



EWOLUCYJNA ROLA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI W DIAGNOSTYCE I PLANOWANIU LECZENIA ORTODONTYCZNEGO

The evolving role of artificial intelligence
in orthodontic diagnosis and treatment planning



Konstancja Nosowicz¹, Agata Tuczyńska², Patrycja Różak¹, Adam Łuczak¹, Adrianna Gliszczyńska¹,
Nina Szczepańska¹

1. Wojskowa Specjalistyczna Przychodnia Lekarska Samodzielny Publiczny Zakład Opieki Zdrowotnej w Poznaniu, Filia Szylinga, Polska
2. Katedra i Klinika Ortopedii Szczękowej i Ortodontji, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Polska

Konstancja Nosowicz – ID 0009-0000-5080-1509

Agata Tuczyńska – ID 0000-0003-164w8-6765

Patrycja Różak – ID 0009-0004-2643-8817

Adam Łuczak – ID 0009-0004-1848-5437

Adrianna Gliszczyńska – ID 0009-0009-1721-5327

Nina Szczepańska – ID 0009-0003-7448-4466

Streszczenie

Sztuczna inteligencja coraz bardziej rewolucjonizuje dziedzinę ortodontji, zwiększając precyzję diagnostyczną, optymalizując planowanie leczenia i poprawiając wyniki terapeutyczne. Niniejsza praca przeglądowa przedstawia aktualne zastosowania, korzyści, ograniczenia oraz przyszłe perspektywy wykorzystania sztucznej inteligencji w praktyce ortodontycznej. Artykuł ma na celu wyjaśnienie, na podstawie analizy najnowszych osiągnięć technologicznych i zastosowań klinicznych, w jaki sposób sztuczna inteligencja zmienia współczesną ortodontję.

Abstract

Artificial intelligence is increasingly transforming the field of orthodontics by enhancing diagnostic precision, optimising treatment planning, and improving patient outcomes. This review explores current applications, benefits, limitations, and future prospects of artificial intelligence in orthodontic practice. By examining recent technological advancements and clinical implementations, this article aims to provide a comprehensive understanding of how artificial intelligence is reshaping contemporary orthodontics.

Słowa kluczowe: ortodontja; sztuczna inteligencja

Keywords: orthodontics; artificial intelligence

DOI 10.53301/lw/208277

Praca wpłynęła do Redakcji: 10.06.2025

Zaakceptowano do druku: 15.07.2025

Opublikowano: 31.03.2026

Autor do korespondencji:

Konstancja Nosowicz

Wojskowa Specjalistyczna Przychodnia Lekarska
Samodzielny Publiczny Zakład Opieki Zdrowotnej
w Poznaniu, Filia Szylinga

e-mail: konstancjanosowicz@gmail.com

Wstęp

Integracja sztucznej inteligencji (ang. *artificial intelligence*, AI) z opieką zdrowotną to jedno z najważniejszych osiągnięć technologicznych XXI wieku. W różnych specjalizacjach medycznych AI zwiększa dokładność diagnostyczną, usprawnia pracę i umożliwia podejmowanie lepszych decyzji klinicznych [1]. W ortodontji wdrażanie AI zyskuje na popularności ze względu na duże znaczenie obrazowania w tej specjalizacji, analizę wzorców i indywidualne planowanie leczenia [2].

Cyfrowa transformacja dokumentacji ortodontycznej, w tym powszechne zastosowanie tomografii wiązki stożkowej (ang. *cone beam computed tomography*, CBCT), skanów wewnątrzustnych i zdjęć cefalometrycznych, stworzyła korzystne warunki do wprowadzenia i stosowania algorytmów AI.

