



UNIwersYTET MEDYCZNY
IM. PIASTÓW ŚLĄSKICH WE WROCLAWIU

Maciej Łukasz Warnecki

Ocena czynników wpływających na efektywność leczenia aparatami nakładkowymi

Promotor:

Dr hab. n. med. Michał Sarul

Katedra i Zakład Stomatologii Zintegrowanej

Recenzenci:

Prof. dr hab. n. med. Teresa Matthews-Brzozowska

Katedra Praktycznej Stomatologii Klinicznej, Klinika Ortodontji i Dysfunkcji Narządu Żucia
Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

Dr hab. n. med. Agnieszka Machorowska-Pieniążek

Kierownik Katedry i Zakładu Ortodontji Wydziału Nauk Medycznych w Zabrze, Śląski Uniwersytet
Medyczny w Katowicach

Dr hab. n. med. Monika Machoy

Kierownik Zakładu Periodontologii Pomorskiego Uniwersytetu Medycznego w Szczecinie

Wrocław 2023

SPIS TREŚCI

1. Wykaz zastosowanych skrótów	4
2. Wykaz publikacji stanowiących rozprawę doktorską.....	5
3. Streszczenie	6
4. Abstract	11
5. Wprowadzenie.....	16
6. Założenia i cele pracy	18
7. Materiał i metody.....	19
8. Cykl publikacji stanowiących podstawę pracy doktorskiej	21
8.1. Publikacja 1... ..	22
8.2. Publikacja 2... ..	30
8.3. Publikacja 3... ..	40
9. Podsumowanie wyników	53
10. Wnioski.....	57
11. Piśmiennictwo	57
12. Spis rycin	60
13. Spis tabel.....	60
14. Załączniki	61
14.1. Zgoda Komisji Bioetycznej... ..	61
14.2. Dorobek naukowy doktoranta... ..	63
14.3. Oświadczenia o współautorstwie... ..	64

1. Wykaz zastosowanych skrótów

PICO	Population, Intervention, Control, Outcome
QUADAS	Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies
GRADE	Grades of Recommendation, Assessment, Development, and Evaluation
ANOVA	Analiza wariancji
OJ	Nagryz poziomy
OB	Nagryz pionowy
IMW	Szerokość międzytrzonowcowa
ICW	Szerokość międzykłowa
FD	Metoda analizy wymiaru fraktalnego
TA	Metoda analizy tekstur
SEM	Skaningowy mikroskop elektronowy
J1W	Grupa badawcza sok pomarańczowy 1 tydzień
J2W	Grupa badawcza sok pomarańczowy 2 tygodnie
C1W	Grupa badawcza Coca-Cola 1 tydzień
C2W	Grupa badawcza Coca-Cola 2 tygodnie

2. Wykaz publikacji stanowiących rozprawę doktorską

1. **Warnecki M**, Nahajowski M, Papadopoulos MA, Kawala B, Lis J, Sarul M. Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*. 2022, 44, 5, 522-529. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjac005>

IF: 3,131

MNiSW/KBN: 140,00

2. **Warnecki M**, Żak M, Szkoda-Poliszuk K, Kawala B, Sarul M. Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? *Symmetry (Basel)* 2022, 14, 1069. <https://doi.org/10.3390/sym14051069> ma15186341

IF: 2,940

MNiSW/KBN: 70,00

3. **Warnecki M**, Sarul M, Kozakiewicz M, Zięty A, Babiarczuk B, Kawala B, Jurczyszyn K. Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. *Materials (Basel)* 2022, 15, 6341. <https://doi.org/10.3390/ma15186341>

IF: 3,748

MniSW/KBN: 140,00

Sumaryczny Impact Factor: **9,819**

Sumaryczna liczba punktów MNiSW/KBN: **350,00**

3. STRESZCZENIE

Wstęp

Aparaty wyjmowane są stosowane w leczeniu ortodontycznym od wielu lat. Jedną z ich największych zalet jest możliwość łatwego utrzymania higieny jamy ustnej. Do największych wad należą: brak możliwości dobrej kontroli ruchu przesuwanych zębów oraz ich niezadowalająca estetyka. W związku z tym aparaty wyjmowane przez wielu lekarzy i pacjentów są stosowane niechętnie, przegrywając ten swoisty wyścig z różnymi odmianami aparatów stałych. W ostatnich latach coraz większą popularność zyskują jednak nakładki (alignery) – aparaty wyjmowane wykonane z elastycznego, przezroczystego tworzywa, pokrywającego całe łuki zębowe.

Z punktu widzenia ortodontów, posiadają one wiele zalet w porównaniu do klasycznych, tradycyjnych aparatów stałych: dzięki możliwości zakładania i zdejmowania ułatwiają dbanie o prawidłową higienę uzębienia. Zmniejsza to ryzyko gromadzenia się płytki nazębnej, a w konsekwencji obniża prawdopodobieństwo wystąpienia choroby próchnicowej, a także chorób przyzębia. Zwiększa to również komfort spożywania pokarmów i obniża ryzyko wystąpienia awarii. Dodatkowo, dzięki swojej cienkiej, przezroczystej budowie aparaty te są niemal niewidoczne, co odpowiada stale rosnącym oczekiwaniom estetycznym pacjentów. Jednocześnie alignery pozwalają na trójwymiarową kontrolę ruchu zębów, która dotychczas nie była możliwa przy zastosowaniu tradycyjnych aparatów wyjmowanych.

W ramach procesu produkcji nakładek wykorzystane są techniki cyfrowe odpowiadające za odtworzenie anatomicznej budowy uzębienia pacjenta w ramach modelu cyfrowego zapisanego w pamięci komputera. Następnie, w specjalistycznym programie przeprowadzana jest symulacja leczenia ortodontycznego, a cały proces podzielony jest na 1-, lub 2- tygodniowe etapy, w ramach których ma następować stopniowy ruch zębów w pożądanym przez lekarza kierunku. W ramach każdego z etapów następuje wymiana nakładki na kolejną, której kształt ma odpowiadać ułożeniu zębów w danym momencie leczenia. W ten sposób, uzębienie pacjenta ma stopniowo osiągnąć zamierzone przez lekarza położenie.

W piśmiennictwie istnieją jednak liczne doniesienia wskazujące, że osiągnięte w ramach takiej terapii efekty w istotny sposób odbiegają od celu leczniczego, założonego w ramach komputerowej symulacji ruchów zębowych.

Jako przyczyny takiego stanu rzeczy, badacze wskazują między innymi: niedokładność cyfrowej reprodukcji uzębienia pacjenta w ramach modelu cyfrowego, indywidualną zmienność geometrii korzeni zębów (która może w istotny sposób odbiegać od uśrednionych, przyjmowanych przez oprogramowanie wartości), a także zmiany właściwości materiału nakładek pod wpływem środowiska jamy ustnej, co może negatywnie wpływać na ich zdolność do wywierania optymalnych sił ortodontycznych.

W celu zwiększenia skuteczności i przewidywalności leczenia nakładkowego konieczne jest zatem określenie, czy modele cyfrowe wiernie odwzorowują uzębienie pacjenta. Ma to szczególne znaczenie z uwagi na fakt, że w ramach terapii pojedynczy etap przesunięć

zębowych zakłada ruch w zakresie około 0,2 mm. Aby proces ten był dokładny, musi opierać się na bardzo precyzyjnym i wiarygodnym odwzorowaniu danych.

Określenie, czy występuje indywidualna zmienność anatomii uzębienia pacjentów (ze szczególnym uwzględnieniem różnic w długości korzeni zębów, które nie są rutynowo brane pod uwagę w ramach symulacji komputerowej leczenia nakładkowego) ma kluczowe znaczenie dla lekarzy praktyków. Może to bowiem pomóc zindywidualizować plan terapii, lub podjąć decyzję o innej metodzie leczenia ortodontycznego – na przykład przy pomocy aparatu stałego cienkołukowego. Da ono także wiedzę producentom oprogramowania służącego do projektowania nakładek ortodontycznych, jak je usprawnić. Może to potencjalnie pozwolić tworzyć lepiej dopasowane, bardziej realistyczne symulacje leczenia ortodontycznego.

Z kolei wypracowanie metod służących do określenia zmian właściwości powierzchniowych nakładek może pomóc producentom w poszukiwaniu bardziej odpornych materiałów o lepszych właściwościach mechanicznych, co korzystnie wpłynie na efektywność leczenia. Dodatkowo uzyskanie takich wyników może stać się podstawą do oceny długości interwału, w jakim nakładki powinny być wymieniane.

Cele

- 1) Zbadanie, czy odwzorowanie uzębienia pacjenta w formie modelu cyfrowego jest statystycznie tożsame (identyczne) z modelem gipsowym (dotychczasowy złoty standard w leczeniu tradycyjnym).
- 2) Określenie, czy występuje osobnicza zmienność w długości korzeni zębów dolnych z uwzględnieniem indywidualnych charakterystyk pacjentów, takich jak przerost żuchwy jedno-, lub obustronny. Ocena, czy występuje dymorfizm płciowy w długości korzeni zębów dolnych u człowieka.
- 3) Próba określenia idealnego interwału wymiany nakładki ortodontycznej, ze względu na proces jej degradacji w środowisku jamy ustnej. Ocena zmian występujących na powierzchni nakładek poddanych działaniu kwaśnych pokarmów, mających imitować dietę współczesnego człowieka oraz określenie najbardziej wiarygodnej metody badania procesu starzenia nakładek.

Metodyka

Rozprawę doktorską stanowi cykl trzech publikacji o łącznym IF= 9,819; MNiSW= 350 pkt.

W pierwszej publikacji przeprowadzono przegląd systematyczny piśmiennictwa połączony z analizą statystyczną (metaanalizą) w celu określenia, czy pomiary uzębienia wykonywane na modelach cyfrowych są identyczne z pomiarami wykonywanymi na modelach gipsowych. Z uzyskanych wstępnie 1507 prac, ostatecznie do analizy jakościowej zakwalifikowano 50 publikacji. Po przeanalizowaniu formalnych kryteriów włączenia do analizy statystycznej, do analizy ilościowej zakwalifikowano 9 publikacji. Wyekstrahowano łącznie dane 428 pacjentów, u których wykonano modele diagnostyczne przed leczeniem ortodontycznym. Pobrano informacje dotyczące płci i wieku badanych, rodzaju i wartości wykonywanych pomiarów, średniej różnicy między pomiarami wykonywanymi metodą cyfrową, a tradycyjną. Następnie wykonano metaanalizę następujących pomiarów: szerokości międzytrzonowcowej górnej, szerokości międzytrzonowcowej dolnej, szerokości międzykłowej górnej, szerokości międzykłowej dolnej, nagryzu pionowego, nagryzu poziomego.

Celem drugiej pracy było zbadanie, czy występuje osobnicza zmienność w długości zębów dolnych - koron i korzeni. Jako odpowiednie dystraktory wyznaczono: długość żuchwy, asymetrię w budowie żuchwy, płeć pacjenta. W sposób retrospektywny przeanalizowano tomografie stożkowe (CBCT) wykonane w ramach diagnostyki przed leczeniem ortodontycznym. Do udziału w badaniu zakwalifikowano 92 pacjentów, na tomografiach których zmierzono długości zębów dolnych od siekacza centralnego, do 2. zęba trzonowego. Analizowano pacjentów z prawidłową przednio-tylną relacją szczęki i żuchwy (I klasa szkieletowa), oraz pacjentów prezentujących przerost żuchwy jedno-, lub obustronny (III klasa szkieletowa z- i bez asymetrii).

Określono trzy hipotezy zerowe: 1) nie ma dymorfizmu płciowego w długości zębów dolnych 2) u pacjentów z jednostronnym przerostem żuchwy, zęby dolne po stronie z przerostem nie są dłuższe, niż zęby po stronie o prawidłowej długości żuchwy 3) nie ma różnic w długości zębów między pacjentami z I klasą, a pacjentami z III klasą szkieletową bez asymetrii. Następnie, przy pomocy analizy statystycznej zweryfikowano każdą z nich.

W trzecim badaniu analizowano wpływ płynów o niskim pH na zmiany zachodzące na powierzchni materiału, z którego wykonywane są nakładki ortodontyczne. Wykorzystano napój Coca-Cola oraz sok pomarańczowy, w celu zasymulowania działania pokarmów będącymi składnikami diety przeciętnego współczesnego człowieka. Stworzono grupę kontrolną (n=15) oraz cztery grupy badawcze (każda o liczebności n=15), w ramach których zanurzano nakładki odpowiednio w Coca-Coli i soku pomarańczowym przez 1, lub 2 tygodnie. Zmiany zachodzące na powierzchni nakładek badano przy pomocy analizy kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego. Wykorzystano także metodę analizy wymiaru fraktalnego i analizy tekstur w celu dokładniejszego opisu zachodzących zmian i oceny procesu starzenia nakładek w funkcji czasu.

Wyniki

Wykonany w ramach pierwszej pracy przegląd piśmiennictwa ujawnił znaczną heterogeniczność wśród 50 analizowanych publikacji. Stwierdzono łącznie 25 niestandardyzowanych rodzajów pomiarów modeli cyfrowych i gipsowych (tradycyjnych). Do analizy ilościowej włączono prace, które porównywały przynajmniej jeden z poniższych parametrów: szerokość międzytrzonowcowa górna/dolna, szerokość międzykłowa górna/dolna, nagryz pionowy, nagryz poziomy. Finalnie do dalszej analizy statystycznej włączono pomiary z 9. prac opisujących łącznie pomiary uzębienia 428. pacjentów.

W ośmiu pracach, z analizowanych dziewięciu, autorzy stwierdzili występowanie istotnych statystycznie różnic między pomiarami cyfrowymi, a tradycyjnymi. Ponadto ocena poszczególnych analizowanych badań wykazała, że występujące w 8. na 9 badanych prac różnice były istotne statystycznie, ale nie wykazywały różnic, które powinny mieć znaczenie kliniczne. Jednakże, analizując wszystkie dane zbiorczo w ramach metaanalizy z efektem zmiennym nie stwierdzono istotnych statystycznie ($p < 0,05$) różnic dla żadnego z analizowanych pomiarów. Potwierdza to wzrost poziomu istotności statystycznej testu po przeanalizowaniu większej ilości danych, który pozwolił uniknąć błędu pierwszego rodzaju (błędu statystycznego polegającego na fałszywym stwierdzeniu różnic, które wynikają ze zbyt małej liczebności analizowanych grup) oraz potwierdza słuszność decyzji o wykonaniu analizy metodą ilościową.

W ramach drugiego projektu badawczego zmierzono długości korzeni zębów dolnych na tomografiach stożkowych (CBCT) 92. pacjentów (49. mężczyzn, 43. kobiety). Średni wiek badanych wynosił 24,3 lata. Analiza statystyczna umożliwiła zweryfikowanie postawionych hipotez zerowych.

Stwierdzono, że występuje dymorfizm płciowy w długości zębów dolnych (hipoteza zerowa pierwsza została obalona). W trzech badanych grupach (I klasa szkieletowa, III klasa bez asymetrii, III klasa z asymetrią) zęby dolne mężczyzn były dłuższe od zębów kobiet średnio o odpowiednio 1,57mm, 1,35mm, 1,43mm.

U pacjentów z jednostronnym przerostem żuchwy nie odnaleziono istotnej statystycznie zależności między długością trzonu żuchwy, a długością zębów po tej samej stronie (hipoteza zerowa druga została potwierdzona).

Potwierdzono, że zęby dolne u pacjentów z przerostem żuchwy są dłuższe, niż u pacjentów z prawidłową budową żuchwy – średnio o 1,17mm dla mężczyzn i 1,39mm dla kobiet (hipoteza zerowa trzecia została obalona).

Podsumowując: Wykazano istotne statystycznie różnice w długości zębów dolnych między kobietami, a mężczyznami oraz między pacjentami z prawidłową budową żuchwy, a pacjentami z przerostem żuchwy.

W ramach trzeciej pracy, w metodzie analizy wymiaru fraktalnego (FD) wykazano istotne statystycznie różnice między grupami kontrolną i grupą poddawaną immersji w soku pomarańczowym przez 1 tydzień (J1W), a grupami poddawanymi immersji w Coca-Coli przez 2 tygodnie (C2W) i w soku pomarańczowym przez 2 tygodnie (J2W).

W badaniu metodą analizy tekstur (TA) uzyskano istotne statystycznie różnice dla każdego z porównań, za wyjątkiem C2W-J2W. Zauważono silną zależność spadku poziomu entropii (miary wzrostu uszkodzeń materiału) od czasu moczenia nakładek, a także niższy poziom entropii dla soku pomarańczowego, niż napoju Coca-Cola. Zależność tę potwierdzono zarówno w porównaniach grup poddawanych immersji przez 1 tydzień (C1W-J1W), jak i grup poddawanych immersji przez 2 tygodnie (C2W-J2W). W badaniu metodą analizy kąta zwilżania uzyskano istotne statystycznie różnice między grupą kontrolną, a grupą C1W dla wody oraz między grupami kontrolną, a C1W i J2W oraz J1W-C1W dla glikolu.

W analizie napięcia powierzchniowego uzyskano istotne statystycznie różnice dla wody w porównaniu: grupa kontrolna - grupa C1W. Dla glikolu nie uzyskano statystycznie istotnych różnic.

W porównaniu metod TA okazała się metodą najczulszą.

Wartym odnotowania jest fakt, że sok pomarańczowy wykazywał nieznacznie bardziej uszkodzające działanie od Coca-Coli, co potwierdzono w analizie TA.

Podsumowując: Zmiany widoczne na powierzchni nakładek są bardziej widoczne po 2-tygodniowej inkubacji, niż po 1-tygodniowej, przy zastosowaniu metody TA. W czasie 1-tygodniowej obserwacji, sok pomarańczowy powodował większą intensywność zmian na powierzchni nakładek, niż napój Coca-Cola. Najlepsze do oceny zmian obecnych na powierzchni nakładek wydają się być metody TA i FD.

Wnioski

- 1) W sposób statystyczny dowiedziono, że modele cyfrowe są identyczne względem modeli gipsowych i mogą je zastąpić jako nowy „złoty standard” w ortodontacji w celach diagnostyki, planowania, analizowania osiągniętych rezultatów leczenia.
- 2) Zęby dolne są dłuższe u mężczyzn, niż u kobiet. Zęby dolne u osób z przerostem żuchwy są dłuższe, niż u osób z prawidłową budową żuchwy. Asymetria w budowie żuchwy nie jest skorelowana z długością zębów dolnych.
- 3) Metody analizy fraktalnej i analizy tekstur mogą być metodami z wyboru do badania właściwości powierzchniowych materiału, z którego wykonuje się nakładki oraz mogą być z powodzeniem używane przy rozwoju nowych tworzyw do produkcji nakładek. Kwaśne płyny wchodzące w skład diety współczesnego człowieka mają uszkodzający wpływ na powierzchnię nakładek. Proces ten najskuteczniej uwidaczniają badania metodą analizy fraktalnej i analizy tekstur. 2-tygodniowy interwał wymiany nakładek wydaje się wystraszający, ale należy wziąć pod uwagę, że niekiedy zmiana właściwości powierzchniowych tych aparatów może nastąpić już po 1. tygodniu użytkowania.

4. ABSTRACT

Introduction

Removable appliances have been used in orthodontic therapy for many years. One of their major advantages is the ability to easily maintain good oral hygiene. Some of their biggest drawbacks are: lack of good tooth movement control and unsatisfactory aesthetics. For those reasons, many clinicians and patients were reluctant to use them. Thereby, different kinds of fixed appliances started to overcome the removable ones in terms of popularity in this specific “race”. In recent years, however, aligners are beginning to gain popularity – they are removable appliances made of elastic, transparent material, which covers whole dental arches.

From the orthodontists’ perspective, they offer many advantages over classic, traditional fixed appliances: thanks to the possibility of easy appliance removal and insertion, maintaining proper mouth hygiene is much easier. This decreases the risk of dental plaque accumulation, which in turn lowers the likelihood of carious disease, as well as periodontium breakdown. It also increases the comfort during food consumption, and decreases the risk of appliance breakage. At the same time, aligners offer the ability of tridimensional tooth movement control, which, until recently, was only achievable with edgewise fixed appliance.

In addition, thanks to their thin, transparent body these appliances are almost invisible, which accommodates the patients’ ever increasing aesthetic demands.

During aligner fabrication, digital techniques are utilised. They enable the reconstruction of anatomic structure of the patient’s teeth as a digital model saved on the computer’s hard drive. As a next step, a simulation of an orthodontic treatment is carried out in dedicated orthodontic software. This process is split into one- or two week steps, in which gradual tooth movement should occur in the direction the clinician had planned. Every step involves a next set of aligners, whose shape represent the teeth position at a given moment of treatment. In this way, the patient’s dental arches should gradually become aligned according to the clinician’s plan.

The projected and the actual outcome of this course of treatment, however, differ significantly. This has been shown in numerous papers in the literature focusing on the evidence behind aligner treatment.

Researchers show many reasons behind this problem, among others: the accuracy of digital reconstruction of patient’s teeth as a means of a digital model, individual variation of teeth roots geometry (which can greatly deviate from the mean values, which are programmed in the software used for appliance fabrication). Another reason are the changes of aligner material properties under the influence of oral cavity fluids, which can have a negative impact on their ability to exert optimal orthodontic forces.

In order to increase efficacy and predictability of aligner treatment it is therefore necessary to determine whether the digital model is a faithful reproduction of the patient’s teeth. It is particularly important due to the fact, that in the course of treatment one tooth movement step may involve an increment of approximately 0,2mm. For this process to be accurate, it must be based on very precise and reliable data reproduction.

It is crucial for the clinician to determine whether there is a marked variation of tooth anatomy (particularly involving teeth root length, which are not routinely analysed during the computer simulation of aligner treatment). It can help individualise the patient's treatment plan, or make a decision to choose a different method of orthodontic treatment – such as utilising the fixed appliance, for example. It could also bolster the software developers' knowledge regarding the ways to improve their product. This, in turn, may enable them to create a more reliable and realistic simulations of orthodontic treatment outcome.

The development of methods to determine changes in the surface properties of the aligners can aid manufacturers in their search for more resistant materials with better mechanical properties. This will be beneficial for the efficacy of the treatment. Additionally, these methods may be used to help determine the length of the interval, in which the aligners should be replaced by a new set in the course of treatment.

Aims

- 1) To investigate whether the patient's teeth reproduced as a digital model are statistically similar (identical) to the stone model (conventional golden mean in traditional treatment course).
- 2) To determine whether there is personal variation in the length of the roots of the lower teeth- taking into account individual characteristics of patients such as mandibular hypertrophy unilaterally or bilaterally. To assess whether there is sexual dimorphism in the length of the roots of the lower teeth in humans.
- 3) Evaluation of changes occurring on the surface of aligners exposed to acidic foods designed to mimic the diet of modern humans. Determining the most reliable method to study the ageing process of aligners. An attempt to find an answer on how frequent should the aligners be replaced during treatment.

Methods

The doctoral dissertation is a series of three publications with a total IF = 9.819; Ministry of Science and Higher Education = 350 points.

In the first publication, a systematic review of the literature combined with statistical analysis (meta-analysis) was carried out to determine whether dental measurements made on digital models are identical to those made on plaster models. Of the 1507 papers initially obtained, 50 publications were finally selected for qualitative analysis. After reviewing the formal inclusion criteria for statistical analysis, nine publications were qualified for quantitative analysis. Data of a total of 428 patients (volunteers) with diagnostic models taken before orthodontic treatment were extracted. Information was collected on the gender and age of the subjects, the type and value of measurements taken, the mean difference between measurements taken by digital and traditional methods. Subsequently, a meta-analysis of the data on the following measurements was performed: upper intermolar width, lower intermolar width, upper intercanine width, lower intercanine width, overbite, overjet.

The aim of the second study was to investigate whether there is personal variability in the total length of lower teeth (crowns and roots combined). The following were identified as relevant differentiators: mandibular length, asymmetry in mandibular bone structure, and patient gender. Cone-beam computed tomography (CBCT) scans taken as part of the diagnostic process prior to orthodontic treatment between 2017 and 2021 were retrospectively analysed. 92 patients were eligible to participate in the study, and their CT scans were utilised to measure the length of the teeth starting from lower central incisor, up to the second lower molar on both sides. Patients with a normal anteroposterior relationship of the maxilla and mandible (skeletal class I), and patients presenting mandibular hypertrophy unilaterally or bilaterally (skeletal class III with and without asymmetry) were analysed. Three null hypotheses were developed: 1) There is no sexual dimorphism in lower tooth length 2) There is no correlation between unilateral mandibular hypertrophy and lower tooth length on the same side 3) There are no differences in tooth length between patients with class I and patients with skeletal class III without asymmetry. Subsequently, each of these was verified using statistical analysis.

The third study analysed the effect of low pH liquids on changes occurring on the surface of orthodontic aligner material. A Coca-Cola beverage and orange juice were used to simulate the foods that are components of the diet of the average present-day individual. A control group (n=15) and four study groups (each with n=15) were designed, within which the aligners were immersed in Coca-Cola and orange juice for 1 or 2 weeks, respectively. Changes occurring on the surface of the aligners were studied using wetting angle and surface tension analysis. Fractal dimension analysis and texture analysis were also used to further investigate the changes taking place and to assess the ageing process of the aligners in the function of time.

