

STRESZCZENIE

Wstęp

Wady klasy II dominują zarówno w populacjach kaukaskich Europy północnej, Środkowo-Wschodniej jak i w populacjach pochodzenia indyjskiego. W Polsce wady klasy II są również najczęściej występującą wadą zgryzu.

Diagnostykę wad klasy II oraz różnicowanie wad szkieletowych i zębowych przeprowadza się na podstawie badania zewnątrzustnego, wewnątrzustnego, analizy modeli oraz badania radiologicznego w postaci analizy cefalometrycznej.

W badaniu zewnątrzustnym charakterystyczne cechy wskazujące na szkieletową wadę klasy II to cofnięta bródka, pogłębiona bruzda wagowo-bródkowa, cofnięta warga dolna. Często zaburzeniom przednio-tylnym towarzyszą też zaburzenia pionowe. Wewnątrzustnie oraz podczas analizy modeli można zauważyć pełną lub częściową klasę II wg Angle'a. W zależności od rodzaju wady może występować I lub II klasa kłowa, a siekacze górne mogą być wychylone, przechylone lub mogą mieć prawidłową inklinację. Niedostateczny lub nadmierny wzrost szczęk zwykle w konsekwencji powoduje również nieprawidłowości w zgryzie. Diagnostykę wady w wymiarze strzałkowym i jej podłoże umożliwia analiza cefalometryczna, w której uwzględnia się szereg pomiarów, między innymi pomiar kątów SNA, SNB oraz ANB, w celu określenia podłoża występującego zaburzenia. Określenie czynnika, najbardziej przyczyniającego się do powstania wady – zbyt dotylnej pozycji żuchwy lub/i wyrostka zębodołowego wraz z zębami żuchwy albo zbyt doprzedniej pozycji szczęki lub/i jej wyrostka zębodołowego wraz z uzębieniem – powinno warunkować zastosowanie odpowiedniej formy terapii. Najczęściej wykorzystywanym pomiarem jest kąt ANB, którego zwiększenie wskazuje na relację dotylną szczęk.

Leczenie wad klasy II jest uzależnione zarówno od przyczyny jak i wieku pacjentów. W trakcie wzrostu przeprowadza się najczęściej leczenie czynnościowe, które może wpłynąć na poprawę relacji szkieletowych. Natomiast w przypadku pacjentów dorosłych możliwe jest leczenie ortodontyczno-chirurgiczne lub kamuflaż wady. Leczenie kamuflujące wad klasy II/1 często wymaga ekstrakcji górnych przedtrzonowców oraz retrakcji segmentu zębów przednich – podobne postępowanie dotyczy leczenia również innych wad, takich jak: protruzji zębowo-wyrostkowej czy dekompensacja przedoperacyjna wad klasy III. Efektem końcowym jest często nie tylko zmiana inklinacji oraz pozycji strzałkowej siekaczy, ale często również powikłanie w postaci niepożądanego resorpcji korzeni tych zębów oraz zmiana objętości wyrostka zębodołowego szczęki, a także dehiscencje.

Zastosowanie siły ortodontycznej powoduje naprężenia w obrębie więzadła przyzębia (PDL), które przekraczając ciśnienie krwi w tętniczkach włosniczkowych, powodują hialinizację, niedokrwienie i martwicę sąsiadujących tkanek, cementu korzeniowego i kości wyrostka zębodołowego. Komórki znajdujące się w pobliżu obszaru martwiczego mogą inicjować resorpcję korzenia. W związku z tym ustalono korelację pomiędzy nadmierną siłą ortodontyczną, skutkującą utrzymującym się wysokim poziomem stresu w PDL, upośledzonym przepływem krwi i indukowaną ortodontycznie resorpcją zapalną korzenia zęba (OIIRR). W dobie powszechnej dostępności badania CBCT z możliwością zastosowania TISAD, można dokładnie i indywidualnie przeanalizować anatomię każdego pacjenta, dopuszczając możliwość zastosowania retrakcji powyżej 7 mm. Zastosowanie retrakcji charakteryzuje się często dłuższym czasem leczenia, koniecznością zastosowania większych sił oraz przesunięciem zęba na większą odległość w porównaniu do innych strategii leczenia. Powyższe cechy mogą być przyczyną indukowanej ortodontycznie resorpcji zapalnej korzeni (OIIRR). Resorpcja korzenia zęba podczas leczenia ortodontycznego jest jednym z najczęstszych powikłań jatrogennych. Na to zjawisko składa się wiele czynników. W ostatnich latach, w wyniku rozwoju obrazowania 3D, zwrócono uwagę na kolejny ważny element, jakim jest kanał przysieczny i jego związek z korzeniami siekaczy górnych.

Kanał przysieczny, zwany także kanałem nosowo-podniebiennym, to połączenie między jamą nosową a jamą ustną, zawierające naczynia i nerwy. Jest to często pomijany element w procesie planowania leczenia ortodontycznego, a otoczony jest stosunkowo grubą płytką korową. Ocena i znajomość cech anatomicznych kanału przysiecznego, jego budowy, wielkości i zmian nachylenia w zależności od wieku, płci, a także parametrów decydujących o położeniu siekaczy szczęki może skutecznie zapobiegać poważnym powikłaniom leczenia ortodontycznego, takim jak resorpcja korzeni.

W praktyce klinicznej, w leczeniu aparatami stałymi cienkołukowymi stosuje się dwa rodzaje slotów zamków ortodontycznych: 0.018 i 0.022 cala. W zależności od zastosowanego slotu dobiera się odpowiednie rozmiary łuków stalowych, na których prowadzi się pożądaną ortodontyczny ruch. Ponieważ celem leczenia ortodontycznego jest uzyskanie optymalnego ruchu zębów oraz poprawa profilu pacjenta, przy minimalnych efektach ubocznych, w przypadkach nasilonych wad konieczne jest dodatkowo zastosowanie miniimplantów ortodontycznych jako zakotwienia szkieletowego w celu uzyskania maksymalnej retrakcji siekaczy.

W wyniku przyłożonej siły ortodontycznej w ożębnej (periodontal ligament - PDL) pojawiają się naprężenia, które po stronie nacisku powodują resorpcję kości a po stronie rozciągania nawarstwianie nowej tkanki kostnej. Naprężenia, które przekraczają ciśnienie krwi w tętniczkach włosowatych powodują hialinizację związaną z niedokrwieniem i martwicą tkanek,

przylegającego cementu korzeniowego i kości wyrostka zębodołowego. Komórki znajdujące się w blisko strefy martwicy mogą zainicjować resorpcję korzeni. W związku z tym wykryto związek pomiędzy zastosowaniem zbyt dużej siły ortodontycznej powodującej zbyt duże i stałe naprężenia w PDL i zahamowanie przepływu krwi a ortodontycznie indukowaną zapalną resorpcją korzeni zębów (OIIRR).