AI obejmuje szeroki zakres technologii, w tym uczenie maszynowe (ang. *machine learning*, ML), głębokie uczenie (ang. *deep learning*, DL) i konwolucyjne sieci neuronowe

(ang. *convolutional neural network*, CNN), które potrafią analizować duże i złożone zbiory danych w celu identyfikacji wzorców niedostrzegalnych dla klinicystów [2, 3]. Technologie te są wykorzystywane do automatyzacji czasochłonnych zadań, takich jak wyznaczanie obrysów struktur anatomicznych w cefalometrii [4], poprawy dokładności oceny szkieletowej [5] oraz dostarczania informacji wspomagających planowanie leczenia.

Uczenie się sieci neuronowych polega na wieloetapowym procesie optymalizacji, w którym model uczy się na podstawie analizy ogromnych zbiorów danych. W przypadku sieci głębokich każda warstwa modelu przekształca dane w coraz bardziej abstrakcyjne reprezentacje, aż do uzyskania diagnozy. Kluczowym etapem tego procesu jest tzw. faza treningu, w której model dostosowuje swoje parametry w odpowiedzi na popełniane błędy.

W tym kontekście niezwykle istotna jest rola lekarzy specjalistów, którzy nie tylko dostarczają wysokiej jakości dane do treningu (np. ręcznie oznaczane punkty cefalometryczne, opisy przypadków klinicznych), ale również pełnią funkcję walidatorów i recenzentów działania algorytmów. Ekspercka wiedza kliniczna jest niezbędna na każdym etapie tworzenia systemów AI – od przygotowania zbiorów danych po ocenę trafności i użyteczności modeli w praktyce. Lekarze specjaliści przyczyniają się także do identyfikowania ograniczeń modeli, poprawy interpretowalności wyników oraz zapewnienia zgodności narzędzi AI z rzeczywistymi potrzebami klinicznymi [6].

W miarę rozwoju ortodoncji AI oferuje obiecujące możliwości poprawy jakości opieki nad pacjentem, skrócenia czasu wizyt i osiągnięcia lepszych wyników leczenia [1]. Jednak skuteczna integracja z praktyką ortodontyczną wymaga również uwzględnienia wyzwań etycznych, regulacyjnych i praktycznych [7].

Cel pracy

Celem niniejszego artykułu jest omówienie dostępnej literatury dotyczącej ewoluującej roli sztucznej inteligencji w ortodoncji, ze szczególnym uwzględnieniem jej obecnych zastosowań, korzyści, ograniczeń oraz perspektyw dalszego rozwoju.

Ewolucja i podstawowe koncepcje sztucznej inteligencji w ortodoncji

Sztuczna inteligencja w opiece zdrowotnej odnosi się do symulacji ludzkiej inteligencji przez maszyny, a w szczególności przez systemy komputerowe, które potrafią uczyć się na podstawie danych, rozpoznawać wzorce i podejmować decyzje. W ortodoncji AI opiera się głównie na uczeniu maszynowym, które pozwala systemom uczyć się na podstawie doświadczenia bez konieczności programowania, oraz na uczeniu głębokim, wykorzystującym sztuczne sieci neuronowe do modelowania złożonych wzorców w danych. Szczególnie skuteczne w analizie obrazów są konwolucyjne sieci neuronowe, które znajdują szerokie zastosowanie w diagnostyce ortodontycznej opartej na obrazowaniu radiologicznym [2].

Technologie te umożliwiły przejście od ręcznych, czasochłonnych procesów do cyfrowo wspomaganych, zau-

tomatyzowanych systemów. Od przewidywania wad zgryzu po projektowanie indywidualnych aparatów – AI wspiera ortodontów w podejmowaniu bardziej świadomych i precyzyjnych decyzji [2, 3].

Zastosowania w diagnostyce obrazowej

Ortodoncja w dużym stopniu opiera się na technikach obrazowania, takich jak radiogramy cefalometryczne, zdjęcia pantomograficzne oraz CBCT. Sztuczna inteligencja odgrywa kluczową rolę w usprawnieniu analizy tego typu obrazów.

