

**ORTODONTİDE YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ SEFALOMETRİK ANALİZLER:
TANISAL GÜVENİLİRLİK VE KLİNİK YANSIMALAR**
ARTIFICIAL INTELLIGENCE-ASSISTED CEPHALOMETRIC ANALYSES IN
ORTHODONTICS: DIAGNOSTIC RELIABILITY AND CLINICAL IMPLICATIONS

Dr. Dt. Melis Alyan

İstanbul Gelişim Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi
Ağız ve Diş Sağlığı Uygulama ve Araştırma Merkezi
İstanbul, Türkiye

ORCID: 0009-0005-5480-3911

Özet

Ortodontide sefalometrik analiz, tanı, tedavi planlaması ve büyüme-gelişim değerlendirmesi için kritik bir araçtır. Ancak manuel landmark işaretleme işlemi zaman alıcı olup gözlemci içi ve gözlemciler arası hata riskleri taşımaktadır. Bu derlemenin amacı, yapay zekâ (YZ) destekli sefalometrik analizlerin tanısal güvenilirliğini ve klinik yansımalarını güncel literatür ışığında incelemektir. Özellikle derin öğrenme ve konvolüsyonel sinir ağları (CNN) temelli sistemler, 2B lateral sefalogramlarda saniyeler içinde analiz yapabilmekte ve klinik olarak kabul edilebilir hata sınırlarında (genellikle 2 mm altı) yüksek uyum göstermektedir. Bununla birlikte, YZ performansının her parametrede eşit olmadığı; insizör eğimi, yumuşak doku noktaları ve bilateral landmarklarda doğruluk oranlarının düştüğü görülmektedir. Ayrıca, karmaşık kraniyofasiyal anomali olan hastalarda ve karma dentisyon dönemindeki çocuklarda YZ'nin tanısal güvenilirliği azalmaktadır. 3B ve KIBT tabanlı analizlerde umut verici gelişmeler yaşansa da mevcut ticari sistemler arasında performans açısından heterojenlik bulunmaktadır. Sonuç olarak, YZ uygulamaları ortodontik teşhis sürecinde klinisyenlerin yerini alacak otonom sistemlerden ziyade, iş akışını hızlandıran, ölçüm tekrarlanabilirliğini artıran ve standartlaşma sağlayan güçlü yardımcı karar destek araçları olarak değerlendirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Sefalometrik Analiz, Dijital Sefalometri, Tanı Güvenilirliği

Abstract

Cephalometric analysis in orthodontics is a critical tool for diagnosis, treatment planning, and growth assessment. However, manual landmark identification is time-consuming and carries risks of intra- and inter-observer errors. This review aims to examine the diagnostic reliability and clinical implications of artificial intelligence (AI)-assisted cephalometric analyses based on current literature. Deep learning and convolutional neural network (CNN)-based systems, in particular, can perform analyses on 2D lateral cephalograms within seconds, demonstrating high agreement within clinically acceptable error margins (typically under 2 mm). Nevertheless, AI performance is not consistent across all parameters; accuracy decreases for incisor inclination, soft tissue points, and bilateral landmarks. Furthermore, diagnostic reliability of AI is reduced in patients with complex craniofacial anomalies and children in the mixed dentition stage. Although there are promising developments in 3D and CBCT-based analyses, performance heterogeneity exists among current commercial systems. In conclusion, AI applications should be regarded as powerful auxiliary decision-support tools that accelerate workflow, enhance measurement reproducibility, and provide standardization, rather than autonomous systems replacing clinicians in the orthodontic diagnostic process.

Keywords: Cephalometric Analysis, Digital Cephalometry, Diagnostic Reliability

1. Giriş

Sefalometrik analiz, ortodontik tanı, büyüme-gelişim değerlendirmesi, tedavi planlaması ve ortognatik cerrahi hazırlığında temel araçlardan biri olmayı sürdürmektedir (Kazimierczak ve ark.,2024; Londono ve ark.,2023; Jiang ve ark.,2022). Bununla birlikte manuel landmark işaretleme; zaman alıcılığı, gözlemciler arası ve gözlemci içi değişkenlik ve görüntü kalitesine duyarlılık nedeniyle hata riski taşımaktadır (Kazimierczak ve ark.,2024; Yu ve ark.,2020; Lin ve ark.,2026). Bu sınırlılıkların aşılması amacıyla yapay zekâ (YZ), makine öğrenmesi ve özellikle derin öğrenme tabanlı sistemler son yıllarda ortodontik görüntü analizine yoğun biçimde entegre edilmiştir (Zaborowicz ve ark.,2026; Kazimierczak ve ark.,2024; Mohammad-Rahimi ve ark.,2021).

Literatürde en sık kullanılan mimariler arasında konvolüsyonel sinir ağları (CNN), You Only Look Once (YOLO), Bayesyen konvolüsyonel sinir ağları (BCNN), stacked hourglass ağları ve diğer çok aşamalı derin öğrenme modelleri yer almaktadır (Zaborowicz ve ark.,2026; Junaid ve ark.,2022; Neeraja ve Anbarasi, 2025). Bu teknolojilerin temel vaadi, landmark saptamayı standardize etmek, klinik iş akışını hızlandırmak ve ölçüm tekrarlanabilirliğini artırmaktır (Zaborowicz ve ark.,2026; De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Tian, 2026).

Bununla birlikte mevcut kanıtlar, YZ'nin bütün ölçümlerde ve tüm hasta alt gruplarında eşit doğruluk göstermediğini, bazı sistemlerin klinik olarak değiştirilebilir düzeye ulaşırken bazılarının kritik parametrelerde anlamlı sapmalar ürettiğini göstermektedir (Kazimierczak ve ark.,2024; Polizzi ve Leonardi, 2024; Azari-Mehr ve ark.,2026). Bu nedenle konu yalnızca teknik doğruluk meselesi değil, aynı zamanda tanı güvenilirliği, klinik kararların etkilenme riski, etik sorumluluk ve iş akışına entegrasyon sorunudur (Nordblom ve ark.,2024; Rajan ve Anuradha, 2026; Ozmen ve Taub, 2026). Bu derlemenin amacı, ortodontide YZ destekli sefalometrik analizlerin tanısal güvenilirliğini ve klinik yansımalarını güncel kanıtlar ışığında incelemektir (Zaborowicz ve ark.,2026; Mohammad-Rahimi ve ark.,2021; Czapiński ve ark.,2026).

2. YZ Destekli Sefalometrik Analizin Gelişimi Ve Teknik Temeli

Ortodontide otomatik sefalometrik landmark tanımlamaya yönelik araştırmalar 1990'ların sonlarından beri sürmektedir, ancak 2020 sonrasında derin öğrenme temelli çalışmaların sayısı belirgin biçimde artmıştır (Kazimierczak ve ark.,2024; Zaborowicz ve ark.,2026; Bichu ve ark.,2021). Bu büyüme, artan hesaplama gücü, büyük veri kümeleri ve dijital radyograflerin yaygınlaşmasıyla ilişkilidir (Subramanian ve ark.,2022; Putra ve ark.,2021). Çağdaş sistemler çoğunlukla kaba-konumlama ve ince-düzeltilme basamaklarından oluşan çok aşamalı mimariler kullanmaktadır (Yao ve ark.,2021; Zeng ve ark.,2020; Song ve ark.,2021).