Z powyższych rozważań wynika, że w celu osiągnięcia optymalnych wyników leczenia konieczne jest przeprowadzenie precyzyjnej diagnostyki, zastosowanie optymalnej biomechaniki leczenia oraz uwzględnienie indywidualnych cech anatomii pacjenta w celu uniknięcia jatrogennych powikłań w czasie leczenia ortodontycznego.

Cel pracy:

1. Określenie wartości i dokładności diagnostyki cefalometrycznej wad w wymiarze strzałkowym.
2. Ocena wpływu różnych czynników na ryzyko resorpcji siekaczy górnych w wyniku kontaktu z blaszką kanału przysiecznego
3. Ocena biomechaniki retrakcji zębów górnych w aspekcie ryzyka wystąpienia resorpcji korzeni zębów siecznych oraz zmiany objętości kości wyrostka zębodołowego szczęki.

Material i metody:

Rozprawę doktorską stanowi cykl 7 publikacji o łącznym IF=25; MNiSW= 800 pkt. Jestem pierwszym autorem w 5 artykułach (artykuły nr 3, 4, 5, 6, 7), a drugim autorem w 2 artykułach (praca nr 1 i 2). Opublikowałam, w ramach cyklu: 4 przeglądy systematyczne (odpowiednio prace 1, 3, 4, 6) oraz 3 prace oryginalne (artykuły 2, 5 i 7).

W ramach cyklu na podstawie przeglądu systematycznego 1451 artykułów (praca 1) dokonałam analizy dostępnej wiedzy na temat dokładności różnych metod diagnostyki wad strzałkowych. Określiłam, na podstawie dostępnej wiedzy, skuteczność różnych pomiarów cefalometrycznych służących do określania pozycji podstaw szczęki i żuchwy w wymiarze wertykalnym i strzałkowym. Wykazałam, że diagnostyka ortodontyczna przy użyciu dotychczas stosowanych wskaźników antropometrycznych została wzbogacona o nowe kąty Tau, Yen, SAR, W, DW, Pi i analizę liniową Pi oceniające relacje sagitalne podstaw szczęki i żuchwy i wzbogacające złoty standard analizy w postaci kąta ANB. Określiłam również możliwość zastosowania nowych kąta R, płaszczyzny zewnątrzustnej KR oraz płaszczyzny górnej granicy łuku jarzmowego do oceny relacji wertykalnych. Na bazie dostępnej literatury wykazałam, że

dotychczas używane w diagnostyce cefalometrycznej wskaźniki pomiarowe dla oceny relacji sagitalnej i wertykalnej utrzymują swoje zalety wobec umiarkowanych i słabych dowodów na jakość nowych wskaźników do ich oceny.

W pracy oryginalnej dokonałam samodzielnej weryfikacji zakresu, zależnego od lekarza, błędu pomiaru w dostępnych metodach analizy cefalometrycznej (praca 2: grupa badana 29 ortodontów). Zbadałam wiarygodność dwóch różnych metod pomiarów cefalometrycznych służących określaniu strzałkowej pozycji szczęki i żuchwy. Wykazałam, że uzyskane wyniki po zastosowaniu narzędzi statystycznych wskazują, że dyspersja poziomych współrzędnych punktów determinujących kąt ANB jest mniejsza niż w przypadku kąta tau, więc wartości kąta ANB cechują się mniejszym błędem pomiarowym niż wartości kąta tau. Wykazałam również po zastosowaniu współczynnika Kappa Cohena że kąt ANB nadal pozostaje podstawowym parametrem do diagnozowania szkieletowych zaburzeń strzałkowych, a upowszechnienie kąta tau wymaga wcześniejszego edukowania ortodontów.

W dwóch kolejnych przeglądach systematycznych zbadałam zakres dostępnej wiedzy na temat czynników mogących wpływać na biomechanikę retrakcji siekaczy szczęki (praca 3: 3175 artykułów, praca 4: 1401 artykułów). W pracy 3 dokonałam analizy dostępnej wiedzy dotyczącej metod kontrolowania pozycji siekaczy, podczas ich retrakcji w toku leczenia kamuflującego wad klasy II. Wykazałam, że dwustronna koryktomia oraz zastosowanie miniimplantów do retrakcji en masse są najlepszymi i skutecznymi metodami kontroli toru podczas retrakcji siekaczy w leczeniu ortodontycznym. W pracy 4 zbadałam zakres dostępnej wiedzy w zakresie charakterystyki remodelingu kości wyrostka zębodołowego w czasie retrakcji siekaczy szczęki. Analiza dostępnych publikacji wykazała, że w wyniku retrakcji siekaczy następuje znaczna utrata kości, co zmniejsza odległość między powierzchnią kości a powierzchnią korzenia od strony podniebiennej.

W kolejnej pracy oryginalnej (praca 5) dokonałam analizy biomechaniki retrakcji zębów szczęki w przypadkach ekstrakcyjnych i nieekstrakcyjnych za pomocą nowatorskiej metody nielinearnej analizy metodą elementów skończonych. W tej pracy określiłam wartość sił retrakcyjnych mogących skutkować przekroczeniem progu naprężeń optymalnych w więzadłach ozębnej. Przedstawiłam analizę naprężeń w ozębnej wykonaną metodą elementów skończonych, na nowatorskim, nieliniarnym modelu szczęki, w trakcie retrakcji zębów górnych. W badaniu jako zmienne badane uwzględniono retrakcję en masse segmentu zębów górnych przednich do miniimplantu (TISAD) umieszczonego w okolicy pomiędzy drugim zębem przedtrzonowym a pierwszym trzonowym oraz dystalizację całego łuku również do TISAD przeprowadzoną na łuku 0.017*0.025 SS w zamkach slotu 0.018, z uwzględnieniem różnych wartości sił i wysokości haczyków wpływających na wektor zastosowanej siły. Wykazałam, że optymalnie łuki

0,017*0,025 SS w zamkach MBT 0,018 zapewniają doskonałą kontrolę toru, prowadząc do precyzyjnego osiowego przemieszczenia zębów, przy zastosowaniu optymalnych sił 180-200g/stronę nie ma ryzyka resorpcji wierzchołka korzenia.