Analiza cefalometryczna jest podstawą diagnostyki ortodontycznej oraz planowania leczenia. Tradycyjnie identyfikacja anatomicznych punktów orientacyjnych na radiogramach cefalometrycznych była procesem manualnym, charakteryzującym się zmiennością wyników zarówno pomiędzy różnymi specjalistami, jak i w przypadku tego samego specjalisty w różnych momentach przeprowadzenia analizy. AI, a szczególnie modele głębokiego uczenia, takie jak konwolucyjne sieci neuronowe, potrafią zautomatyzować ten proces z dużą precyzją i powtarzalnością [4]. Systemy te mogą wykrywać i opisywać punkty orientacyjne szybciej niż eksperci, zwiększając efektywność pracy i powtarzalność wyników diagnostycznych, zachowując przy tym dokładność. Badanie kontrolne wykazało, że AI była o 2,12% lepsza i 95% szybsza niż specjaliści [8].

Poza wykrywaniem punktów orientacyjnych, modele AI mogą również przeprowadzać segmentację, czyli identyfikację i wyodrębnianie określonych struktur anatomicznych, takich jak zęby, szczęki czy drogi oddechowe. Umożliwia to automatyczne wykonywanie pomiarów, wykrywanie anomalii i klasyfikację morfologiczną. Przykładowo, CNN skutecznie stosuje się do segmentacji skanów CBCT oraz wykrywania próchnicy czy resorpcji korzeni, co zwiększa obiektywność i efektywność interpretacji obrazów [9].

Udoskonalanie planowania i monitorowania leczenia

Integracja AI z procesami ortodontycznymi zrewolucjonizowała sposób, w jaki klinicyści planują, prowadzą i nadzorują leczenie. Dzięki wykorzystaniu rozległych zbiorów danych oraz zaawansowanych algorytmów, narzędzia oparte na AI mogą poprawić precyzję, efektywność i indywidualizację opieki ortodontycznej.

Jednym z najbardziej przełomowych zastosowań AI w ortodoncji jest modelowanie predykcyjne. Algorytmy uczenia maszynowego, wytrenowane na dużych zbiorach danych z przeszłych przypadków, potrafią prognozować wyniki leczenia na podstawie takich zmiennych, jak struktura szkieletu, typ wady zgryzu czy wiek pacjenta. Narzędzia predykcyjne umożliwiają ortodontom:

- symulację wielu możliwych ścieżek leczenia, pomagając wybrać najbardziej efektywną strategię;
- oszacowanie czasu trwania leczenia oraz prawdopodobieństwa wystąpienia powikłań;
- przewidywanie wzrostu struktur szkieletowych i zębowych u młodszych pacjentów.

Takie rozwiązania są szczególnie przydatne w złożonych przypadkach wymagających chirurgii ortognatycznej lub

współpracy interdyscyplinarnej (np. z periodontologiem czy protetykiem), gdzie symulacje oparte na AI mogą wspomóc planowanie poprzez przewidywanie okluzji i estetyki twarzy po zakończeniu leczenia [10].

AI znacząco usprawniła proces projektowania aparatów ortodontycznych poprzez integrację z systemami CAD/CAM. Wykorzystując skany wewnątrzustne lub CBCT, platformy oparte na AI mogą automatycznie:

- analizować morfologię zębów i ich ustawienie;
- projektować indywidualnie dopasowane łuki, zamki i alignery;
- symulować optymalne wektory sił oraz ruchy zębów.

W przypadku leczenia alignerami AI potrafi wyznaczyć optymalną sekwencję oraz wielkość ruchów niezbędnych do osiągnięcia założonych celów terapeutycznych, minimalizując przy tym dyskomfort oraz ryzyko zmęczenia materiału. Automatyzacja projektowania nie tylko zwiększa precyzję aparatów ortodontycznych, ale również skraca czas wizyty i ogranicza liczbę błędów ludzkich – co jest szczególnie istotne w klinikach z dużą liczbą pacjentów [11].