Results

The systematic review performed as part of the first study revealed considerable heterogeneity among the 50 publications analysed. A total of 25 non-standardised types of digital and plaster (traditional) model measurements were found. Papers that compared at least one of the following parameters were included in the quantitative analysis: upper/lower intermolar width, upper/lower intercanine width, overbite, and overjet.

For the meta-analysis, measurements from nine papers covering a total of 428 patients were included in the statistical analysis.

In eight of the nine papers analysed, the authors found statistically significant differences between digital and traditional measurements. In addition, the evaluation of the individual studies analysed showed that the differences found in eight out of nine papers were statistically significant, but did not show differences that should be clinically meaningful. However, when analysing all the data collectively in a meta-analysis with a variable effect, no statistically significant ($p < 0.05$) differences were found for any of the measurements analysed. This confirms the increase in the level of statistical power of the test after analysing more data, which helped avoid an error of the first kind (the statistical mistake of falsely finding differences that are due to too small a size of groups analysed) and confirms the validity of the decision to perform the analysis using the quantitative method.

The second research project measured the root lengths of the lower teeth on cone-beam CT (CBCT) scans of 92 patients (49 male, 43 female). The mean age of the subjects was 24.3 years. Statistical analysis made it possible to verify the null hypotheses. It was found that there exists a sexual dimorphism in the length of lower teeth (null hypothesis one was rejected). In the three study groups (skeletal class I, class III without asymmetry, class III with asymmetry), male lower teeth were longer than female teeth by an average of 1.57mm, 1.35mm and 1.43mm, respectively. No statistically significant relationship was found between tooth length and mandibular body length on the same side (null hypothesis two was confirmed). It was confirmed that the lower teeth in patients with mandibular hypertrophy are longer than in patients with normal mandibular structure - by an average of 1.17mm for men and 1.39mm for women (null hypothesis three was rejected). Summary: Statistically significant differences were found in the length of lower teeth between men and women and between patients with normal mandibular structure and patients with mandibular hypertrophy.

Within the third study, the fractal dimension (FD) analysis method showed statistically significant differences between the control and J1W groups, and the C2W and J2W groups.

The texture analysis (TA) method showed statistically significant differences for each of the comparisons, with the exception of C2W-J2W. A strong dependence between the reduction in entropy level (a measure of the increase in material damage) and the immersion time of the aligners was observed, as well as a lower entropy level for orange juice than Coca-Cola drink in the comparison of groups with the same immersion time (C1W-J1W, C2W-J2W).

In the wetting angle analysis, statistically significant differences were obtained between the control group and the C1W group for water and between the control and C1W and J2W and J1W-C1W groups for glycol.

In the surface tension analysis, statistically significant results were obtained for water in the control - C1W group comparison. No statistically significant differences were obtained for glycol.

In the comparison of methods, TA proved to be the most sensitive of the methods, confirming the effect of time on the increase in material damage.

It is noteworthy that orange juice showed a slightly more destructive effect than Coca-Cola, which was confirmed in the TA analysis.

Summary: The changes visible on the surface of the aligners are more evident after a 2-week incubation than after a 1-week incubation in the TA method. At the 1-week follow-up, orange juice caused more intense changes on the surface of the aligners than Coca-Cola beverage. The TA and FD methods appear to be the best tools for assessing the changes present on the surface of the aligners.

Conclusions

1) It has been statistically proven that digital models are identical to plaster models and can replace them as the new 'gold standard' in orthodontics for the purposes of diagnostics, treatment planning and analysis of treatment results achieved.

2) Lower teeth are longer in men than in women. Lower teeth in persons with mandibular hypertrophy are longer than in persons with normal mandibular structure. Asymmetry in mandibular structure is not correlated with lower tooth length.

3) Fractal dimension analysis and texture analysis methods can be the methods of choice for investigating the surface properties of aligner material and can be successfully used in the development of new aligner materials. Acidic liquids included in the diet of modern humans have a damaging effect on the surface of aligners. This process is most effectively visualised by fractal dimension and texture analysis studies. A 2-week aligner change interval seems sufficient, but it should be taken into account that sometimes a change in the surface properties of these appliances can occur after just 1 week of use.

5. Wprowadzenie

Tradycyjne aparaty ortodontyczne, składające się z elementów mocowanych na stałe na zębach pacjenta na czas leczenia zostały opisane jeszcze pod koniec lat 20. XX. wieku przez Edwarda H. Angle, nazywanego „ojcem współczesnej ortodoncji” (1).

Pomimo wprowadzania szeregu usprawnień, współcześnie stosowane tradycyjne aparaty stałe w znaczącym zakresie przypominają aparat opisany blisko sto lat temu.

Mają one swoje istotne wady: sprzyjają gromadzeniu się płytki nazębnej, zwiększają ryzyko próchnicy, zapalenia dziąseł i przyzębia (2). Ponadto, z uwagi na stale rosnące oczekiwania pacjentów często są one uważane przez nich za niewystarczająco estetyczne i niewygodne w użytkowaniu.

Jako alternatywę do aparatów stałych opisano elastyczne, zdejmowane aparaty ortodontyczne. Po raz pierwszy zostały one przedstawione już w 1945 roku (3).

Zdejmowane aparaty ortodontyczne w formie niewidocznych nakładek znajdują uznanie wśród pacjentów z uwagi na wygodę (łatwość zakładania i zdejmowania), estetykę (nie zasłaniają zębów w trakcie terapii, pozostając całkowicie przezroczyste), higienę (łatwość utrzymania higieny zębów oraz samego aparatu) oraz brak istotnego wpływu na wydolność żucia, w przeciwieństwie do tradycyjnych aparatów stałych.

Zwiększone zainteresowanie zdejmowanymi aparatami ortodontycznymi w ostatnich latach jest związane z rozwojem odpowiednich technik materiałowych (4) oraz technik cyfrowych, umożliwiających cyfrowe przedstawienie uzębienia pacjenta, wraz z analizą jego uzębienia (5).

Współcześnie, w celu uzyskania cyfrowego odwzorowania uzębienia pacjenta wykorzystuje się najczęściej dwa procesy: 1) skanowanie uzębienia pacjenta (przy pomocy skanera wewnątrzustnego) 2) skanowanie gipsowego modelu uzębienia pacjenta (przy pomocy skanera laboratoryjnego). Skanery laboratoryjne są często wykorzystywane w praktyce ortodontycznej z uwagi na to, że nie wymagają kosztownej inwestycji w skaner wewnątrzustny, a także nie wymagają specjalnych przygotowań uzębienia pacjenta w celu uzyskania odpowiedniej jakości skanu. Umożliwiają one stworzenie wirtualnych modeli uzębienia, które są następnie wykorzystywane w dalszych etapach: analizy uzębienia pacjenta, stawiania diagnozy, przeprowadzania symulowanego procesu leczenia pacjenta w środowisku cyfrowym. Następnie, w trakcie procesu produkcji nakładek są one wykonywane na serii modeli, powstających w procesie druku 3D. Tak wytworzone nakładki są następnie wymieniane przez pacjenta w określonych odstępach w trakcie terapii według wskazań producenta: najczęściej spotyka się opisy interwałów 1- lub 2-tygodniowych.

Według założeń takiego procesu leczniczego, w miarę wymiany nakładek zęby ulegają stopniowemu przesunięciu w kierunku z góry zaplanowanych przez lekarza, idealnych pozycji (6). W piśmiennictwie można jednak znaleźć dowody na to, że efekty osiągane w ramach terapii w istotny sposób odbiegają od założonego celu leczniczego, widocznego na ekranie komputera w trakcie planowania (7-8).

Wśród czynników opisywanych w piśmiennictwie wpływających na skuteczność i przewidywalność leczenia ortodontycznego przy pomocy nakładek wymienia się między

innymi: dokładność cyfrowego odwzorowania uzębienia pacjenta, indywidualne zróżnicowanie anatomii korzeni zębów u pacjentów (które nie jest rutynowo brane pod uwagę w czasie projektowania i symulowania leczenia ortodontycznego *in silico*), a także utratę korzystnych właściwości materiałowych aparatu w trakcie procesu starzenia materiału na skutek oddziaływania środowiska jamy ustnej i spożywanych pokarmów.

W przeszłości podejmowane były próby sprawdzenia, czy modele cyfrowe mogą być wiernym odzwierciedleniem modeli gipsowych (5). Jednak z uwagi na znaczne zróżnicowanie metod porównawczych i różnice metodologiczne badacze nie podjęli do tej pory próby wykonania metaanalizy, która na drodze analizy statystycznej w sposób obiektywny mogłaby odpowiedzieć na pytanie, czy modele cyfrowe mogą w praktyce ortodontycznej zastąpić modele gipsowe.

Jest to istotna luka w piśmiennictwie, bowiem metaanaliza oferuje poziom dowodów naukowych o najwyższej jakości. Celem pierwszej pracy w cyklu było sprawdzenie na drodze metaanalizy, czy pomiary dokonywane na modelach cyfrowych uzyskanych przy pomocy skanowania modeli gipsowych są dokładnym odzwierciedleniem pomiarów dokonywanych na modelach uzyskanych drogą tradycyjną.

Wybrano tę metodę z uwagi na to, że jest ona popularna wśród ortodontów z uwagi na brak konieczności inwestowania znacznych środków w kosztowny skaner wewnątrzustny (9).

Podczas cyfrowego projektowania przesunięć zębowych i założonego celu leczenia oprogramowanie służące do projektowania nakładek uwzględnia wyłącznie część anatomii zęba, jaką jest korona kliniczna zęba – jest to ta część zęba, na którą nakładka poprzez swoją obecność w jamie ustnej wywiera siły, służące do przesunięć zębowych. Jednak w piśmiennictwie udowodniono (8), że czynnikiem w największym stopniu determinującym to, jaki ruch wykona ząb w odpowiedzi na siły ortodontyczne jest długość i anatomia całego zęba, ze szczególnym uwzględnieniem długości korzenia zęba. Obecnie w ramach komputerowej symulacji leczenia nakładkowego anatomia korzeni jest przedstawiana przy pomocy uśrednionych danych, nie biorąc pod uwagę indywidualnej zmienności anatomii pacjenta, która w istotny sposób może wpływać na uzyskany efekt leczenia ortodontycznego, poziom trudności oraz czas leczenia (6).

Celem drugiej pracy było zbadanie, czy istnieją różnice w długości zębów żuchwy między pacjentami prezentującymi III klasę szkieletową (przerost żuchwy jedno-, lub obustronny) a pacjentami prezentującymi I klasę szkieletową (prawidłowa relacja strzałkowa szczęki i żuchwy). Zostało zbadane także, czy u pacjentów z jednostronnym przerostem żuchwy występuje zależność między zwiększeniem długości trzonu żuchwy po stronie hiperplastycznej, i zwiększeniem długości korzeni zębów po tej samej stronie, w stosunku do zębów po stronie bez przerostu. W dostępnym piśmiennictwie istnieją dowody (10), że na rozwój III klasy szkieletowej czynniki genetyczne wpływają w większym stopniu, niż ma to miejsce np. w powstawaniu wad klasy II. Dodatkowo, istnieje wiele dowodów na to, że zbliżone czynniki genetyczne mają wpływ na długość i anatomię korzeni zębów (11). Z tego powodu zbadanie tej zależności oraz stwierdzenie czy istnieje dymorfizm płciowy w długości korzeni zębów dolnych stało się celem mojej drugiej pracy w cyklu badawczym dotyczącym efektywności leczenia nakładkowego.

Pod wpływem środowiska jamy ustnej i narażenia na pokarmy o niskim pH materiał nakładek ulega procesowi starzenia, który może mieć wpływ na ich efektywność w zakresie wywierania sił ortodontycznych, a tym samym może wpływać negatywnie na proces leczenia ortodontycznego (12). Dodatkowo, uszkodzenia powierzchni nakładek mogą mieć wpływ na proces adhezji bakteryjnej i formowania biofilmu na powierzchni aparatu (13).

Mając na uwadze powyższe, celem trzeciej pracy było ustalenie, jaki wpływ na powierzchnię nakładek wywierają płyny o niskim pH stanowiące jedne z częstszych elementów obecnych w diecie współczesnego człowieka, tzn. sok pomarańczowy i napój Coca-Cola. Napoje te były również wielokrotnie używane w doświadczeniach mających na celu zbadanie diety o niskim pH na właściwości elementów stosowanych w jamie ustnej (14,15). Nakładki były oceniane po 1 i 2 tygodniach immersji w odpowiednich napojach przez 3-krotne zanurzenie każdorazowo na 1 godzinę w ciągu jednej doby. Jako grupy kontrolnej użyto nakładek poddawanych immersji, według tego samego protokołu w wodzie destylowanej. Do analizy zostały wykorzystane metoda analizy fraktalnej i analizy tekstur, opracowane i udoskonalone w ramach działalności naukowej pracowników Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu. W ten sposób uzyskano liczbową wartość entropii, opisującą miarę homogeniczności materiału w sposób matematyczny.

Wykonano także analizę kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego przy pomocy nakropień mikrokroplami wody i glikolu. W ten sposób badano zwilżalność materiału – wyższe wartości kąta zwilżania oznaczają większą hydrofobowość, a zatem większą czystość powierzchni. Odwrotnie: im niższy kąt, tym większa zwilżalność. Wysoka energia powierzchniowa materiału i niskie napięcie powierzchniowe roztworu zmniejszają wartość kąta zwilżania.

6. Założenia i cele pracy

Celem pracy doktorskiej było zidentyfikowanie i opisanie czynników mogących mieć wpływ na skuteczność leczenia ortodontycznego przy pomocy nakładek ortodontycznych, a w szczególności:

- 1) Określenie, czy modele cyfrowe uzyskane poprzez skanowanie gipsowego modelu uzębienia pacjenta są tożsame (identyczne) z modelami gipsowymi poprzez analizę metodami statystycznymi (metaanalizę).
- 2) Zbadanie, czy występuje osobnicza zmienność w długości zębów dolnych – z uwzględnieniem wpływu długości żuchwy, asymetrii w budowie żuchwy, płci pacjenta.
- 3) Próba określenia idealnego interwału wymiany nakładki ortodontycznej, ze względu na proces jej degradacji w środowisku jamy ustnej. Ocena zmian występujących na powierzchni nakładek poddanych działaniu kwaśnych pokarmów, mających imitować dietę współczesnego człowieka oraz określenie najbardziej wiarygodnej metody badania procesu starzenia nakładek.

Założone cele badawcze zrealizowano poprzez przeprowadzenie 3 projektów badawczych, a każde z badań stanowiło podstawę do artykułu współtworzącego cykl.

7. Materiał i metody

Celem pierwszego projektu badawczego było zbadanie, czy modele cyfrowe stanowią wierną kopię modeli gipsowych - a zatem, czy mogą z powodzeniem służyć do celów stawiania diagnozy, projektowania i analizy przebiegu leczenia ortodontycznego przy pomocy nakładek ortodontycznych. Przeprowadzono przegląd systematyczny piśmiennictwa połączony z analizą statystyczną zebranych danych (metaanalizą). Pytanie badawcze oraz kryteria włączenia zdefiniowano w formacie PICO: P (populacja): 428 pacjentów (ochotników) u których wykonano modele diagnostyczne w ramach diagnostyki wykonywanej przed leczeniem ortodontycznym; I (grupa badana): pomiary wykonywane na modelach cyfrowych otrzymanych ze skanerów laboratoryjnych; C (grupa kontrolna): pomiary wykonywane na modelach gipsowych wykonywane metodą tradycyjną; O (wyniki): różnice otrzymane pomiędzy grupą badaną, a grupą kontrolną.

Do przeglądu włączono randomizowane badania kliniczne, prospektywne kontrolne badania kliniczne, badania obserwacyjne, przeglądy i analizy retrospektywne, natomiast wykluczono serie przypadków, opisy przypadków, listy do redakcji, badania na zwierzętach, a także badania, w których zawarto ograniczony zestaw danych: to znaczy badania, które nie prezentowały średniej różnicy pomiędzy pomiarami wykorzystując różne metody pomiaru, bez prezentacji odchylenia standardowego dla ocenianych pomiarów. Wykluczono także badania, które zostały przeprowadzone na niereprezentatywnych grupach: to znaczy te badania, które nie przedstawiły wyjaśnienia procesu włączania pacjentów do badania. Dokonano przeglądu elektronicznych baz danych PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar i Cochrane Central Register of Controlled Trials . Wyszukiwanie obejmowało wszystkie publikacje dostępne do 7. października 2021 r. i nie uwzględniało żadnych dodatkowych kryteriów dotyczących języka i daty publikacji. Niezależnie przeanalizowano ponadto piśmiennictwo źródłowe dostępne w opublikowanych przeglądach oraz przewodach doktorskich, a także ręcznie przeszukano następujące czasopisma: : *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *Angle Orthodontist*, *European Journal of Orthodontics* oraz *Journal of Orthodontics* pod kątem możliwych brakujących prac naukowych. Selekcji artykułów dokonywało niezależnie dwóch badaczy (M.W., M.N.). Wszelkie różnice w wyborze artykułów były omawiane przez obu autorów do czasu osiągnięcia wspólnego stanowiska.

Z każdego artykułu wyekstrahowano następujące dane: rok publikacji, rodzaj badania, liczbę pacjentów, wiek pacjentów, rodzaje pomiarów ortodontycznych porównywanych między grupą badawczą i kontrolną, średnią różnicę między pomiarami uzyskanymi metodą cyfrową i tradycyjną wraz z odchyleniem standardowym. Oceny jakości artykułów dokonali niezależnie dwaj badacze (M.W., M.N.) W celu oceny ogólnej jakości dowodów naukowych dla każdej z ocenianych danych użyto narzędzia Grades of Recommendation, Assessment, Development, and Evaluation (GRADE). Dodatkowo, w celu oceny ryzyka bias użyto narzędzia Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies (QUADAS). Powyższe narzędzia zostały wykorzystane, gdyż do badań diagnostycznych nie można wykorzystać narzędzia The Cochrane Risk of Bias tool for RCTs.

W celu przeprowadzenia analizy statystycznej (metaanalizy) wykorzystano model z efektem zmiennym. Głównym wynikiem była różnica w średnich (MDs) pomiędzy pomiarami uzyskiwanymi na modelach cyfrowych i gipsowych. Drugim wynikiem była kliniczna

istotność uzyskanego wyniku. W celu analizy heterogeniczności włączonych do analizy badań wykonano test Cochran Q oraz obliczono statystykę I^2 . Wszystkie obliczenia wykonano w programie Statistica 13 PL (StatSoft Polska, Kraków).

Przed przystąpieniem do dalszych badań uzyskano zgodę Komisji Bioetycznej nr KB-415/2022. (Komisja Bioetyczna Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu).

Celem drugiego autorskiego projektu badawczego było zbadanie, czy występuje osobnicza zmienność w długości korzeni zębów dolnych – wraz ze zbadaniem wpływu długości żuchwy, asymetrii w budowie żuchwy, płci.

Badanie było badaniem retrospektywnym – w badaniu przeanalizowano tomografie stożkowe (CBCT) wykonane w ramach diagnostyki ortodontycznej u pacjentów zgłaszających się do gabinetu ortodontycznego jednego z autorów (M.W.) między latami 2017, a 2021. Każdy z pacjentów wyraził pisemną zgodę na możliwe wykorzystanie danych zebranych w czasie diagnostyki w badaniach naukowych.

Dodatkowo, u każdego z pacjentów w ramach rutynowej diagnostyki przed leczeniem ortodontycznym wykonano zdjęcie boczne czaszki, na którym przy pomocy analizy cefalometrycznej według Segnera i Hasunda (16) dokonano analizy klasy szkieletowej pacjenta.

U każdego z pacjentów prezentujących relację szkieletową klasy III definiowaną jako przerost żuchwy oceniano, czy występuje asymetria w budowie żuchwy określona jako zbaczanie bródki o przynajmniej 5mm względem linii pośrodkowej twarzy (po wykluczeniu zaburzeń stawu skroniowo-żuchwowego i przesunięć czynnościowych).

Do udziału w badaniu zakwalifikowano 92 pacjentów (49 mężczyzn i 43 kobiety). Średni wiek badanych wynosił 24,3 roku. Najmłodszy pacjent miał 17 lat, najstarszy 35 lat. Kryteria włączenia były następujące: 1) brak historii wcześniejszego leczenia ortodontycznego w wywiadzie 2) pełne uzębienie stałe w dolnym łuku zębowym przynajmniej od 2. zęba trzonowego do przeciwległego 2. zęba trzonowego (14 zębów) 3) Pacjenci prezentujący I klasę szkieletową, lub III klasę szkieletową (z, lub bez asymetrii) 4) Pacjenci ogólnie zdrowi, bez historii zaburzeń kostnych w wywiadzie (w przeszłości i obecnie).

Z badania wyłączono pacjentów prezentujących wadę szkieletową klasy III kombinowaną (jeśli poza przerostem żuchwy występował niedorozwój strzałkowy szczęki, lub inne zaburzenia). Wykluczono także pacjentów z zaburzoną anatomią korzeni wywołaną: niezakończonym rozwojem wierzchołka, urazami, procesami zapalnymi, zaburzeniami genetycznymi.

Pacjenci zostali podzieleni na 3 grupy: pacjenci z I klasą szkieletową (prawidłowa relacja strzałkowa szczęk), pacjenci z III klasą szkieletową z asymetrią, pacjenci z III klasą szkieletową bez asymetrii (przerost żuchwy jedno-, lub obustronny). Dodatkowo, w każdej grupie wydzielono podgrupy według podziału na mężczyzn i kobiety.

Opracowano trzy hipotezy zerowe: 1) nie występuje dymorfizm płciowy w zakresie długości zębów dolnych 2) nie występuje zależność między jednostronnym przerostem żuchwy, a długością zębów dolnych po tej samej stronie 3) nie ma różnic w długości zębów między pacjentami z I klasą, a pacjentów z III klasą szkieletową bez asymetrii.

Długość każdego z zębów była mierzona w projekcji strzałkowej w programie 3D Slicer (<https://www.slicer.org/>). Kalkulacje statystyczne wykonano w programie Origin Pro 9 (OriginLab, Northhampton, MA, USA). Do oceny normalności rozkładów empirycznych posłużono się testem Shapiro-Wilka. Analizy statystyczne wykonano przy pomocy analizy wariancji ANOVA przy poziomie istotności statystycznej $p=0,05$. Średnie wartości między grupami porównano przy pomocy testu HSD Tukeya.

W trzecim projekcie badawczym badano, w jaki sposób na charakterystykę powierzchni materiału, z którego są tworzone nakładki ortodontyczne wpływają składniki diety współczesnego człowieka o niskim pH: sok pomarańczowy i napój Coca-Cola. Próbkę materiału, z którego wykonane są nakładki ($n=75$) podzielono na 5 grup o równej liczebności ($n=15$): grupę kontrolną (bez zanurzania) i 4 grupy badawcze: 1) C1W: immersja w napoju Coca-Cola przez okres jednego tygodnia 2) C2W: immersja w napoju Coca-Cola przez okres dwóch tygodni 3) J1W: immersja w soku pomarańczowym przez okres jednego tygodnia 4) J2W: immersja w soku pomarańczowym przez okres dwóch tygodni. Nakładki z grup badawczych zanurzano trzykrotnie w ciągu każdego dnia na okres 1 godziny w temperaturze $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, w celu symulowania działania zbliżonego do spożywania soków w ramach codziennej diety. Po zakończeniu immersji, nakładki były płukane przez okres 15 minut wodą demineralizowaną, następnie w ciągu 24 godzin struktura ich powierzchni była analizowana.

Po upływie określonego czasu badawczego właściwego dla każdej z grup, wykonano zdjęcia skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM) – VEGA3.

Na otrzymanych obrazach wykonano analizę wymiaru fraktalnego i analizę tekstur, uzyskując wynik liczbowy określający wartość homogeniczności (entropii) materiału według metod opisanych przez współautorów w piśmiennictwie (17,18). Kalkulacje przeprowadzono w programie MaZda 4.6. Wartości entropii porównywano między grupami przy pomocy testu Kruskala-Wallisa. Przyjęto poziom istotności statystycznej $p=0,05$.

Na każdej z próbek wykonano ponadto analizę kąta zwilżania nakraplając materiał nakładek mikrokroplami o objętości około $3\mu\text{l}$ wody i glikolu przy pomocy mikrostrzykawki. Kroplę fotografowano aparatem CCD (Hamamatsu ORCA-285G CCD Digital Camera C4742-95-12G04, Boston Industries) 5 sekund po tym, jak została ona nakroplona na badaną powierzchnię.

Do obliczeń statystycznych w ramach badania wymiaru fraktalnego, kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego materiału wykorzystano program Statistica, wersja 13.3 (StatSoft, Kraków, Polska). Wartość $p=0,05$ przyjęto za poziom istotności statystycznej. Wykorzystano nieparametryczny test Kruskala-Wallisa do zbadania obecności różnic między grupami z uwagi na brak rozkładu normalnego. Korelacja między zmiennymi była badana poprzez obliczenie współczynnika Spearmana. Dla analizy tekstur grupy porównywano przy pomocy analizy wariancji ANOVA lub testu Kruskala-Wallisa, zależnie od obecności (lub braku) rozkładu normalnego. Dla analizy tekstur wykorzystano program Statgraphics Centurion 18, wersja 18.1.12 (StarPoint Technologies, Inc, VA, USA).