Na podstawie dostępnej wiedzy, poprzez przegląd systematyczny 1862 artykułów (praca 6) określiłam ryzyko resorpcji siekaczy szczęki, w trakcie ich retrakcji, w związku z kontaktem z blaszką zbitą kanału przysiecznego. Określiłam obecny stan wiedzy na temat wpływu morfologii kanału przysiecznego na możliwość występowania resorpcji korzeni siekaczy górnych w trakcie ich retrakcji w toku leczenia kamuflującego wad klasy II. Wykazałam, że kontakt korzeni siekaczy z kanałem przysiecznym zwiększa ryzyko resorpcji tych korzeni.

Na tej podstawie zaplanowałam badanie oryginalne, opublikowane jako praca 7, w której dokonałam analizy badań CBCT 67 pacjentów. Dokonałam klasyfikacji morfologii kanału przysiecznego pacjentów, w zależności od wieku i płci. Na tej podstawie stworzyłam wykaz zaleceń dotyczących unikania ryzyka resorpcji korzeni siekaczy górnych w trakcie ich retrakcji, w związku z kontaktem ze ścianami kanału przysiecznego. Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały różną szerokość kanału siecznego w zależności od płci.

Wyniki

W publikacji 1 na podstawie dostępnej literatury usystematyzowano dostępną wiedzę dotyczącą skuteczność różnych pomiarów cefalometrycznych służących do określania pozycji podstaw szczęki i żuchwy w wymiarze wertykalnym i sagitalnym. Wykazano, że diagnostyka ortodontyczna przy użyciu dotychczas stosowanych wskaźników antropometrycznych została wzbogacona o nowe kąty Tau, Yen, SAR, W, DW, Pi i analiza liniowa Pi oceniające relacje sagitalne podstaw szczęki i żuchwy wzbogacające złoty standard analizy w postaci kąta ANB. Określono również możliwość zastosowania nowych pomiarów: kąta R, płaszczyzny zewnętrznej KR oraz płaszczyzny górnej granicy łuku jarzmowego do oceny relacji wertykalnych. Na bazie dostępnej literatury wykazano, że dotychczas używane w diagnostyce cefalometrycznej wskaźniki pomiarowe dla oceny relacji sagitalnej i wertykalnej utrzymują swoje zalety wobec umiarkowanych i słabych dowodów na jakość nowych wskaźników do ich oceny.

W pracy oryginalnej nr 2, dotyczącej porównania wiarygodności i powtarzalności pomiarów cefalometrycznych odnoszących się do dyskrepancji sagitalnej porównujących pomiary kąta ANB i kąta Tau uzyskano następujące wyniki:

Kąt ANB. Najwyższy współczynnik korelacji Pearsona stwierdzono w przypadku współrzędnych Ax i Ay. Błąd Dahlberga wahał się od 0,265 do 0,665, a współczynniki

korelacji międzyklasowej i wewnątrzklasowej (ICC) mieściły się w przedziale od 0,841 do 1,000, wskazując na bardzo dużą zgodność pomiarów badaczy. Błąd powtarzalności (BP), błąd odtwarzalności wśród różnych lekarzy (BO), zmienność indywidualna pacjenta (ZI) oraz łączny błąd powtarzalności i odtwarzalności (R&R) wyniosły, odpowiednio: 1,61%, 0,92%, 97,47% oraz 2,53%.

Kąt tau. Najwyższy współczynnik korelacji Pearsona stwierdzono w przypadku współrzędnych poziomych Tx i Mx. Błąd Dahlberga wahał się od 0,891 do 1,639, a wartości ICC mieściły się w przedziale od 0,147 do 0,624, wskazując na słabą zgodność pomiarów badaczy. Wartości BP, BO, Zi oraz R&R wyniosły, odpowiednio: 4,30%, 3,94%, 91,76% oraz 8,24%.

Prawie cała zmienność wyników pomiarów kąta ANB i tau wynikała z wariacji międzygrupowej (zmienności indywidualnej pacjenta). Niska wartość R&R (poniżej 10%) oznacza, że oba kąty są dobrym parametrami diagnostycznymi wad strzałkowych

Ortodonci biorący udział w badaniu znacznie dokładniej mierzyli kąt ANB niż kąt tau: błąd Dahlberga i wartość R&R były około trzy razy większe, a wartość ICC – trzy i półkrotnie mniejsza w przypadku pomiarów kąta tau. Wyniki te wskazują, że dyspersja poziomych współrzędnych punktów determinujących kąt ANB jest mniejsza niż w przypadku kąta tau, więc wartości kąta ANB cechują się mniejszym błędem pomiarowym niż wartości kąta tau. Wartość kappa Cohena, czyli współczynnika rzetelności zastosowanego do oceny spójności ortodontów w kwestii ustalania klasy szkieletowej wyniosła 0,778 w przypadku kąta ANB i 0,722 w przypadku kąta tau, a analiza wyniku dowiodła statystycznej istotności różnicy ($p < 0,001$). Oznacza to, że kąt ANB nadal pozostaje podstawowym parametrem do diagnozowania szkieletowych zaburzeń strzałkowych, a upowszechnienie kąta tau wymaga wcześniejszego edukowania ortodontów.

W publikacji 3 we wszystkich badaniach podczas ruchu retrakcji obserwowano przechylenie siekaczy, czyli występował przedśionkowy torok korzenia zęba. W grupach leczonych średnia zmiana nachylenia policzkowo-podniebiennego korzeni siekaczy wyniosła 10,46. Biorąc pod uwagę wszystkie badania, średnia różnica w nachyleniu górnych siekaczy pomiędzy grupą kontrolną i leczoną wyniosła 2,46°, co było statystycznie istotne ($p = 0,0003$). Stosowanie kortykotomii podczas cofania zębów przednich znacznie zmniejsza nachylenie siekaczy szczęki, a kortykotomia może mieć znaczenie w kontroli nachylenia korzeni, tj. nacięcia należy wykonywać zarówno po stronie przedśionkowej, jak i podniebiennej. Stosowanie TISAD podczas retrakcji znacząco zmniejsza także przechylenie siekaczy szczęki. Przy cofaniu zębów przednich korzystniejsze jest zastosowanie mechaniki przedśionkowej niż językowej. Retrakcja masowa za pomocą miniimplantów i łuków po stronie przedśionkowej skutkuje zmniejszeniem nachylenia siekaczy szczęki w porównaniu z takim samym masowym ruchem z dostępu językowego i miniimplantami umieszczonymi na podniebieniu. Należy wspomnieć o zastosowaniu protokołów postępowania takich jak łuk intruzyjny czy system

PASS podczas retrakcji siekaczy. Zastosowanie wyciągów klasy I skutkuje mniejszym nachyleniem siekaczy podczas retrakcji w porównaniu z zastosowaniem łańcuszka elastycznego.