Ciągłe monitorowanie leczenia jest kluczowe dla jego sukcesu. Narzędzia oparte na AI umożliwiają obecnie ocenę postępów leczenia w czasie rzeczywistym lub w regularnych odstępach czasu poprzez:

- sekwencyjną analizę fotograficzną – AI porównuje zdjęcia twarzy lub jamy ustnej wykonywane w różnych etapach leczenia;
- superpozycję cefalometryczną – AI automatycznie nakłada anatomiczne punkty orientacyjne z radiogramów w celu oceny zmian w strukturach szkieletowych i zębowych;
- porównywanie modeli 3D – okresowe skany wewnątrzustne mogą być analizowane pod kątem dokładności ustawienia i przemieszczeń zębów w łuku.

Narzędzia te są szczególnie przydatne w leczeniu alignerami, gdzie współpraca pacjenta ma kluczowe znaczenie. Algorytmy AI potrafią wykryć i sygnalizować niewystarczające noszenie nakładek lub nieoczekiwane ruchy zębów, co pozwala na szybką interwencję i zmniejsza ryzyko nawrotów [12].

Zastosowania sztucznej inteligencji w diagnostyce ortodontycznej

Sztuczna inteligencja znacznie usprawniła analizę cefalometryczną, automatyzując identyfikację anatomicznych punktów orientacyjnych na zdjęciach radiologicznych. Zmniejszyło to liczbę błędów ludzkich i poprawiło efektywność diagnostyczną. Platformy takie jak WeDoCeph, WebCeph czy CephX wykorzystują algorytmy głębokiego uczenia, w szczególności konwolucyjne sieci neuronowe (CNN), do wykrywania punktów cefalometrycznych z wysoką dokładnością [11, 13].

Wykazano, że systemy te generują wyniki porównywalne z tymi, które uzyskują doświadczeni klinicyści – często w ciągu kilku sekund od przesłania obrazu. Integracja tych narzędzi w praktyce ortodontycznej pozwala na szybszą diagnozę oraz powtarzalne oznaczanie punktów

orientacyjnych, co ma kluczowe znaczenie dla precyzyjnego planowania leczenia [11, 13, 14].

AI jest coraz częściej wykorzystywana do oceny dojrzałości szkieletowej, co ma kluczowe znaczenie dla odpowiedniego zaplanowania momentu interwencji u pacjentów w fazie wzrostu. Modele AI trenowane na obrazach radiologicznych, takich jak boczne cefalogramy czy zdjęcia ręki i nadgarstka, potrafią oszacować etapy dojrzewania kręgów szyjnych (ang. *cervical vertebral maturation*, CVM) oraz wskaźniki dojrzałości szkieletowej Fishmana (ang. *skeletal maturity indicators*, SMI).

Badania wykazały, że systemy AI osiągają wysoki poziom zgodności z ocenami ekspertów w zakresie klasyfikacji CVM. Narzędzia te pomagają klinicystom w wybraniu odpowiedniego momentu rozpoczęcia leczenia, szczególnie w terapiach modyfikujących wzrost [15–17].

Sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie również w analizie górnych dróg oddechowych oraz struktur stawu skroniowo-żuchwowego (ang. *temporomandibular joint*, TMJ) przy użyciu obrazów CBCT i rezonansu magnetycznego. Wspierają one diagnostykę niedrożności dróg oddechowych, np. obturacyjnego bezdechu sennego, poprzez segmentację i pomiar objętości przestrzeni nosowo-gardłowej i ustno-gardłowej [18, 19].

W diagnostyce TMJ systemy AI klasyfikują przemieszczenie krążka stawowego, identyfikują zmiany zwyrodnieniowe oraz analizują morfologię wyrostka kłykciowego żuchwy na podstawie danych obrazowych, zapewniając szybszą i bardziej standaryzowaną ocenę niż metody manualne [20].