Bazı yaklaşımlar ayrıca belirsizlik tahmini sağlayarak yalnızca bir landmark konumu değil, güven aralığı ya da güven bölgesi de üretmektedir (Zaborowicz ve ark.,2026; Lee ve ark.,2020). Bu özellik, özellikle anatomik olarak belirsiz noktalarda klinisyenin hangi ölçümlere daha fazla dikkat etmesi gerektiğini göstermesi bakımından yorumlanabilirliği artırmaktadır (Lee ve ark.,2020; Kotula ve ark.,2026). Büyük ve çok merkezli veri kümeleriyle eğitilen modellerin daha güçlü genellenebilirlik potansiyeli gösterdiği bildirilmektedir (Jiang ve ark.,2022; Kim ve ark.,2021; Sahlsten ve ark.,2024). Örneğin 20 merkezden toplanan 9870 sefalogramla geliştirilen bir CNN sistemi, ortalama 0.94 ± 0.74 mm landmark hatası ve %89.33 sınıflama doğruluğu bildirmiştir (Jiang ve ark.,2022). Benzer biçimde 10 üniversite hastanesinden toplanan verilerle eğitilen bir modelde genel otomatik saptama hatası 1.36 ± 0.98 mm bulunmuş ve bu değer insan gözlemciler arası fark olan 1.31 ± 1.13 mm'ye çok yakın seyretmiştir (Kim ve ark.,2021). Dolayısıyla teknik ilerleme, yalnızca otomasyon değil, aynı zamanda uzmanlar arası varyasyonu modellemeye yaklaşan performans üretme yönünde gerçekleşmektedir (Bagdy-Bálint ve ark.,2024; Kim ve ark.,2021; Schwendicke ve ark.,2021).

3. 2B Lateral Sefalogramlarda Tanı Güvenilirliği

Güncel sistematik derlemeler ve meta-analizler, 2B lateral sefalogramlarda YZ tabanlı landmark saptamanın genellikle klinik olarak kabul edilen hata sınırlarına yaklaştığını ya da bu sınırlar içinde kaldığını göstermektedir (Zaborowicz ve ark.,2026; Londono ve ark.,2023; Hendrickx ve ark.,2024; Schwendicke ve ark.,2021). Bir meta-analizde 2 mm eşikte başarılı saptama oranı %81, 3 mm eşikte %91 ve 4 mm eşikte %96 olarak bildirilmiştir (Londono ve ark.,2023). Başka bir meta-analizde derin öğrenme temelli 2B landmark saptamada ortalama hata 1.39 mm olarak hesaplanmıştır (Hendrickx ve ark.,2024). 2021 tarihli bir meta-analiz ise 2 mm eşik içinde saptanan landmark oranını yaklaşık %79.9 olarak bildirmiştir (Schwendicke ve ark.,2021). Bu sonuçlar genel olarak umut verici olsa da kanıt tabanının önemli bir kısmı yüksek yanlışlık riski taşımaktadır (De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Schwendicke ve ark.,2021; Hendrickx ve ark.,2024). Özellikle örneklem seçimi, referans standart oluşturma biçimi ve dış doğrulama eksikliği, bildirilen doğrulukların gerçek klinik ortamlarda daha düşük olabileceğini düşündürmektedir (De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Nordblom ve ark.,2024).

Bireysel klinik çalışmalar da 2B ortamda çoğunlukla yüksek uyum bildirmiştir, ancak parametreye ve yazılıma göre farklar ortaya çıkmaktadır (Mahto ve ark.,2022; Tsolakis ve ark.,2022; Sadek ve ark.,2024). WebCeph'in manuel izlemle karşılaştırıldığı bir çalışmada tüm ölçümlerde ICC 0.75'in üzerinde bulunmuş, yedi parametrede ICC 0.90'ın üstüne çıkmıştır (Mahto ve ark.,2022). 100 sefalogram üzerinde yapılan başka bir çalışmada otomatik ve manuel yöntemler arasında ICC 0.70–0.92 aralığında büyük uyum saptanmıştır (Tsolakis ve ark.,2022). Bazı çalışmalarda farklar istatistiksel olarak anlamlı olsa bile klinik açıdan önemsiz kalmıştır (Mercier ve ark.,2024). Bu durum, istatistiksel anlamlılığın tek başına klinik değiştirilebilirlik için yeterli olmadığını göstermektedir (Azari-Mehr ve ark.,2026; Jiang ve ark.,2026).

Bunun karşısında bazı bağımsız doğrulama çalışmaları, özellikle ticari yazılımlar arasında belirgin performans farkları göstermiştir (Kunz ve ark.,2023; Kazimierczak ve ark.,2024; Bor ve ark.,2024). Dört ticari sağlayıcının karşılaştırıldığı bir çalışmada tüm dokuz parametrede insan altın standardına göre anlamlı farklar saptanmış, ancak sağlayıcılar arasında büyük heterojenlik bulunmuştur (Kunz ve ark.,2023). Aynı çalışmada DentalQ.ortho insan referansına anlamlı ortalama fark göstermemişken AudaxCeph yedi parametrede anlamlı sapma göstermiştir (Kunz ve ark.,2023). Üç ticari YZ programının karşılaştırıldığı başka bir çalışmada programlar arasında çoğu parametrede yüksek tekrar edilebilirlik olsa da bazı açısallık ölçümlerde ve oklüzal düzlem gibi tedavi kararını etkileyebilecek değişkenlerde dikkate değer farklılıklar görülmüştür (Kazimierczak ve ark.,2024). Dolayısıyla 2B YZ-sefalometri için en doğru genel yargı, “bazı platformlarda klinik olarak yeterli, bazılarında ise seçici doğrulama gerektiren yardımcı araç” olduğudur (Kazimierczak ve ark.,2024; Kunz ve ark.,2023; Azari-Mehr ve ark.,2026).

4. Hata Kaynakları, Ölçüme Duyarlı Alanlar Ve Özel Gruplar

YZ destekli sefalometrik sistemlerin performansı tüm landmarklar için eşit değildir (Polizzi ve Leonardi, 2024; Lin ve ark.,2026; Merouani-Drissi ve ark.,2026). Anatomik süperpozisyon, düşük kontrast, geometrik olarak türetilen noktalar ve referans düzlemlerini oluşturan landmarklar hata yayılımını artırabilmektedir (Guinot-Barona ve ark.,2023; Kang ve ark.,2023; Jiang ve ark.,2026). Özellikle dental ölçümler, insizal apeksler, bilateral landmarklar ve yumuşak doku noktaları birçok çalışmada daha değişken bulunmuştur (Jeon ve Lee, 2021; Duran ve ark.,2023; Gurel ve ark.,2025; Sadek ve ark.,2024). İnsizör eğimi ile ilişkili ölçümlerde doğruluğun görece düşük olması, birkaç bağımsız çalışmada tekrarlanmıştır (Kunz ve ark.,2023; Afaf ve ark.,2026; Duran ve ark.,2023). Bu nedenle küçük landmark hatalarının ANB, FMA, SN-GoGn, IMPA veya interinsizal açı gibi türetilmiş ölçümlerde klinik olarak

anlamli farklara dönüşmesi mümkündür (Azari-Mehr ve ark.,2026; Kang ve ark.,2023; Kotula ve ark.,2026).

Çocuklar ve karma dentisyon hastaları, YZ performansının daha dikkatli yorumlanması gereken bir alt gruptur (Shinde ve ark.,2026; Shin ve Kim, 2022; Hoang ve ark.,2026). Kronolojik yaşa göre değil dentisyon evresine göre sınıflandırmanın, doğruluk farklılıklarını daha iyi ortaya koyduğu bildirilmiştir (Hoang ve ark.,2026). Özellikle erken karma dentisyonunda mandibular ark ve mandibular düzlem açısı için doğruluğun belirgin biçimde düştüğü gösterilmiştir (Hoang ve ark.,2026). Bununla birlikte başka pediatrik çalışmalarda çoğu parametrenin manuel izleme klinik olarak karşılaştırılabilir olduğu ve sürenin yaklaşık yarıya indiği bildirilmiştir (Shinde ve ark.,2026). Dolayısıyla pediatrik olgularda YZ kullanımı olanaksız değildir; ancak büyüme, diş sürmesi ve değişken anatomi nedeniyle seçici manuel doğrulama daha önemlidir (Shinde ve ark.,2026; Shin ve Kim, 2022; Majd ve ark.,2026).