W publikacji 4 po retrakcji siekaczy obserwuje się istotną statystycznie zmianę grubości kości. Po stronie podniebiennej obserwuje się znaczny ubytek kości. Zaobserwowana zmiana może zależeć zarówno od stopnia przesunięcia siekaczy, jak i zmiany ich nachylenia, a co za tym idzie, zmiany położenia wierzchołków korzeni. Zmiana ta jest znacznie większa u dorosłych niż u dorastającej młodzieży. Dodatkowo tempo retrakcji może skutkować większą utratą kości, ponieważ procesy naprawy mogą nie nadążać za procesami resorpcji. Zmiany w kościach strony wargowej budzą kontrowersje, gdyż wykazują zarówno zyski, jak i straty.

W pracy oryginalnej 5 podczas retrakcji en masse w spektrum przyłożonych sił od 50 g do 300 g wartości ciśnienia hydrostatycznego σ_h dla całego łuku zębowego wahają się od 0,37 kPa do 2,5 kPa. Warto zauważyć, że wartości ciśnienia σ_h wykazują liniową korelację ze wzrostem przyłożonej siły. Jednakże obserwuje się marginalne różnice w wartościach nacisku σ_h odpowiadające różnym wysokościami haczyków dla danej wielkości siły, które są nieistotne klinicznie. Warto zauważyć, że we wszystkich opisanych scenariuszach najniższy nacisk σ_h obserwuje się dla wysokości haka 6 mm, natomiast najwyższy dla wysokości haka 2 mm. Ciśnienie σ_h wywierane w ozębnej siekaczy centralnych waha się od 0,23 kPa do 1,54 kPa i wykazuje liniową zależność od przyłożonej siły. W odróżnieniu od całego łuku zębowego, minimalne wartości ciśnienia σ_h obserwuje się przy najniższej wysokości haka wynoszącej 2 mm, stopniowo narastając wraz ze wzrostem wysokości haka. We wszystkich przypadkach wartości nacisku σ_h wywieranego na siekacze centralne stanowią około 55% całkowitych wartości ciśnienia obserwowanych w obrębie przyzębia całego łuku zębowego. Ciśnienie σ_h w ozębnej siekaczy bocznych stanowi około 45% ciśnienia łuku pełnego i waha się od 0,18 kPa do 1,14 kPa przy rozkładzie liniowym. W odróżnieniu od całego łuku i siekaczy centralnych, najniższe wartości odnotowuje się przy najwyższej wysokości haka wynoszącej 10 mm i zwiększają się wraz ze zmniejszaniem się wysokości haka. W przypadku kłów wartości nacisków σ_h są największe i stanowią około 75% wartości całego ciśnienia w PDL pełnego łuku. Jego wartości wahają się od 0,28 do 1,83 kPa. Zależności są równoważne dla siekaczy bocznych. Wartość krytyczna 4,7 kPa zostaje przekroczona dla pełnego łuku zębowego przy działaniu siły 642 g i koncentruje się na górnych korzeniach pierwszych zębów trzonowych, osiągając jednocześnie w odcinku przednim 2,93 kPa, które kumuluje się głównie w prawym środkowym siekacz w okolicy dolnych połówek korzeni podniebionych

W publikacji 6 we wszystkich artykułach skrócenie korzeni siekaczy górnych po retrakcji było statystycznie większe w przypadku kontaktu z kanałem przysiecznym. Aktualne publikacje zawarte w przeglądzie systematycznym wyraźnie wskazują na możliwe większe ryzyko resorpcji korzeni siekaczy podczas retrakcji oraz bocznego przemieszczenia lub intruzji po kontakcie z płytką korową kanału przysiecznego.

W pracy oryginalnej 7 stwierdzono wyraźną zależność pomiędzy szerokością kanału a jego długością AP. W większości grup wiekowych zwiększonej długości kanału towarzyszyła zwiększona szerokość na wszystkich poziomach (L1, L2 i L3). Ze względu na znacznie większą długość kanału na poziomie L1, ryzyko kontaktu szyjki z kanałem korzeniowym było wyższe u mężczyzn niż u kobiet. Badania u kobiet wykazały, że rozbieżność korzenia siekacza zwiększa się wraz ze wzrostem szerokości kanału, co wydaje się logiczne. Dla mężczyzn w wieku od 13 do 30 lat korelacja ta była ujemna, tj. im szerszy kanał, tym korzenie są bardziej równoległe lub zbieżne. Analiza nachylenia siekaczy i nachylenia kanału siecznego wykazała bardzo silną zależność, szczególnie w grupie wiekowej od 13 do 20 lat. U kobiet nachylenie kanału zwiększało się wraz ze wzrostem tylnego ruchu siekaczy, natomiast u mężczyzn sytuacja była odwrotna. Analiza szerokości kanału i odległości pomiędzy najbardziej mezialnym punktem korzenia a styczną przechodzącą przez najbardziej wysunięty do przodu punkt kanału siecznego wykazała ujemną korelację we wszystkich grupach wiekowych mężczyzn. Im szerszy kanał, tym mniejsza odległość między korzeniami a kanałem.