Wyniki kliniczne i skuteczność

Sztuczna inteligencja znacząco poprawiła dokładność diagnostyki ortodontycznej i planowania leczenia. Dzięki wykorzystaniu algorytmów uczenia maszynowego oraz modeli głębokiego uczenia, systemy AI są w stanie analizować złożone zbiory danych, co prowadzi do dokładniejszej identyfikacji punktów cefalometrycznych i lepszej oceny wad zgryzu. Randomizowane badanie kontrolne wykazało, że diagnostyka wspomagana przez AI osiągała wyższą precyzję planowania leczenia w porównaniu z tradycyjnymi metodami, z istotną statystycznie poprawą ($p < 0,05$) [10]. Integracja AI w praktyce ortodontycznej doprowadziła do skrócenia czasu leczenia oraz zmniejszenia liczby wizyt. W badaniu średni czas leczenia pacjentów z grupy wspomaganej AI wynosił $14,6 \pm 3,2$ miesięcy, w porównaniu z $18,9 \pm 4,5$ miesięcy w grupie bez wsparcia AI ($p < 0,001$). Dodatkowo, grupa AI wymagała mniejszej liczby wizyt ($10,2 \pm 2,1$) niż grupa tradycyjna ($12,8 \pm 3,4$) [21].

Pacjenci poddani leczeniu ortodontycznemu wspomaganiu przez AI zgłaszali wyższy poziom satysfakcji. Randomizowane badanie kontrolne wykazało, że grupa AI osiągnęła średni wynik satysfakcji na poziomie $9,2 \pm 0,6$, w porównaniu z $8,1 \pm 0,8$ w grupie tradycyjnej ($p < 0,001$). Do czynników wpływających na wzrost satysfakcji należały skrócony czas leczenia, mniejsza liczba wizyt oraz lepsze wyniki leczenia [21].

Wyzwania i ograniczenia

Pomimo rosnącego potencjału AI w ortodoncji, nadal istnieje wiele istotnych wyzwań. Integracja AI w praktyce ortodontycznej wiąże się z koniecznością gromadzenia i analizy obszernej dokumentacji oraz danych pacjenta, w tym zdjęć radiologicznych, skanów 3D oraz zapisów leczenia. Rodzi to poważne obawy dotyczące prywatności pacjentów i bezpieczeństwa danych. Niezbędne jest przestrzeganie przepisów, takich jak Ogólne Rozporządzenie o Ochronie Danych Osobowych (RODO) w Europie oraz Ustawa o przenośności i odpowiedzialności ubezpieczenia zdrowotnego (ang. *Health Insurance Portability and Accountability Act*, HIPAA) w Stanach Zjednoczonych. Praktyki ortodontyczne muszą stosować zaawansowane środki cyberbezpieczeństwa i techniki anonimizacji danych w celu ochrony wrażliwych informacji [22].

Wykorzystanie AI w diagnostyce ortodontycznej rodzi również pytania w zakresie określenia odpowiedzialności za uzyskane wyniki. Mimo rosnącej autonomii algorytmów nadal brakuje jednoznacznych regulacji prawnych dotyczących odpowiedzialności za ewentualne błędy diagnostyczne lub błędne decyzje kliniczne podjęte na podstawie sugestii AI. W praktyce to lekarz specjalista ponosi odpowiedzialność za cały proces leczniczy, niezależnie od tego, czy korzystał z narzędzi wspomaganych AI. Taka konstrukcja prawna wynika z uznania, że AI pełni rolę pomocniczą, a nie decyzyjną, a końcowa interpretacja danych i decyzja terapeutyczna należą do człowieka. Niemniej jednak wraz z dalszym rozwojem technologii konieczne będzie doprecyzowanie ram prawnych i etycznych, które uwzględnią specyfikę algorytmicznych rekomendacji i ich wpływ na proces leczenia [23].