Dudak-damak yarıklı bireylerde hata oranları daha da yükselebilmektedir (Tanikawa ve ark.,2021; Karagoz ve ark.,2025). Bir hasta-ilişkili hata analizinde yarık dudak-damak varlığı daha büyük tanımlama hatasıyla ilişkili bulunmuştur (Tanikawa ve ark.,2021). 188 yarık dudak ve/veya damak hastasında OrthoDx™ ile yapılan çalışmada yapay zekâ temelli ölçümlerin doğruluğu sınırlı bulunmuş, ancak uzman düzeltmesi bazı parametreleri manuel yöntemle yaklaştırmıştır (Karagoz ve ark.,2025). Bu bulgu, kraniyofasiyal anomalili hasta gruplarında hibrit insan-YZ iş akışının tam otomasyondan daha güvenli olduğunu düşündürmektedir (Karagoz ve ark.,2025; Huq ve ark.,2022).

5. 3B Ve CBCT Tabanlı Analizlerde Durum

3B sefalometri, kompleks deformiteler ve ortognatik cerrahi planlaması için önemli avantajlar sunsa da YZ doğruluğu 2B sistemlere göre daha heterojendir (Dot ve ark.,2022; Hendrickx ve ark.,2024; Czapiński ve ark.,2026). Bir sistematik derlemede 3B landmark hataları çalışmaya ve landmarka göre 1.0 mm ile 5.8 mm arasında değişmiştir (Hendrickx ve ark.,2024). Daha eski 3B sistematik derleme, en iyi derin öğrenme algoritmalarının tüm landmarklarda 2 mm'nin altında ortalama hata bildirdiğini, ancak zorlu klinik ortamlarda sağlamlık testlerinin yetersiz olduğunu vurgulamıştır (Dot ve ark.,2020). Yakın dönem çalışmalar ise 3B alanda hem güçlü hem de zayıf örnekler bulunduğunu göstermektedir (Dot ve ark.,2022; Kazimierczak ve ark.,2026; Jiang ve ark.,2026).

Çok merkezli 309 CBCT verisiyle geliştirilen hafif derin öğrenme modeli, iki etnik kohortta yaklaşık 1.96–1.99 mm ortalama hata ve olguların büyük kısmında klinik olarak kabul edilebilir ölçüm doğruluğu bildirmiştir (Sahlsten ve ark.,2024). Benzer şekilde 3B CT üzerinde 33 landmark için geliştirilen başka bir modelde ortalama lokalizasyon hatası 1.0 ± 1.3 mm bulunmuş ve iskeletsel değişkenlerin %91.9'u manuel tekrar edilebilirliğin Bland-Altman sınırları içinde kalmıştır (Dot ve ark.,2022). Buna karşılık ticari CBCT sefalometri yazılımlarında sistematik yanlılık görülebilmektedir (Kazimierczak ve ark.,2026). 135 hastalık bir çalışmada CephX ve Invivo için SNA, SNB ve ANB gibi temel açılarda 3–6° düzeyinde farklar bildirilmiş ve bu farklar klinik değiştirilebilirliğe karşı yorumlanmıştır (Kazimierczak ve ark.,2026). Başka bir bağımsız doğrulamada Diagnocat platformu iskeletsel ve vertikal sınıflamaların çoğunu üretememiş, iskeletsel parametreler için kullanılabilirlik %10'un altında kalmıştır (Kazimierczak ve ark.,2026). Bu nedenle 3B YZ-sefalometrinin potansiyeli yüksek olsa da mevcut ticari ürünlerin performansı henüz homojen değildir ve doğrudan manuel 2B referansın yerine geçebildiği söylenemez (Polizzi ve Leonardi, 2024; Czapiński ve ark.,2026; Hendrickx ve ark.,2024).

6. Klinik Yansımalar: İş Akışı, Karar Desteği Ve Sorumluluk

YZ destekli sefalometrik analizlerin en tutarlı klinik avantajı zaman kazandırıcıdır (Kazimierczak ve ark.,2024; De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Hendrickx ve ark.,2024). Çeşitli çalışmalarda otomatik analiz süresinin saniyeler ile bir dakikanın altı arasında değiştiği, manuel yöntemin ise dakikalar sürdüğü bildirilmiştir (Duran ve ark.,2023; De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Shinde ve ark.,2026). Bu verimlilik, yoğun kliniklerde ilk tarama, tedavi öncesi ön değerlendirme ve büyük veri kümelerinin araştırma amaçlı incelenmesinde önemli yarar sağlayabilir (Subramanian ve ark.,2022; Kim ve ark.,2021; Alabdulkareem ve ark.,2026). Ayrıca YZ, yalnızca landmark saptama değil, iskeletsel sınıflama, servikal vertebra maturasyonu ve cerrahi adaylık değerlendirmesi gibi üst düzey karar destek görevlerinde de umut verici sonuçlar vermektedir (Zaborowicz ve ark.,2026; Mohammad-Rahimi ve ark.,2021). 5890 sefalogramla geliştirilen uçtan uca CNN sistemi, sagittal ve vertikal iskeletsel tanıda %90'ın üzerinde duyarlılık, özgüllük ve doğruluk bildirmiştir (Yu ve ark.,2020). Başka bir DCNN modeli sagittal sınıflamada otomatik-tracing yazılımını aşmış ve 0.96 doğruluk ile $\kappa=0.913$ uyum göstermiştir (Kim ve ark.,2022). Dolayısıyla klinik etki yalnızca “çizimi hızlandırma” ile sınırlı değildir; doğru geliştirilen modeller sınıflama ve karar desteğinde de katkı sağlayabilir (Baxmann ve ark.,2026; Alabdulkareem ve ark.,2026).

Bununla birlikte literatürün baskın mesajı, YZ'nin bağımsız karar verici değil, klinisyen destek sistemi olarak konumlandırılması gerektiğidir (Kazimierczak ve ark.,2026; Alessandri-Bonetti ve ark.,2023; Zalana ve ark.,2025; Baxmann ve ark.,2026). Birçok derleme ve klinik çalışma, manuel doğrulama ve gerektiğinde düzeltme yapılmadan YZ çıktılarının tedavi planına doğrudan aktarılabilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Polizzi ve Leonardi, 2024; Duran ve ark.,2023; Sadek ve ark.,2024; Gurel ve ark.,2025). Bu uyarı özellikle ANB, FMA, dental inklinasyonlar, yumuşak doku ölçümleri ve bilateral landmarklar için önemlidir (Azari-Mehr ve ark.,2026; Sadek ve ark.,2024; Gurel ve ark.,2025). Ayrıca tek merkezli veri, yetersiz etnik çeşitlilik, cihazlar arası alan kayması ve standartlaşmamış raporlama, gerçek dünya uygulamasında eşitsiz performans riskini artırmaktadır (Kazimierczak ve ark.,2024; Kim ve ark.,2021; Czapiński ve ark.,2026; Hung ve ark.,2022). Etik ve düzenleyici açıdan da yüz biyometrisi, mahremiyet, açıklanabilirlik, sürekli öğrenen sistemlerin gözetimi ve klinik sorumluluğun paylaşımı çözülmesi gereken temel başlıklardır (Kazimierczak ve ark.,2024; Johannes ve ark.,2023; Ozmen ve Taub, 2026).

7. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Kanıtların bütüncül değerlendirmesi, 2B lateral sefalogramlarda YZ destekli landmark saptama ve ölçüm üretiminin artık deneysel bir merak konusu olmaktan çıkıp klinik olarak anlamlı yardımcı performans düzeyine ulaştığını göstermektedir (Zaborowicz ve ark.,2026; Khanagar ve ark.,2020; Czapiński ve ark.,2026). Ancak bu yargı tüm yazılımlar, tüm ölçümler ve tüm hasta grupları için genellenemez (Polizzi ve Leonardi, 2024; Lin ve ark.,2026; Baxmann ve ark.,2026). En güçlü kanıt, büyük veriyle eğitilmiş 2B sistemlerde zaman verimliliği ve genel landmark doğruluğu lehinedir (Jiang ve ark.,2022; Kim ve ark.,2021; Yao ve ark.,2021). En zayıf ya da en tartışmalı alanlar ise 3B ticari sistemlerin değiştirilebilirliği, karmaşık kraniofasial anomaliler, karma dentisyon ve ölçüm düzeyinde küçük landmark hatalarının tanı sınıflamasına etkisidir (Kazimierczak ve ark.,2026; Karagoz ve ark.,2025; Hoang ve ark.,2026; Kotula ve ark.,2026). Bu nedenle klinik uygulamada en rasyonel yaklaşım, YZ'yi bir “ilk okuyucu” veya “hızlandırılmış ön-analiz” aracı olarak kullanmak, son klinik yorumu ise uzman ortodontistin çoklu kayıtlarla birlikte vermesidir (Zaborowicz ve ark.,2026; Nordblom ve ark.,2024; Rajan ve Anuradha, 2026). Gelecekte çok merkezli dış doğrulama, standart anotasyon protokolleri, belirsizlik raporlaması ve düzenleyici kalite güvencesi iyileştikçe YZ-sefalometri daha güvenli ve daha yaygın biçimde rutin pratiğe girebilir

(Zaborowicz ve ark.,2026; De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark.,2023; Ozmen ve Taub, 2026).

Mevcut literatür, yapay zekâ (YZ) destekli sefalometrik analizlerin özellikle 2B lateral sefalogramlarda yüksek tekrar edilebilirlik, klinik olarak kabul edilebilir doğruluk ve anlamlı zaman kazancı sağladığını göstermektedir (Hendrickx ve ark., 2024; Schwendicke ve ark., 2021; Zaborowicz ve ark., 2026; Mohammad-Rahimi ve ark., 2021). Meta-analitik ve sistematik derleme düzeyindeki bulgular, 2B landmark lokalizasyonunda ortalama hatanın çoğu çalışmada yaklaşık 1–2 mm aralığında kümelendiğini ve bunun deneyimli ortodontistler arası değişkenlikle çoğu zaman benzer düzeyde olduğunu desteklemektedir (Hendrickx ve ark., 2024; De Queiroz Tavares Borges Mesquita ve ark., 2023; Zaborowicz ve ark., 2026; Schwendicke ve ark., 2021). Birçok birincil çalışma da AI sistemlerinin aynı görüntü üzerinde insan değerlendiricilere göre daha kararlı sonuçlar verdiğini, yani tekrar ölçümlerde değişkenliği azalttığını bildirmektedir (Hwang ve ark., 2019; Bao ve ark., 2023; Kazimierczak ve ark., 2024; Fracchia ve ark., 2025).

Ortodontik iş akışı açısından en tutarlı avantaj zaman verimliliğidir. Manuel landmark işaretleme yaklaşık 20 dakika sürebilirken birçok AI tabanlı sistem analizi bir dakikadan kısa sürede tamamlayabilmekte, bazı çalışmalarda insanlara göre onlarca kat daha hızlı performans bildirilmektedir (Hendrickx ve ark., 2024; Bao ve ark., 2023; Mahto ve ark., 2022). Bu nedenle YZ, özellikle yüksek hacimli kliniklerde, tarama amaçlı değerlendirmelerde ve dijital iş akışına entegre ortamlarda klinik üretkenliği artıran güçlü bir destek aracı olarak öne çıkmaktadır (Mahto ve ark., 2022; Gracea ve ark., 2024; Azari-Mehr ve ark., 2026; Subramanian ve ark., 2022).

Bununla birlikte, klinik olarak kabul edilebilir ortalama performans tüm ölçümlerin eşdeğer doğrulukta olduğu anlamına gelmemektedir. Landmark bazında performans belirgin biçimde değişmektedir; gonion, porion, basion, orbitale ve keser kök apeksleri gibi anatomik olarak zor noktalar daha yüksek hata üretme eğilimindedir (Lee ve ark., 2020; Fracchia ve ark., 2025; Savkan ve ark., 2026; Uğurlu, 2022). Benzer şekilde, ölçüm düzeyinde özellikle üç nokta üzerinden türetilen açısal değişkenler ve dental/lineer parametreler daha kırılgan görünmektedir; çünkü küçük landmark sapmaları klinik yorumu etkileyebilecek daha büyük ölçüm farklarına dönüşebilmektedir (Bor ve ark., 2024; Jiang ve ark., 2026; Kang ve ark., 2023; Afaf ve ark., 2026).

Bu heterojenlik yazılımlar arasında da görülmektedir. Farklı ticari platformlar çoğu parametrede yüksek iç tekrar edilebilirlik sunsa da birbirleriyle veya uzman referansı ile tam değiştirilebilir değildir (Kazimierczak ve ark., 2024; Kunz ve ark., 2023; Baig ve ark., 2024). Bazı karşılaştırmalarda DentalQ.ortho veya düzeltilmiş yarı-otomatik iş akışlar daha iyi uyum gösterirken, WebCeph, CephX, AudaxCeph veya diğer platformlarda belirli iskeletsel, dental ve yumuşak doku parametrelerinde anlamlı sapmalar bildirilmiştir (Kunz ve ark., 2023; Bor ve ark., 2024; Raby ve ark., 2025).

AI'nın ortalama hata düzeyi kabul edilebilir olsa bile bireysel hasta düzeyinde geniş uyum sınırları klinik değiştirilebilirliği kısıtlayabilmektedir. Özellikle ANB, FMA, keser eğimleri ve bazı yumuşak doku ölçümlerinde küçük ortalama farklar yanıltıcı olabilir; çünkü bireysel olgularda sapma genişleyebilir ve tanısal sınıflamayı değiştirebilir (Azari-Mehr ve ark., 2026; Lee ve ark., 2023; Tageldin ve ark., 2025).

Kanıtlar en güçlü biçimde 2B lateral sefalogramlar için olumludur; 3B CBCT tabanlı analizlerde ise sonuçlar daha değişkendir. 3B çalışmaların bir kısmı yüksek doğruluk ve güçlü iskeletsel ölçüm uyumu bildirirse de (Dot ve ark., 2022; Baldini ve ark., 2026), derleme ve klinik karşılaştırmalar 3B alanda heterojenliğin daha yüksek olduğunu ve bazı ticari sistemlerde çekirdek sagittal açılar için 3–6°'lik sapmalar görülebildiğini ortaya koymaktadır (Hendrickx

ve ark., 2024; Polizzi & Leonardi, 2024; Kazimierczak ve ark., 2026). Bu nedenle 3B sefalometri umut verici olsa da, günlük klinikte 2B kadar olgun bir doğrulama düzeyine henüz ulaşmış görünmemektedir (Czapiński ve ark., 2026; Schwendicke ve ark., 2021; Dot ve ark., 2020).

Hasta grubuna göre değişkenlik de önemlidir. Yarık dudak-damaklı olgularda, karmaşık kraniofasiyal anatomi AI hata oranlarını artırabilmektedir (Tanikawa ve ark., 2021; Karagoz ve ark., 2025; Tageldin ve ark., 2025). Karışık dişlenme döneminde özellikle mandibular ark ve mandibular düzlem gibi ölçümlerde doğruluk düşebilmekte, bu da biyolojik gelişim evresinin kronolojik yaştan daha anlamlı bir performans belirleyicisi olduğunu düşündürmektedir (ve ark., 2026). Ayrıca görüntüleme cihazı, sensör tipi, merkezler arası farklar ve eğitim verisinin ait olduğu popülasyon da sonucu etkileyebilmektedir; bu durum genel uygulanabilirliğin halen sınırlı olduğunu göstermektedir (Kim ve ark., 2021; Nordblom ve ark., 2024; Silva ve ark., 2025).