Wnioski

1. Analiza porównawcza kąta ANB i kąta Tau w ocenie dyskrepancji sagitalnej potwierdziła, że kąt ANB nadal pozostaje podstawowym parametrem do diagnozowania szkieletowych zaburzeń strzałkowych, a upowszechnienie kąta tau wymaga wcześniejszego edukowania ortodontów. Powtarzalność oznaczania punktów pomiarowych oraz ocena indywidualnej koperty kostnej ma istotne znaczenie w aspekcie prawidłowej diagnostyki i doboru metody leczenia. Błąd ludzki może wpłynąć na sam proces pomiaru oraz na jego interpretację. W celu największej wiarygodności należy zidentyfikować najbardziej stabilne i powtarzalne punkty antropometryczne, niezależnie od kierunku wzrostu i zastosowanego leczenia ortodontycznego. Warto jednak pamiętać, że żadna metoda nie jest całkowicie wolna od błędów, a w niektórych sytuacjach uzyskane wyniki

mogą wymagać walidacji metodą alternatywną. Badania skupiające się na analizie cefalometrycznej zazwyczaj koncentrują się na jednej grupie etnicznej, co może prowadzić do błędnej interpretacji wyników. Zaś powtarzalność, oceniająca stopień w jakim pomiary wykonywane przez tego samego operatora pokrywają się, i odtwarzalność, oceniająca pomiary wykonywane przez różnych operatorów, mają kluczowe znaczenie dla dokładnej oceny zależności pomiędzy podstawą szczęki, wyrostkami zębodołowymi i zębami w zarówno w wymiarze strzałkowym, jak i pionowym. W przypadku nowego nieznanego i niewykonywanego dotychczas pomiaru istnieje wysokie ryzyko błędu ludzkiego. Błąd Dahlberga $p > 0,1$ świadczy o konieczności nauczania ortodontów oznaczania punktów antropometrycznych wchodzących w skład pomiaru.

2. Kontakt korzeni siekaczy z kanałem przysiecznym zwiększa ryzyko resorpcji tych korzeni. W diagnostyce ortodontycznej za pomocą obrazowania 3D należy uwzględnić anatomię układu IC, a ryzyko powikłań resorpcyjnych można zmniejszyć poprzez odpowiednie zaplanowanie zakresu przemieszczenia i toru korzeni siekaczy oraz ewentualne zastosowanie zamków siecznych z wbudowanym większym kątem. Istnieje zróżnicowanie szerokości kanału siecznego w zależności od płci. Długość przednio-tylna kanału w dużej mierze zależy od jego szerokości. Nachylenie kanału jest zależne od nachylenia siekaczy w różnych grupach wiekowych. Szerokość kanału zależy od zależności od płci położenia zbieżnego lub rozbieżnego siekaczy. Błyszcząca zbita, która otacza kanał przysieczny jako pierwsza może przeszkadzać siekaczom podczas retrakcji, a także powodować ich resorpcję. Nasilone wychylenie siekaczy należy leczyć jak najwcześniej w okresie wzrostu młodzieńczego, kiedy zdolność organizmu do przebudowy jest duża i gdy wraz z kością następuje ruch ortodontyczny. W tym wieku kanał przysieczny, którego nachylenie zależy od nachylenia siekaczy, również może mieć większą zdolność do przebudowy. Znajomość anatomii kanału siecznego i zastosowanie obrazowania 3D u pacjentów wysokiego ryzyka może zapobiec resorpcji korzenia siekacza, uwzględniając indywidualne warunki anatomiczne pacjenta podczas planowania ortodontycznego przesuwania zębów.
3. Dwustronna korytkotomia oraz zastosowanie miniimplantów do retrakcji en masse są najlepszymi i skutecznymi metodami kontroli toru podczas retrakcji siekaczy w

leczeniu ortodontycznym. Zastosowanie zarówno mechaniki przedSIONKOWEJ, jak i dodatkowej rurki w zamkach umieszczonych na zębach trzonowych, co pozwala uzyskać efekt podobny do łuku intruzyjnego, badano w protokołach o niejasnym ryzyku błędu systematycznego, w których różne czynniki mogły mieć wpływ na wiarygodność wyników. Wiek pacjenta wydaje się nie mieć znaczenia dla kontroli torcu. W wyniku retrakcji siekaczy następuje znaczna utrata kości, co zmniejsza odległość między powierzchnią kości a powierzchnią korzenia od strony podniebiennej. Wielkość tej zmiany może być różna, w zależności od stopnia przemieszczenia siekaczy i zmian w ich nachyleniu, co wpływa na położenie wierzchołków korzeni. Zmiana ta jest znacznie większa u dorosłych niż u dorastającej młodzieży. Uzasadnieniem tego twierdzenia jest powszechnie znane zjawisko spadku aktywności komórkowej wraz z wiekiem. Zmniejszenie szybkości i intensywności zmian komórkowych może wyjaśniać zmniejszoną zdolność do przebudowy wraz ze wzrostem wieku pacjenta. Ruch ortodontyczny u dorosłych odbywa się poprzez kość i najczęściej kość nie dostosowuje się do nowego położenia zębów. Blaszkę korową podniebienną należy traktować jako nieuszkodzoną ścianę ograniczającą zakres planowanego ruchu siekaczy.

Łuki 0,017*0,025 SS w zamkach MBT 0,018 zapewniają doskonałą kontrolę torcu, prowadząc do precyzyjnego osiowego przemieszczenia zębów, przy zastosowaniu optymalnych sił 180-200g/stronę nie ma ryzyka resorpcji wierzchołka korzenia dzięki równomiernemu rozłożeniu lekkiego i średniego ciśnienia hydrostatycznego σ_h w więzadle przyzębia (PDL). Przyłożenie potrójnych sił ortodontycznych (600-640 g/stronę) może zainicjować proces resorpcji poprzez zamknięcie naczyń włosowatych, natomiast próba wyrównania łuku zębowego przy znacznej rozbieżności zębowo-wyrostkowej może skutkować fenestracją płytki przedSIONKOWEJ wyrostka zębodołowego. Zaleca się stosowanie wysokiej jakości modeli nieliniowych do analizy elementów skończonych (FEA), aby zapewnić wiarygodne, porównywalne i realistyczne symulacje bardzo przypominające warunki w jamie ustnej.

4. Abstract

Introduction

Class II defects are prevalent in Caucasian populations of northern Europe, Central and Eastern Europe, as well as in populations of Indian origin. In Poland, class II malocclusions are also the most common.

The diagnosis of class II defects and the differentiation of skeletal and dental defects are conducted through extraoral and intraoral examinations, model analysis, and radiological examination in the form of cephalometric analysis.

During extraoral examination, characteristic features indicating a class II skeletal defect include a receding chin, a deepened submental furrow, and a retracted lower lip. Additionally, anterior-posterior disorders often coincide with vertical disorders. Intraorally and during model analysis, full or partial Angle class II malocclusions can be observed. Depending on the type of defect, canine class I or II may be present, and the upper incisors may be tipped, tilted, or have a normal inclination. Insufficient or excessive jaw growth typically results in bite irregularities. Cephalometric analysis enables the diagnosis of the defect in the sagittal dimension and its basis, considering measurements such as SNA, SNB, and ANB angles, to determine the underlying cause of the disorder. Identifying the primary factor contributing to the defect, whether it be a posterior position of the mandible and/or the alveolar process with the lower teeth, or an anterior position of the maxilla and/or its alveolar process with the teeth, guides the selection of appropriate therapy. The ANB angle is commonly utilized, with an increased angle indicating a posterior relationship of the jaws.