8. Cykl publikacji stanowiących podstawę pracy doktorskiej

Systematic Review

Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and meta-analysis

Maciej Warnecki¹, Marek Nahajowski², Moschos A. Papadopoulos³, Beata Kawala⁴, Joanna Lis⁴, and Michał Saruł²

¹Private practice, Niemodlińska 63, Opole, Poland

²Department of Integrated Dentistry, Wrocław Medical University, Poland

³Department of Orthodontics, School of Dentistry, Aristotle University of Thessaloniki, Greece

⁴Department of Dentofacial Orthopaedics and Orthodontics, Wrocław Medical University, Poland

Correspondence to: Maciej Warnecki, ul. Śląski Dom 13, 46-045 Kotórz Wielki. E-mail: maciej.warnecki@gmail.com

Summary

Background: In recent years, digital models have become increasingly popular among orthodontists, both for clinical and scientific purposes. It is, therefore, crucial to appropriately investigate their reliability. To this date, however, there has been no scientific, statistical investigation of their reliability as compared to the traditional gold standard—plaster models in the form of a meta-analysis.

Objectives: To evaluate the reliability and reproducibility of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scanning plaster models in laboratory scanners compared to measurements taken directly on plaster models.

Search methods: Multiple electronic databases (PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar and Cochrane Central Register of Controlled Trials) were searched for articles with no year or language limitations.

Selection criteria: The included original papers should have dealt with the accuracy and repeatability of the measurements conducted on plaster and digital models derived from laboratory scanners. In order to provide an adequate statistical analysis, the studies should have provided sufficient data, that is the difference of means (MDs) with standard deviations (SDs) for analysed measurements.

Data collection and analysis: In total, 25 types of non-standardised measurements were found in the evaluated studies. The quantitative analysis included papers that compared at least one of the parameters: upper/lower intermolar width, upper/lower intercanine width, overjet and overbite and provided standard deviation of the mean differences between measurements obtained on plaster and digital models from a laboratory scanner.

Results: GRADE and QUADAS tools were used to assess the quality of evidence, and they revealed substantial heterogeneity. Random-effects meta-analysis revealed no statistically significant differences for analysed measurements. Four of the analysed papers reported differences that may be considered clinically significant.

Conclusions: No statistical significance between the direct measurements on plaster models and the digital ones taken from laboratory scanners could be identified by means of random-effects meta-analysis.

Registration: The systematic review was registered in the PROSPERO database (ID CRD42020215411).

Introduction

For decades, manual measurements of orthodontic plaster models constituted the basis of diagnostic records for the initial assessment, as well as of the progress of orthodontic treatment. In addition, such measurements were initially the only method for documenting and archiving medical data describing the orthodontic treatment process (1). Plaster models are convenient because they provide a three-dimensional evaluation (3D) of the oral cavity, and they make it possible to observe the dental arches from any angle. They do, however, have numerous disadvantages, including the risk of being damaged during analysis or storage, the need for

investments of money and storage space, and the fact that it takes considerable time to bring them in and out of the storage room when an archival model is needed (1–11).

Due to the advancements in digital technology, both soft and hard tissues can be visualised now electronically in a modern orthodontic practice (1, 12, 13). Digital models are therefore starting to become the new standard in orthodontic medical documentation that may totally replace plaster models (1, 12). There are many ways of obtaining digital models, including scanning (a) of the patient's dentition using an intraoral scanner at the office, (b) of an alginate impression or (c) of a plaster model with a laboratory scanner, as well as

(d) by means of Cone Beam Computed Tomography (CBCTs) following 3D imaging reconstruction (1, 12, 14). To evaluate the clinical usefulness of digital models, it is necessary to conduct an evidence-based evaluation of whether their measurements are accurate, reliable, repeatable and, most importantly, identical to plaster model measurements.

Systematic reviews addressing this issue can be found in the literature, and the most recent review was published in 2016 (1). In this paper, the authors concluded that digital models may very well replace plaster models. However, it is important to note that in their qualitative evaluation there were large discrepancies in the methodology applied in the studies, the analysed measurements were diverse and, most importantly, there was no quantitative evaluation of their data, i.e. meta-analysis that could scientifically and objectively confirm in a more evidence-based manner the quality of the measurements on the digital models.

Thus, aim of this study was to perform a quantitative evaluation of the available data by means of a meta-analysis in order to compare measurements directly made on plaster models and measurements performed on digital models obtained with the use of a laboratory 3D laser scanner.

Materials and methods

Registration and protocol

The systematic review was registered in the PROSPERO database (ID CRD42020215411). The protocol for the present study was conducted a priori in accordance with the Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (15), and the respective results are reported on the basis of the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statement (16) and the corresponding abstract extension (17).

The research questions were defined a priori in PICO format as follows:

- population (P), which included the patients or volunteers in whom orthodontic diagnostics were carried out.
- intervention (I), that is, measurements of digital models obtained from laboratory scanners,
- comparison (C), that is, measurements of plaster models conducted in the traditional way,
- results (O), meaning the differences between the intervention and the comparison.

Search strategy

The PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar and Cochrane Central Register of Controlled Trials databases were searched by entering keywords consistent with the search strategy for publications with no language or time limitations on 7 October 2021 (Supplementary Table 1).

In addition, the authors reviewed the references of the potentially included papers and manually searched the following journals: *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *Angle Orthodontist*, *European Journal of Orthodontics* and *Journal of Orthodontics* for possible missing papers. The search strategy was conducted independently by two authors (M.W. and M.N.). Any differences in article selection were discussed by all authors until a consensus was reached.

The search strategy has been validated by an independent supplementary search performed in the review process of the

manuscript. The supplementary search can be obtained from the corresponding author upon request.

Inclusion and exclusion criteria

The included original papers should have dealt with the accuracy and repeatability of the measurements conducted on plaster and digital models.

In addition, with regard to the study design the following inclusion criteria were applied:

- randomised clinical studies,
- prospective controlled clinical studies,
- retrospective studies,
- observational studies.

The following types of publications were excluded:

- case reports,
- case series,
- reviews,
- studies containing limited data (i.e. studies that did not provide the mean differences between the measurements

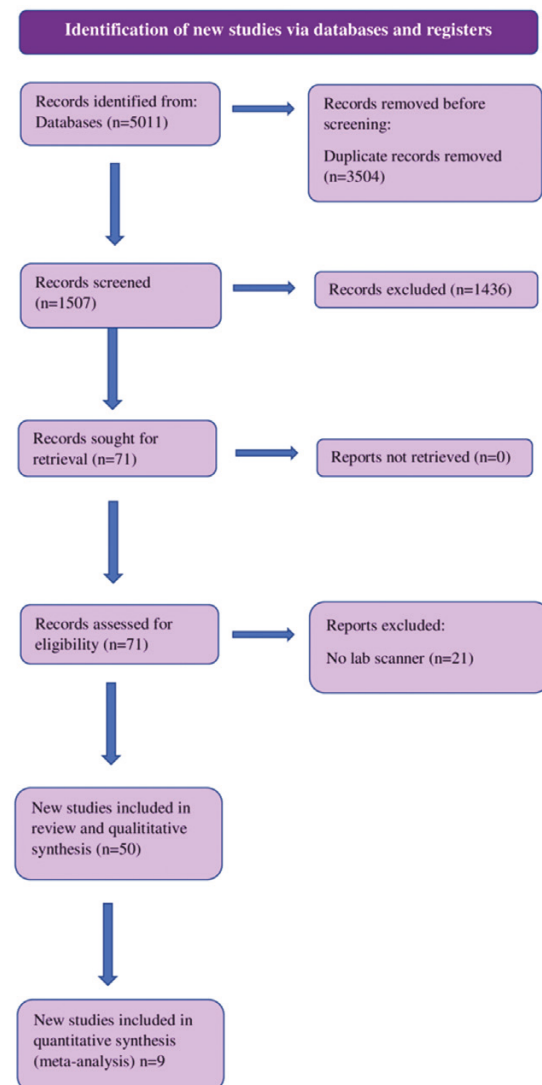


Figure 1. Schematic representation of the selection process: PRISMA flow diagram.

using different measurement methods together with the standard deviation of differences for the measurements evaluated),

- conference abstracts and letters to journals,
- studies conducted on nonrepresentative samples (i.e. studies that did not provide explanation of the enrolment process of the samples included in the study),
- animal studies.

Exclusion criteria included also different comparison methods, such as the calculation of measurement correlation coefficients and/or other statistical correlations without providing the exact values of the differences between measurements.

In addition, studies lacking abstracts in English and unrelated to the topic of the planned paper were excluded from current evaluation.

The authors of studies with limited, incomplete or missing data or of studies with nonrepresentative samples were not contacted for supplementary data or clarifications. This was based on the premise, that including parts of unpublished data from previously published studies might provide sources of confusion and ambiguity regarding the quality of such data, and the corresponding analysis based upon them.

Analysis of quality of evidence

Since The Cochrane Risk of Bias tool for RCTs cannot be applied to analyse the associated risk in diagnostic studies, it was decided to assess only the overall quality of the evidence for each of the primary outcomes according to the Grades of Recommendation, Assessment, Development, and Evaluation (GRADE) approach (18).

Additionally, the Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies (QUADAS) tool (19) was used to determine the risk of bias for each included study. This methodological

quality scoring scale is recommended for use in SRs of diagnostic accuracy by the Agency for Healthcare Research and Quality, Cochrane Collaboration, and the U.K. National Institute for Health and Clinical Excellence. Specifically, for each category (risk of bias and applicability concerns), studies with two or more domains of high risk would be designated as high risk; those with only one domain of high risk would be designated as medium risk; those with no domain of high risk would be designated as low risk. Assessments were conducted independently and in duplicate by two review authors.

Data synthesis

The statistical analysis assessed measurements that were present in all studies. The primary outcome measure was the difference of means (MDs) between measurements taken on digital and plaster models. The secondary outcome measure was the clinical relevance of the difference of means between measurements taken on digital and plaster models. Meta-analysis was conducted using the random-effects model.

A total difference of means (MDs) was calculated for each of the assessed measurements (Supplementary Table 2).

In addition, an analysis of the heterogeneity of the included studies was conducted using the Cochrane Q test and I^2 statistics. All calculations were performed with Statistica 13 PL software (StatSoft Polska, Krakow, Poland).

Results

After entering the keywords, the authors obtained 5011 abstracts. After removing duplicate data, 1507 records were identified and subsequently screened.

Seventy-one papers were initially included in the systematic review. Out of this group, 21 papers were excluded because they didn't meet the eligibility criteria (comparison of plaster models and digital models obtained by a laboratory scanner).

Table 1. GRADE Certainty assessment.

Certainty assessment								
Admission type	No. of participants (studies)	Study design	Risk of bias	Inconsistency	Indirectness	Imprecision	Publication bias	Certainty
MD (mean difference) for upper intermolar width	428 (9)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low
MD (mean difference) for lower intermolar width	418 (8)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low
MD (mean difference) for upper intercanine width	370 (7)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low
MD (mean difference) for lower intercanine width	380 (8)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low
MD (mean difference) for overbite	290 (5)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low
MD (mean difference) for overjet	300 (6)	Laboratory studies	Moderate	Inconsistent ^a	Direct	Imprecise ^b	Strongly suspected	Low

GRADE, Grading of Recommendations Assessment, Development, and Evaluation.

^aDifferent sample sizes, various models of laboratory scanners and various brands of software for the digital measurements lead to inconsistency in the results.

^bHeterogeneity of analysed data leads to imprecision of the evidence.

GRADE quality of evidence:

High quality: We are very confident that the true effect lies close to that of the estimate of the effect.

Moderate quality: We are moderately confident in the effect estimate: The true effect is likely to be close to the estimate of the effect, but there is a possibility that it is substantially different.

Low quality: Our confidence in the effect estimate is limited. The true effect may be substantially different from the estimate of the effect.

Very low quality: We have very little confidence in the effect estimate: The true effect is likely to be substantially different from the estimate of effect.

Table 2. Quality assessment of the included studies according to QUADAS-2.

Study	Risk of bias					Applicability concerns			
	Patient selection	Index test	Reference	Flow&timing	Total	Patient selection	Index test	Reference	Total
Abizadeh et al., 2012	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Yoon et al., 2018	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Camardella et al., 2020	High	Low	Low	Low	Medium	High	Low	Low	Medium
Bootvong et al., 2010	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Asquith et al., 2007	High	Low	Low	Low	Medium	High	Low	Low	Medium
Koretsi et al., 2017	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Lim et al., 2009	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Kim et al., 2014	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Liang et al., 2018	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Low

From the remaining 50 studies included in the qualitative synthesis, 41 were excluded because they lacked appropriate comparison data. Thus, finally only 9 papers were identified and analysed, which presented appropriate data set that made it possible to include them in the meta-analysis.

In total, 25 types of non-standardised measurements were found in the evaluated studies. The quantitative analysis included papers that compared at least one of the parameters: upper/lower intermolar width, upper/lower intercanine width, overjet and overbite and provided standard deviation of the mean differences between measurements obtained on plaster and digital models from a laboratory scanner. The PRISMA flow diagram depicting the selection procedure of the articles is presented in Figure 1.

Characteristics of the studies

A total of 428 models were examined in the included original papers. All studies except the paper by Camardella et al (20). included analyses of models obtained from the archives. It was also the only study, in which the measurements were conducted on models of students who were volunteers recruited for the study. This was also the only paper that provided the age of participants (21 to 39 years, mean age 27 years, 9 months). The data extracted from the articles are summarised in Supplementary Table 2.

Some of the studies involved in the meta-analysis have presented diagnostic flaws, such as lack of sample size calculation (21–26), or they have been declared as pilot studies (26). Further, in one study the authors found it not appropriate to attempt a formal a priori sample size calculation due to lack of clear indication of what would constitute a clinically relevant difference in the relative spread of observations (measured by standard deviations or variances) (25).

The results of the GRADE quality of evidence assessment are presented in Table 1.

All the included studies were additionally analysed for the risk of bias using QUADAS-2 assessment tool. The results of the QUADAS-2 analysis are presented in Table 2.

Data synthesis

In order to take better into consideration data heterogeneity in our analysis, the random-effects model was applied for the quantitative synthesis (27, 28). However, the analysis of the data for the upper intermolar width, which was the first of the assessed measurements, indicated that the study

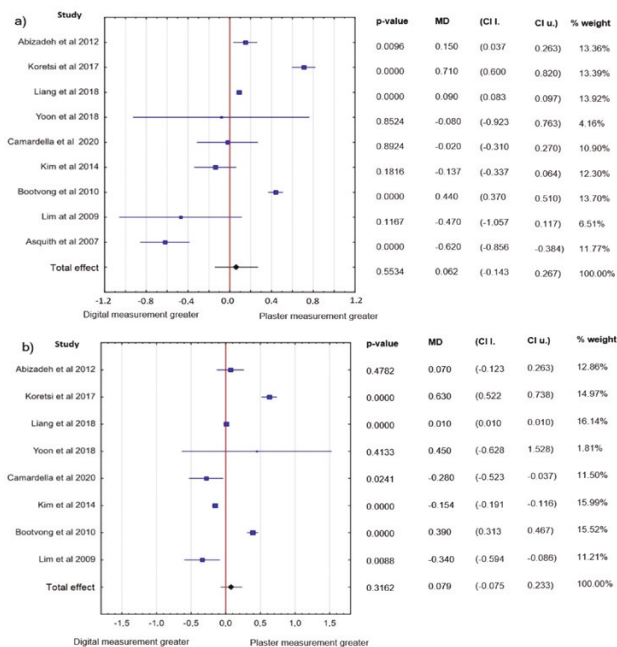


Figure 2. Forest plots of the meta-analyses: a) upper intermolar width, b) lower intermolar width. [P-value—level of statistical significance, MD—mean difference, CI l.—lower confidence interval, CI u.—upper confidence interval, % weight—percentage share of individual studies in the meta-analysis].

by Liang et al (23). clearly dominated in terms of its weight on the calculation of the total effect (Supplementary Table 3). After that study was excluded from the meta-analysis, another study was still observed to dominate (29) the results (Supplementary Table 3). Thus, a non-heterogeneity analysis based on the Q-statistic was conducted, and the I² statistic was calculated. The results confirmed the heterogeneity of the values of the parameters in the evaluated studies (Supplementary Table 4).

After analysing these results, it was unanimously decided not to exclude any study and thus to perform a meta-analysis with variable effects for all included studies (27, 28) (Supplementary Table 3).

Eight out of the nine studies included in the meta-analysis reported statistically significant differences between measurements performed on plaster and digital models (20, 22–26,

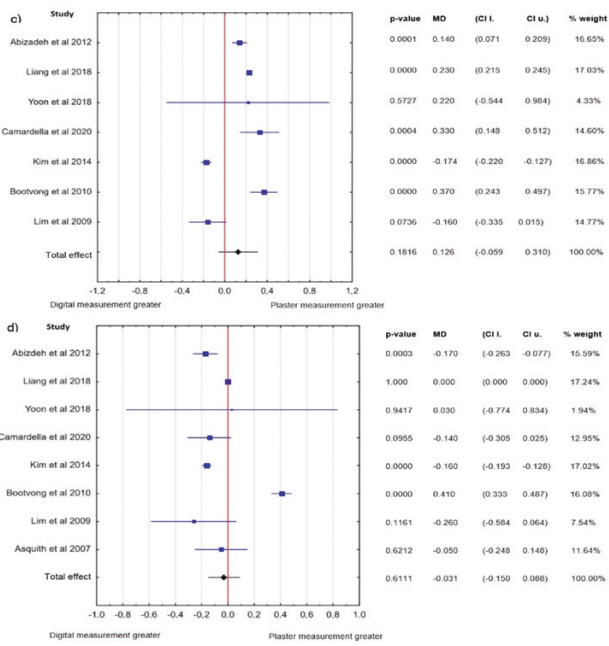


Figure 3. Forest plots of the meta-analyses: c) upper intercanine width, d) lower intercanine width. [P-value—level of statistical significance, MD—mean difference, CI l.—lower confidence interval, CI u.—upper confidence interval, % weight—percentage share of individual studies in the meta-analysis].

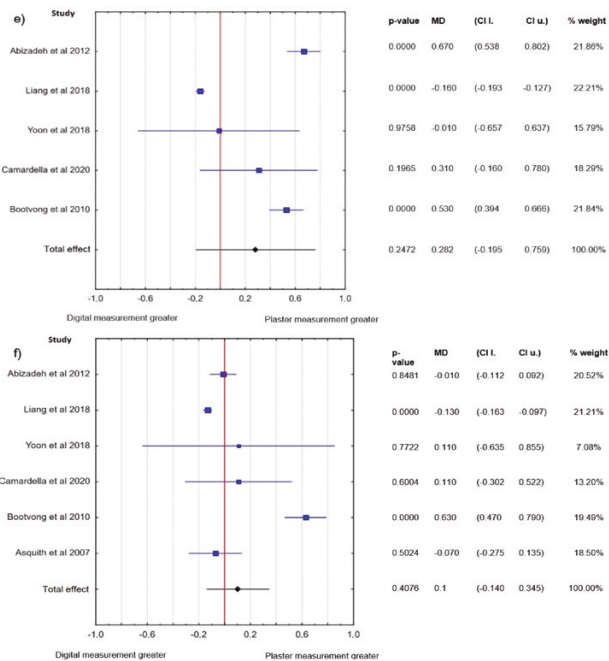


Figure 4. Forest plots of the meta-analyses: e) overbite, f) overjet. [P-value—level of statistical significance, MD—mean difference, CI l.—lower confidence interval, CI u.—upper confidence interval, % weight—percentage share of individual studies in the meta-analysis].

29, 30). The authors of one study did not observe any statistically significant differences (Supplementary Table 2) (21).

The results of the meta-analysis of the mean differences between digital and plaster model measurements turned out to be insignificant ($p < 0.05$), which, along with the percentage of the weight of the studies included in the meta-analysis and

the upper and lower confidence intervals, is presented in forest plots (Figures 2–4).

Discussion

Data selection

Initially, the papers selected for the meta-analysis were those that provided measurements on digital models obtained from an intraoral scanner, laboratory scanner or conical-beam computer tomography. To ensure homogeneity of the material, which makes statistically significant, objective conclusions possible, the literature was narrowed down to only studies that focused on obtaining digital models after scanning the plaster models with laboratory scanners. This method is common in orthodontic practice because it does not require significant investments, such as purchasing an expensive intraoral scanner (5, 31), and it does not expose patients to additional ionizing radiation, as in the case of CBCT (2, 8, 20, 32). It is also the most common method for transferring archival models to a digital repository. Confirming the reliability of this method would enable data obtained from digitalised, archived plaster models to be used in legal investigations and, first and foremost, in scientific studies. The use of an extraoral scanner does not require preparation of the scanned field, unlike the use of an intraoral scanner. Because heterogeneity in this subject may impact the quality of the results, and thus any meta-analysis based on them, this aspect is of significant importance (8, 21, 33).

In all papers included in the meta-analysis, the differences among the mean values of the measurements in the study and control groups were obtained using only one type of hardware and software. The exception was the paper by Camardella et al., in which differences were analysed with the use of software by two different manufacturers, OrthoAnalyzer (3Shape, Copenhagen, Denmark) and Digimodel (OrthoProof, Nieuwegein, The Netherlands), and were presented in the form of two separate data sets (20). Due to the structure of the meta-analysis, it was necessary to select only one of these data sets for the statistical analysis. Since Camardella et al (20). used a 3Shape (R700) scanner, it was unanimously decided to use in current evaluation only the data set based on the software from the same manufacturer of the laser scanner, as it was considered more appropriate in comparison to using software of external manufacturers.

Quality of evidence

The assessment of the certainty of evidence revealed low quality of all articles under evaluation.

The quality of evidence was analysed for each of the determined parameters (upper/lower intermolar width, upper/lower intercanine width, overbite and overjet). The inconsistency of all studies was considered significant, due to the different sample sizes, as well as due to the various models of laboratory scanners and various brands of software used for the digital measurements. The imprecision was assessed as serious due to the width of 95% CI for all analysed parameters, which resulted in heterogeneity of the data. Moreover, a small number of studies fulfilling our criteria raised the suspicion of publication bias. Due to the fact that each parameter was determined using the same method and the authors did not provide differences in the method of

measurements, a GRADE approach indicated that the quality of evidence supporting all the outcomes was low due to significant risk of bias, inconsistency, imprecision and publication bias (Table 1).

With the help of QUADAS-2 assessment tool (Table 2), seven of the studies evaluated were classified as having low risk of bias (21–25, 29, 30) and two (20, 26) as having medium risk of bias. Comparable results were obtained in the applicability arm of the QUADAS-2. All of the studies directly compared measurements from plaster casts against digital models produced by laboratory scanners. The researchers evaluated measurements from plaster models with a digital calliper, and digital models with computer software. The measurement methods were adequately described.

In most studies, the risk of bias associated with patient selection was determined to be low due to the use of an orthodontic model base, from which controls were selected according to specific inclusion criteria. However, in the paper of Camardella et al (20), the selection bias was considered as high, since the study and the control groups were not representative of the entire population (study models were obtained from students aged 21–39 years). In the paper by Asquith et al (26), the authors included study models in the study arbitrarily, without providing detailed inclusion criteria, which also presented a high risk of bias in this domain.

Data synthesis

The meta-analyses of all different measurements with the random-effects model, revealed that the *P*-value of the total MD for each variable under investigation was significantly higher than the adopted level of statistical significance ($P < 0.05$). Thus, in current study it was not possible to demonstrate any statistically significant differences between the values of the measurements obtained from plaster and digital models.

Clinical significance of differences in measurement values between plaster and digital models

In the literature, the adopted threshold for clinically negligible intergroup differences in orthodontic models is considered to be 0.5 mm (26, 34). This value was exceeded in four included articles (25, 26, 29, 30). Nevertheless, the authors of three papers (25, 26, 30) decided that the digital measurements were clinically adequate, due to either the small difference in the results (26) or the high coefficients of statistical agreement between the digital and plaster measurements (25, 30). One paper did not include an assessment of whether the measurements based on digital models were clinically adequate (29). The authors of the paper did, however, note that measurements of both digital and plaster models were characterised by high coefficients of statistical agreement. Liang et al. emphasised that there are certain factors that impact the clinical usefulness of digital model measurements, indicating that (especially in the case of less-skilled operators and very crowded teeth) it may be problematic to properly mark 3D measurement points that are projected onto the two-dimensional (2D) surface of a computer screen (23). For this reason, prior training and experience of the physician make digital measurements highly repeatable (5, 7, 20, 23, 30, 35–39). Furthermore, the literature suggests that possible minor differences in the assessment of digital models do not impact a clinician's decisions if data from the clinical examination of the patient also exist (25).

Study limitations

The search strategy included a review of a number of databases; however, grey literature was not searched, a fact that could be potentially a source of publication bias. In addition, a subject-related limitation was applied, and the authors analysed only the reliability of laboratory scanners for selected measurements, rejecting papers in which the authors provided incomplete data or presented the data in a way that made conducting a meta-analysis impossible.

Researchers' arbitrariness in the allocation of models to the study or control group (20, 22, 24–26, 30) as well as in the determination of the size of these groups in most of the evaluated papers (21–26) resulted in heterogeneity among the included studies. The fact that the authors used various models of laboratory scanners and various brands of software for the digital measurements also made comparisons of the results of various studies more difficult. Information regarding age and sex of the patients whose study models were analysed was provided in only one article (20). It is also worth emphasising that study models with deciduous and mixed dentition were not analysed in any of the studies, indicating the need to conduct such a study in the future.