Modele AI są tak bezstronne, jak dane, na których zostały wytrenowane. Jeśli zestawy danych treningowych są nieodróżnionowe lub wykazują uprzedzenia wobec określonych grup demograficznych, powstałe systemy AI mogą utrzymywać istniejące uprzedzenia, prowadząc do nierównych wyników leczenia. Na przykład niedostateczna reprezentacja niektórych grup etnicznych w danych treningowych może skutkować słabszą skutecznością AI dla tych populacji, pogłębiając nierówności zdrowotne. Zwalczanie uprzedzeń algorytmicznych wymaga włączenia różnorodnych i reprezentatywnych zbiorów danych w procesie rozwoju systemów AI [24].

Pomimo znacznych postępów AI w ortodoncji, technologia ta nie jest w stanie zastąpić doświadczenia klinicznego ortodontów. Chociaż systemy AI doskonale rozpoznają wzorce i analizują dane, nie są w stanie uwzględnić preferencji pacjenta, czynników psychospołecznych ani aspektów etycznych. Dlatego nadal niezbędny jest nadzór człowieka, który interpretuje rekomendacje AI, podejmuje świadome decyzje kliniczne i zapewnia spersonalizowaną opiekę [25].

Przyszłość i perspektywy

Integracja AI z innymi nowoczesnymi technologiami, takimi jak druk 3D i rzeczywistość wirtualna (ang. *virtual reality*, VR), ma szansę jeszcze bardziej spersonalizować leczenie ortodontyczne. Algorytmy AI mogą analizować ogromne ilości danych z poprzednich przypadków, aby

przewidzieć najskuteczniejsze plany leczenia dla nowych pacjentów. Druk 3D umożliwia szybkie wykonanie indywidualnych aparatów ortodontycznych, skracając czas produkcji i poprawiając dopasowanie oraz komfort [26]. Ponadto technologia VR może być wykorzystywana w edukacji pacjentów, zwiększaniu ich świadomości oraz w planowaniu leczenia. Wizualizacja ruchów zębów i efektów leczenia pozwala pacjentom lepiej zrozumieć przebieg terapii, co zwiększa satysfakcję i współpracę. Dla lekarzy VR oferuje immersyjne symulacje do szkolenia oraz planowania złożonych procedur, co może poprawić wyniki kliniczne [27].

Rozwój systemów AI zdolnych do ciągłego uczenia się jest kluczowy dla zwiększenia ich przydatności klinicznej. Tradycyjne modele AI są statyczne, trenowane na stałych zestawach danych i mogą nie adaptować się dobrze do nowych danych lub zmian w praktyce klinicznej. Systemy uczące się w sposób ciągły mogą przystosowywać się do nowych danych w czasie rzeczywistym, poprawiając swoją wydajność i trafność w dynamicznych warunkach klinicznych [12].

Wdrożenie takich systemów wymaga rygorystycznych mechanizmów kontroli jakości, które będą monitorować działanie algorytmów i zapobiegać integracji błędnych danych. Ponadto ich integracja wymaga starannego planowania w celu zapewnienia bezpieczeństwa pacjenta i integralności danych [25].

Wnioski

Sztuczna inteligencja redefiniuje ortodoncję, oferując narzędzia zwiększające dokładność diagnostyczną, usprawniające planowanie leczenia i personalizację opieki nad pacjentem. Dzięki innowacjom takim jak zautomatyzowana analiza cefalometryczna, modelowanie predykcyjne i inteligentne projektowanie aparatów, AI umożliwia klinicyście podejmowanie szybszych i bardziej świadomych decyzji, co przekłada się na poprawę wydajności i wyników leczenia.

Integracja z technologiami uzupełniającymi, takimi jak druk 3D i rzeczywistość wirtualna, może jeszcze bardziej zrewolucjonizować organizację pracy w ortodoncji, zwiększając precyzję leczenia i koncentrując się na indywidualnych potrzebach pacjenta.