Treatment of class II defects is contingent upon both the cause and the patient's age. Functional treatment is typically administered during growth stages, aiming to improve skeletal relations. Conversely, adult patients may undergo orthodontic and surgical treatment or camouflage of the defect. Camouflaging treatment of class II/1 defects often involves the extraction of upper premolars and retraction of anterior teeth segments, akin to treatments for other defects such as dentoalveolar protrusion or preoperative decompensation of class III defects. The final outcome often encompasses changes in incisor inclination and sagittal position, along with potential complications such as root resorption of these teeth and alterations in the volume of the maxillary alveolar process, as well as dehiscence.

Orthodontic force application induces stress in the periodontal ligament (PDL), surpassing blood pressure in capillary arterioles, leading to hyalinization, ischemia, and

necrosis of adjacent tissues, root cement, and alveolar bone. Cells adjacent to the necrotic area may initiate root resorption. Thus, a correlation exists between excessive orthodontic force, persistent stress in the PDL, impaired blood flow, and orthodontically induced inflammatory root resorption (OIIRR). With the advent of widespread availability of CBCT examination and the utilization of TISAD, meticulous analysis of individual patient anatomy is achievable, facilitating retraction exceeding 7 mm. However, retraction employment often entails longer treatment duration, necessitates greater forces, and involves tooth displacement over longer distances compared to alternative treatment strategies. These features may contribute to orthodontically induced inflammatory root resorption (OIIRR), one of the most common iatrogenic complications during orthodontic treatment. Many factors contribute to this phenomenon. In recent years, as a result of the development of 3D imaging, attention has been paid to another important element, which is the incisive canal and its relationship with the roots of the upper incisors.

The incisive canal, also called the nasopalatine canal, is a connection between the nasal cavity and the oral cavity, containing vessels and nerves. This is an often overlooked element in the orthodontic treatment planning process and is surrounded by a relatively thick cortical plate. Assessment and knowledge of the anatomical features of the incisal canal, its structure, size, and changes in inclination depending on age, gender, as well as parameters determining the position of the maxillary incisors can effectively prevent serious complications of orthodontic treatment, such as root resorption.

In clinical practice, two types of orthodontic bracket slots are used in the treatment with thin-arch fixed appliances: 0.018 and 0.022 inches. Depending on the slot used, appropriate sizes of steel arches are selected, on which the desired orthodontic movement is carried out. Since the goal of orthodontic treatment is to obtain optimal tooth movement and improve the patient's profile, with minimal side effects, in cases of severe defects, it is additionally necessary to use orthodontic mini-implants as skeletal anchorage to obtain maximum retraction of the incisors.

As a result of the applied orthodontic force, stresses appear in the periodontal ligament (PDL), which cause bone resorption on the pressure side and the accumulation of new bone tissue on the tension side. Stresses that exceed the blood pressure in the capillary arterioles cause hyalinization associated with ischemia and necrosis of tissues, adjacent root cement, and alveolar bone. Cells close to the necrotic zone can initiate root resorption. Therefore, a relationship was found between the use of excessive orthodontic force, causing persistently

high stress in the PDL and inhibition of blood flow, and orthodontically induced inflammatory tooth root resorption (OIIRR).

The above considerations show that to achieve optimal treatment results, precise diagnostics, optimal treatment biomechanics, and consideration of individual patient anatomy are necessary to avoid iatrogenic complications during orthodontic treatment.

Objective of the work:

1. Determining the value and accuracy of cephalometric diagnosis of defects in the sagittal dimension.
2. Assessment of the impact of various factors on the risk of resorption of the upper incisors as a result of contact with the lamina of the incisive canal.
3. Assessment of the biomechanics of upper tooth retraction in terms of the risk of resorption of the roots of incisors and changes in the volume of the maxillary alveolar bone.

Materials and Methods:

The doctoral dissertation comprises a series of seven publications with a cumulative Impact Factor (IF) of 25 and 800 points awarded by the Ministry of Science and Higher Education. I am the first author on five of these articles (articles 3, 4, 5, 6, and 7) and the second author on two articles (papers 1 and 2). The series includes four systematic reviews (papers 1, 3, 4, and 6) and three original research papers (articles 2, 5, and 7).

In this series, I conducted a systematic review of 1,451 articles (paper 1) to analyze the current knowledge on the accuracy of various methods for diagnosing sagittal defects. Utilizing this knowledge, I assessed the effectiveness of various cephalometric measurements in determining the positions of the maxilla and mandible bases in both the vertical and sagittal dimensions. My research demonstrated that orthodontic diagnostics, which traditionally relied on anthropometric indices, could be enhanced with new angles such as Tau, Yen, SAR, W, DW, Pi, and linear analysis Pi. These new measures supplement the gold standard ANB angle in assessing the sagittal relations of the maxillary and mandibular bases. Additionally, I explored the potential use of new angles R, the extraoral plane KR, and the plane of the upper

border of the zygomatic arch to evaluate vertical relationships. My findings indicated that the traditional measurement indices used in cephalometric diagnostics for sagittal and vertical relationships maintain their advantages, whereas the quality of evidence for the new indices is moderate to weak.

In my original research, I independently verified the measurement error scope in existing cephalometric analysis methods, depending on the orthodontist (paper 2: study group of 29 orthodontists). I assessed the reliability of two different cephalometric measurement methods for determining the sagittal positions of the maxilla and mandible. Statistical analysis revealed that the dispersion of horizontal coordinates for points determining the ANB angle is smaller than that for the Tau angle, indicating that the ANB angle has a smaller measurement error. Additionally, using Cohen's Kappa coefficient, I demonstrated that the ANB angle remains the primary parameter for diagnosing skeletal sagittal disorders. The adoption of the Tau angle in clinical practice requires prior education and training of orthodontists.