Conclusions

Taking into consideration the limitations of the current study, the following can be concluded:

- By comparing the measurements taken on the plaster models with the ones taken on the digital models obtained from a laboratory scanner, the meta-analysis with random-effects model revealed no statistically or clinically significant differences of the variables under investigation, i.e. upper/lower intermolar width, upper/lower intercanine width and the overbite/overjet. Thus, the reliability of orthodontic measurements based on digital models obtained from scans of plaster models can be considered significant.
- Significant discrepancy in the methods used to compare the reliability and reproducibility of measurements impacted the heterogeneity of the included studies, indicating that the methodology used to analyse the reliability of digital models should be more uniform. Thus, it may be important to develop a standardised quality assessment procedure for new commercially available scanners taking this issue into consideration.

Supplementary material

Supplementary material is available at *European Journal of Orthodontics* online.

Funding

This work was supported by the Wroclaw Medical University, Wroclaw, Poland.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethics approval information

Not applicable.

Data availability statement

All data generated or analysed during this study in quantitative analysis are included in this published article and its supplementary information files. The datasets analysed during the current study in qualitative analysis are available from the corresponding author on reasonable request.

References

- Rossini, G., Parrini, S., Castroflorio, T., Deregibus, A., Debernardi, C.L. (2016) Diagnostic accuracy and measurement sensitivity of digital models for orthodontic purposes: a systematic review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 149, 161–170.
- Nowak, R., Wesemann, C., Robben, J., Muallah, J., Bumann, A. (2017) An in-vitro study comparing the accuracy of full-arch casts digitized with desktop scanners. *Quintessence International*, 20, 667–676.
- Kiviahde, H., Bukovac, L., Jussila, P., Pesonen, P., Sipilä, K., Raustia, A., Pirttiniemi, P. (2018) Inter-arch digital model vs. manual cast measurements: accuracy and reliability. *Cranio: The Journal of Craniomandibular Practice*, 36, 222–227.
- Zilberman, O., Huggare, J.A., Parikakis, K.A. (2003) Evaluation of the validity of tooth size and arch width measurements using conventional and three-dimensional virtual orthodontic models *Angle Orthodontist*, 73, 301–306.
- Murugesan, A., Sivakumar, A. (2020) Comparison of accuracy of mesiodistal tooth measurements made in conventional study models and digital models obtained from intraoral scan and desktop scan of study models. *Journal of Orthodontics*, 47, 149–155.
- Reuschl, R.P., Heuer, W., Stiesch, M., Wenzel, D., Dittmer, M.P. (2016) Reliability and validity of measurements on digital study models and plaster models. *European Journal of Orthodontics*, 38, 22–26.
- Sousa, M.V., Vasconcelos, E.C., Janson, G., Garib, D., Pinzan, A. (2012) Accuracy and reproducibility of 3-dimensional digital model measurements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 142, 269–273.
- Stevens, D.R., Flores-Mir, C., Nebbe, B., Raboud, D.W., Heo, G., Major, P.W. (2006) Validity, reliability, and reproducibility of plaster vs digital study models: comparison of Peer Assessment Rating and Bolton analysis and their constituent measurements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 129, 794–803.
- Verma, R.J., Singh, S.P., Verma, S., Kumar, V., Bhupali, N.R., Arora, S. (2019) Comparison of reliability, validity, and accuracy of linear measurements made on pre- and posttreatment digital study models with conventional plaster study models. *Journal of Orthodontic Science*, 8, 18.
- Grunheid, T., Patel, N.D., Felipe, N.L., Wey, A., Gaillard, P.R., Larson, B.E. (2014) Accuracy, reproducibility, and time efficiency of dental measurements using different technologies. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145, 157–164.
- Akyalcin, S., Dyer, D.J., English, J.D., Sar, C. (2013) Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: diagnostic accuracy and surface registration analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 144, 831–837.
- Fleming, P.S., Marinho, V., Johal, A. (2011) Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 14, 1–16.
- Hajeer, M.Y., Millett, D.T., Ayoub, A.F., Siebert, J.P. (2004) Applications of 3D imaging in orthodontics: part II. *Journal of Orthodontics*, 31, 154–162.
- Hirogaki, Y., Sohmura, T., Satoh, H., Takahashi, J., Takada, K. (2001) Complete 3-D reconstruction of dental cast shape using perceptual grouping. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 20, 1093–1101.
- Higgins, J.P.T., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M.J., Welch, V.A. (2020) Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.1 (updated September 2020). Cochrane. Available from <http://handbook.cochrane.org> (20 October 2021, date last accessed).
- Page, M.J., et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews *British Medical Journal*, 29, 372.
- Rethlefsen, M.L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A.P., Moher, D., Page, M.J. and Köffel, J.B. (2021) PRISMA-S Group. PRISMA-S: an extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Systematic Reviews*, 26, 39.
- Guyatt, G.H., Oxman, A.D., Schünemann, H.J., Tugwell, P., Knottnerus, A. (2011) GRADE guidelines: a new series of articles in the Journal of Clinical Epidemiology. *Journal of Clinical Epidemiology*, 64, 380–382.
- Whiting, P.F., Rutjes, A.W., Westwood, M.E., Mallett, S., Deeks, J.J., Reitsma, J.B., Leeflang, M.M., Sterne, J.A., Bossuyt, P.M. (2011) QUADAS-2 Group. QUADAS-2: a revised tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies. *Annals of Internal Medicine*, 155, 529–536.
- Camardella, L.T., Ongkosuwito, E.M., Penning, E.W., Kuijpers-Jagtman, A.M., Vilella, O.V., Breuning, K.H. (2020) Accuracy and reliability of measurements performed using two different software programs on digital models generated using laser and computed tomography plaster model scanners. *Korean Journal of Orthodontics*, 50, 13–25.
- Yoon, J.H., Yu, H.S., Choi, Y., Choi, T.H., Choi, S.H., Cha, J.Y. (2018) Model analysis of digital models in moderate to severe crowding: in vivo validation and clinical application. *Biomed Research International*, 841460, 5.
- Lim, M.Y., Li, S.H. (2009) Comparison of model analysis measurements among plaster model, laser scan digital model, and cone beam CT image. *Korean Journal of Orthodontics*, 39, 6–17.
- Liang, Y.M., Rutchakitprakarn, L., Kuang, S.H., Wu, T.Y. (2018) Comparing the reliability and accuracy of clinical measurements using plaster model and the digital model system based on crowding severity. *Journal of the Chinese Medical Association*, 81, 842–847.
- Kim, J., Heo, G., Lagravere, M.O. (2014) Accuracy of laser-scanned models compared to plaster models and conebeam computed tomography. *Angle Orthodontist*, 84, 443–450.
- Abizadeh, N., Moles, D.R., O'Neill, J., Noar, J.H. (2012) Digital versus plaster study models: how accurate and reproducible are they? *Journal of Orthodontics*, 39, 151–159.
- Asquith, J., Gillgrass, T., Mossey, P. (2007) Three-dimensional imaging of orthodontic models: a pilot study. *European Journal of Orthodontics*, 29, 517–522.
- Borenstein, M., Hedges, L.V., Higgins, J., Rothstein, H. (2009) *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ, USA. ISBN: 9780470057247.
- Riley, R.D., Higgins, J.P.T., Deeks, J.J. (2011) Interpretation of random effects meta-analyses. *British Medical Journal*, 342, d549.
- Bootvong, K., Liu, Z., McGrath, C., Hägg, U., Wong, R.W., Bendeus, M., Yeung, S. (2010) Virtual model analysis as an alternative approach to plaster model analysis: reliability and validity. *European Journal of Orthodontics*, 32, 589–595.
- Koretsi, V., Tingelhoff, L., Proff, P., Kirschnick, C. (2018) Intra-observer reliability and agreement of manual and digital orthodontic model analysis. *European Journal of Orthodontics*, 40, 52–57.
- Camardella, L.T., Vilella, O.V., van Hezel, M.M., Breuning, K.H. (2017) Accuracy of stereolithographically printed digital models compared to plaster models. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 78, 394–402.

32. Mah, J.K., Huang, J.C. and Choo, H. (2010) Practical applications of cone-beam computed tomography in orthodontics. *The Journal of the American Dental Association*, 141, 7S–13S.
33. Flugge, T.V., Schlager, S., Nelson, K., Nahles, S., Metzger, M.C. (2013) Precision of intraoral digital dental impressions with itero and extraoral digitization with the itero and a model scanner. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 1, 44, 471–478.
34. Luu, N.S. Nikolcheva, L.G. Retrouvey, J.M. Flores-Mir, C.E.-Bialy, T. Carey, J.P. Major, P.W. (2012) Linear measurements using virtual study models. *Angle Orthodontist*, 82, 1098–1106.
35. Gül Amu, N., Karsli, E., Kurt, G. (2019) Comparison of dental measurements between conventional plaster models, digital models obtained by impression scanning and plaster model scanning. *International Orthodontics*, 17, 151–158.
36. Westerlund, A., Tancredi, W., Ransjo, M., Bresin, A., Psonis, S., Torgersson, O. (2015) Digital casts in orthodontics: a comparison of 4 software systems. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 147, 509–516.
37. Nawi, N., Mohamed, A.M., Marizan Nor, M., Ashar, N.A. (2018) Correlation and agreement of a digital and conventional method to measure arch parameters. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 79, 19–27.
38. Quimby, M.L., Vig, K.W., Rashid, R.G., Firestone, A.R. (2004) The accuracy and reliability of measurements made on computer-based digital models. *Angle Orthodontist*, 74, 298–303.
39. Liu, J., Liu, Y., Wang, J., Zuo, X., Wang, X., Zhang, Y., He, H. (2021) Dental measurements based on a three-dimensional digital technique: a comparative study on reliability and validity. *Archives of Oral Biology*, 124, 105059.

Article

Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length?

Maciej Warnecki ^{1,*}, Małgorzata Żak ², Klaudia Szkoda-Poliszuk ², Beata Kawala ^{3,4} and Michał Sarul ^{4,5}¹ Independent Researcher, Niemodlińska 63, 45-864 Opole, Poland² Department of Mechanics, Materials and Biomedical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, 50-370 Wrocław, Poland; malgorzata.a.zak@pwr.edu.pl (M.Ż.); klaudia.szkoda-poliszuk@pwr.edu.pl (K.S.-P.)³ Department of Dentofacial Orthopaedics and Orthodontics, Wrocław Medical University, 50-425 Wrocław, Poland; ortodoncja@umw.edu.pl⁴ Clinic of Integrated Dentistry, Academic Polyclinic of Stomatology, 50-425 Wrocław, Poland; michal.sarul@umw.edu.pl⁵ Department of Integrated Dentistry, Wrocław Medical University, 50-425 Wrocław, Poland

* Correspondence: maciej.warnecki@gmail.com

Abstract: Introduction: The aim of our cross-sectional study is to determine whether there is a link between sex, skeletal class and mandibular asymmetry in orthodontic patients, with tooth length and asymmetry in tooth length on contralateral sides of the mandible. Methods: As the source for relevant data to answer this question, 3D cone-beam tomography (CBCT) images of a total of 95 future orthodontic patients were retrospectively selected from private practice records and were analyzed. The CBCT images were part of routine orthodontic diagnosis. Patients were divided into three groups (Class I, Class III with asymmetry and Class III without asymmetry) based on skeletal variables assessed on orthodontic cephalometric images and frontal photos of the face. Three null hypotheses were developed, and a series of statistical tests was performed in order to support or reject them. Results: We have established that there exists a sexual dimorphism in some of the teeth's lengths in our sample. Furthermore, we failed to find a link between mandibular asymmetry and asymmetry in tooth length. We have also found a link between skeletal class and tooth length differences in some of the analyzed measurements. Conclusions: Computational models used to design orthodontic appliances and to plan orthodontic treatment should be more individualized to consider a patient's sex and skeletal class.

Keywords: tooth length; sexual dimorphism; mandibular asymmetry; skeletal class; orthodontic treatment planning; orthodontics; dentistry



Citation: Warnecki, M.; Żak, M.; Szkoda-Poliszuk, K.; Kawala, B.; Sarul, M. Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? *Symmetry* **2022**, *14*, 1069. <https://doi.org/10.3390/sym14051069>

Academic Editors: Anna Paradowska-Stolarz, Irena Duś-Ilnicka and Maria Cristina Pollmann

Received: 25 April 2022

Accepted: 20 May 2022

Published: 23 May 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In recent years, a number of in vitro studies have been conducted to simulate specific tooth movements with different orthodontic methods, such as fixed appliances or aligners [1–17]. These studies have allowed us to better understand dental biomechanics and make it easier to plan orthodontic therapy for optimal treatment results.

These studies use the finite element method, in which the boundary conditions require the adoption of material parameters corresponding to the investigated tissues (cancellous, cortical bone and tooth material) and orthodontic appliance parameters. These mechanical properties, determined by experimental methods (such as Young's modulus and Poisson's ratio), can be found in abundance in the literature. However, the finite element method presents an analytical approach, describing the solution of a problem using differential equations in which the results are close enough to the exact solution. This is achieved by simplifying the geometry of the actual model or by obtaining approximate solutions to the exact physical model. In contrast to the above, there is considerable diversity in the

literature on how bone and tooth anatomy is determined. For example, the integration of optical scanners and computed tomography data [1] is used, as is the manual creation of a dental model according to the principles set out by Andrews [2,18]. Some researchers also use data produced by scanning a dental demonstration model [3]. In order for these studies to faithfully reflect real tooth movements during orthodontic therapy, it is crucial to reproduce the patient's anatomy as closely as possible in the computer simulation. Knowledge of the bone's anatomy, as well as information on the length and shape of the teeth and possible asymmetry in the patient's dentition, are important. This has the potential to positively influence the accuracy of mathematical predictions of dental movements in the future.

In view of this, in the authors' opinion, studies shedding light on the anatomy of patients' dentition and possible variability in the structure (also depending on sex and the possibility of asymmetry) are justified. This is because the length and morphology of the tooth roots are key elements affecting the tooth movements achieved in the course of orthodontic treatment [4–6,19,20].

Knowledge of the presence (or absence) of tooth length differences may allow clinicians to make better decisions about planned tooth movements and for aligner design software developers to potentially more effectively individualize aligners by accounting for the patient's dental characteristics, which has the potential to result in more effective orthodontic treatment with aligners in the future.

As the morphometric features of teeth significantly influence movement during orthodontic treatment, this study aims to assess if there are differences in lower teeth length. Particular attention was paid to the dependencies resulting from sex (sexual dimorphism), skeletal class (skeletal class I and skeletal class III patients) and mandibular asymmetry (longer side/shorter side).

Three null hypotheses were developed:

1. There is no sexual dimorphism in lower tooth length;
2. There are no differences in tooth length in skeletal class III patients with asymmetry depending on the side of the mandible (with/without excessive growth);
3. There are no differences in tooth length between patients with class I and patients with class III without asymmetry.

2. Materials and Methods

The study conducted was a retrospective study; cone beam computed tomography (CBCT) scans taken between 2017 and 2021 prior to orthodontic treatment were used as part of the orthodontic diagnostic process. All scans were taken with a single CT scanner (Carestream CS 8200 CS 3D, Carestream Health, Rochester, NY, USA) and were then analyzed using CS 3D Imaging Software. The study was conducted in the context of individual private medical practice of one of the co-authors (M.W.). Every patient had signed an informed consent form to include data created during the gathering of orthodontic records (such as CBCT scans) in scientific research.

The patients' personal data were anonymized, and a different researcher (M.S.) was responsible for the assignment of the measurement data to the corresponding research groups.

Ethical approval of the Bioethical Committee of the Wrocław Medical University was granted for our study (number KB-231/2021, accessed on 19 March 2021), providing that all the data were anonymized (as was the case in our study).

In all patients, a lateral skull radiograph, which assessed skeletal class based on the Wits [21] measurement, as well as SNA, SNB and ANB angles according to Segner–Hasund analysis [22], was also taken as part of the diagnostic process. Patients were also examined for the presence (or absence) of asymmetry in facial features, defined as a shift of the chin greater than 5 mm relative to the facial midline (after excluding temporomandibular joint disorders and functional shifts). Patients with an anterior defect related to isolated excessive mandibular growth, without a maxillary defect, i.e., SNA angle normal, SNB angle and the Wits measurement enlarged, were considered skeletal class III patients. In

our research, we identified any elements that may affect the correct measurement of tooth length, reflecting the established inclusion or exclusion criteria:

Patient inclusion criteria:

- No history of previous orthodontic treatment;
- Complete dentition in the lower arch from at least the 2nd molar to the 2nd molar (minimum 14 teeth);
- Patients with skeletal class I and skeletal class III (with or without asymmetry);
- Generally healthy patients, with no history of bone disease (past or present).

Patient exclusion criteria:

- Incomplete root development;
- Root resorption (due to trauma or inflammation);
- Genetic defects in tooth anatomy;
- Significant damage to the tooth crown, making it impossible to assess anatomy;
- History of previous orthodontic treatment;
- Class III problem in conjunction with other skeletal malformations, which may indicate a genetic syndrome;
- No sex, age or race limitations were applied.

The patients were then divided into three groups: skeletal class I patients, skeletal class III patients without asymmetry and skeletal class III patients with asymmetry. A calculation of the statistical power of the test was not performed due to the lack of data in the literature specifying what difference in tooth length constitutes a clinically meaningful difference in measurements. Instead, a convenience-based sample was used. Additionally, each group was divided into subgroups of men and women. The youngest patient was 17 years old, and the oldest was 35 years old. All patients were Caucasian. In patients with skeletal class I and skeletal class III without asymmetry, teeth were grouped into left/right sides. In skeletal class III patients with asymmetry, teeth were grouped into sides with/without excessive mandibular growth. The sizes of the groups are presented in Table 1.

Table 1. The sizes of the research groups.

Group Name	Mandibular Asymmetry	Sex	<i>n</i>	Age
Class I	-	men	19	23.8 ± 2
	-	women	18	22.9 ± 2
Class III	without asymmetry	men	17	24.1 ± 3
		women	14	23.7 ± 3
	with asymmetry	men	13	25.8 ± 3
		women	11	24.4 ± 3

The length of each tooth was measured separately in the sagittal section with 3D Slicer (version 4.11.20210226. <https://www.slicer.org/>, accessed on 6 January 2022) using the “Create line markup” function. In single-rooted teeth, the crown and apex were identified on a single sagittal section. In multi-rooted teeth, the most prominent cusp on the mesial part of the crown and the apex of the mesial root were identified on separate sagittal sections (Figure 1).

Statistical calculations were performed using the Origin Pro 9 software (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA). A normal distribution of the results obtained was developed using the Shapiro–Wilk test, which can also be used for analyses of small samples. Statistical analysis was performed using a one-way ANOVA for independent samples at a statistical significance level of $p = 0.05$. The results were presented as means with standard deviation. Tukey’s multiple comparison test was used to compare mean values between groups. There were no cases of missing or incomplete data in our sample.



Figure 1. Example measurements of the length: (a) of a single-rooted tooth using a single section; (b) of a multi-rooted tooth using more than one section.

3. Results

3.1. Verification of Null Hypothesis No. 1: Hypothesis Rejected

The results of the tooth length analysis are presented in Figure 2. Studies have shown that, in patients with class I skeletal configuration, mean tooth length is greater in men (23.75 ± 2.06 mm) than in women (22.18 ± 2.01 mm), as can be seen in Figure 2a. The largest difference in tooth length between women and men was found in the case of the first premolars (34, 44). In both women and men, the longest teeth turned out to be canines (33, 43). However, the smallest difference in tooth length between women and men was found for the central incisor (31, 41).

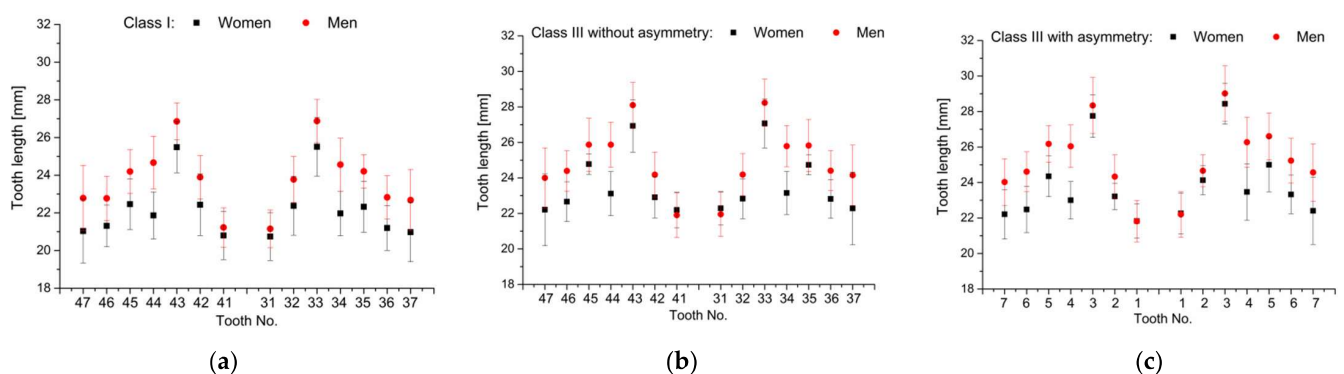


Figure 2. Representation of mean teeth length in groups: (a) Class I; (b) Class III without asymmetry; (c) Class III with asymmetry: teeth from the non-hyperplastic side of the mandible are found on the left side of the graph, and teeth from the hyperplastic side of the mandible are found on the right side of the graph.

In the case of class III without asymmetry, the mean tooth length was greater in men (24.92 ± 2.23 mm) than in women (23.75 ± 2.03 mm), as can be seen in Figure 2b. The largest difference in tooth length between women and men was found in the case of the first premolars (34, 44). The difference in the lengths of the second premolars (35, 45) between women and men was also shown to be smaller than in the case of class I. In both women and men, the longest teeth turned out to be canines (33, 43). However, the smallest difference in tooth length between women and men was found for the central incisor (31, 41).

In class III with asymmetry, it was shown that the average length of the teeth was higher on the hyperplastic side in both women and men, as can be seen in Figure 2c. In the case of women, the mean value of the tooth length on the non-hyperplastic side was 23.55 ± 2.18 mm, and on the hyperplastic side it was 24.14 ± 2.36 mm. The biggest difference between the non-hyperplastic side and the hyperplastic side in women was demonstrated for the lateral incisor (2) and first molar (6) teeth.

In the case of men, the mean value of tooth length on the non-hyperplastic side was 25.05 ± 2.26 mm, and on the hyperplastic side it was 25.51 ± 2.36 mm. The greatest difference between the non-hyperplastic side and the hyperplastic side in men was demonstrated for the canine (3) and first molar teeth (6). The smallest difference in tooth length between women and men was demonstrated on the non-hyperplastic side for the canine (3) and central incisor (1), and on the hyperplastic side, it was for the canine (3) and the incisors (1,2). These differences were not statistically significant, however, as is explained further. In all groups, the longest teeth turned out to be the lower canines (33,43).

The statistical analysis of the comparison between the sexes in the class I group showed statistically significantly longer teeth in men than in women, as can be seen in Table 2. On the right side, these differences were significant for teeth 47, 45 and 44, whereas on the left side they were significant for teeth 37, 36, 35 and 34. Statistically significant differences between the sexes were also found in the class III without asymmetry group. On the right side, these differences were statistically significant for teeth 47, 46 and 44, whereas on the left side they were significant for teeth 37 and 34. The only tooth whose length was greater in women was the lower central incisor (31,41). This was not statistically significant, however. In the class III with asymmetry group, we also demonstrated statistically significant sexual dimorphism in tooth length for some of the measurements analyzed. On the non-hyperplastic side, these differences were significant for teeth 7, 6, 5 and 4, whereas on the hyperplastic side they were significant for teeth 7, 6 and 4. The only teeth longer in women were the lower central incisors, both for the non-hyperplastic and hyperplastic side. This was not statistically significant, however.

Table 2. Results of statistical analysis for within-group comparisons between sexes (to reject or confirm null hypothesis no. 1). Class I (Women: $n = 18$; Men: $n = 19$). Class III without asymmetry (Women: $n = 14$; Men: $n = 17$). Class III with asymmetry (Women: $n = 11$; Men: $n = 13$).