Görüntü kalitesi ve hasta pozisyonu da klinik performansı belirgin etkiler. Yanlış baş pozisyonu özellikle lineer ölçümlerde hatayı artırmakta, bazı yazılımlarda başta Go-Me olmak üzere belirli parametrelerde uyumu belirgin biçimde düşürmektedir (Polizzi ve ark., 2025). Bu bulgu, kontrollü araştırma koşullarında elde edilen başarı oranlarının gerçek yaşam radyografik çeşitliliğinde otomatik olarak korunmayabileceğini düşündürmektedir (Czapiński ve ark., 2026; Schwendicke ve ark., 2021).

Klinik açıdan en makul yorum, YZ'nin otonom tanı koyan bir sistemden çok uzman denetimli karar destek aracı olduğudur (Zaborowicz ve ark., 2026; Polizzi & Leonardi, 2024; Gracea ve ark., 2024; Baxmann ve ark., 2026). Geniş derlemeler ve klinik karşılaştırmalar, AI'nın özellikle ön değerlendirme, tarama, eğitim, büyüme takibi ve standartlaştırılmış raporlama için yararlı olduğunu; ancak kesin tanı ve tedavi planlamasında klinisyen doğrulamasının gerekli kaldığını bildirmektedir (Zaborowicz ve ark., 2026; Azari-Mehr ve ark., 2026; Junaid ve ark., 2022; Mikulewicz & Chojnacka, 2025).

İnsan-AI hibrit yaklaşımı, tam otomasyona göre daha gerçekçi bir klinik model gibi görünmektedir. Landmark düzeltmesi yapılan yarı-otomatik veya gözden geçirilmiş AI çıktıları, tam otomatik çıktılarından daha doğru sonuçlar verebilmekte ve çoğu zaman zaman kazancının önemli bölümünü korumaktadır (Mercier ve ark., 2024; Bao ve ark., 2023; Meriç & Naoumova, 2020; Raby ve ark., 2025). Özellikle uzman müdahalesi; yarık olguları, karmaşık ortognatik vakalar, karışık dişlenme dönemi, yumuşak doku analizleri ve keser eğimi gibi klinik etkisi yüksek parametrelerde hata yayılımını azaltmaktadır (Karagoz ve ark., 2025; Jiang ve ark., 2026; Kim ve ark., 2025; Raby ve ark., 2025).

Bazı çalışmalar AI gözden geçirme sürecinin her zaman belirgin ek zaman kazancı sağlamadığını da göstermektedir. Deneyimsiz kullanıcılar AI desteğinden daha fazla yarar görebilirken, deneyimli kullanıcıların AI kaynaklı yanlış güven nedeniyle daha az optimal düzeltme yapabilmesi mümkündür (Lee ve ark., 2023). Bu nedenle klinik fayda yalnızca algoritmanın ham doğruluğuna değil, kullanıcı deneyimine, düzeltme arayüzüne ve kalite güvence protokolüne de bağlıdır (Azari-Mehr ve ark., 2026; Dipalma ve ark., 2023; Guo & Shao, 2025).

Ortodontide yapay zekâ destekli sefalometrik analizler, özellikle 2B lateral sefalogramlarda, yüksek tekrar edilebilirlik ve klinik olarak kabul edilebilir doğrulukla çalışan, aynı zamanda analiz süresini belirgin biçimde kısaltan güçlü dijital yardımcı sistemler olarak değerlendirilmektedir (Hendrickx ve ark., 2024; Schwendicke ve ark., 2021; Ye ve ark., 2023; Tsolakis ve ark., 2022). Bununla birlikte bu başarı tüm landmarklar, tüm ölçümler ve tüm platformlar için eşit değildir; doğruluk özellikle gonion, porion, basion, yumuşak doku noktaları, keser apeksleri ve çok noktalı açısal ölçümler gibi zor bölgelerde azalmakta, ayrıca

kullanılan yazılım, görüntü kalitesi, baş pozisyonu, görüntüleme modalitesi ve hasta grubuna göre anlamlı biçimde değişmektedir (Merouani-Drissi ve ark., 2026; Savkan ve ark., 2026; Polizzi ve ark., 2025; ve ark., 2026; Silva ve ark., 2025).

Özellikle 3B CBCT tabanlı otomatik analizler ve yarık dudak-damak, karışık dişlenme ya da kompleks ortognatik olgular gibi zor klinik senaryolar, insan denetiminin halen vazgeçilmez olduğunu göstermektedir (Kazimierczak ve ark., 2026; Karagoz ve ark., 2025; Tageldin ve ark., 2025; ve ark., 2026). Bu nedenle güncel kanıtlar, YZ'nin ortodontistin yerini alan bağımsız bir tanı sistemi olarak değil, uzman kararını hızlandıran, ölçümleri standardize eden ve iş akışını verimli hale getiren bir klinik karar destek aracı olarak konumlandırılmasını desteklemektedir (Hendrickx ve ark., 2024; Kazimierczak ve ark., 2024; Azari-Mehr ve ark., 2026; Iftikhar ve ark., 2025).

Sonuç olarak, bu alanın temsil ettiği en önemli değişim sefalometrik değerlendirmenin daha hızlı, daha standardize ve daha tekrar edilebilir hale gelmesidir. Buna karşılık en büyük açık soru, hangi yazılımın, hangi popülasyonda, hangi ölçümler için ve hangi denetim düzeyiyle gerçekten klinik olarak değiştirilebilir kabul edilebileceğidir.

Kaynaklar

- A., Hoang, H. T., Le, H. N., & Ho, T. T. T. (2026). Reliability of Automated Cephalometric Analysis: A Comparative Assessment of Stratification Strategies Based on Chronological Age Versus Dentition Stage. *Dentistry Journal*, 14. <https://doi.org/10.3390/dj14030167>
- Afaf, A., Afaf, E.T., Imane, H., Fatima, Z. ve Hicham, B. (2026). Agreement and reliability of AI-based cephalometric analysis (WebCeph) compared with digital manual tracing for skeletal and dentoalveolar measurements (a retrospective comparative study). *Journal of Baghdad College of Dentistry*. <https://doi.org/10.26477/jbcd.v38i2.4215>
- Alabdulkareem, M., Atieh, M., AbuMostafa, A., Aldalaan, K. ve Alturki, N. (2026). Artificial intelligence in dental treatment planning and diagnostic decision-making: a systematic review and meta-analysis. *Clinical and Experimental Dental Research*, 12. <https://doi.org/10.1002/cre2.70343>
- Alessandri-Bonetti, A., Sangalli, L., Salerno, M. ve Gallenzi, P. (2023). Reliability of artificial intelligence-assisted cephalometric analysis—a pilot study. *BioMedInformatics*. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics3010003>
- Azari-Mehr, A., Bisbal-Puchades, A., Marqués-Martínez, L., Carmona-Santamaría, M., García-Miralles, E., Aura-Tormos, J., & Guinot-Barona, C. (2026). Clinical Reliability of AI-Based Cephalometric Analysis Using WebCeph: A Comparative Agreement Study. *Journal of Clinical Medicine*, 15. <https://doi.org/10.3390/jcm15114155>
- Bagdy-Bálint, R., Szabó, G., Zováthi, Ö.H., Zováthi, B.H., Somorjai, Á., Köpenczei, C. ve Rózsa, N. (2024). Accuracy of automated analysis in cephalometry. *Journal of Dental Sciences*, 20, 830-843. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.09.012>
- Baig, N., Gyasudeen, K. S., Bhattacharjee, T., Chaudhry, J., & Prasad, S. (2024). Comparative evaluation of commercially available AI-based cephalometric tracing programs. *BMC Oral Health*, 24. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05032-9>
- Baldini, B., Rubiu, G., Serafin, M., Bologna, M., Facchi, G., Baselli, G., & Tartaglia, G. M. (2026). Automated 3D cephalometry: A lightweight V-net for landmark localization on CBCT. *Computerized medical imaging and graphics : the official journal of the Computerized Medical Imaging Society*, 128, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2026.102700>

