

Yapay Zekâ ve Spinal Cerrahi

Artificial Intelligence and Spinal Surgery

Öz

Yapay zekâ, ilk kez 1950'de tanımlandı ancak 2000'li yılların başında derin öğrenmenin ortaya çıkışıyla inanılmaz bir ivme kazandı. Bilimin diğer dallarında olduğu gibi tıp alanında da yaygın bir şekilde yer bulmaya başladı. Yapay zekâ modelleri, hasta görüntüleme girişi sayesinde tanıya ve omurga cerrahi yaklaşımlarını planlamada, hastaya en doğru tedavi seçeneği sunulması konusunda hekime yardımcı olabilmektedir. Günümüzde, algoritmaları sayesinde cerrahi endikasyon belirleyebilen yapay zekânın, tedavi sonucunu ve gelişebilecek komplikasyonları tahmin etme konusunda başarılı olduğu söylenebilir. Artık yapay zekâ sistemleri karmaşık algoritmaları analiz etme ve kendi kendine öğrenme yeteneğine sahip olduğundan, tıpta yapay zekânın risk değerlendirme modelleri aracılığıyla klinik uygulamaya adapte edilebileceği yeni bir çağa giriyoruz.

Anahtar Sözcükler: Yapay zekâ, Derin öğrenme, Makine öğrenimi, Omurga, Spinal cerrahi

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) was first defined in 1950, but it gained incredible momentum with the emergence of deep learning in the early 2000s. It began to find widespread use in the field of medicine, as in other fields of science. AI models, thanks to patient imaging inputs, can assist the physician in diagnosing and planning spinal surgical approaches and offering the most appropriate treatment option to the patient. In our day, it can be said that artificial intelligence, which can determine surgical indications thanks to its algorithms, is successful in predicting the treatment outcome and complications that may develop. As AI systems now have the ability to analyse complex algorithms and self-learn, we are entering a new era in medicine where AI can be adapted to clinical practice through risk assessment models.

Keywords: Artificial intelligence, Deep learning, Machine learning, Spine, Spinal surgery

GENEL BİLGİLER

Akıllı makineler üretme bilimi ve mühendisliği olarak tanımlanan yapay zekâ (YZ), resmi olarak 1956'da doğdu. YZ, bir sisteme dış veriler yüklenmesi sonrası bunları öğrenme ve doğru şekilde yorumlama, bu öğrendiklerini esnek adaptasyon yoluyla belirli hedeflere ve görevlere ulaşmak için kullanma yeteneği olarak tanımlanmıştır (7,12). İlk otomatik makine algoritmasının 1959'da ortaya çıkması, bugün endüstride hâlihazırda kullanılan sistemlerin önü açılmış oldu. Makine öğrenimi (MÖ), bir insan tarafından programlanmak yerine, verilerden deneysel bilgi elde edebilen algoritmalarla ilgilenen bir YZ alt kümesidir (17). MÖ, bilgisayar biliminden kaynaklanır ve belirli görevleri gerçekleştirmek için bir veri tabanının analiz edilmesiyle oluşturulan algoritmaları kullanır. Bu algoritmalar arasında karar ağaçları veya rastgele ormanlar, destek vektör makineleri ve yapay sinir ağları (YSA) yer almaktadır. Konvolüsyonel sinir ağları (KSA), görsel korteksden ilham almıştır ve görüntü veya ses tanımda kullanılan

bilgi kombinasyonlarını işlerler. Derin öğrenme (DÖ), bir dizi MÖ yöntemini bir araya gruplandırır ve birden fazla yapay nöron katmanı kullanarak karmaşık ilişkileri yüksek derecede soyutlayıp modellemek için kullanılır (4). Kendi kendine park eden arabalar, internette karşımıza çıkan reklamlar ve akıllı telefonların sesli yanıt sistemlerinde olduğu gibi yaşantımızın birçok yerinde karşımıza çıkan ve çıkacak olan YZ için yapılan araştırma geliştirme ve programlarının sayısı hızla artmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2013'ten bu yana YZ ile ilgili faaliyet gösteren 4.643 şirkete yaklaşık 250 milyar dolarlık yatırım yapılmıştır. Geçtiğimiz yıl sadece sağlık alanındaki YZ uygulama ve çalışmalarına, dünya genelinde 6.1 milyar dolar yatırım payı ayrılmıştır.