Class I			Class III without Asymmetry		Class III with Asymmetry		
Tooth	<i>p</i> -Value	Mean Diff.	<i>p</i> -Value	Mean Diff.	Tooth	<i>p</i> -Value	Mean Diff.
47	* 0.006	1.748	* 0.022	1.792	7	* 0.019	1.817
46	0.055	1.464	* 0.032	1.732	6	* 0.002	2.127
45	* 0.007	1.740	0.608	1.092	5	* 0.018	1.828
44	* 8.06×10^{-8}	2.803	* 5.36×10^{-6}	2.760	4	* 4.56×10^{-7}	3.042
43	0.100	1.371	0.487	1.173	3	0.995	0.590
42	0.056	1.460	0.341	1.278	2	0.571	1.117
41	0.999	0.425	1.000	−0.291	1	1.000	−0.007
37	* 0.008	1.701	* 0.010	1.872	7 ^h	* 0.010	2.162
36	* 0.014	1.626	0.063	1.593	6 ^h	* 0.045	1.909
35	* 0.001	1.892	0.571	1.096	5 ^h	0.192	1.606
34	* 5.90×10^{-7}	2.594	* 1.06×10^{-5}	2.640	4 ^h	* 1.04×10^{-4}	2.804
33	0.091	1.370	0.475	1.159	3 ^h	0.999	0.583
32	0.072	1.406	0.219	1.359	2 ^h	1.000	0.531
31	1.000	0.408	1.000	−0.337	1 ^h	1.000	−0.058
Total:	* 1.78×10^{-8}	1.572	* 2.55×10^{-4}	1.351	Total:	* 3.96×10^{-8}	1.432

^h Marks the teeth on the hyperplastic (overgrown) side of the mandible. * Marks statistically significant values at $p < 0.05$ with Tukey's correction. A positive value of Mean diff. means that the tooth is longer in men. A negative value of Mean diff. means that the tooth is longer in women. The Total summarizes the mean differences in between-sex comparisons for all teeth in the given group.

3.2. Verification of Null Hypothesis No. 2: Hypothesis Confirmed

The statistical analysis of comparisons of class III patients with asymmetry for between-sides comparison did not show statistically significant differences at the level of $p < 0.05$, as can be seen in Table 3. In both women and men, teeth have been shown to be longer on the non-hyperplastic side. None of these differences were statistically significant, however.

Table 3. Results of statistical analysis for within-group comparisons for class III patients with asymmetry for between-sides comparisons (to reject or confirm null hypothesis no. 2). Women: $n = 11$; Men: $n = 13$.

Tooth	Class III with Asymmetry (Men)			Class III with Asymmetry (Women)		
	Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.	Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.
7	24.02 \pm 1.31	0.999	0.541	22.21 \pm 1.39	1.000	0.195
7 ^h	24.56 \pm 1.62			22.40 \pm 1.89		
6	24.61 \pm 1.13	0.994	0.628	22.48 \pm 1.30	0.947	0.846
6 ^h	25.23 \pm 1.25			23.33 \pm 1.09		
5	26.18 \pm 1.03	1.000	0.427	24.35 \pm 1.15	0.994	0.649
5 ^h	26.60 \pm 1.31			25.00 \pm 1.53		
4	26.04 \pm 1.20	1.000	0.228	23.00 \pm 1.05	1.000	0.467
4 ^h	26.27 \pm 1.40			23.47 \pm 1.59		
3	28.34 \pm 1.58	0.988	0.678	27.75 \pm 1.20	0.991	0.685
3 ^h	29.02 \pm 1.56			28.43 \pm 1.14		
2	24.33 \pm 1.23	1.000	0.329	23.21 \pm 0.74	0.907	0.915
2 ^h	24.55 \pm 0.90			24.13 \pm 0.81		
1	21.82 \pm 1.16	1.000	0.380	21.83 \pm 0.95	1.000	0.431
1 ^h	22.20 \pm 1.28			22.26 \pm 1.16		
Total: 7 \div 1	25.05 \pm 2.26	0.182	0.459	23.55 \pm 2.18	0.104	0.598
Total: 7 ^h \div 1 ^h	25.51 \pm 2.36			24.14 \pm 2.36		

^h Marks the teeth on the hyperplastic (overgrown) side of the mandible. A positive value of Mean diff. means that that the tooth is longer on the hyperplastic side. A negative value Mean diff. means that the tooth is longer on the non-hyperplastic side. The Total summarizes the mean differences in between-sides comparisons for all teeth in the given group.

3.3. Verification of Null Hypothesis No. 3: Hypothesis Rejected

The statistical analysis of comparisons between-groups for class I and class III patients without asymmetry has revealed that all of the teeth that were analyzed were longer in the class III without asymmetry group; however, only some of the differences were statistically significant, as can be seen in Table 4.

Table 4. Results of statistical analysis for between-group comparisons for class I and class III without asymmetry groups (to reject or confirm null hypothesis no. 3). Class I (Women: $n = 18$; Men: $n = 19$). Class III without asymmetry (Women: $n = 17$; Men: $n = 14$).

Tooth	Class	Men			Women		
		Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.	Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.
47	I	22.78 \pm 1.73	0.073	1.219	21.03 \pm 1.69	0.164	1.175
	III	24.00 \pm 1.70			22.21 \pm 2.03		
46	I	22.77 \pm 1.18	* 0.33 $\times 10^{-4}$	1.622	21.31 \pm 1.11	* 0.008	1.354
	III	24.39 \pm 1.13			22.66 \pm 1.12		
45	I	24.20 \pm 1.17	* 7.00 $\times 10^{-4}$	1.674	22.46 \pm 1.34	* 3.21 $\times 10^{-6}$	2.323
	III	25.87 \pm 1.49			25.78 \pm 0.58		
44	I	24.67 \pm 1.40	* 0.0214	1.206	21.86 \pm 1.24	* 0.018	1.249
	III	25.87 \pm 1.27			23.11 \pm 1.24		

Table 4. Cont.

Tooth	Class	Men			Women		
		Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.	Mean \pm SD [mm]	<i>p</i> -Value	Mean Diff.
43	I	26.86 \pm 0.98	* 0.013	1.246	25.49 \pm 1.35	* 0.016	1.444
	III	28.10 \pm 1.27			26.93 \pm 1.48		
42	I	23.89 \pm 1.16	0.755	0.290	22.43 \pm 1.63	0.586	0.472
	III	24.18 \pm 1.26			22.90 \pm 1.15		
41	I	21.23 \pm 1.04	0.196	0.676	20.80 \pm 1.28	* 0.004	1.393
	III	21.90 \pm 1.26			22.19 \pm 1.00		
37	I	22.68 \pm 1.63	* 0.027	1.474	20.98 \pm 1.57	0.130	1.303
	III	24.15 \pm 1.70			22.28 \pm 2.04		
36	I	22.82 \pm 1.15	* 5.69×10^{-4}	1.583	21.20 \pm 1.19	* 0.001	1.617
	III	24.41 \pm 1.13			22.81 \pm 1.09		
35	I	24.21 \pm 0.89	* 7.79×10^{-4}	1.618	22.32 \pm 1.35	* 8.99×10^{-6}	2.414
	III	25.83 \pm 1.47			24.73 \pm 9.56		
34	I	24.56 \pm 1.40	* 0.021	1.231	21.97 \pm 1.18	* 0.044	1.185
	III	25.79 \pm 1.16			23.15 \pm 1.21		
33	I	26.88 \pm 1.15	* 0.010	1.366	25.51 \pm 1.55	* 0.011	1.567
	III	28.23 \pm 1.33			27.07 \pm 1.38		
32	I	23.77 \pm 1.22	0.528	0.411	22.37 \pm 1.56	0.587	0.459
	III	24.19 \pm 1.19			22.83 \pm 1.12		
31	I	21.15 \pm 1.00	0.112	0.799	20.74 \pm 1.27	* 0.002	1.543
	III	21.95 \pm 1.25			22.29 \pm 0.94		
Total: 47 \div 31	I	23.75 \pm 2.06	* 2.54×10^{-9}	1.172	22.18 \pm 2.01	* 0	1.393
	III	24.92 \pm 2.23			23.57 \pm 2.03		

* Marks statistically significant values at $p < 0.05$ with Tukey's correction. A positive value of Mean diff. means that the tooth is longer in class I group. A negative value of Mean diff. means that the tooth is longer in class III without asymmetry group. The Total summarizes the mean differences in between-sides comparisons for all teeth in the given group.

4. Discussion

In the current scientific studies describing the biomechanics of tooth movement using computer analyses, such as the finite element method, there is a significant discrepancy in the assumptions related to the anatomy of the teeth, the alveolar process and surrounding structures.

Calculations are performed either based on computer-generated models representing ideal dental anatomy based on Andrews' keys [2,18], obtained from scans of a dental demonstration model [3], created de novo based on arbitrary assumptions made by the researchers [7] or on averaged models [8]. However, models most commonly found in the literature are those created based on data collected from one, or a few, patients [5,9–16].

This approach has its obvious advantages; it makes it possible to compare different methods of moving teeth relative to each other using the same geometric model. In this way, it is possible to avoid complicating calculations that account for different variations in tooth anatomy. An example of such a study may be a comparison of different shapes of aligner attachments [2].

At the same time, it should be emphasized that the individual variability of a patients' anatomy, particularly the different lengths of the tooth roots, has a significant impact on the different biomechanics of tooth movements [4–6,19,20].

As a result, great caution should be exercised in extrapolating the results of currently existing studies that use the finite element method to the general population, and the calculations themselves still need to be validated by actual obtained results [20].

Some authors have noted this problem, proposing as an example the solution of individualizing calculations using segmentations of the patients' teeth isolated from the CBCT scan with subsequent modelling of their geometry [4] and then combining them with an aligner model in order to better adjust orthodontic therapy to the patients' individual anatomies [5].

This approach, although undoubtedly better at addressing individual patients' anatomies and associated biomechanical challenges, may be difficult to implement in routine orthodontic practice due to the time-consuming process of isolating patients' structures from CBCT data.

The authors of the present paper propose an alternative solution: the creation of a publicly available database of patients' dental anatomies, individualized by distinguishing patients on the basis of sex, age, race and skeletal relationships.

Having access to such a tool, a clinician, when designing an orthodontic appliance and predicting tooth movement, can select from the available list the values closest to those characterizing his/her patient, thus obtaining an anatomical model as close as possible to the individual anatomy of the examined case.

This solution can also make it easier for companies that manufacture removable appliances (aligners) to individualize treatment based on the needs of a particular patient.

This approach seems to be a reasonable compromise between the need to account for the individual anatomy of the patient and the difficulty of using different, more advanced and complicated solutions in practice (as no additional measurements or calculations are needed here).

The presented study answers questions about asymmetry in tooth length in skeletal class III patients with mandibular asymmetry, differences in tooth length between patients with skeletal class I and III, and sexual dimorphism in tooth length. The authors showed that tooth length depends on the sex of the patient. This is important, because most of the studies using the finite element method that were analyzed in this paper do not differentiate methodologies based on the sex of the virtual patient [1–3,5,7–10,13–17]. Therefore, they report results that are averaged or specific to only one sex. Similarly, out of the reviewed papers, none but one [16] accounts for the skeletal class of the analyzed "virtual" patient; thus, they do not take into consideration whether skeletal class affects the biomechanics of tooth movement.

The authors showed that skeletal class III is directly associated with excessive mandibular growth (mandibular prognathism) and can affect the size of tooth roots and therefore the biomechanics of their movement as well. Interestingly, the study showed that mandibular asymmetry does not have a statistically significant effect on asymmetry in tooth length on opposite sides of the mandible. This opens up opportunities for further research that can explain the genesis of such a phenomenon.

The presented results clearly indicate that further research is needed to analyze factors influencing tooth root size and the relationship between those factors and the factors affecting mandibular size.

Finally, it should be noted that the measurement method presented in this paper may also be applicable to studies on variations in root anatomy in patients with genetic disorders, such as MSX1 gene mutations [23]. It has been proven that such disorders can affect the length of tooth roots [24].

The authors intentionally did not include patients with skeletal class II in the study. It has been shown in the literature that there is a greater number of genetic factors influencing the development of skeletal class III than skeletal class II [25]. Moreover, there is ample evidence that genetic factors influence the length and anatomy of tooth roots [24]. Therefore, patients with skeletal class III naturally represent the main area of interest in determining the correlation between tooth anatomy and skeletal class. However, according to the authors, further studies should be considered, including ones involving skeletal class II patients.

This study assessed only the length of the roots, without considering their volume. This is due to the pilot nature of the paper. Consideration should be given to conducting similar studies in the future using solutions, available in the literature, which enable assessing root anatomy in a more individualized manner [20].

Limitations of the Study

No class II patients were included in the study. It only included Caucasians of a certain age, even though no age or race limitations were applied. In addition, the study did not account for the possibility of individual anomalies of root structure, such as dilacerations or other shape abnormalities, due to the preliminary nature of the study. Individual bone anatomy was not accounted for, which may also be important for biomechanical calculations, especially in patients with periodontal atrophy [6]. Further research is warranted in order to eliminate some of the limitations.

5. Conclusions

- In all three study groups, some of men's lower teeth were longer than women's, so null hypothesis 1 was rejected.
- Mandibular asymmetry and the resulting differences in the anatomy (length) of the alveolar part of the mandible on the right and left side did not affect the differences in the length of the teeth on the hyperplastic and non-hyperplastic side, so null hypothesis 2 was confirmed.
- In skeletal class III patients without asymmetry, some lower teeth were longer than they were in skeletal class I patients, so null hypothesis 3 was rejected.
- When creating computational models that allow for the designing of orthodontic aligners and analyzing the forces acting on teeth, software developers should account for the sex and the skeletal class of the patient. This is why current models, which do not differentiate between patients in these respects, have significant limitations and cannot be extrapolated to the whole population.
- Clinicians should account for sex as well as the skeletal class of patients when predicting the difficulty and effectiveness of an orthodontic treatment to be implemented.
- It may be advisable to create a database describing the dental anatomy of patients with different anatomical characteristics, which can be used by clinicians when examining their patients. This can enable simple individualization of orthodontic treatment without the need to take any additional, time-consuming steps.

Author Contributions: Conceptualization, B.K. and M.S.; methodology, M.W., B.K. and M.S.; software, M.W., M.Ž. and K.S.-P.; validation, M.Ž. and K.S.-P.; formal analysis, M.Ž. and K.S.-P.; investigation, M.W.; resources, M.W.; data curation, M.W.; writing—original draft preparation, M.W.; writing—review and editing, M.S., M.Ž. and K.S.-P.; visualization, M.W.; supervision, M.S. and B.K.; project administration, M.S. and B.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Ethics Committee of Wrocław Medical University (protocol number KB-231/2021, dated 19 March 2021).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: All data generated and analyzed during this study are available from the corresponding author on reasonable request.


Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Liu, L.; Zhan, Q.; Zhou, J.; Kuang, Q.; Yan, X.; Zhang, X.; Shan, Y.; Li, X.; Lai, W.; Long, H. Effectiveness of an anterior mini-screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear aligners: A finite element study. *Angle Orthod.* **2021**, *91*, 794–803. [\[CrossRef\]](#)
2. Ayidağa, C.; Kamiloğlu, B. Effects of Variable Composite Attachment Shapes in Controlling Upper Molar Distalization with Aligners: A Nonlinear Finite Element Study. *J. Healthc. Eng.* **2021**, *2021*, 5557483. [\[CrossRef\]](#)
3. Yokoi, Y.; Arai, A.; Kawamura, J.; Uozumi, T.; Usui, Y.; Okafuji, N. Effects of attachment of plastic aligner in closing of diastema of maxillary dentition by finite element method. *J. Healthc. Eng.* **2019**, *2019*, 1075097. [\[CrossRef\]](#)
4. Barone, S.; Paoli, A.; Razionale, A.; Savignano, R. Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.* **2017**, *33*, 2839. [\[CrossRef\]](#)
5. Rossini, G.; Schiaffino, M.; Parrini, S.; Sedran, A.; Deregibus, A.; Castroflorio, T. Upper Second Molar Distalization with Clear Aligners: A Finite Element Study. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 7739. [\[CrossRef\]](#)
6. Ma, Y.; Li, S. The optimal orthodontic displacement of clear aligner for mild, moderate and severe periodontal conditions: An in vitro study in a periodontally compromised individual using the finite element model. *BMC Oral Health* **2021**, *21*, 109. [\[CrossRef\]](#)
7. Cortona, A.; Rossini, G.; Parrini, S.; Deregibus, A.; Castroflorio, T. Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study. *Angle Orthod.* **2020**, *90*, 247–254. [\[CrossRef\]](#)
8. Liang, W.; Rong, Q.; Lin, J.; Xu, B. Torque control of the maxillary incisors in lingual and labial orthodontics: A 3-dimensional finite element analysis. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthoped.* **2009**, *135*, 316–322. [\[CrossRef\]](#)
9. Comba, B.; Parrini, S.; Rossini, G.; Castroflorio, T.; Deregibus, A. A three-dimensional finite element analysis of upper-canine distalization with clear aligners, composite attachments, and class II elastics. *J. Clin. Orthod.* **2017**, *51*, 24–28.
10. Gomez, J.P.; Peña, F.M.; Martínez, V.; Giraldo, D.C.; Cardona, C.I. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments—A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod.* **2014**, *85*, 454–460. [\[CrossRef\]](#)
11. Jiang, T.; Wu, R.Y.; Wang, J.K.; Wang, H.H.; Tang, G.H. Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: A 3D finite element study. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 10156. [\[CrossRef\]](#)
12. Baek, S.-H.; Cha, H.-S.; Cha, J.-Y.; Moon, Y.-S.; Sung, S.-J. Three-dimensional finite element analysis of the deformation of the human mandible: A preliminary study from the perspective of orthodontic mini-implant stability. *Korean, J. Orthod.* **2012**, *42*, 159–168. [\[CrossRef\]](#)
13. Cattaneo, P.; Dalstra, M.; Melsen, B. The finite element method: A tool to study orthodontic tooth movement. *J. Dent. Res.* **2005**, *84*, 428–433. [\[CrossRef\]](#)
14. Hong, K.; Kim, W.-H.; Eghan-Acquah, E.; Lee, J.-H.; Lee, B.-K.; Kim, B. Efficient Design of a Clear Aligner Attachment to Induce Bodily Tooth Movement in Orthodontic Treatment Using Finite Element Analysis. *Materials* **2021**, *14*, 4926. [\[CrossRef\]](#)
15. Kim, W.-H.; Hong, K.; Lim, D.; Lee, J.-H.; Jung, Y.J.; Kim, B. Optimal Position of Attachment for Removable Thermoplastic Aligner on the Lower Canine Using Finite Element Analysis. *Materials* **2020**, *13*, 3369. [\[CrossRef\]](#)
16. Seo, J.-H.; Eghan-Acquah, E.; Kim, M.-S.; Lee, J.-H.; Jeong, Y.-H.; Jung, T.-G.; Hong, M.; Kim, W.-H.; Kim, B.; Lee, S.-J. Comparative Analysis of Stress in the Periodontal Ligament and Center of Rotation in the Tooth after Orthodontic Treatment Depending on Clear Aligner Thickness—Finite Element Analysis Study. *Materials* **2021**, *14*, 324. [\[CrossRef\]](#)
17. D’Antò, V.; Bucci, R.; De Simone, V.; Ghislanzoni, L.H.; Michelotti, A.; Rongo, R. Evaluation of Tooth Movement Accuracy with Aligners: A Prospective Study. *Materials* **2022**, *15*, 2646. [\[CrossRef\]](#)
18. Andrews, L.F. The six keys to normal occlusion. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthoped.* **1972**, *6*, 296–309. [\[CrossRef\]](#)
19. Burstone, C.J.; Pryputniewicz, R.J. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthoped.* **1980**, *77*, 396–409. [\[CrossRef\]](#)
20. Barone, S.; Paoli, A.; Razionale, A.V. CT segmentation of dental shapes by anatomy-driven reformation imaging and B-spline modelling. *Int. J. Numer. Method. Biomed. Eng.* **2015**, *32*, e02747. [\[CrossRef\]](#)
21. Jacobson, A. The “Wits” appraisal of jaw disharmony. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthoped.* **1975**, *67*, 125–138. [\[CrossRef\]](#)
22. Segner, D.; Hasund, A. *Individualisierte Kephallometrie*, 2nd ed.; Sietmar Segner Verlag: Hamburg, Germany, 1994; ISBN 3980270920.
23. Paradowska-Stolarz, A. MSX1 gene in the etiology of orofacial deformities. *Postepy Hig. Med. Dosw.* **2015**, *69*, 1499–1504.
24. De Coster, P.J.; Marks, L.A.; Martens, L.C.; Huysseune, A. Dental agenesis: Genetic and clinical perspectives. *J. Oral. Pathol. Med.* **2009**, *38*, 1–17. [\[CrossRef\]](#)
25. Gershtater, E.; Li, C.; Ha, P.; Chung, C.H.; Tanna, N.; Zou, M.; Zheng, Z. Genes and Pathways Associated with Skeletal Sagittal Malocclusions: A Systematic Review. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 13037. [\[CrossRef\]](#)

Article

Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice

Maciej Warnecki ¹, Michał Sarul ^{2,*}, Marcin Kozakiewicz ³, Anna Zięty ⁴, Bartosz Babiarczuk ⁴, Beata Kawala ⁵ and Kamil Jurczyszyn ⁶

¹ Independent Researcher, Niemodlińska 63, 45-864 Opole, Poland

² Department of Integrated Dentistry, Wrocław Medical University, 50-425 Wrocław, Poland

³ Department of Maxillofacial Surgery, Medical University of Lodz, 113 Żeromskiego Str., 90-549 Lodz, Poland

⁴ Department of Mechanics, Materials and Biomedical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław, Poland

⁵ Department of Dentofacial Orthopedics and Orthodontics, Wrocław Medical University, Krakowska 26, 50-425 Wrocław, Poland

⁶ Department of Oral Surgery, Wrocław Medical University, Krakowska 26, 50-425 Wrocław, Poland

* Correspondence: michal.sarul@umw.edu.pl; Tel.: +48-71-7840299

Abstract: Orthodontic removable appliances made of transparent thermoplastic materials—aligners—are becoming increasingly popular in contemporary orthodontic practice. It is important for the clinician to fully understand the mechanical properties and behavior of the appliance used. Because of that, the aim of our study was to investigate the changes in aligner surface after immersion in Coca-Cola and orange juice. For surface evaluation, fractal analysis, texture analysis, and wetting angle measurement were performed. Statistically significant changes were found between some of the groups in the fractal dimension analysis. In texture analysis, all but one intergroup comparison showed statistically significant differences. For wetting angle assessment, statistically significant differences were found. These were, however, more numerous when assessing glycol droplets, rather than water droplets. Fractal dimension analysis confirmed a correlation between the intensity of changes in the aligner surface with immersion time in the liquids assessed. Texture analysis showed a high sensitivity to the changes in aligner surface. It failed, however, to reveal changes relative to immersion time. Wetting angle analysis revealed aligner surface degradation for Coca-Cola. It did not, however, prove the dependence of the intensity of this degradation as a function of time. Both Coca-Cola and orange juice can cause aligner surface degradation.

Keywords: orthodontic aligners; orthodontic aligner surface; fractal dimension analysis; texture analysis; wetting angle; Coca-Cola; orange juice



Citation: Warnecki, M.; Sarul, M.; Kozakiewicz, M.; Zięty, A.; Babiarczuk, B.; Kawala, B.; Jurczyszyn, K. Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. *Materials* **2022**, *15*, 6341. <https://doi.org/10.3390/ma15186341>

Academic Editor: Rosalia Maria Leonardi

Received: 15 August 2022

Accepted: 12 September 2022

Published: 13 September 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Edgewise fixed orthodontic appliances have been in use for over 100 years. The contemporary standards with regard to aesthetic looks, also in terms of the appearance of teeth and smile, have resulted in the use of orthodontic therapy also in adult patients. The same standards make patients want their therapeutic appliances to be as little visible as possible. Traditional orthodontic brackets are often not considered sufficiently aesthetically pleasing and, as they promote the accumulation of dental plaque, they increase the risk of caries, gingivitis, and periodontitis [1]. Even though the use of elastic positioning appliances was described as early as 1945 [2], it is only for the above-mentioned reasons that invisible orthodontic aligners (IOAs) are increasingly gaining popularity. They are an innovative alternative for fixed orthodontic appliances due to their ability to be easily applied/removed from the mouth without affecting the ability to masticate or the aesthetic look of the patient's smile [3].

The market has seen the emergence of a considerable number of companies dealing with aligners that employ a similar strategy in treating patients. Thermoplastic materials used by aligner manufacturers currently include polyethylene terephthalate glycol-modified (PET-G), polypropylene, polycarbonate (PC), thermoplastic polyurethanes (TPUs), ethylene-vinyl acetate, and many others. Materials should be biocompatible, transparent, have a low level of toughness and high elasticity, and be able to effectively fix the alignment of teeth [4]. For this reason, many authors have undertaken the analysis of the mechanical and chemical properties of aligners [5–9].

It is recommended that a single aligner be used for a period of 14 days. During that period, the brace is exposed to the environment of the patient's oral cavity, with highly variable temperature and pH conditions. Therefore, it is important to determine the influence of the ageing of these elements under the influence of the oral environment with regard to their mechanical properties [9]. The most frequently analyzed data include the elasticity coefficient and the surface topography of these elements [5,6,8–10]. The physical and chemical properties of the oral environment can affect the level of changes occurring in the structure of the brace material. Beverages such as Coca-Cola or fruit juices are one of the main factors affecting them [11,12].

Various methods of microscopic imaging (SEM, AFM), laser spectroscopy, and X-ray diffraction analysis are the techniques most often used to analyze the surface of orthodontic components. However, the use of such methods may require application of complicated and expensive equipment and does not always allow conclusions to be drawn about functional properties [13,14]. A relatively simple method based on image analysis is the analysis of the values of the fractal dimension and texture analysis. They are increasingly often applied for analyzing the surface of elements used in orthodontic therapy [15,16]. For assessing the level of surface degradation, wetting angle analysis can also be used. This method assesses the shape of droplets forming on the analyzed surface—the higher the wetting angle (higher hydrophobicity), the lower the wettability of the element, and thus the cleaner the surface, and the other way around—the smaller the angle, the higher the wettability. High surface energy of the material and low surface tension of the solution decrease the value of the wetting angle. The level and time in which dental/orthodontic biomaterials absorb moisture from the oral environment have a considerable impact on the durability of these elements and determine the level of their degradation [17].