- Bao, H., Zhang, K., Yu, C., Li, H., Cao, D., Shu, H., Liu, L., & Yan, B. (2023). Evaluating the accuracy of automated cephalometric analysis based on artificial intelligence. *BMC Oral Health*, 23. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02881-8>
- Baxmann, B. M., Zsoldos, M., & Kárpáti, K. (2026). AI in orthodontic treatment planning: a systematic review comparing learning approaches.. *BMC oral health*. <https://doi.org/10.1186/s12903-026-08854-x>
- Bichu, Y.M., Hansa, I., Bichu, A., Premjani, P., Flores-Mir, C. ve Vaid, N.R. (2021). Applications of artificial intelligence and machine learning in orthodontics: a scoping review. *Progress in Orthodontics*, 22. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00361-9>
- Bor, S., Cigirim, S. Ç., & Kotan, S. (2024). Comparison of AI-assisted cephalometric analysis and orthodontist-performed digital tracing analysis. *Progress in Orthodontics*, 25. <https://doi.org/10.1186/s40510-024-00539-x>
- Czapiński, O., Kwiatkowska, M., Małek, Z., Wyciślok, A., Makala, K. W. , Waśkowska, K., Kubiak, W., Kalsztejn, J., & Kępa, A. (2026). Current Evidence on Artificial Intelligence for Cephalometric Diagnosis and Orthodontic Treatment Planning - A Narrative Review. *Journal of Education, Health and Sport*. <https://doi.org/10.12775/jehs.2026.92.72449>
- De Queiroz Tavares Borges Mesquita, G., Vieira, W., Vidigal, M., Travençolo, B., Beaini, T., Spin-Neto, R., Paranhos, L. ve De Brito Júnior, R.B. (2023). Artificial intelligence for detecting cephalometric landmarks: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Digital Imaging*, 36, 1158-1179. <https://doi.org/10.1007/s10278-022-00766-w>
- Dipalma, G., Inchingolo, A., Inchingolo, A., Piras, F., Carpentiere, V., Garofoli, G., Azzollini, D., Campanelli, M., Paduanelli, G., Palermo, A., & Inchingolo, F. (2023). Artificial Intelligence and Its Clinical Applications in Orthodontics: A Systematic Review. *Diagnostics*, 13. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13243677>
- Dot, G., Rafflenbeul, F., Arbott, M., Gajny, L., Rouch, P. ve Schouman, T. (2020). Accuracy and reliability of automatic three-dimensional cephalometric landmarking. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2020.02.015>
- Dot, G., Schouman, T., Chang, S., Rafflenbeul, F., Kerbrat, A., Rouch, P. ve Gajny, L. (2022). Automatic 3-dimensional cephalometric landmarking via deep learning. *Journal of Dental Research*, 101, 1380-1387. <https://doi.org/10.1177/00220345221112333>
- Duran, G.S., Gökmen, Ş., Topsakal, K.G. ve Görgülü, S. (2023). Evaluation of the accuracy of fully automatic cephalometric analysis software with artificial intelligence algorithm. *Orthodontics & Craniofacial Research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.12633>
- Fracchia, D., Bignotti, D., Lai, S., Cubeddu, S., Curreli, F., Lombardo, M., Verdecchia, A., & Spinass, E. (2025). Reproducibility of AI in Cephalometric Landmark Detection: A Preliminary Study. *Diagnostics*, 15. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15192521>
- Gracea, R., Winderickx, N., Vanheers, M., Hendrickx, J., Preda, F., Shujaat, S., Pérula, M. C. D. L., & Jacobs, R. (2024). Artificial intelligence for orthodontic diagnosis and treatment planning: A scoping review.. *Journal of dentistry*, 105442. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105442>
- Guinot-Barona, C., Pérez-Barquero, J.A., Galán López, L., Barmak, A.B., Att, W., Kois, J. ve Revilla-León, M. (2023). Cephalometric analysis performance discrepancy between orthodontists and an artificial intelligence model using lateral cephalometric radiographs. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. <https://doi.org/10.1111/jerd.13156>

- Guo, X., & Shao, Y. (2025). AI-driven dynamic orthodontic treatment management: personalized progress tracking and adjustments—a narrative review. *Frontiers in Dental Medicine*, 6. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1612441>
- Gurel, H., Alkumru, P. ve Sectakof, P. (2025). How reliable are AI-assisted cephalometric programs in assessing measurements involving bilateral landmarks?. *Australasian Orthodontic Journal*, 41, 123-129. <https://doi.org/10.2478/aoj-2025-0017>
- Hendrickx, J., Gracea, R. S., Vanheers, M., Winderickx, N., Preda, F., Shujaat, S., & Jacobs, R. (2024). Can artificial intelligence-driven cephalometric analysis replace manual tracing? A systematic review and meta-analysis. *The European Journal of Orthodontics*, 46. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae029>
- Hung, K., Ai, Q., Leung, Y. ve Yeung, A.W.K. (2022). Potential and impact of artificial intelligence algorithms in dento-maxillofacial radiology. *Clinical Oral Investigations*, 26, 5535-5555. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04477-y>
- Huqh, M., Abdullah, J., Wong, L.S., Jamayet, N., Alam, M., Rashid, Q.F., Husein, A., Ahmad, W.A.N.W., Eusufzai, S.Z., Prasad, S., Subramaniyan, V., Fuloria, N., Fuloria, S., Sekar, M. ve Selvaraj, S. (2022). Clinical applications of artificial intelligence and machine learning in children with cleft lip and palate—a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710860>
- Hwang, H.-W., Park, J.-H., Moon, J.-H., Yu, Y., Kim, H., Her, S.-B., Srinivasan, G., Aljanabi, M. N. A., Donatelli, R. E., & Lee, S.-J. (2019). Automated identification of cephalometric landmarks: Part 2-Might it be better than human?. *The Angle orthodontist*. <https://doi.org/10.2319/022019-129.1>
- Iftikhar, A., Zeb, S., & Israr, S. (2025). COMPARISON OF ACCURACY AND RELIABILITY OF CEPHALOMETRIC LANDMARKS AMONG DIGITAL SOFTWARE WEB CEPH AND CARE STREAM WITH TRADITIONAL MANUAL TRACING. *Journal of Gandhara Medical and Dental Science*. <https://doi.org/10.37762/jgmids.13-1.804>
- Jeon, S. ve Lee, K. (2021). Comparison of cephalometric measurements between conventional and automatic cephalometric analysis using convolutional neural network. *Progress in Orthodontics*, 22. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00358-4>
- Jiang, F., Guo, Y., Yang, C., Zhou, Y., Lin, Y., Cheng, F., Quan, S., Feng, Q. ve Li, J. (2022). Artificial intelligence system for automated landmark localization and analysis of cephalometry. *Dento Maxillo Facial Radiology*. 20220081. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20220081>
- Jiang, Y., Al-Mohana, R. A. A. M., Jiang, C., Zhang, X., Shi, B., Wu, Y., Wang, X., Huang, J., Huang, X., Lin, L., & Huang, L. (2026). Clinical accuracy of cephalometric analysis using deep learning-based automated landmark identification on CBCT in class I and class II malocclusions. *Scientific Reports*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41408-3>
- Johannes, T., Chaurasia, A., Joachim, K., Shankeeth, V., Anahita, H., Reza, M.S., Mohammad, B. ve Hossein, M.R. (2023). Evaluation of AI model for cephalometric landmark classification (TG Dental). *Journal of Medical Systems*, 47, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10916-023-01977-6>
- Junaid, N., Khan, N., Ahmed, N., Abbasi, M., Das, G., Maqsood, A., Ahmed, A., Marya, A., Alam, M., & Heboyan, A. (2022). Development, Application, and Performance of Artificial Intelligence in Cephalometric Landmark Identification and Diagnosis: A Systematic Review. *Healthcare*, 10. <https://doi.org/10.3390/healthcare10122454>