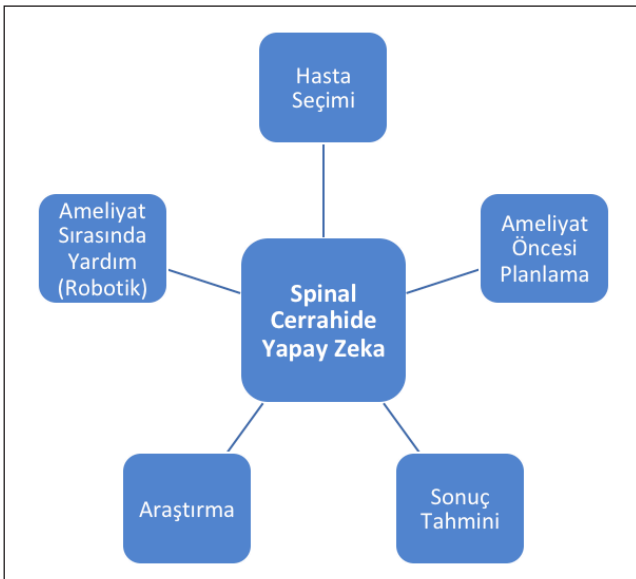
YZ'nın Spinal Cerrahideki Rolü

YZ, karmaşık bilgisayar programlarıyla insan zekâsını simüle etmek için makinelerin kullanıldığı bir dizi teori ve tekniktir. Başlangıçta tıp alanına uyarlanmakta zorluk yaşansa da DÖ gibi YZ modellerinin ortaya çıkmasıyla bu zorluk aşıldı. Gü-

nümüzde; robotik, teşhis, tıbbi istatistik, tedavi algoritmaları oluşturma, araştırma, tıp eğitimi ve insan biyolojisi gibi tıp alanındaki geniş bir yelpazede kendine yer bulmaya başladı. Son 10 yılda, omurga cerrahisi ve araştırmalarında, YZ benzersiz bir ilerleme gösterdi. Araştırmaların ve klinik deneylerin sürekli olarak ilerlemesi, omurga hakkındaki ve farklı omurga patolojilerinin tedavisi ile ilgili çok çeşitli bilgiler ortaya çıkardı. Her hasta için en iyi tedaviyi planlamak ve hastanın geçmişinin ve bireysel özelliklerinin klinisyen tarafından ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi çok zor ve zaman alıcı olabilir. Aynı görüntüleme özelliklerine sahip hastaların farklı semptomlarla başvurabileceği ve bu yüzden hekimlerin işini daha da zorlaştırabileceği bilinen bir gerçektir. Tedaviye karar vermede ve tedavi sonuçlarını tahmin etmede YZ, demografik ve radyolojik verileri birleştirip inceleyerek, her hastaya daha kişisel bir tedavi planı sunabilir (2). Zamansal ve ekonomik açıdan daha verimli olmak amacıyla bilgisayar bilimciler, analistler ve klinisyenlerin oluşturduğu multidisipliner bir yaklaşımla MÖ teknikleri kullanılarak görüntüleme bulgularının otomatik tespiti geliştirilmiştir. Her geçen gün, omurga cerrahisinde YZ ve modellerinin, preoperatif hasta değerlendirme, hasta seçimi, tanı, tedavi seçimi, cerrahiye yardım (robotik spinal cerrahi), araştırma ve tedavi sonuç tahmininde faydalı ve başarılı olduğunu bildiren çalışmalar literatürde yerini almaya devam etmektedir (Şekil 1).