The present study aimed to determine the changes in the surface properties of aligners under the influence of the immersion in Coca-Cola and fruit juice with the use of fractal dimension analysis, texture analysis, and wetting angle analysis.

A null hypothesis was proposed that immersion in orange juice and Coca-Cola does not cause changes to the surface properties of aligners, as measured with fractal dimension analysis (FD), texture analysis (TA), and wetting angle analysis (WA).

2. Materials and Methods

Aligners made of three-layer polyurethane (Zendura™ FLX) were selected for the test. The material was 0.76 mm thick, consisting of two hard outer shells and an elastic inner core. All aligners were made using one selected model, only for the purpose of this experiment, increasing its range within the palate. A 25 × 25 mm aligner element was selected for the study, located on its palatal surface.

To assess the effect of immersing aligners in different beverages, a total of 75 aligner samples were selected. Each of them was initially molded on the same model.

Then, the aligners were divided into 5 groups:

1. The control group—not immersed—15 aligners;
2. A group immersed in Coca-Cola (pH = 2.5) for one week (C1W)—15 aligners;
3. A group immersed in Coca-Cola (pH = 2.5) for two weeks (C2W)—15 aligners;
4. A group immersed in orange juice (pH = 3.5) for one week (J1W)—15 aligners;
5. A group immersed in orange juice (pH = 3.5) for two weeks (J2W)—15 aligners.

The total size of the studied group of aligners was 75 specimens.

The Coca-Cola beverage used was the Coca-Cola Original Taste™ beverage, which is a trademark of The Coca-Cola Company. The orange juice beverage used was the “Tymbark™ sok 100% pomarańcza”, which is a trademark of Tymbark-MWS Sp. z o.o., a popular brand of juice in Poland.

The immersion involved immersing aligners in a beverage 3 times a day for 1 h, at room temperature (22 °C), as follows:

- In freshly squeezed orange juice for groups J1W and J2W—for 1 or 2 weeks, respectively.
- In Coca-Cola for groups C1W and C2W—for 1 or 2 weeks, respectively.

After completion of the immersion, each piece was rinsed for 15 min with demineralized water, and in a dry state, they were submitted for testing within 24 h.

2.1. Taking Images

All images for analysis were taken using the scanning electron microscope (SEM)—VEGA3 (Tescan, Brno—Kohoutovice, Czech Republic). The resolution of images was 1280×1430 , with a magnification of $1000\times$, a voltage of 15 kV, and a backscattered electron (BSE) detector. In every group of aligners, 15 regions of interest (ROIs) for fractal dimension and texture analyses were set. All ROIs were $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ in size. ROIs were saved as 8-bit grayscale bitmaps. To apply all necessary graphical operations, GIMP version 2.10.30 (GNU Image Manipulation program: www.gimp.org, free and open-source license, accessed on 1 April 2022) was used.

2.2. Fractal Dimension Analysis

All fractal analyses were performed in ImageJ, version 1.53e (Image Processing and Analysis in Java—Wayne Rasband and contributors, National Institutes of Health, USA, public domain license, <https://imagej.nih.gov/ij/> (accessed on 1 April 2022)), and the FracLac plugin, version 2.5 (Charles Sturt University, Bathurst, Australia, public domain license).

A modified algorithm of the box-counting method, which makes it possible to analyze monochromatic images (such as 8- or 16-bit images) was used in the presented analysis. For the grayscale images, the intensity difference algorithm was used to calculate the fractal dimension, as it was applied in other studies examining the surface of orthodontic components with the FDA method [16]. The analyzed image was divided into boxes, as in the box-counting method. The image size selected for analysis was $25 \times 25 \mu\text{m}$. Performing every FDA, repetitive actions were performed: in the first step, the grid size equals 200 mm (dimension of the analyzed image, $\varepsilon = 1$); then, ε is divided by 2 (ε value for the following steps: $\varepsilon = 0.5$; $\varepsilon = 0.25$). In each step, the difference in pixel brightness intensity is calculated in every grid on scale ε . In the FracLac plugin, the algorithm of the ε calculation is called a block series. This option scans a square block within an image using a series of grids calculated from the block size. According to the authors, this specific algorithm is the best solution when analyzing the pattern that fills the entire area of the image.

The difference between the maximum pixel intensity and the minimum pixel intensity is calculated in each box ($\delta I_{i,j,\varepsilon}$, where i, j —the location of the analyzed box in the ε scale) [14,18]:

$$\delta I_{i,j,\varepsilon} = \text{maximum pixel intensity}_{i,j,\varepsilon} - \text{minimum pixel intensity}_{i,j,\varepsilon} \quad (1)$$

In the next step, 1 is added to the intensity difference to prevent its value from becoming a 0 [14,18]:

$$I_{i,j,\varepsilon} = \delta I_{i,j,\varepsilon} + 1 \quad (2)$$

Finally, the fractal dimension of the intensity difference is described using the following formula [14,18]:

$$\text{FD} = \left(\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(I\varepsilon)}{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \right) \quad (3)$$

where FD is the final fractal dimension of intensity, $I_\epsilon = \Sigma [1\delta I_{i,j,\epsilon} + 1]$, and ϵ is the box scale.

2.3. Texture Analysis

SEM images of orthodontic aligner surfaces were evaluated in ROIs of $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$. The surface texture was evaluated using features derived from the co-occurrence matrix. The regions of interest (ROIs) were normalized ($\mu \pm 3\sigma$) to share the same average (μ) and standard deviation (σ) of optical density within the ROIs. Selected image texture features (entropy and difference entropy from the co-occurrence matrix and long-run emphasis moment from the run-length matrix) in ROIs were calculated for the reference bone and the bone with the collagen scaffold applied [19]:

$$\text{Entropy} = - \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} p(i,j) \log(p(i,j)) \quad (4)$$

where Σ is the sum, Ng is the number of optical density levels in the radiograph, i and j are the optical density of pixels that are 5 pixels away from one another, p is probability, and \log is the common logarithm.

Calculations were performed in the MaZda 4.6 program [15,16,18–24]. Entropy values were compared between groups with the Kruskal–Wallis test. When $p < 0.05$, the difference was considered statistically significant. Statgraphics Centurion 18 ver.18.1.12 (StarPoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA) was used for statistical analyses.

2.4. Wetting Angle Assessment

Two wetting agents were used to test the wetting angle. H_2O was selected as the substance with polar properties. Ethylene glycol was chosen as a substance that does not have the properties of dissolving the aligner material and, at the same time, has nonpolar properties.

In the presented test, droplets of approximately $3 \mu\text{L}$ of water or glycol were placed on the surface of the sample using a microsyringe, keeping the needle at the same minimum height above the surface to be analyzed, and maintaining the truncation direction of its tip. The droplet was photographed with a CCD camera (Hamamatsu ORCA-285G CCD Digital Camera C4742-95-12G04, Boston Industries) 5 s after it was placed on the sample surface. A minimum of six droplets were placed on each sample, each time on a ‘fresh’ surface—Figure 1.

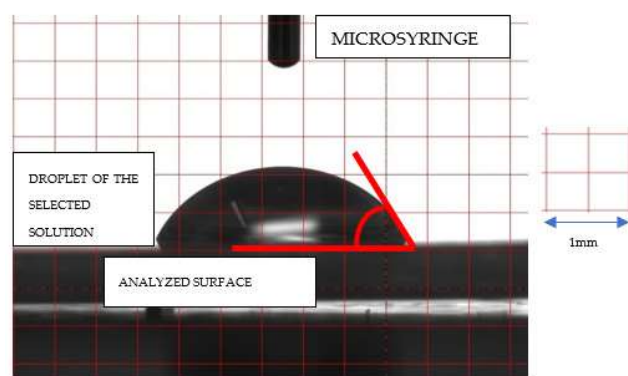


Figure 1. Illustrative image of a droplet on the surface of a sample, taken with a CCD camera.

2.5. Statistical Analysis

Statistica, version 13.3 (StatSoft, Cracow, Poland), was used to perform statistical tests in the aspect of fractal dimension analysis, wetting angle, and surface tension. A value of 0.05 was deemed to be statistically significant. The Shapiro–Wilk test was applied to confirm the normality of distribution. Due to the lack of a normal distribution, the nonparametric Kruskal–Wallis test was applied to reveal differences between groups. The Spearman coefficient was used to check for correlations between variables. Texture comparisons

between wire sides and the material were performed with the one-way ANOVA or the Kruskal–Wallis test, depending on the presence of a normal distribution. When $p < 0.05$, the difference was considered statistically significant. The assumed power of the test was greater than 0.8. Statgraphics Centurion 18, version 18.1.12 (StarPoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA), was used for statistical analyses.

3. Results

3.1. Fractal Dimension Analysis

Table 1 shows the results of statistical differences in fractal dimension (FD) values between the different series of samples. Statistically significant differences of the control group with the J2W and C2W groups, and of the J1W group with the J2W and C2W groups were found. As the only group, the C1W group showed no differences compared to any other group.

Table 1. Summary statistic of fractal dimension value, and results of Kruskal–Wallis multiple comparison test. (Control—control group, J1W—juice one week, J2W—juice two weeks, C1W—Coca-Cola one week, C2W—Coca-Cola two weeks, n.s.—no statistically significant difference).

Group Number	Name	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	1.8032	1.8364	0.1176	1.5118	1.9436	vs. 3, vs. 5
2	J1W	15	1.8400	1.8957	0.1374	1.4986	1.9803	vs. 3, vs. 5
3	J2W	15	1.5944	1.6528	0.1605	1.3031	1.7667	vs. 1, vs. 2
4	C1W	15	1.7615	1.7695	0.1156	1.5016	1.8970	n.s.
5	C2W	15	1.5424	1.5225	0.2560	1.1085	1.8737	vs. 1, vs. 2

The results of the correlation of FD and TA with wetting angle, surface tension for water and glycol, and total tension are presented in Table 2. There was no correlation between FD and wetting angle with water and glycol or total tension.

Table 2. Value of R (Spearman) coefficient between examined variables, FDA—fractal dimension analysis, and TA—texture analysis.

			R Spearman	p Value
FDA	vs.	Water wetting angle	0.5000	0.3910
FDA	vs.	Glycol wetting angle	0.5000	0.3910
FDA	vs.	Water surface tension	−0.3000	0.6238
FDA	vs.	Glycol surface tension	−0.1000	0.8729
FDA	vs.	Total tension	−0.6668	0.2189
TA	vs.	Water wetting angle	0.4000	0.5046
TA	vs.	Glycol wetting angle	0.4000	0.5046
TA	vs.	Water surface tension	−0.1000	0.8729
TA	vs.	Glycol surface tension	0.0000	1.0000
TA	vs.	Total tension	−0.8721	0.0539
TA	vs.	FDA	0.6000	0.2848

3.2. Texture Analysis

The average entropy of the aligner surface texture (control) is high and indicates the homogeneity of the material structure and the chaotic arrangement of small elements in the SEM image of the surface. Incubation with the two test substances increases the surface complexity in a time-dependent manner and directly proportional to the time elapsed.

After 1 week, visible texture-organized fields appear. These are globular and rod-shaped structures on part of the homogeneous native surface, and after 2 weeks, they cover most of the surface. These image elements are fragmented, which raise the calculated entropy in the samples—Figure 2.

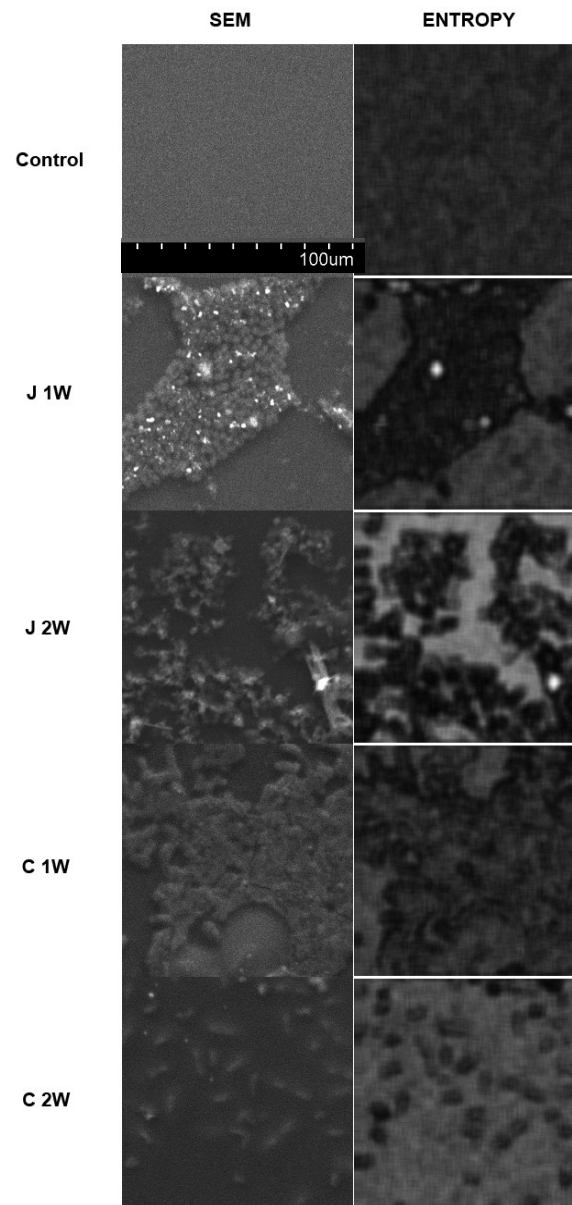


Figure 2. Investigation of surface structures on orthodontic alignments using digital texture analysis. The left column shows images from scanning emission microscopy (SEM). The right column shows intensity maps of chaotic and nonorganized structures (Entropy)—the brighter the local areas, the higher the entropy of the site. In these maps, textures with organized structure have low entropy (dark fields) because their structure is not chaotic.

The highest entropy measured was in the control group (3.21 ± 0.03). The next highest was in the C1W group (3.07 ± 0.06 , but statistically significantly lower than the control). It was lower in group J1W (2.91 ± 0.06 statistically lower than in control and C1W), and the lowest texture entropy values were in both groups after two weeks of incubation, i.e., C2W and J2W (2.65 ± 0.24 and 2.65 ± 0.23 , respectively, significantly lower than the other three groups, $p < 0.001$) (Tables 3 and 4).

Table 3. Summary statistics for entropy.

Name	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum
Control	15	3.21389	3.20668	0.0333161	3.17229	3.26219
J1W	15	2.91045	2.92633	0.0586776	2.7919	2.97064
J2W	15	2.55829	2.58065	0.233394	2.17102	2.9178
C1W	15	3.06823	3.07739	0.0563168	2.96178	3.15617
C2W	15	2.63535	2.6641	0.237663	2.28786	3.03994

Table 4. Statistically significant differences in entropy between groups (* denotes a statistically significant difference).

Contrast	Sig.	Difference	+/- Limits
Control-J1W	*	0.303439	0.112201
Control-J2W	*	0.655598	0.112201
Control-C1W	*	0.145663	0.112201
Control-C2W	*	0.57854	0.112201
J1W-J2W	*	0.352159	0.112201
J1W-C1W	*	-0.157776	0.112201
J1W-C2W	*	0.275101	0.112201
J2W-C1W	*	-0.509935	0.112201
J2W-C2W		-0.0770581	0.112201
C1W-C2W	*	0.432877	0.112201

It should also be noted that there are differences between the two experimental groups. Both after 1 week of incubation ($p < 0.001$) and after 2 weeks ($p < 0.001$), values in group C are higher than in group J—Figure 3.

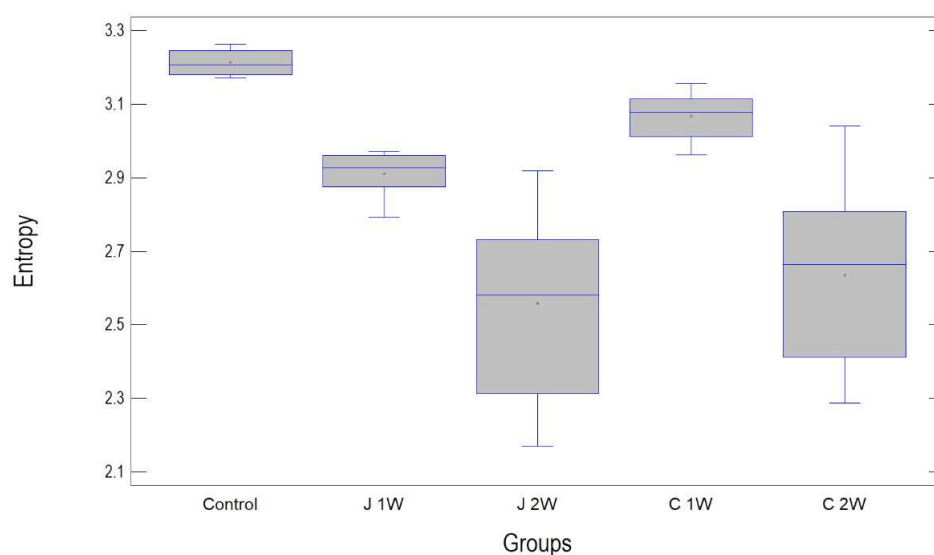


Figure 3. Entropy measured in presented texture on the surface of orthodontic aligners. Contact with incubation fluid decreases entropy in a time-dependent manner. Abbreviations: J1W—orange juice incubation 1 week, J2W—orange juice incubation 2 weeks, C1W—Coca-Cola incubation 1 week, C2W—Coca-Cola incubation 2 weeks.

3.3. Wetting Angle

The study aimed to determine the values of the wetting angle and surface tension of samples of the material used to make Clear Aligner braces. The results obtained are shown in the tables below. They were grouped into successive wetting angle results using water and ethyl glycol. Statistically significant differences were found only between the control group and the C1W group for water, as well as between the control group and the J2W and C1W groups and between the J1W and C1W groups for glycol—Table 5.

Table 5. Summary statistics of water and glycol wetting angle, and results of Kruskal–Wallis multiple comparison test. (Control—control group, J1W—juice one week, J2W—juice two weeks, C1W—Coca-Cola one week, C2W—Coca-Cola two weeks, and n.s.—no statistically significant difference).

Wetting Angle [°]—Water								
Group Number	Name	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	68.9	65.5	5.4	64.2	75.9	vs. 4
2	J1W	15	57.1	53.9	6.8	50.1	64.5	n.s.
3	J2W	15	53.4	52.3	2.7	50.7	57.7	n.s.
4	C1W	15	30.5	36.8	9.9	19.5	38.7	vs. 1
5	C2W	15	53.9	54.6	4.8	48.8	60.7	n.s.
Wetting Angle [°]—glycol								
Group Number	Name	Count	Average	Median	Standard deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	54.4	54.2	2.0	52.6	57.5	vs. 3, vs. 4
2	J1W	15	44.9	43.5	3.3	42.0	50.3	vs. 4
3	J2W	15	36.1	35.0	2.3	34.1	39.2	vs. 1
4	C1W	15	26.5	26.1	2.4	23.4	29.8	vs. 1, vs. 2
5	C2W	15	42.4	42.7	5.8	35.8	51.2	n.s.

From the individual measurement results obtained, a slight reduction in the wetting angle values was observed when both solutions—water and the organic solution ethyl glycol—were used for samples exposed to a particular environment, i.e., juice or in a Coca-Cola-type drink. Moreover, a clear difference in angle values between the solutions themselves was observed. Wetting angles were smaller when ethyl glycol was used. However, this is characteristic of organic solutions and this type of measurement.

The next step of the measurements was to obtain the individual surface tension and total tension values (Tables 6 and 7). In this case, an increase in surface tension can be seen with a change in the conditions/environment in which the sample was exposed. This increase is evident for both water and ethyl glycol that have been used. Nevertheless, the results for water show a statistically significant difference only between the control group and the C1W group. The other measurements do not show any statistically significant differences.

The wetting angle values determined for the control samples correspond to wettable materials exhibiting more hydrophilic properties ($\theta < 90^\circ$). However, when all results are compared, a clear reduction in wetting angles is observed for samples additionally exposed to a particular solution. The lower the value of the wetting angle, the better the hydrophilic properties and the worse the hydrophobic properties. This is most evident in the surfaces of the samples that have been exposed for a week in the Coca-Cola environment.

Table 6. Summary statistics of water and glycol surface tension, and results of Kruskal–Wallis multiple comparison test. (Control—control group, J1W—juice one week, J2W—juice two weeks, C1W—Coca-Cola one week, C2W—Coca-Cola two weeks, and n.s.—no statistically significant difference).

Surface Tension [mN/m]–Water								
Group Number	Name	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	24.9	28.17	9.7	13.4	33.6	4
2	J1W	15	39.4	45.3	13.8	22.2	52.6	n.s.
3	J2W	15	38.8	41.3	7.9	28.0	48.7	n.s.
4	C1W	15	70.9	62.9	13.5	58.0	87.0	1
5	C2W	15	42.2	48.0	11.0	24.1	50.0	n.s.
Surface Tension [mN/m]–Glycol								
Group Number	Name	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	10.1	7.8	5.8	4.7	16.9	n.s.
2	J1W	15	6.5	5.0	4.3	2.5	11.9	n.s.
3	J2W	15	9.5	8.5	3.8	5.4	15.0	n.s.
4	C1W	15	2.8	3.1	1.8	0.7	5.3	n.s.
5	C2W	15	7.1	5.4	5.7	2.4	16.8	n.s.

Table 7. Summary statistics of total surface tension, and results of Kruskal–Wallis multiple comparison test. (Control—control group, J1W—juice one week, J2W—juice two weeks, C1W—Coca-Cola one week, C2W—Coca-Cola two weeks, and n.s.—no statistically significant difference).

Total Surface Tension [mN/m]								
Group Number	Groups	Count	Average	Median	Standard Deviation	Minimum	Maximum	$p < 0.05$
1	Control	15	35.2	37.0	4.1	30.2	39.0	n.s.
2	J1W	15	47.2	50.3	7.9	37.9	55.5	n.s.
3	J2W	15	48.3	48.9	4.2	42.9	54.1	n.s.
4	C1W	15	35.2	37.0	4.1	30.2	39.0	n.s.
5	C2W	15	49.3	51.9	5.6	40.9	54.0	n.s.

4. Discussion

Texture analysis was the research method that revealed surface texture changes in all cases as compared to the control group. Statistical analysis showed differences between all groups for this method, except for the C2W/J2W groups. What is notable about these two groups is the extent of the standard deviation, which is an order of magnitude higher than for all of the other tested groups.

The observed structures on the originally smooth (control) surface of the orthorhombic material disturb the random texture of small elements of an image. Therefore, entropy decreases in experimental groups. This means the appearance of some organized surface structures [23,24]. The sites remaining intact by this process continue to have an underlying high entropy, while the sites of altered texture are significantly organized into globular and elongated formations. This significantly reduces the magnitude of the measured level of texture chaoticity (entropy) [25,26].

The results show that the texture analysis can detect and distinguish changes occurring on the surface of aligners under the influence of foods that were active over a period of one or two weeks. It can be seen that the effect of Coca-Cola for just 1 week led to a change in the surface structure of aligner material. The effect of orange juice was even more pronounced in the same time frame. The action of both beverages over a 2-week period caused a very significant change in the surface entropy of the test elements, but the level of variation in

these changes also increased so substantially that, as a consequence, statistical analysis did not yield a statistically significant result when comparing the J2W/C2W groups.

In conclusion, it can be assumed that the results obtained are in agreement with studies by Kumar et al., Filho et al., and Lombardo et al., who showed that drinks such as Coca-Cola and orange juice can affect the structure of orthodontic materials such as elastomeric chains or aligners [27–29].

The results of the analysis indicate that crystallized precipitates from the fluids in which the test samples were immersed may be responsible for some of the changes occurring on the surface of the tested elements. It is important to consider the extent to which such precipitates can contribute to the development of bacterial colonies and biofilms. Another important consideration is whether it is possible to prevent the development of such a biofilm, as is attempted, for example, by modifying the surface of orthodontic wires [30,31].

Although many researchers consider wetting angle goniometry to be a strictly qualitative technique, it can be used to measure certain properties quantitatively. The goniometer allows the contact point at the phase contact to be observed at high magnification, with the wetting angle value and the surface tension value to be obtained as numerical values.

A comparison of the change in water wetting angle between groups showed a statistically significant difference only for the control/C1W groups. It can be assumed that, in fact, just 1 week of exposure to Coca-Cola on the surface of polymeric orthodontic materials can cause a change in surface texture to occur, but in the light of both the above-discussed texture analysis and studies by other authors [27–29], it should be assumed that this is all the more likely to occur with the other groups. The results obtained by the authors should therefore rather lead to the conclusion that the mentioned test method should not be considered reliable for the analysis of aligner surface changes.

A different situation is found in the analysis of changes in glycol wetting angle. For this measurement, it was again shown that the greatest change occurred when the surface of the aligners was exposed to Coca-Cola for 1 week (control/C1W groups). Nevertheless, a statistically significant difference also occurred between the control/J2W and J1W/C1W groups. Interestingly, the C2W group showed no statistically significant differences from either group.