- Kang, S., Kim, I., Kim, Y.J., Kim, N., Baek, S. ve Sung, S.J. (2023). Accuracy and clinical validity of automated cephalometric analysis using convolutional neural networks. *Orthodontics & Craniofacial Research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.12683>
- Karagoz, H., Akarsu-Guven, B. ve Aksu, M. (2025). Accuracy of cephalometric analysis in cleft lip and palate: comparison of manual, artificial intelligence-based, and examiner-corrected artificial intelligence approaches. *The Cleft Palate Craniofacial Journal*, 63, 2927-2937. <https://doi.org/10.1177/10556656251400212>
- Kazimierczak, N., Chwaścianek, N., Sultani, N., Janiszewska-Olszowska, J., Jankowski, T., Nowicka, A., Serafin, Z. ve Kazimierczak, W. (2026). Reliability of AI-driven cephalometric analysis on CBCT: comparison with manual 2D cephalometry. *Progress in Orthodontics*, 27. <https://doi.org/10.1186/s40510-026-00613-6>
- Kazimierczak, N., Kazimierczak, W., Serafin, Z., Nowicki, P., Nożewski, J. ve Janiszewska-Olszowska, J. (2024). AI in orthodontics: revolutionizing diagnostics and treatment planning—a comprehensive review. *Journal of Clinical Medicine*, 13. <https://doi.org/10.3390/jcm13020344>
- Kazimierczak, N., Sultani, N., Krzykowski, S., Serafin, Z. ve Kazimierczak, W. (2026). CBCT-based orthodontic classification using commercial AI: completeness and accuracy in independent validation. *Journal of Clinical Medicine*, 15. <https://doi.org/10.3390/jcm15041637>
- Kazimierczak, W., Gawin, G., Janiszewska-Olszowska, J., Dyszkiewicz-Konwińska, M., Nowicki, P., Kazimierczak, N., Serafin, Z. ve Orhan, K. (2024). Comparison of three commercially available, AI-driven cephalometric analysis tools in orthodontics. *Journal of Clinical Medicine*, 13. <https://doi.org/10.3390/jcm13133733>
- Khanagar, S., Al-Ehaideb, A., Vishwanathaiah, S., Maganur, P., Patil, S., Naik, S., Baeshen, H. ve Sarode, S. (2020). Scope and performance of artificial intelligence technology in orthodontic diagnosis, treatment planning, and clinical decision-making - a systematic review. *Journal of Dental Sciences*, 16, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.05.022>
- Kim, H.J., Kim, K.D. ve Kim, D.H. (2022). Deep convolutional neural network-based skeletal classification of cephalometric image compared with automated-tracing software. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15856-6>
- Kim, I., Kim, Y.G., Kim, S., Park, J.W. ve Kim, N. (2021). Comparing intra-observer variation and external variations of a fully automated cephalometric analysis with a cascade convolutional neural net. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87261-4>
- Kim, J., Kim, I., Kim, Y.-J., Kim, M., Cho, J.-H., Hong, M., Kang, K.-H., Kim, S.-J., Kim, Y. H., Kim, N., Sung, S.-J., & Baek, S. (2021). Accuracy of automated identification of lateral cephalometric landmarks using cascade convolutional neural networks on lateral cephalograms from nationwide multi-centers.. *Orthodontics & craniofacial research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.12493>
- Kim, S., Kim, I., Cho, J.-H., Kang, K.-H., Kim, M.-J., Kim, S.-J., Kim, Y.-J., Sung, S.-J., Kim, Y. H., Lim, S.-H., Baek, S.-H., Kim, N., & Hong, M. (2025). Accuracy of artificial intelligence-assisted soft tissue landmark identification in serial lateral cephalograms of Class III two-jaw surgery patients. *Korean Journal of Orthodontics*, 55, 392 - 404. <https://doi.org/10.4041/kjod24.302>
- Kotuła, J., Konarzewski, M., Polkowski, J., Kotuła, K., Lis, J., Porowski, R., Kuc, A., Kawala, B. ve Sarul, M. (2026). Automated YOLO-based cephalometric landmark detection for ANB-

based skeletal classification: a retrospective single-centre study. *Journal of Clinical Medicine*, 15. <https://doi.org/10.3390/jcm15135149>

Kunz, F., Stellzig-Eisenhauer, A., Widmaier, L. M., Zeman, F., & Boldt, J. (2023). Assessment of the quality of different commercial providers using artificial intelligence for automated cephalometric analysis compared to human orthodontic experts. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 86, 145 - 160. <https://doi.org/10.1007/s00056-023-00491-1>

Lee, J., Bae, S.-R., & Noh, H.-K. (2023). Commercial artificial intelligence lateral cephalometric analysis: part 1-the possibility of replacing manual landmarking with artificial intelligence service.. *The Journal of clinical pediatric dentistry*, 47 6, 106-118. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2023.085>

Lee, J., Bae, S.-R., & Noh, H.-K. (2023). Commercial artificial intelligence lateral cephalometric analysis: part 2-effects of human examiners on artificial intelligence performance, a pilot study.. *The Journal of clinical pediatric dentistry*, 47 6, 130-141. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2023.087>

Lee, J.H., Yu, H., Kim, M.J., Kim, J.W. ve Choi, J. (2020). Automated cephalometric landmark detection with confidence regions using Bayesian convolutional neural networks. *BMC Oral Health*, 20. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01256-7>

Lin, Y., Auta, A., Brown, J., Cure, R. ve Ireland, R. (2026). The accuracy of artificial intelligence in identifying cephalometric landmarks: a scoping review. *International Orthodontics*, 24(4), 101205. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2026.101205>

Londono, J., Ghasmi, S., Shah, A.H., Fahimipour, A., Ghadimi, N., Hashemi, S., Sultan, Z.K. ve Dashti, M. (2023). Evaluation of deep learning and convolutional neural network algorithms accuracy for detecting and predicting anatomical landmarks on 2D lateral cephalometric images: a systematic review and meta-analysis. *The Saudi Dental Journal*, 35, 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.05.014>

Mahto, R. K., Kafle, D., Giri, A., Luintel, S., & Karki, A. (2022). Evaluation of fully automated cephalometric measurements obtained from web-based artificial intelligence driven platform. *BMC Oral Health*, 22. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02170-w>

Majd, F.E., Langari, S.F. ve Langari, S.H. (2026). Artificial intelligence in pediatric lateral cephalometric detection and analysis: a narrative review. *Journal of Pediatrics Review*. <https://doi.org/10.32598/jpr.14.2.1396.1>

Mercier, J.-P., Rossi, C., Sánchez, I., Renovales, I. D., Sahagún, P. M.-P., & Templier, L. (2024). Reliability and accuracy of Artificial intelligence-based software for cephalometric diagnosis. A diagnostic study. *BMC Oral Health*, 24. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05097-6>

Meriç, P., & Naoumova, J. (2020). Web-based Fully Automated Cephalometric Analysis: Comparisons between App-aided, Computerized, and Manual Tracings.. *Turkish journal of orthodontics*, 33 3, 142-149. <https://doi.org/10.5152/turkjorthod.2020.20062>

Merouani-Drissi, A. E., Benmohim, H., Alassfar, A., Ahmadoun, D., Zaoui, F., & Benyahia, H. (2026). Evaluation of Accuracy and Reproducibility of an AI-Based Cephalometric Landmark Detection Software: A Comparative Study with Manual Annotations. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 18, e720 - e728. <https://doi.org/10.4317/jced.64030>