Aby jednak w pełni wykorzystać potencjał AI w praktyce ortodontycznej, konieczne jest sprostanie obecnym wyzwaniom. Problemy z prywatnością danych muszą być rozwiązane poprzez ścisłe przestrzeganie przepisów, takich jak RODO i HIPAA, oraz wdrożenie zaawansowanych protokołów cyberbezpieczeństwa. Stronniczość algorytmiczna pozostaje istotnym problemem, co podkreśla potrzebę uwzględniania różnorodnych i reprezentatywnych zbiorów danych treningowych w celu zapewnienia równej opieki dla wszystkich grup pacjentów. Równie ważny jest stały nadzór człowieka, ponieważ systemy AI nie są jeszcze w stanie zastąpić doświadczenia klinicznego, rozumowania etycznego i indywidualnego podejścia do pacjenta, jakie zapewniają doświadczeni ortodonty.

W miarę rozwoju technologii AI, kluczowe będzie wspieranie współpracy interdyscyplinarnej pomiędzy klinicy-

stami, specjalistami ds. danych i ekspertami ds. regulacji. Taka współpraca zapewni, że AI zostanie zintegrowana w sposób etyczny, bezpieczny i skuteczny, zapoczątkując nową erę precyzyjnej, zindywidualizowanej opieki ortodontycznej.