Overall, the wetting angle values determined for the control samples correspond to wettable materials exhibiting more hydrophilic properties ($\theta < 90^\circ$). However, when all results are compared, a reduction in wetting angles is observed for samples additionally exposed to a particular solution. The lower the value of the wetting angle, the better the hydrophilic properties and the worse the hydrophobic properties. This is most evident in the surfaces of the samples that have been exposed for a week in Coca-Cola. However, the change in wetting angle did not show a clear time dependence. That is, in the case of Coca-Cola, the decrease in wetting angle was distinctly greater after one week of immersion and then increased but to a value lower than the baseline value. In the case of juice, the wetting angle decreased with increased immersion time. However, the analysis of the wetting angle with water as well as with glycol did not allow the researchers to establish an unambiguous relationship between immersion time and the degree of change, but it is only a confirmation that immersion in orange juice and more significantly in Coca-Cola contributes to the surface degradation of the tested elements. To some extent, this is consistent with the results obtained by the authors in previous studies, in which they found that the oral environment can significantly degrade even metal components used in this environment [32,33]. Beverages that significantly lower the pH of the oral environment are considered to be one of the elements of such an environment [34,35]. Interestingly, virtually no difference was shown in terms of surface tension changes, regardless of the times of immersion in juice and Coca-Cola.

The most consistent results were obtained when analyzing the fractal dimension changes of the samples tested. Only the C1W group did not show statistically significant differences from any of the analyzed groups. The control group showed a significant difference compared to both groups of samples immersed for 2 weeks (control/C2W and

control/J2W). At the same time, a similar variation occurred when comparing the J1W group—immersion for 1 week in juice did not induce changes that would be significantly different compared to the control group, but prolonged exposure to both fluids induced statistically significant changes also in comparison to this group (differences occurred for J1W/J2W and J1W/C2W).

In general, it can be concluded that cola causes a slightly greater change in fractal dimension value, but the decisive factor for this parameter is time—both liquids strongly changed the values of the fractal dimension after immersion for two weeks only. It should be noted that these have resulted in a reduction in the value of this parameter, thus changing the nature of the disturbance of the homogeneity of the surface from a surface disturbance toward a linear change. This may suggest the formation of micro-cracks on the surface of the aligners as a result of prolonged exposure to both Coca-Cola and orange juice. The occurrence of this type of degradation can alter the mechanical properties of the material and promote damage during use. However, what is significant is that such changes occurred after 2 weeks of immersion. According to recommendations, the aligners should be replaced every two weeks. Some vendors, depending on the type of aligner, recommend replacing it every 1 week. In this case, the obtained results suggest that in the assumed period, there should be no significant changes in the structure of the aligner surface.

Unfortunately, this is not confirmed by an analysis of the occurrence of correlations between the wetting angle of both water and glycol and FD and TA. Each of the measurements: FD, TA, and wetting angle, showed changes that depended on the immersion of the aligners in juice and Coca-Cola. However, the intensity and distribution of these changes varied and did not show statistical significance in terms of correlation analysis. Therefore, it is only possible to descriptively state the direction of change, i.e., the gradual degradation of the surface of the aligners, during immersion in juice and Coca-Cola.

The results obtained are consistent with a study by Daniele et al. who also showed degradation and a change in the mechanical properties of aligners after 2 weeks of use [36]. The presented results are also in agreement with the findings reported by Paradowska et al. who found that aligner materials, especially after a period of use, promote microbial proliferation [9].

Limitations of the Study

In the presented study, the most popular beverages were used for immersion. The intention of the authors was to show certain tendencies while maintaining maximum clarity. Of course, such a study could be extended to more liquids, and then the results might be more comprehensive. This could make the study more difficult to correctly interpret, however.

The authors resigned from carrying out other analyses of mechanical properties, such as bending tests, for example. In the authors' opinion, this topic has already been extensively described in the literature. However, the relationship between changes in the surface characteristics studied with the help of three methods and changes in the characteristics of other mechanical properties has not yet been investigated. This could be the subject of a future study.

5. Conclusions

Analysis of fractal dimension values showed a clear dependence of the intensity of aligner surface changes on the time of immersion of these elements in Coca-Cola and orange juice.

The texture analysis showed high sensitivity to the changes occurring on the surface of the aligners under immersion in Coca-Cola and orange juice. This analysis, however, was not able to show the intensity of the changes in relation to immersion time.

The measurement of the wetting angle proved that immersion of the aligners in Coca-Cola leads to the degradation of their surface, but it did not prove the dependence of the intensity of this degradation as a function of time.

Repeated immersion in Coca-Cola and orange juice can cause degradation of the surface of the aligners and the formation of microcracks, which supports the recommendation to replace these elements no later than after 2 weeks.

On the surface of the aligners, microprecipitates from beverages such as Coca-Cola or orange juice can be formed. Therefore, it would be appropriate to consider conducting studies to assess their impact on the development of bacterial biofilm on the surface of aligners and possibly develop a method to prevent the deposition of these precipitates or the development of bacterial biofilm.

Author Contributions: Conceptualization, M.W., M.S., B.K. and K.J.; methodology, M.W., M.S., M.K., K.J., A.Z., B.K. and B.B.; software, not applicable; validation, M.W., M.S., M.K. and K.J.; formal analysis, M.S., M.K., K.J., A.Z. and B.B.; investigation, M.K. and K.J.; resources, M.S., M.K. and K.J.; data curation, M.S. and K.J.; writing—original draft preparation, M.W.; writing—review and editing, M.S. and K.J.; visualization, M.K. and K.J.; supervision, M.S. and K.J.; project administration, M.S. and B.K.; funding acquisition, M.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Medical University of Lodz—grant numbers: 503/5-061-02/503-51-001-18, 503/5-061-02/503-51-001-17, 503/5-061-02/503-51-002-18.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable

Data Availability Statement: Data available from the corresponding author upon request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Ogaard, B.; Rølla, G.; Arends, J. Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 1. Lesion development. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **1988**, *94*, 68–73. [\[CrossRef\]](#)
- Kesling, H.D. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am. J. Orthod. Oral Surg.* **1945**, *31*, 297–304. [\[CrossRef\]](#)
- Daniele, V.; Macera, L.; Taglieri, G.; Di Giambattista, A.; Spagnoli, G.; Massaria, A.; Messori, M.; Quagliarini, E.; Chiappini, G.; Campanella, V.; et al. Thermoplastic Disks Used for Commercial Orthodontic Aligners: Complete Physicochemical and Mechanical Characterization. *Materials* **2020**, *13*, 2386. [\[CrossRef\]](#)
- Ho, C.T.; Huang, Y.T.; Chao, C.W.; Huang, T.H.; Kao, C.T. Effects of different aligner materials and attachments on orthodontic behavior. *J. Dent. Sci.* **2021**, *16*, 1001–1009. [\[CrossRef\]](#)
- Gracco, A.; Mazzoli, A.; Favoni, O.; Conti, C.; Ferraris, P.; Tosi, G.; Guarneri, M.P. Short-term chemical and physical changes in invisalign appliances. *Aust. Orthod. J.* **2009**, *25*, 34–40. [\[PubMed\]](#)
- Papadopoulou, A.K.; Cantele, A.; Polychronis, G.; Zinelis, S.; Eliades, T. Changes in Roughness and Mechanical Properties of Invisalign® Appliances after One- and Two-Weeks Use. *Materials* **2019**, *12*, 2406. [\[CrossRef\]](#)
- Tektas, S.; Thurnheer, T.; Eliades, T.; Attin, T.; Karygianni, L. Initial Bacterial Adhesion and Biofilm Formation on Aligner Materials. *Antibiotics* **2020**, *9*, 908. [\[CrossRef\]](#)
- Condò, R.; Mampieri, G.; Giancotti, A.; Cerroni, L.; Pasquantonio, G.; Divizia, A.; Convertino, A.; Mecheri, B.; Maiolo, L. SEM characterization and ageing analysis on two generation of invisible aligners. *BMC Oral Health* **2021**, *21*, 316. [\[CrossRef\]](#)
- Paradowska-Stolarz, A.; Wieckiewicz, M.; Owczarek, A.; Wezgowiec, J. Natural Polymers for the Maintenance of Oral Health: Review of Recent Advances and Perspectives. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 10337. [\[CrossRef\]](#)
- Fang, D.; Li, F.; Zhang, Y.; Bai, Y.; Wu, B.M. Changes in mechanical properties, surface morphology, structure, and composition of Invisalign material in the oral environment. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **2020**, *157*, 745–753. [\[CrossRef\]](#)
- Hammad, S.M.; Enan, E.T. In vivo effects of two acidic soft drinks on shear bond strength of metal orthodontic brackets with and without resin infiltration treatment. *Angle Orthod.* **2013**, *83*, 648–652. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Kessler, P.; Türp, J.C. Influence of Coca-Cola on orthodontic materials. A systematic review. *Swiss Dent. J.* **2020**, *130*, 983–993. [\[PubMed\]](#)
- Nosalik, K.; Kawala, M. Contemporary NiTi Archwires—Mechanical Properties. *Dent. Med. Probl.* **2012**, *49*, 433–437.
- Zak, K.; Rzaşa, M. The use of fractal dimension to the identification of the similarity Surface. *Mechanik* **2016**, *12*, 1868–1869. [\[CrossRef\]](#)
- Sarul, M.; Mikulewicz, M.; Kozakiewicz, M.; Jurczyszyn, K. Surface Evaluation of Orthodontic Brackets Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* **2022**, *15*, 2071. [\[CrossRef\]](#)
- Sarul, M.; Kozakiewicz, M.; Jurczyszyn, K. Surface Evaluation of Orthodontic Wires Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* **2021**, *14*, 3688. [\[CrossRef\]](#)

17. Liber-Kneć, A.; Łagan, S. The use of contact angle and the surface free energy as the surface characteristics of the polymers used in medicine. *Polim. Med.* **2014**, *44*, 29–37.
18. Karolczak, P.; Kowalski, M.; Raszka, K. The Application of Fractal Analysis to the Description of Brushed Steel Surfaces. *J. Mach. Eng.* **2020**, *20*, 99–115. [[CrossRef](#)]
19. Haralick, R.M.; Shanmuga, K.; Dinstein, I. Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* **1973**, *3*, 610–621. [[CrossRef](#)]
20. Dash, M.; Liu, H. Feature selection for classification. *Intell. Data Anal.* **1997**, *1*, 131–156. [[CrossRef](#)]
21. Haralick, R.M. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE* **1979**, *67*, 786–804. [[CrossRef](#)]
22. Materka, A.; Strzelecki, M. *Texture Analysis Methods—A Review*; COST B11 Report; Technical University of Lodz, Institute of Electronics: Brussels, Belgium, 1998.
23. Kozakiewicz, M.; Wach, T. New Oral Surgery Materials for Bone Reconstruction—A Comparison of Five Bone Substitute Materials for Dentoalveolar Augmentation. *Materials* **2020**, *13*, 2935. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Kołaciński, M.; Kozakiewicz, M.; Materka, A. Textural entropy as a potential feature for quantitative assessment of jaw bone healing process. *Arch. Med. Sci.* **2015**, *11*, 78–84. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Wach, T.; Kozakiewicz, M. Are recent available blended collagen-calcium phosphate better than collagen alone or crystalline calcium phosphate? Radiotextural analysis of a 1-year clinical trial. *Clin. Oral Investig.* **2021**, *25*, 3711–3718. [[CrossRef](#)]
26. Wach, T.; Kozakiewicz, M. Fast-Versus Slow-Resorbable Calcium Phosphate Bone Substitute Materials—Texture Analysis after 12 Months of Observation. *Materials* **2020**, *13*, 3854. [[CrossRef](#)]
27. Kumar, K.; Shetty, S.; Krithika, M.J.; Cyriac, B. Effect of commonly used beverage, soft drink, and mouthwash on force delivered by elastomeric chain: A comparative in vitro study. *J. Int. Oral Health* **2014**, *6*, 7–10.
28. Filho, J.C.; Gallo, D.B.; Santana, R.M.; Guariza-Filho, O.; Camargo, E.S.; Tanaka, O.M. Influence of different beverages on the force degradation of intermaxillary elastics: An in vitro study. *J. Appl. Oral Sci.* **2013**, *21*, 145–149. [[CrossRef](#)]
29. Lombardo, L.; Arreghini, A.; Maccarrone, R.; Bianchi, A.; Scalia, S.; Siciliani, G. Optical properties of orthodontic aligners—spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog. Orthod.* **2015**, *16*, 41. [[CrossRef](#)]
30. Kielan-Grabowska, Z.; Bącela, J.; Zięty, A.; Seremak, W.; Gawlik-Maj, M.; Kawala, B.; Borak, B.; Detyna, J.; Sarul, M. Improvement of Properties of Stainless Steel Orthodontic Archwire Using TiO₂:Ag Coating. *Symmetry* **2021**, *13*, 1734. [[CrossRef](#)]
31. Mollabashi, V.; Farmany, A.; Alikhani, M.Y.; Sattari, M.; Soltanian, A.R.; Kahvand., P.; Banisafar, Z. Effects of TiO₂-Coated Stainless Steel Orthodontic Wires on Streptococcus mutans Bacteria: A Clinical Study. *Int. J. Nanomed.* **2020**, *15*, 8759–8766. [[CrossRef](#)]
32. Sarul, M.; Kawala, B.; Kawala, M.; Antoszewska-Smith, J. Do the NiTi low and constant force levels remain stable in vivo? *Eur. J. Orthod.* **2015**, *37*, 656–664. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Sarul, M.; Rutkowska-Gorczyca, M.; Detyna, J.; Zięty, A.; Kawala, M.; Antoszewska-Smith, J. Do Mechanical and Physicochemical Properties of Orthodontic NiTi Wires Remain Stable In Vivo? *Biomed. Res. Int.* **2016**, *2016*, 5268629. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Johansson, A.K.; Lingström, P.; Birkhed, D. Effect of soft drinks on proximal plaque pH at normal and low salivary secretion rates. *Acta Odontol. Scand.* **2007**, *65*, 352–356. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Parenti, S.I.; Guicciardi, S.; Melandri, C.; Sprio, S.; Lafratta, E.; Tampieri, A.; Bonetti, G.A. Effect of soft drinks on the physical and chemical features of nickel-titanium-based orthodontic wires. *Acta Odontol. Scand.* **2012**, *70*, 49–55. [[CrossRef](#)]
36. Daniele, V.; Macera, L.; Taglieri, G.; Spera, L.; Marzo, G.; Quinzi, V. Color Stability, Chemo-Physical and Optical Features of the Most Common PETG and PU Based Orthodontic Aligners for Clear Aligner Therapy. *Polymers* **2022**, *14*, 14. [[CrossRef](#)]

9. Podsumowanie wyników

Publikacja 1

Z uzyskanych wstępnie 1507 artykułów do przeglądu piśmiennictwa zakwalifikowano ostatecznie 50 publikacji.

W celu przeprowadzenia metaanalizy przeanalizowano 9 prac, które posiadały wystarczającą ilość danych do spełnienia formalnych kryteriów włączenia do analizy statystycznej.

Z każdej pracy wyekstrahowano dane o wieku badanych, rodzajach pomiarów dokonywanych na modelach, rodzaju wykorzystywanego skanera, wartości średniej różnicy między pomiarami opartymi na metodzie cyfrowej i tradycyjnej.

Odnaleziono łącznie 25 niestandardyzowanych rodzajów pomiarów. Do analizy ilościowej włączono prace, które porównywały przynajmniej jeden z poniższych parametrów: szerokość międzytrzonowcowa górna/dolna, szerokość międzykłowa górna/dolna, nagryz pionowy, nagryz poziomy.

Z 9 prac włączonych do analizy statystycznej wyekstrahowano dane łącznie 428 pacjentów.

W ośmiu pracach autorzy opisali istotne statystycznie różnice między pomiarami wykonanymi na modelach cyfrowych i gipsowych (19-26). Autorzy jednej pracy nie znaleźli istotnych statystycznie różnic (27).

Jednak po przeprowadzeniu metaanalizy z efektem zmiennym nie stwierdzono istotnych statystycznie ($p < 0,05$) różnic dla żadnego z pomiarów.

W piśmiennictwie, przyjęty poziom istotności klinicznej dla różnic między pomiarami wykonywanymi na modelach ortodontycznych to najczęściej 0,5mm (24, 28). Wartość ta była przekroczona w czterech spośród analizowanych artykułów (23-26). Mimo tego, w trzech spośród z tych prac (23,24,26) autorzy ocenili modele cyfrowe jako odpowiednie, albo z uwagi na małą relatywną różnicę między pomiarami cyfrowym, a gipsowym (24), albo z uwagi na wysokie współczynniki zgodności statystycznej pomiędzy pomiarami wykonywanymi różnymi metodami (23,26).

Dodatkowo, autorzy podkreślali rolę czynników wpływających na kliniczną użyteczność modeli cyfrowych takich, jak: odpowiednie przeszkolenie lekarza w prawidłowym użytkowaniu oprogramowania, doświadczenie z analizą modeli cyfrowych niezbędne do uzyskania biegłości w prawidłowym zaznaczaniu punktów anatomicznych.

W dyskusji omówiono czynniki mogące wpływać na interpretację wyników, takie jak heterogeniczność analizowanych badań. Badania prezentowały różne rozmiary grup badawczych, a także analizowały różne typy skanerów laboratoryjnych. Dodatkowo, używano oprogramowania dostarczanego przez różnych producentów w celu przeprowadzenia pomiarów. Duża szerokość dolnych i górnych przedziałów ufności dla każdego z badanych parametrów wpływała na heterogeniczność danych.

Zadecydowano o włączeniu do badania jedynie prac analizujących modele cyfrowe pochodzące ze skanera laboratoryjnego, w celu uzyskania odpowiednich danych do analizy statystycznej. W konsekwencji, wnioski pochodzące z niniejszej pracy mogą nie mieć zastosowania dla innych typów skanerów, na przykład skanerów wewnątrzustnych.

Znaczna różnorodność prezentowanych w analizowanych pracach pomiarów wskazuje, że autorzy powinni dążyć do zunifikowania metodologii wykorzystywanej do analizy wiarygodności modeli cyfrowych. W związku z powyższym, celowe wydaje się stworzenie standaryzowanego narzędzia do porównywania jakości, które w sposób obiektywny umożliwiłoby badanie nowych, dopiero pojawiających się na rynku skanerów.

Pomimo raportowania przez badaczy obecności, w 8 z analizowanych 9 badań, różnic statystycznych między modelami gipsowymi a cyfrowymi, w metodzie metaanalizy z efektem zmiennym w sposób statystyczny różnic takich nie wykazano.

Pozwala to wnioskować, że po przeanalizowaniu większej ilości danych poziom istotności statystycznej testu wzrósł, co pozwoliło uniknąć błędu pierwszego rodzaju (błąd statystycznego polegającego na fałszywym stwierdzeniu różnic, które wynikają ze zbyt małej liczebności analizowanych grup) oraz potwierdza słuszność decyzji o wykonaniu analizy metodą ilościową.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że modele cyfrowe są odpowiednie do celów diagnostyki, planowania leczenia i produkcji nakładek ortodontycznych.

Publikacja 2

Poza wiernym odwzorowaniem koron zębów, kluczowe dla przebiegu i planowania leczenia ortodontycznego nakładkami jest prawidłowe przedstawienie anatomii korzeni zębów, ze szczególnym uwzględnieniem długości korzeni.

W ramach drugiej pracy przedstawiono trzy hipotezy zerowe. Uzyskane dane pozwoliły na zweryfikowanie każdej z nich.

- Hipoteza zerowa pierwsza - Nie ma dymorfizmu płciowego w długości zębów dolnych - została obalona. Dla pacjentów z I klasą szkieletową średnia różnica między długością zęba dolnego mężczyzny, a kobiety wynosiła 1,57mm i była to różnica istotna statystycznie ($p=1,78 \times 10^{-8}$). Dla pacjentów z III klasą szkieletową bez asymetrii i z III klasą szkieletową z asymetrią różnice wynosiły odpowiednio 1,35mm ($p= 2.55 \times 10^{-4}$) oraz 1,43mm ($p= 3.96 \times 10^{-8}$).
- Hipoteza zerowa druga – nie występuje zależność między jednostronnym przerostem żuchwy, a długością zębów dolnych po tej samej stronie – została potwierdzona. Analiza statystyczna porównań w grupie pacjentów z III klasą szkieletową z asymetrią nie wykazała różnic istotnych statystycznie na poziomie $p<0,05$. Średnie wartości długości każdego z dolnych zębów były wyższe po stronie przerostowej, niż po stronie bez przerostu. Nie były to jednak istotne statystycznie różnice. Dla średniej różnicy uwzględniającej każdy z zębów uzyskano poziom istotności $p=0,104$.
- Hipoteza zerowa trzecia - nie ma różnic w długości zębów między pacjentami z I klasą, a pacjentów z III klasą szkieletową bez asymetrii – została obalona. Hipoteza

została sprawdzona poprzez porównania statystyczne długości zębów osobno dla grupy kobiet i grupy mężczyzn. Wśród kobiet, średnia różnica w długości zębów wynosiła 1,39mm i była to wartość istotna statystycznie ($p=0$). Dla mężczyzn średnia różnica wynosiła 1,17mm ($p= 2.54 \times 10^{-9}$).

Powyższe ustalenia oznaczają dla klinicystów konieczność różnicowania planów leczenia i wprowadzenie odpowiednich modyfikacji w mechanice leczenia ortodontycznego zależnie od płci i klasy szkieletowej danego pacjenta, bowiem osiągnięcie zaplanowanych ruchów ortodontycznych u pacjentów posiadających dłuższe zęby może okazać się trudniejsze (8).

Wskazane zależności i indywidualna zmienność anatomii zębów pacjentów wymuszają na producentach oprogramowania do tworzenia nakładek ortodontycznych konieczność wprowadzenia nowych narzędzi, takich jak analiza korzeni zębów pacjenta w celu uzyskania lepszych rezultatów leczenia.

Według wiedzy autora, wykazane zależności do tej pory nie były badane i opisane w piśmiennictwie. Większość dotychczas opublikowanych prac nie różnicuje metodologii badania bazując na zmiennych takich, jak płeć pacjenta (29-31). Dodatkowo, żadna z analizowanych w piśmiennictwie prac, poza jedną (32) nie bierze pod uwagę klasy szkieletowej pacjenta. Wskazuje to na istotną lukę w piśmiennictwie i sugeruje konieczność dalszych badań, z uwzględnieniem większej ilości zmiennych.

Ważnym punktem podniesionym w dyskusji jest udowodniona zależność między długością żuchwy (prognatyzmem żuchwy), a długością korzeni zębów. Jednakże, nie wykazano statystycznie istotnej korelacji między asymetrią żuchwy, a asymetrią w długości zębów. To otwiera pole dla kolejnych badań, które na polu genetycznym będą mogły wyjaśnić to zjawisko.

Opisane wyniki wskazują także na konieczność dalszych badań w szerszym zakresie w celu zbadania, czy istnieją podobne zależności dla pacjentów z klasą II szkieletową (wady dotylne, mogące być powiązane z niedorozwojem strzałkowym żuchwy).

Publikacja 3

Pod wpływem działania czynników obecnych w jamie ustnej materiał, z którego wykonywane są nakładki może ulegać degradacji, a w konsekwencji pogorszeniu mogą ulec jego właściwości materiałowe (12). Dodatkowo, materiał poddany procesowi starzenia staje się bardziej podatny na proces infiltracji bakteryjnej i tworzenie biofilmu (13), w konsekwencji mogąc być promotorem stanów zapalnych jamy ustnej i próchnicy zębów.

W badaniu metodą analizy fraktalnej (FD) wykazano statystycznie istotne różnice pomiędzy grupą kontrolną, a grupami J2W i C2W. Wykazano także statystycznie istotne różnice między grupą J1W, a grupami J2W i C2W. C1W była jedyną grupą, która nie wykazała statystycznie istotnych ($p>0,05$) różnic wobec innych grup.

W badaniu metodą analizy tekstur (TA) uzyskano wartość liczbową określającą poziom entropii (nieuporządkowania) opisujący liczbowo skalę zmian obecnych na powierzchni nakładki. Średnia entropia tekstury powierzchni nakładki w grupie kontrolnej jest wysoka i określa homogenność materiału i chaotyczne ułożenie elementów w obrazie SEM. Obniżenie

poziomu entropii określa wzrost heterogenności tekstury i pojawianie się zmian na powierzchni materiału, potwierdzających proces uszkodzenia nakładki pod wpływem czynników zewnętrznych.

Najwyższy poziom entropii stwierdzono w grupie kontrolnej ($3,21 \pm 0,03$). Dla grup z okresem inkubacji 1 tygodnia (C1W, J1W) entropia była niższa, niż dla grupy kontrolnej. Dla grup z okresem inkubacji 2 tygodnie (C2W, J2W) entropia była niższa niż dla grup C1W, J1W. Wszystkie z tych różnic były istotne statystycznie ($p < 0,05$). W porównaniach między napojami, w 1. tygodniu entropia była niższa dla soku pomarańczowego, niż dla Coca-Coli i było to istotne statystycznie. W 2. tygodniu nie było statystycznie istotnej różnicy w entropii między grupą moczoną w soku, a grupą moczoną w Coca-Coli.