In two subsequent systematic reviews, I examined the scope of available knowledge on factors that may influence the biomechanics of maxillary incisor retraction (paper 3: 3,175 articles; paper 4: 1,401 articles). In paper 3, I analyzed the existing knowledge regarding methods of controlling the position of the incisors during their retraction in the camouflaging treatment of Class II defects. I demonstrated that bilateral corticotomy and the use of mini-implants for en-masse retraction are the most effective methods of torque control during incisor retraction in orthodontic treatment. In paper 4, I explored the characteristics of alveolar bone remodeling during maxillary incisor retraction. The analysis of the available literature revealed that significant bone loss occurs as a result of incisor retraction, reducing the distance between the bone surface and the root surface on the palatal side.

In another original work (paper 5), I analyzed the biomechanics of maxillary tooth retraction in both extraction and non-extraction cases using an innovative non-linear finite element analysis method. In this study, I determined the retraction force values that may exceed the optimal stress threshold in the periodontal ligament. I conducted a stress analysis in the periodontium using the finite element method on an innovative, non-linear model of the jaw during upper tooth retraction. The study variables included en masse retraction of a segment of the upper front teeth to a mini-implant (TISAD) placed between the second premolar and the first molar, and distalization of the entire arch also to TISAD, performed on a 0.017×0.025 SS

archwire in 0.018 slot brackets. Various force values and hook heights influencing the applied force vector were considered. I showed that optimal 0.017×0.025 SS archwires in MBT 0.018 brackets provide excellent torque control, leading to precise axial displacement of the teeth. With the use of optimal forces of 180-200g per side, there is no risk of root apex resorption.

Based on a systematic review of 1,862 articles (paper 6), I assessed the risk of resorption of the maxillary incisors during retraction due to contact with the compact lamina of the incisive canal. I evaluated the current state of knowledge on the influence of the morphology of the incisive canal on the risk of resorption of the roots of the upper incisors during retraction in the camouflaging treatment of Class II defects. I found that contact of the incisor roots with the incisive canal increases the risk of root resorption.

Subsequently, I planned an original study, published as paper 7, in which I analyzed CBCT examinations of 67 patients. I classified the morphology of the incisive canal according to age and gender. Based on these findings, I developed a list of recommendations to avoid the risk of resorption of the roots of the upper incisors during retraction due to contact with the walls of the incisive canal. My research demonstrated varying widths of the incisive canal depending on gender.

Results

Publication 1 systematized the available knowledge regarding the effectiveness of various cephalometric measurements used to determine the position of the maxillary and mandibular bases in the vertical and sagittal dimensions. It was demonstrated that orthodontic diagnostics, previously reliant on traditional anthropometric indices, have been enhanced with new angles such as Tau, Yen, SAR, W, DW, and Pi, along with linear Pi analysis for assessing sagittal relationships of the maxillary and mandibular bases. These additions enrich the gold standard of analysis, which includes the ANB angle. The study also identified the potential use of new measurements—the R angle, the extraoral KR plane, and the plane of the upper border of the zygomatic arch—for assessing vertical relations. Despite moderate and weak evidence supporting the quality of these new indices, traditional measurement indices in cephalometric diagnostics for sagittal and vertical relationship assessment maintain their advantages.

Original Paper 2 focused on comparing the reliability and repeatability of cephalometric measurements related to sagittal discrepancy by comparing the ANB angle and the Tau angle. The following results were obtained:

ANB Angle: The highest Pearson correlation coefficient was found for the Ax and Ay coordinates. The Dahlberg error ranged from 0.265 to 0.665, and the interclass and intraclass correlation coefficients (ICC) ranged from 0.841 to 1.000, indicating very high agreement between researchers' measurements. The repeatability error (BP), inter-physician reproducibility error (BO), individual patient variability (ZI), and total repeatability and reproducibility error (R&R) were 1.61%, 0.92%, 97.47%, and 2.53%, respectively.

Tau Angle: The highest Pearson correlation coefficient was found for the horizontal Tx and Mx coordinates. The Dahlberg error ranged from 0.891 to 1.639, and the ICC values ranged from 0.147 to 0.624, indicating poor agreement between researchers' measurements. The BP, BO, ZI, and R&R values were 4.30%, 3.94%, 91.76%, and 8.24%, respectively.

Almost all of the variability in ANB and Tau measurements was due to between-group variance (individual patient variability). A low R&R value (below 10%) indicates that both angles are good diagnostic parameters for sagittal discrepancies. The orthodontists in the study measured the ANB angle much more accurately than the Tau angle: the Dahlberg error and R&R were approximately three times greater, and the ICC was three and a half times lower for Tau angle measurements. These results indicate that the dispersion of the horizontal coordinates of the points determining the ANB angle is smaller than that for the Tau angle, resulting in a smaller measurement error for the ANB angle. The value of Cohen's kappa, the reliability coefficient used to assess the consistency of orthodontists in determining the skeletal class, was 0.778 for the ANB angle and 0.722 for the Tau angle. The analysis of these results proved the statistical significance of the difference ($p < 0.001$). This means that the ANB angle remains the primary parameter for diagnosing skeletal sagittal disorders, and the popularization of the Tau angle requires prior education of orthodontists.

In Publication 3, all tests demonstrated tilting of the incisors during retraction movements, specifically showing vestibular torque of the tooth root. In the treated groups, the average change in the buccopalatal inclination of the incisor roots was 10.46° . Across all studies, the mean difference in the inclination of the upper incisors between the control and treatment groups was 2.46° , which was statistically significant ($p = 0.0003$). The use of corticotomy significantly reduces the inclination of the maxillary incisors during retraction,

suggesting that corticotomy may be crucial for controlling root inclination; this involves making incisions on both the vestibular and palatal sides. Additionally, the use of temporary anchorage devices (TISAD) during retraction significantly reduces the tilt of the maxillary incisors. When retracting anterior teeth, vestibular mechanics are more advantageous than lingual mechanics. Mass retraction using mini-implants and arches on the vestibular side results in less inclination of the maxillary incisors compared to using the lingual approach with mini-implants placed on the palate. Notably, treatment protocols such as the intrusion arch or the PASS system during incisor retraction, as well as using Class I tractions, result in less inclination compared to the use of an elastic chain.

Publication 4 reports a statistically significant change in bone thickness following incisor retraction, with significant bone loss observed on the palatal side. This change may be influenced by both the degree of incisor displacement and the change in their inclination, which affects the position of the root tips. The change is significantly greater in adults compared to adolescents. Additionally, the rate of retraction can lead to greater bone loss, as reparative processes may not keep pace with resorption. Changes in the bone on the labial side are controversial, with observations of both gains and losses.