Piśmiennictwo

- Kazimierczak N, Kazimierczak W, Serafin Z, et al. AI in orthodontics: revolutionizing diagnostics and treatment planning – a comprehensive review. *J Clin Med*, 2024; 13(2): 344. doi: 10.3390/jcm13020344
- Monill-González A, Rovira-Calatayud L, d'Oliveira NG, Ustrell-Torrent JM. Artificial intelligence in orthodontics: Where are we now? A scoping review. *Orthod Craniofac Res*, 2021; 24 Suppl 2: 6–15. doi: 10.1111/ocr.12517
- Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 2019; 25(1): 44–56. doi: 10.1038/s41591-018-0300-7
- Lee Y, Pyeon J-H, Han S-H, et al. A comparative study of deep learning and manual methods for identifying anatomical landmarks through cephalometry and cone-beam computed tomography: a systematic review and meta-analysis. *Appl Sci*, 2024; 14: 7342. doi: 10.3390/app14167342
- Kim HJ, Kim KD, Kim DH. Deep convolutional neural network-based skeletal classification of cephalometric image compared with automated-tracing software. *Sci Rep*, 2022; 12: 11659. doi: 10.1038/s41598-022-15856-6
- Budd S, Robinson EC, Kainz B. A survey on active learning and human-in-the-loop deep learning for medical image analysis. *Med Image Anal*, 2021; 71: 102062. doi: 10.1016/j.media.2021.102062
- Leonardi R, Väiid N. Artificial intelligence in orthodontics: concerns, conjectures, and ethical dilemmas. *Int Dent J*, 2025; 75(1): 20–22. doi: 10.1016/j.identj.2024.11.002
- Blum FMS, Möhlhenrich SC, Raith S, et al. Evaluation of an artificial intelligence-based algorithm for automated localization of craniofacial landmarks. *Clinical Oral Investigations*, 2023; 27(5): 2255–2265. doi: 10.1007/s00784-023-04978-4
- Lee JH, Kim DH, Jeong SN, Choi SH. Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Dent*, 2018; 77: 106–111. doi: 10.1016/j.jdent.2018.07.015
- Li P, Kong D, Tang T, et al. Orthodontic treatment planning based on artificial neural networks. *Sci Rep*, 2019; 9: 2037. doi: 10.1038/s41598-018-38439-w
- Pandey R, Kamble R, Kanani H. Revolutionizing smiles: advancing orthodontics through digital innovation. *Cureus*, 2024; 16(7): e64086. doi: 10.7759/cureus.64086
- Davis SE, Embi PJ, Matheny ME. Sustainable deployment of clinical prediction tools – a 360° approach to model maintenance. *J Am Med Inform Assoc*, 2024; 31(5): 1195–1198. doi: 10.1093/jamia/ocae036
- Mercier JP, Rossi C, Sanchez IN, et al. Reliability and accuracy of artificial intelligence-based software for cephalometric diagnosis. A diagnostic study. *BMC Oral Health*, 2024; 24: 1309. doi: 10.1186/s12903-024-05097-6
- Leonardi R, Giordano D, Maiorana F, Spampinato C. Automatic cephalometric analysis. *Angle Orthod*, 2008; 78(1): 145–151. doi: 10.2319/120506-491.1
- Kazimierczak W, Jedliński M, Issa J, et al. Accuracy of artificial intelligence for cervical vertebral maturation assessment – a systematic review. *J Clin Med*, 2024; 13: 4047. doi: 10.3390/jcm13144047
- Kim DW, Kim J, Kim T, et al. Prediction of hand-wrist maturation stages based on cervical vertebrae images using artificial intelligence. *Orthod Craniofac Res*, 2021; 24 Suppl 2: 68–75. doi: 10.1111/ocr.12514
- Sadeghi TS, Ourang SA, Sohrabniya F, et al. Performance of artificial intelligence on cervical vertebral maturation assessment: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 2025; 25(1): 187. doi: 10.1186/s12903-025-05482-9
- Orhan K, Shamshiev M, Ezhov M, et al. AI-based automatic segmentation of craniomaxillofacial anatomy from CBCT scans for automatic detection of pharyngeal airway evaluations in OSA patients. *Sci Rep*, 2022; 12(1): 11863. doi: 10.1038/s41598-022-15920-1
- Jeong Y, Nang Y, Zhao Z. Automated evaluation of upper airway obstruction based on deep learning. *Biomed Res Int*, 2023; 2023: 8231425. doi: 10.1155/2023/8231425
- Manek M, Maital, Bezerra Silva DF, et al. Temporomandibular joint assessment in MRI images using artificial intelligence tools: where are we now? A systematic review. *Dentomaxillofac Radiol*, 2025; 54(1): 1–11. doi: 10.1093/dmfr/twae055
- Gaonkar P, Mohammed I, Ribin M, et al. Assessing the impact of AI-enhanced diagnostic tools on the treatment planning of orthodontic cases: An RCT. *J Pharm Bioallied Sci*, 2024; 16(Suppl 2): S1798–S1800. doi: 10.4103/jpbs.jpbs_1147_23
- Gala K. Ethical and legal considerations in AI-driven health cybersecurity. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 2024; 10: 682–690. doi: 10.32628/CSEIT241051059
- Roganović J, Radenković M, Milić B. Responsible use of artificial intelligence in dentistry: survey on dentists' and final-year undergraduates' perspectives. *Healthcare (Basel, Switzerland)*, 2023; 11(10): 1480. doi: 10.3390/healthcare11101480
- Allareddy V, Oubaidin M, Rampa S, et al. Call for algorithmic fairness to mitigate amplification of racial biases in artificial intelligence models used in orthodontics and craniofacial health. *Orthod Craniofac Res*, 2023; 26(Suppl 1): 124–130. doi: 10.1111/ocr.12721
- Fawaz P, El Sayegh P, Vande Vannet B. Artificial intelligence in revolutionizing orthodontic practice. *World J Methodol*, 2025; 15(3): 100598. doi: 10.5662/wjm.v15.i3.100598
- Khan MI, Laxmikanth SM, Gopal T, Neela PK. Artificial intelligence and 3D printing technology in orthodontics: future and scope. *AIMS Biophysics*, 2022; 9: 182–197. doi: 10.3934/biophy.2022016
- Huang Y, Cheng X, Chan U, et al. Virtual reality approach for orthodontic education at School of Stomatology, Jinan University. *J Dent Educ*, 2022; 86(8): 1025–1035. doi: 10.1002/jdd.12915