W badaniu metodą analizy kąta zwilżania przy badaniu roztworem hydrofilowym (wodą) uzyskano statystycznie istotne różnice jedynie między grupą kontrolną, a grupą C1W. Dla grupy kontrolnej, kąt zwilżania wynosił $68,9 \pm 5,4$ stopni. Dla grupy C1W, wynosił $30,5 \pm 9,9$ stopni. Pozostałe różnice nie były istotne statystycznie. W badaniu roztworem hydrofobowym (glikolem etylenowym) uzyskano statystycznie istotne różnice między grupą kontrolną ($54,4 \pm 2,0$), w grupami C1W ($26,5 \pm 2,4$), J2W ($36,1 \pm 2,3$). Istotne statystycznie były także różnice między grupami J1W ($44,9 \pm 3,3$), a grupą C1W.

Dla analizy napięcia powierzchniowego, uzyskano statystycznie istotne wyniki w porównaniu między grupą kontrolną, a grupą C1W w roztworze wody. Dla glikolu etylenowego nie uzyskano istotnych statystycznie wyników.

W niniejszej pracy wykorzystano szereg metod w procesie badawczym, co pozwala na porównanie ich między sobą i wyciągnięcie wniosków o wartości konkretnego podejścia przy określaniu właściwości materiałowych powierzchni podczas analizy. Spośród użytych metod, analiza tekstury wykazała się największą czułością, pozwalając wykryć i odróżnić od grupy kontrolnej zmiany zachodzące na powierzchni nakładek już po 1-tygodniowym okresie inkubacji zarówno dla soku pomarańczowego, jak i Coca-Coli. Zauważyć należy, że w 1-tygodniowym okresie inkubacji sok pomarańczowy wywoływał większe zmiany, niż Coca-Cola. Po 2-tygodniowym okresie inkubacji, z racji zwiększonej wariacji w otrzymanych wynikach różnica ta nie była już istotna statystycznie.

Zbliżone wyniki otrzymano w metodzie analizy fraktalnej, gdzie jednak nie zauważono zmian istotnych statystycznie dla grupy C1W. Da się jednak zauważyć zależność wykrytych zmian od funkcji czasu – dla grup C2W oraz J2W wykryto uszkodzenia w porównaniu do grupy kontrolnej i było to statystycznie istotne.

Dla metod analizy kąta zwilżania nie udało się ustalić jednoznacznego związku pomiędzy czasem ekspozycji, a stopniem zmiany. Najniższą czułość na zmiany obecne na powierzchni materiału wykazała metoda analizy napięcia powierzchniowego.

Podsumowując, w niniejszej pracy udało się wykazać degradację powierzchni materiału, z którego tworzone są nakładki pod wpływem kwaśnych napojów takich, jak sok pomarańczowy i Coca-Cola. Najczulszym narzędziem okazała się metoda analizy tekstur, która potwierdza zależność intensywności zmian od funkcji czasu.

Uzyskane wyniki sugerują, że właściwa wydaje się zmiana nakładek po maksymalnie 2., a optymalnie po 1. tygodniu użytkowania. Potwierdzają także uszkodzający wpływ kwaśnych płynów, co wymusza na lekarzach ortodontach konieczność edukowania pacjentów na temat możliwych czynników uszkodzających materiał, z którego wykonane są nakładki.

10. Wnioski

- 1) Modele cyfrowe uzyskane ze skanerów laboratoryjnych są tożsame wobec modeli gipsowych. Klinicyści mogą z dużą pewnością wykorzystywać je w ramach diagnostyki, planowania leczenia i kontroli uzyskanych wyników leczenia ortodontycznego.
- 2) Występuje dymorfizm płciowy w długości zębów dolnych u ludzi – zęby dolne są dłuższe u mężczyzn. Zęby dolne pacjentów z przerostem żuchwy są dłuższe, niż pacjentów z prawidłową budową żuchwy. Asymetria w budowie żuchwy nie jest skorelowana z długością zębów dolnych.
- 3) Kontakt z kwaśnymi płynami wchodzącymi w skład współczesnej diety ma destrukcyjny wpływ na nakładki ortodontyczne. Najbardziej czułymi narzędziami do badania uszkodzeń na powierzchni nakładek okazały się metody analizy fraktalnej i analizy tekstur. Analiza zebranych wyników pozwoliła stwierdzić, że uszkodzenia widoczne na powierzchni nakładek rosną w miarę zwiększenia czasu ekspozycji na kwaśne płyny. Z tego powodu, wskazana jest wymiana nakładek nie rzadziej, jak co 1 tydzień.

11. Piśmiennictwo

1. Angle EH. The latest and best in orthodontic mechanism. *Dent Cosmos* 1928;70:1143-58.
2. Ogaard, B.; Rølla, G.; Arends, J. Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 1. Lesion development. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **1988**, 94, 68–73.
3. Kesling, H.D. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am. J. Orthod. Oral Surg.* **1945**, 31, 297–304.
4. Daniele, V.; Macera, L.; Taglieri, G.; Di Giambattista, A.; Spagnoli, G.; Massaria, A.; Messori, M.; Quagliarini, E.; Chiappini, G.; Campanella, V.; et al. Thermoplastic Disks Used for Commercial Orthodontic Aligners: Complete Physicochemical and Mechanical Characterization. *Materials* **2020**, 13, 2386.
5. Rossini, G.; Parrini, S.; Castroflorio, T.; Deregibus, A.; Debernardi, C.L. Diagnostic accuracy and measurement sensitivity of digital models for orthodontic purposes: A systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* **2016**, 149, 161-70.
6. Nanda, R.; Castroflorio, T.; Garino, F.; Ojima, K. *Principles and Biomechanics of Aligner Treatment (1st Edition)*. Elsevier, **2020**.

7. Koletsi, D.; Iliadi, A.; Eliades, T. Predictability of rotational tooth movement with orthodontic aligners comparing software-based and achieved data: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Journal of Orthodontics*. **2021**, *48*, 277-287.
8. Burstone, C.J.; Pryputniewicz, R.J. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthoped.* **1980**, *77*, 396–409.
9. Murugesan, A., Sivakumar, A. (2020) Comparison of accuracy of mesiodistal tooth measurements made in conventional study models and digital models obtained from intraoral scan and desktop scan of study models. *Journal of Orthodontics*, *47*, 149–155
10. Gershater, E.; Li, C.; Ha, P.; Chung, C.H.; Tanna, N.; Zou, M.; Zheng, Z. Genes and Pathways Associated with Skeletal Sagittal Malocclusions: A Systematic Review. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 13037
11. De Coster, P.J.; Marks, L.A.; Martens, L.C.; Huysseune, A. Dental agenesis: Genetic and clinical perspectives. *J. Oral. Pathol. Med.* **2009**, *38*, 1–17
12. Papadopoulou, A.K.; Cantele, A.; Polychronis, G.; Zinelis, S.; Eliades, T. Changes in Roughness and Mechanical Properties of Invisalign® Appliances after One- and Two- Weeks Use. *Materials* **2019**, *12*, 2406
13. Tektas, S.; Thurnheer, T.; Eliades, T.; Attin, T.; Karygianni, L. Initial Bacterial ion and Biofilm Formation on Aligner Materials. *Antibiotics* **2020**, *9*, 908.
<https://doi.org/10.3390/antibiotics9120908>
14. Iosif, C.; Cuc, S.; Prodan, D.; Moldovan, M.; Petean, I.; Labunet, A.; Barbu Tudoran, L.; Badea, I.C.; Man, S.C.; Badea, M.E.; et al. Mechanical Properties of Orthodontic Cements and Their Behavior in Acidic Environments. *Materials* **2022**, *15*, 7904. <https://doi.org/10.3390/ma15227904>
15. Al-Khatib, S.; Berradja, A.; Celis, J-P.; Willems, G. In vitro friction of stainless steel arch wire–bracket combinations in air and different aqueous solutions. *Orthod Craniofacial Res* **2005**, *8*, 96–105.
16. Segner, D.; Hasund, A. Individualisierte Kephalmetrie, 2nd ed.; Sietmar Segner Verlag:Hamburg, Germany, **1994**; ISBN 3980270920
17. Sarul, M.; Kozakiewicz, M.; Jurczyszyn, K. Surface Evaluation of Orthodontic Wires Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* **2021**, *14*, 3688.
<https://doi.org/10.3390/ma14133688>
18. Sarul, M.; Mikulewicz, M.; Kozakiewicz, M.; Jurczyszyn, K. Surface Evaluation of Orthodontic Brackets Using Texture and Fractal Dimension Analysis. *Materials* **2022**, *15*, 2071.
<https://doi.org/10.3390/ma15062071>
19. Camardella, L.T., Ongkosuwito, E.M., Penning, E.W., KuijpersJagtman, A.M., Vilella, O.V., Breuning, K.H. (2020) Accuracy and reliability of measurements performed using two different software programs on digital models generated using laser and computed tomography plaster model scanners. *Korean Journal of Orthodontics*, *50*, 13–25.
20. Lim, M.Y., Li, S.H. (2009) Comparison of model analysis measurements among plaster model, laser scan digital model, and cone beam CT image. *Korean Journal of Orthodontics*, *39*, 6–17

21. Liang, Y.M., Rutchakitprakarn, L., Kuang, S.H., Wu, T.Y. (2018) Comparing the reliability and accuracy of clinical measurements using plaster model and the digital model system based on crowding severity. *Journal of the Chinese Medical Association*, 81, 842–847.
22. Kim, J., Heo, G., Lagravere, M.O. (2014) Accuracy of laser-scanned models compared to plaster models and conebeam computed tomography. *Angle Orthodontist*, 84, 443–450.
23. Abizadeh, N., Moles, D.R., O'Neill, J., Noar, J.H. (2012) Digital versus plaster study models: how accurate and reproducible are they? *Journal of Orthodontics*, 39, 151–159
24. Asquith, J., Gillgrass, T., Mossey, P. (2007) Three-dimensional imaging of orthodontic models: a pilot study. *European Journal of Orthodontics*, 29, 517–522
25. Bootvong, K., Liu, Z., McGrath, C., Hägg, U., Wong, R.W., Bendeus, M., Yeung, S. (2010) Virtual model analysis as an alternative approach to plaster model analysis: reliability and validity. *European Journal of Orthodontics*, 32, 589–595.
26. Koretsi, V., Tingelhoff, L., Proff, P., Kirschneck, C. (2018) Intraobserver reliability and agreement of manual and digital orthodontic model analysis. *European Journal of Orthodontics*, 40, 52–57.
27. Yoon, J.H., Yu, H.S., Choi, Y., Choi, T.H., Choi, S.H., Cha, J.Y. (2018) Model analysis of digital models in moderate to severe crowding: in vivo validation and clinical application. *Biomed Research International*, 841460, 5
28. Luu, N.S. Nikolcheva, L.G. Retrouvey, J.M. Flores-Mir, C.E.- Bialy, T. Carey, J.P. Major, P.W. (2012) Linear measurements using virtual study models. *Angle Orthodontist*, 82, 1098–1106.
29. Liu, L.; Zhan, Q.; Zhou, J.; Kuang, Q.; Yan, X.; Zhang, X.; Shan, Y.; Li, X.; Lai, W.; Long, H. Effectiveness of an anterior mini-screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear aligners: A finite element study. *Angle Orthod.* 2021, 91, 794–803.
30. Ayidaga, C.; Kamiloglu, B. Effects of Variable Composite Attachment Shapes in Controlling Upper Molar Distalization with Aligners: A Nonlinear Finite Element Study. *J. Healthc. Eng.* 2021, 2021, 5557483.
31. . Yokoi, Y.; Arai, A.; Kawamura, J.; Uozumi, T.; Usui, Y.; Okafuji, N. Effects of attachment of plastic aligner in closing of diastema of maxillary dentition by finite element method. *J. Healthc. Eng.* 2019, 2019, 1075097.
32. Seo, J.-H.; Eghan-Acquah, E.; Kim, M.-S.; Lee, J.-H.; Jeong, Y.-H.; Jung, T.-G.; Hong, M.; Kim, W.-H.; Kim, B.; Lee, S.-J. Comparative Analysis of Stress in the Periodontal Ligament and Center of Rotation in the Tooth after Orthodontic Treatment Depending on Clear Aligner Thickness—Finite Element Analysis Study. *Materials* 2021, 14, 324.

12. Spis rycin

Publikacja 1

Rycina 1 – str. 23

Rycina 2 – str. 25

Rycina 3 – str. 26

Rycina 4 – str. 26

Publikacja 2

Rycina 1 – str. 33

Rycina 2 – str. 33

Publikacja 3

Rycina 1 – str. 43

Rycina 2 – str. 45

Rycina 3 – str. 46

13. Spis tabel

Publikacja 1

Tabela 1 – str. 24

Tabela 2 – str. 25

Publikacja 2

Tabela 1 – str. 32

Tabela 2 – str. 34

Tabela 3 – str. 35

Tabela 4 – str. 35-36

Publikacja 3

Tabela 1 – str. 44

Tabela 2 – str. 44

Tabela 3 – str. 46

Tabela 4 – str. 46

Tabela 5 – str. 47

Tabela 6 – str. 48

KOMISJA BIOETYCZNA
przy
Uniwersytecie Medycznym
we Wrocławiu

OPINIA KOMISJI BIOETYCZNEJ Nr KB – 415/2022

Komisja Bioetyczna przy Uniwersytecie Medycznym we Wrocławiu, powołana zarządzeniem Rektora Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu nr 278/XVI R/2020 z dnia 21 grudnia 2020 r. oraz działająca w trybie przewidzianym rozporządzeniem Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 11 maja 1999 r. (Dz.U. nr 47, poz. 480) na podstawie ustawy o zawodzie lekarza z dnia 5 grudnia 1996 r. (Dz.U. nr 514 z 2020 r.) w składzie:

dr Joanna Birecka (psychiatria)
dr Beata Freier (onkologia)
dr hab. Tomasz Fuchs (ginekologia, położnictwo)
prof. dr hab. Dariusz Janczak (chirurgia naczyniowa, transplantologia)
dr hab. Krzysztof Kaliszewski, prof. UMW(chirurgia endokrynologiczna)
dr prawa Andrzej Malicki (prawo)
dr hab. Marcin Mączyński, prof. UMW (farmacja)
Urszula Olechowska (pielęgniarstwo)
prof. dr hab. Leszek Szenborn (pediatria, choroby zakaźne)
prof. dr hab. Andrzej Szuba (choroby wewnętrzne, angiologia)
ks. prof. Andrzej Tomko (duchowny)
prof. dr hab. Mieszko Więckiewicz (stomatologia)
dr hab. Andrzej Wojnar, prof. nadzw. (histopatologia, dermatologia) przedstawiciel
Dolnośląskiej Izby Lekarskiej)
dr hab. Jacek Zieliński (filozofia)

pod przewodnictwem
prof. dr hab. Jerzego Rudnickiego (chirurgia, proktologia)

Przestrzegając w działalności zasad Good Clinical Practice oraz zasad Deklaracji Helsińskiej,
po zapoznaniu się z projektem badawczym pt.

„Ocena retrospektywna danych diagnostycznych pacjentów leczonych ortodontycznie w celu
określenia optymalnego postępowania biomechanicznego w leczeniu aparatami
nakładkowymi.”

zgłoszonym przez **dr hab. Michała Sarulę, prof. UMW** zatrudnionego w Katedrze Stomatologii Zintegrowanej Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu oraz złożonymi wraz z wnioskiem dokumentami, w tajnym głosowaniu postanowiła **wyrazić zgodę** na przeprowadzenie badań w Katedrze Stomatologii Zintegrowanej Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu, **pod warunkiem zachowania anonimowości zgromadzonych danych.**

Uwaga: Badanie to zostało objęte ubezpieczeniem odpowiedzialności cywilnej Uniwersytetu Medycznego we Wrocławiu z tytułu prowadzonej działalności.

Pouczenie: W ciągu 14 dni od otrzymania decyzji wnioskodawcy przysługuje prawo odwołania do Komisji Odwoławczej za pośrednictwem Komisji Bioetycznej UM we Wrocławiu.

Opinia powyższa dotyczy projektu badawczego realizowanego w ramach działalności pozastatutowej

Przewodniczący Komisji Bioetycznej
przy Uniwersytecie Medycznym

prof. dr hab. Jerzy Rudnicki



Wrocław, dnia 26 maja 2022 r.

14.2 Dorobek naukowy doktoranta

Wykaz publikacji

Maciej Warnecki

1. **Methods of anterior torque control during retraction: a systematic review.** Anna Ewa Kuc, Jacek Kotuła, Marek Nahajowski, **Maciej Warnecki**, Joanna Lis, Ellie Amm, Beata Kawala, Michał Sarul.
Diagnostics 2022 Vol.12 no.7 art.1611 [18 s.], ryc., tab., bibliogr. 22 poz., summ. DOI: 10.3390/diagnostics12071611
IF₂₀₂₁: **3,992**
Punkty ministerialne : 70,00

11.08.2022 r. Beata Majewska

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu
Biblioteka Główna
DZIAŁ INFORMACJI NAUKOWEJ I BIBLIOGRAFII
ul. Marcinkowskiego 2-6, 50-368 Wrocław
tel. 71 784 19 25, fax. 71 784 19 31

14.3 Oświadczenia o współautorstwie

Dr hab. n. med. Michał Sarul

Katedra i Zakład Stomatologii Zintegrowanej

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Wrocław, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓŁAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacjach:

1. Warnecki M, Nahajowski M, Papadopoulos MA, Kawala B, Lis J, **Sarul M**: Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.
2. Warnecki M, Żak M, Szkoda-Polizuk K, Kawala B, **Sarul M**: Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? Symmetry (Basel) 2022; 14: 1069.
3. Warnecki M, **Sarul M**, Kozakiewicz M, Zięty A, Babiarczuk B, Kawala B, Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na : formułowaniu problemów i hipotez badawczych, projektowaniu badań, uzyskaniu finansowania badań, analizie i interpretacji wyników, przygotowaniu i korekcie manuskryptów.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu
KATEDRA I ZAKŁAD STOMATOLOGII ZINTEGROWANEJ
Wrocław
Podpis
Dr hab. n. med. Michał Sarul

Prof. dr hab. n. med. Joanna Lis
Samodzielna Pracownia Ortodoncji Dorosłych
Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Wrocław, 13.02.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Nahajowski M, Papadopoulos MA, Kawala B, Lis J, Sarul M:
Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models
obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and
meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.

Mój udział polegał na : formułowaniu problemów i hipotez badawczych, przygotowaniu i korekcie manuskryptów.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu
Katedra Ortopedii Szczękowej / Ortodoncji
SAMODZIELNA PRACOWNIA
ORTODONCJI DOROSŁYCH
kierownik
prof. dr hab. n. med. Joanna Lis

Podpis

Prof. dr hab. n. med. Beata Kawala

Katedra i Zakład Ortopedii Szczękowej i Ortodoncji

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Wrocław, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacjach:

1. Warnecki M, Nahajowski M, Papadopoulos MA, **Kawala B**, Lis J, Sarul M: Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.
2. Warnecki M, Żak M, Szkoda-Poliszuk K, **Kawala B**, Sarul M: Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? Symmetry (Basel) 2022; 14: 1069.
3. Warnecki M, Sarul M, Kozakiewicz M, Zięty A, Babiarczuk B, **Kawala B**, Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na: formułowaniu problemów i hipotez badawczych, projektowaniu badań, wsparciu przy nadzorze i zarządzaniu projektami badawczymi.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Podpis

Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu
KATEDRA ORZ ZAKŁAD
ORTOPEDII SZCZĘKOWEJ I ORTODONCJI
Kierownik

prof. dr hab. Beata Kawala

Dr n. med. Marek Nahajowski
Katedra i Zakład Stomatologii Zintegrowanej
Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Wrocław, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, **Nahajowski M**, Papadopoulos MA, Kawala B, Lis J, Sarul M:
Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models
obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and
meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.

Mój udział polegał na : selekcji i oceny jakości artykułów, analizie i interpretacji wyników,
przygotowaniu i korekcie manuskryptów.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w
postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w
dyscyplinie nauki medyczne.

Podpis
dr n. med. Marek Nahajowski
lekarz dentysta
specjalista ortodontcji
Nahajowski

Dr hab. n. med. Kamil Jurczyszyn
Katedra i Zakład Chirurgii Stomatologicznej
Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Wrocław, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓŁAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Sarul M, Kozakiewicz M, Zięty A, Babiarczuk B, Kawala B,
Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and
Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na : formułowaniu problemów i hipotez badawczych, projektowaniu badań, analizie i interpretacji wyników, przygotowaniu i korekcie manuskryptów.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.


dr hab. Kamil Jurczyszyn
specjalista chirurgii stomatologicznej
1843635

Podpis

Prof. dr. Moschos A. Papadopoulos
Department of Orthodontics
Aristotle University of Thessaloniki

Thessaloniki, 11/05/2023

CO-AUTHORSHIP STATEMENT

I hereby declare, that in the publication:

Warnecki M, Nahajowski M, **Papadopoulos MA**, Kawala B, Lis J, Sarul M:
Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models
obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and
meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.

My participation included : analysis and interpretation of the outcome data, preparation and
correction of manuscripts.

I agree to include the aforementioned publication in the proceedings to award a Ph.D. degree
in the field of medical sciences and health studies to DDS Maciej Warnecki in the discipline
of medical studies.



Moschos A. Papadopoulos, *D.D.S., Dr. Med. Dent.*
Professor of Orthodontics
Chairman & Program Director
mikepap@dent.auth.gr

Prof. dr hab. n. med. Marcin Kozakiewicz
Klinika Chirurgii Szczękowo-Twarzowej
Uniwersytet Szpital Kliniczny im. Wojskowej Akademii Medycznej

Łódź, 13.02.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓŁAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Sarul M, **Kozakiewicz M**, Zięty A, Babiarczuk B, Kawala B,
Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and
Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na : projektowaniu metodologii badań, walidacji użytych metod, analizie i interpretacji wyników, wizualizacji wyników.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Podpis

Marcin Kozakiewicz

Elektronicznie podpisany przez Marcin Kozakiewicz
Data: 2023.03.22 16:02:56 +01'00'

Mgr inż. Bartosz Babiarczuk

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Politechnika Wroclawska

Wrocław, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Sarul M, Kozakiewicz M, Zięty A, **Babiarczuk B**, Kawala B,
Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and
Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na : projektowaniu metodologii badań, analizie i interpretacji wyników.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Bartosz Babiarczuk

Podpis

Dr inż. Klaudia Szkoda-Poliszuk
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Politechnika Wroclawska

Wroclaw, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Żak M, Szkoda-Poliszuk K, Kawala B, Sarul M: Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? Symmetry (Basel) 2022; 14: 1069.

Mój udział polegał na : opracowaniu i walidacji metod badawczych, analizie i interpretacji wyników, przygotowaniu i korekcie manuskryptu.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Podpis

Szkoda Poliszuk

Dr inż. Małgorzata Żak

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Politechnika Wrocławska

Wrocław, 13.03.2023r.

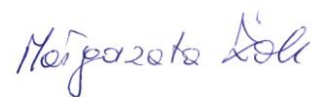
OŚWIADCZENIE O WSPÓŁAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, **Żak M**, Szkoda-Poliszuk K, Kawala B, Sarul M: Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? Symmetry (Basel) 2022; 14: 1069.

Mój udział polegał na : opracowaniu i walidacji metod badawczych, analizie i interpretacji wyników, przygotowaniu i korekcie manuskryptu.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.



Podpis

Dr inż. Anna Zięty

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Politechnika Wroclawska

Wroclaw, 13.03.2023r.

OŚWIADCZENIE O WSPÓLAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Sarul M, Kozakiewicz M, **Zięty A**, Babiarczuk B, Kawala B, Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na : projektowaniu metodologii badań, analizie i interpretacji wyników.

Wyrażam zgodę na włączenie przez lek. dent. Macieja Warneckiego w/w publikacji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.



Podpis

OŚWIADCZENIE O WSPÓŁAUTORSTWIE

Oświadczam, że w publikacjach:

1. **Warnecki M, Nahajowski M, Papadopoulos MA, Kawala B, Lis J, Sarul M:** Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners. A systematic review and meta-analysis. Eur J Orthod. 2022; 44(5): 522-529.
2. **Warnecki M, Żak M, Szkoda-Poliszuk K, Kawala B, Sarul M:** Does Sex, Skeletal Class and Mandibular Asymmetry Affect Tooth Length and Asymmetry in Tooth Length? Symmetry (Basel) 2022; 14: 1069.

Mój udział polegał na : formułowaniu problemów i hipotez badawczych, projektowaniu badań, analizie i interpretacji wyników, przygotowaniu i korekcie manuskryptów.

Oświadczam, że w publikacji:

Warnecki M, Sarul M, Kozakiewicz M, Zięty A, Babiarczuk B, Kawala B, Jurczyszyn K: Surface Evaluation of Aligners after Immersion in Coca-Cola and Orange Juice. Materials (Basel) 2022; 15: 6341.

Mój udział polegał na: współpracy przy analizie i interpretacji wyników, współpracy przy przygotowaniu i korekcie manuskryptu.

Oświadczam, że w/w publikacje są elementami cyklu doktorskiego uczestniczącymi w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk medycznych i nauk o zdrowiu w dyscyplinie nauki medyczne.

Podpis

Maciej Warnecki

lekarz dentysta
3290628