In **Original Work 5**, during en masse retraction with applied forces ranging from 50 g to 300 g, hydrostatic pressure (σ_h) values for the entire dental arch ranged from 0.37 kPa to 2.5 kPa, demonstrating a linear correlation with the increase in applied force. Differences in σ_h values corresponding to different hook heights for a given force magnitude were clinically insignificant. The lowest pressure σ_h was observed at a hook height of 6 mm, while the highest was at 2 mm. The σ_h pressure in the periodontium of the central incisors ranged from 0.23 kPa to 1.54 kPa, also showing a linear dependence on the applied force. Unlike the entire dental arch, the minimum σ_h values for the central incisors were observed at the lowest hook height of 2 mm, increasing with greater hook heights. In all cases, the σ_h pressure on the central incisors constituted approximately 55% of the total pressure observed in the periodontium of the entire dental arch. For the lateral incisors, the σ_h pressure was approximately 45% of the full arch pressure, ranging from 0.18 kPa to 1.14 kPa with a linear distribution. The lowest values for the lateral incisors were recorded at the highest hook height of 10 mm, increasing as the hook height decreased. For canines, the σ_h pressure values were the highest, constituting about 75% of the total pressure in the PDL of the full arch, ranging from 0.28 to 1.83 kPa, with relationships similar to those of the lateral incisors. The critical value of 4.7 kPa was exceeded

for a full dental arch with a force of 642 g, concentrating on the upper roots of the first molars, while reaching 2.93 kPa in the anterior section, predominantly in the area of the lower halves of the palatal roots of the right central incisor.

In Publication 6, all articles reported that the shortening of the roots of the upper incisors after retraction was statistically greater when there was contact with the incisive canal. Current publications included in the systematic review clearly indicate a higher risk of incisor root resorption during retraction and lateral displacement or intrusion after contact with the cortical plate of the incisive canal.

In the original work 7, a clear relationship was found between the canal width and its anteroposterior (AP) length. In most age groups, increased canal length was accompanied by increased width at all levels (L1, L2, and L3). Due to the significantly greater length of the canal at the L1 level, the risk of cervical contact with the root canal was higher in men than in women. Studies in women have shown that incisor root divergence increases with increasing canal width, which is logical. For men aged 13 to 30, this correlation was negative; the wider the canal, the more parallel or convergent the roots were. The analysis of the inclination of the incisors and the inclination of the incisive canal showed a very strong relationship, especially in the age group from 13 to 20 years. In women, canal inclination increased with the posterior movement of the incisors, while in men the situation was the opposite. Analysis of the canal width and the distance between the most mesial point of the root and the tangent passing through the most forward point of the incisive canal showed a negative correlation in all age groups of men. The wider the canal, the smaller the distance between the roots and the canal.

Conclusions

1. The comparative analysis of the ANB angle and the Tau angle in the assessment of sagittal discrepancy confirmed that the ANB angle remains the basic parameter for diagnosing skeletal sagittal disorders. The popularization of the Tau angle requires prior education of orthodontists. The repeatability of marking measurement points and the assessment of the individual bone envelope are important for correct diagnosis and selection of treatment methods. Human error may affect the measurement process and its interpretation. For maximum reliability, the most stable and repeatable anthropometric points should be identified, regardless of the direction of

growth and orthodontic treatment used. However, it is important to remember that no method is completely error-free, and in some situations, the results obtained may require validation with an alternative method.

Studies focusing on cephalometric analysis usually focus on one ethnic group, which may lead to misinterpretation of the results. Repeatability, assessing the degree to which measurements performed by the same operator overlap, and reproducibility, assessing measurements performed by different operators, are crucial for accurately assessing the relationship between the jaw base, alveolar ridges, and teeth in both the sagittal and vertical dimensions. In the case of a new, unknown, and previously unperformed measurement, there is a high risk of human error. A Dahlberg error greater than 0.1 indicates the need to teach orthodontists how to mark anthropometric points included in the measurement.

2. Contact between the incisor roots and the incisive canal increases the risk of root resorption. When conducting orthodontic diagnostics using 3D imaging, the anatomy of the incisive canal system should be considered. The risk of resorption complications can be minimized by carefully planning the extent of displacement and torque of the incisor roots and potentially using incisal brackets with a built-in larger angle. The width of the incisive canal varies by gender, with the anteroposterior length of the canal largely dependent on its width. The inclination of the canal correlates with the inclination of the incisors across different age groups. The width of the canal is influenced by the sex-dependent position of convergent or divergent incisors. The lamina compacta surrounding the incisive canal is the first to interfere with the incisors during retraction, potentially causing resorption. Severe inclination of the incisors should be addressed as early as possible during adolescence, a period of high remodeling capacity and orthodontic movement alongside bone growth. At this stage, the incisive canal, whose inclination is affected by the incisors, may also have a greater capacity for reconstruction. Understanding the anatomy of the incisive canal and utilizing 3D imaging in high-risk patients can prevent incisor root resorption by considering individual anatomical conditions when planning orthodontic tooth movements.

3. Bilateral corticotomy and the use of mini-implants for en masse retraction are effective methods for torque control during incisor retraction in orthodontic treatment. The application of vestibular mechanics and an additional tube in molar brackets, providing effects similar to an intrusion archwire, has been examined in studies with potential bias due to various influencing factors. The patient's age does not significantly impact torque control. Significant

bone loss occurs during incisor retraction, reducing the distance between the bone surface and the root surface on the palatal side. The extent of this change varies with the degree of incisor displacement and inclination, affecting the position of the root tips. This change is more pronounced in adults than in adolescents, explained by the decline in cellular activity with age. The decreased rate and intensity of cellular changes in adults may account for the reduced capacity for remodeling as they age. In adults, orthodontic movement occurs through the bone, which often does not adapt to the new tooth positions. The palatine cortical plate should be treated as an undamaged barrier limiting the range of planned incisor movements.

The use of 0.017*0.025 SS archwires in MBT 0.018 brackets provides excellent torque control, leading to precise axial displacement of teeth. When optimal forces of 180-200g/side are applied, there is no risk of root apex resorption due to the even distribution of light and medium hydrostatic pressure (σ_h) in the periodontal ligament (PDL). However, applying triple orthodontic forces (600-640 g/side) may initiate the resorption process by occluding the capillaries, and attempting to align the dental arch with significant dento-alveolar discrepancies may result in fenestration of the vestibular plate of the alveolar process. The use of high-quality nonlinear finite element analysis (FEA) models is recommended to provide reliable, comparable, and realistic simulations that closely resemble oral conditions.