyotonPRO (L-shape short and medium arm, standard cylindrical flat-end probe and the same standard probe with a disk attachment) were tested for measurement of skin stiffness in young women (30 healthy females) at three different locations (Clavícula, Volar Forearm, Shin). Furthermore the biomechanical and viscoelastic properties of skin were measured in 32 young healthy women at three different skin locations (Clavícula, Volar Forearm, Shin), using L-shape short and medium arm probes. Mean values of obtained parameters recorded by both probes were compared among three skin locations while reliabilities of measurements were assessed. Additionally, relationships between all recorded parameters were examined.

Results: There was no significant difference between stiffness values obtained with L-shape short and L-shape medium arm probes in all investigated areas. Stiffness values recorded by standard probe and standard probe with disc attachment differ significantly from those collected with L-shape probes. There was also significant difference between values of stiffness obtained by standard with disc attachment and standard probes. Moreover, there were no statistically significant differences between the mean values of five measured parameters obtained with both probes in all investigated areas. However, statistically significant differences of mean values of almost all parameters measured (except for logarithmic decrement) among three places examined were found. Despite considerable differences in mean values of obtained parameters, there were visible strong correlations between some studied parameters, which occurs in all three investigated areas of skin.

Conclusion: Both L-shape probes shows a great reliability for skin biomechanical and viscoelastic properties measurements. Therefore, MyotonPRO can be considered a reliable

device for skin assessment. Furthermore it was demonstrated in all locations studied that the higher value of oscillation frequency corresponds to the higher value of dynamic stiffness, moreover such tissue recovers faster to its initial shape and it was characterized by lower creep values. Such results indicate the existence of identical relationships between the same studied parameters in different areas of skin. Thus, MyotonPRO seems to be a device designed for reliable measurement of skin biomechanical and viscoelastic properties.

ZAŁĄCZNIKI

1. Oświadczenie współautorów / Co-authors' declaration
2. Artykuł nr 1 / Article No. 1
3. Artykuł nr 2 / Article No. 2