Mikulewicz, M., & Chojnacka, K. (2025). Artificial Intelligence in Malocclusion Diagnosis: Capabilities, Challenges, and Clinical Integration. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app152413138>

- Mohammad-Rahimi, H., Nadimi, M., Rohban, M.H., Shamsoddin, E., Lee, V. ve Motamedian, S. (2021). Machine learning and orthodontics, current trends and the future opportunities: a scoping review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.02.013>
- Neeraja, R. ve Anbarasi, L. (2025). A critical review of artificial intelligence based techniques for automatic prediction of cephalometric landmarks. *Artificial Intelligence Review*, 58. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11135-8>
- Nordblom, N. F., Büttner, M., & Schwendicke, F. (2024). Artificial Intelligence in Orthodontics: Critical Review. *Journal of Dental Research*, 103, 577 - 584. <https://doi.org/10.1177/00220345241235606>
- Ozmen, B.B. ve Taub, P. (2026). Ethical and regulatory considerations for artificial intelligence adoption in craniofacial surgery. *The Journal of Craniofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1097/scs.00000000000012430>
- Polizzi, A. ve Leonardi, R. (2024). Automatic cephalometric landmark identification with artificial intelligence: an umbrella review of systematic reviews. *Journal of Dentistry*. 105056. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105056>
- Polizzi, A., Lo Giudice, A., Conforte, C., Isola, G., & Leonardi, R. (2025). Influence of head positioning errors on the accuracy of fully automated artificial intelligence-based cephalometric software.. *The Angle orthodontist*. <https://doi.org/10.2319/123124-1075.1>
- Putra, R., Doi, C., Yoda, N., Astuti, E. ve Sasaki, K. (2021). Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dento Maxillo Facial Radiology*. 20210197. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210197>
- Raby, I., Rojas, V., Celis, A., García-Duhalde, C., & Martinac, M. (2025). Accuracy and reliability of 2 artificial intelligence platforms for cephalometric analysis compared with a semiautomatic computer program.. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 168 4, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2025.04.011>
- Rajan, P.T. ve Anuradha, P. (2026). Artificial intelligence in dentistry: current evidence, clinical utility, and challenges. *Journal of Applied Dentistry and Oral Sciences*, 12, 69-73. <https://doi.org/10.1177/30497418261436516>
- Sadek, M., Alaskari, O. ve Hamdan, A.M. (2024). Accuracy of web-based automated versus digital manual cephalometric landmark identification. *Clinical Oral Investigations*, 28. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-06021-6>
- Sahlsten, J., Järnstedt, J., Jaskari, J., Naukkarinen, H., Mahasantipiya, P., Charuakkra, A., Vasankari, K., Hietanen, A., Sundqvist, O., Lehtinen, A. ve Kaski, K. (2024). Deep learning for 3D cephalometric landmarking with heterogeneous multi-center CBCT dataset. *PLOS ONE*, 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0305947>
- Savkan, İ., Özçankaya, S. N., & Turan, Ö. N. (2026). Accuracy of cephalometric landmark identification on artificial intelligence-based software: a comparative study. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 31. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.31.2.e2625144.oar>
- Schwendicke, F., Chaurasia, A., Arsiwala, L., Lee, J.-H., Elhennawy, K., Jost-Brinkmann, P., Demarco, F., & Krois, J. (2021). Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 25, 4299 - 4309. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03990-w>

- Shin, S.H. ve Kim, D. (2022). Comparative validation of the mixed and permanent dentition at web-based artificial intelligence cephalometric analysis. *The Journal of the Korean Academy of Pediatric Dentistry*. <https://doi.org/10.5933/jkapd.2022.49.1.85>
- Shinde, R., Rao, D., Panwar, S. ve Phalke, M. (2026). Pediatric validation of an AI-assisted smartphone application (WebCeph) for cephalometric analysis: reliability, reproducibility and time-efficiency assessment. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 31. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.31.2.e2625274.oar>
- Silva, T., Puntigam, G. S., Andrade-Bortoletto, M. F. S., Takeshita, W., Oliveira-Santos, C., & Freitas, D. Q. (2025). Populational influence on cephalometric landmark identification: performance of two AI-driven software programs in Brazilian and Korean images. *BMC Oral Health*, 25. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-06807-4>
- Song, Y., Qiao, X., Iwamoto, Y., Chen, Y.W. ve Chen, Y. (2021). An efficient deep learning based coarse-to-fine cephalometric landmark detection method. *IEICE Trans. Inf. Syst.*, 104-D, 1359-1366. <https://doi.org/10.1587/transinf.2021edp7001>
- Subramanian, A., Chen, Y.C., Almalki, A., Sivamurthy, G. ve Kafle, D. (2022). Cephalometric analysis in orthodontics using artificial intelligence—a comprehensive review. *BioMed Research International*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1880113>
- Tageldin, M. A., Yacout, Y., Eid, F. Y., & Abdelhafiz, S. H. (2025). Accuracy of cephalometric landmark identification by artificial intelligence platform versus expert orthodontist in unilateral cleft palate patients: A retrospective study.. *International orthodontics*, 23 2, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.ortho.2025.100990>
- Tanikawa, C., Lee, C., Lim, J., Oka, A. ve Yamashiro, T. (2021). Clinical applicability of automated cephalometric landmark identification. part I - patient-related identification errors. *Orthodontics & Craniofacial Research*. <https://doi.org/10.1111/ocr.12501>
- Tian, Q. (2026). Research progress and application of artificial intelligence in cephalometric analysis. *BIO Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202621401007>
- Tsolakis, I.A., Tsolakis, A., Elshebiny, T., Matthaios, S. ve Palomo, J. (2022). Comparing a fully automated cephalometric tracing method to a manual tracing method for orthodontic diagnosis. *Journal of Clinical Medicine*, 11. <https://doi.org/10.3390/jcm11226854>
- Uğurlu, M. (2022). Performance of a Convolutional Neural Network- Based Artificial Intelligence Algorithm for Automatic Cephalometric Landmark Detection.. *Turkish journal of orthodontics*, 35 2, 94-100. <https://doi.org/10.5152/turkjorthod.2022.22026>
- Yao, J., Zeng, W., He, T., Zhou, S.Y., Zhang, Y., Guo, J. ve Tang, W. (2021). Automatic localization of cephalometric landmarks based on convolutional neural network. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.09.012>
- Ye, H., Cheng, Z., Ungvijanpunya, N., Chen, W., Cao, L., & Gou, Y. (2023). Is automatic cephalometric software using artificial intelligence better than orthodontist experts in landmark identification?. *BMC Oral Health*, 23. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03188-4>
- Yu, H., Cho, S., Kim, M., Kim, W.H., Kim, J. ve Choi, J. (2020). Automated skeletal classification with lateral cephalometry based on artificial intelligence. *Journal of Dental Research*, 99, 249-256. <https://doi.org/10.1177/0022034520901715>
- Zaborowicz, K., Zaborowicz, M., Cieślińska, K. ve Biedziak, B. (2026). Artificial intelligence methods in cephalometric image analysis—a systematic narrative review. *Journal of Clinical Medicine*, 15. <https://doi.org/10.3390/jcm15051920>

Zalana, A., Bud, E., Teodorescu, E., Bucur, S. ve Păcurar, M. (2025). Advantages of using artificial intelligence in establishing the diagnosis and prognosis of dento-maxillary anomalies. *Romanian Journal of Stomatology*. <https://doi.org/10.37897/rjs.2025.4.11>

Zeng, M., Yan, Z., Liu, S., Zhou, Y. ve Qiu, L. (2020). Cascaded convolutional networks for automatic cephalometric landmark detection. *Medical Image Analysis*, 68, 101904. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101904>