YZ ve Radyolojik Tanı ilişkisi

Radyologlar ve spinal cerrahi ile ilgilenen ortopedist ve beyin cerrahları, spinal patolojilerinin teşhisi, sınıflandırılması ve tedavisi için şüphesiz, tıbbi görüntülemeye ihtiyaç duyarlar. Günümüzde, radyografiler büyük kırıkların ve eklem aralıklarının daralmasının tespiti için sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bilgisayarlı tomografi (BT) taramaları, ince kırıklar ve diğer kemik değişiklikleri için kemiğin daha yüksek çözünürlüğünü sağlar ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) de yumuşak doku değerlendirilmesinde oldukça başarılıdır. YZ ile görüntüleme değerlendirmeleri, en uygun tedaviye karar vermede cerraha yardımcı olabilir. Ayrıca, tıbbi görüntülemenin insan tarafından değerlendirilmesinin tam olarak tamamlanması onlarca dakika sürebilir ve tıbbi görüntülemenin, özel-



Şekil 1: Spinal cerrahide YZ'nin sağladığı avantajlar.

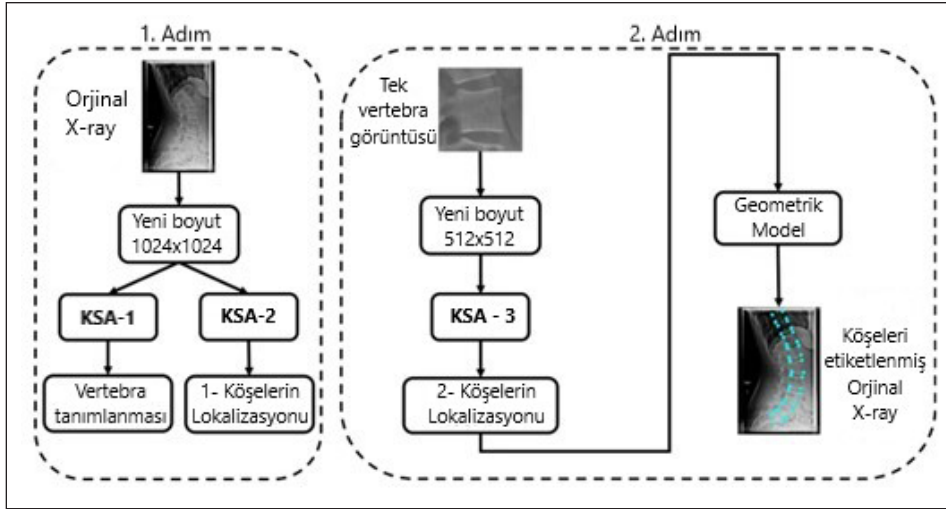
likle de MRG'nin elde edilmesi zaman alır. En başlarda, YZ programlarına radyolojik veriler öğretilerek normal anatomik yapıların tanımlanması sağlandı. Cina ve ark, 2021 yılında Lomber omurganın sagittal röntgen görüntüsünü girdi olarak alan ve görüntülerdeki vertebra köşelerinin piksel cinsinden (x, y) koordinatlarını çıktı olarak üreten 3 adımlı bir DÖ modeli kullandılar ve omurganın bu model ile tespitinde % 98,4'lük bir doğruluk saptadılar (Şekil 2) (5). Modelin sağlamlığını çok çeşitli durumlarla (artefakt, azalmış görüş alanı, omurga enstrümantasyonu, omurga fleksiyon-ekstansiyon ve rotasyonu) test edilerek doğruladılar. Bu ve bu gibi DÖ modelleri; koordinatlar, lordoz açıları ve pelvik parametrelerin hesaplanmasına olanak sağladı. Böylelikle radyografi üzerinde YZ kullanılarak yapılan skolyoz ve omurga kırıklarının tedavi planlamalarının yolu açılmış oldu.

Elli beş hastanın sagittal balanslarının retrospektif olarak değerlendirildiği ve DÖ kullanılan bir başka analizde, cerrahların yaygın olarak kullandığı ve manuel olarak ölçümler yaptığı SurgiMap Spine yazılımı ve DÖ modeli karşılaştırıldı (14). DÖ modelinde, C7 vertebra gövdesi ile sakral uç plak tanımlandı. SurgiMap Spine yazılımıyla yapılan manuel ölçümlerin 75 saniyede, DÖ modeli ile yapılan otomatik ölçümlerin 1 saniyede sonuç verdiği görüldü. Çalışmada, sonuç doğruluğunda manuel ve DÖ arasında bir farklılık saptanmadığı ve YZ'nin skolyoz tedavi planlamasında güvenilir ve ekonomik olduğu vurgulanmıştır (Şekil 3).

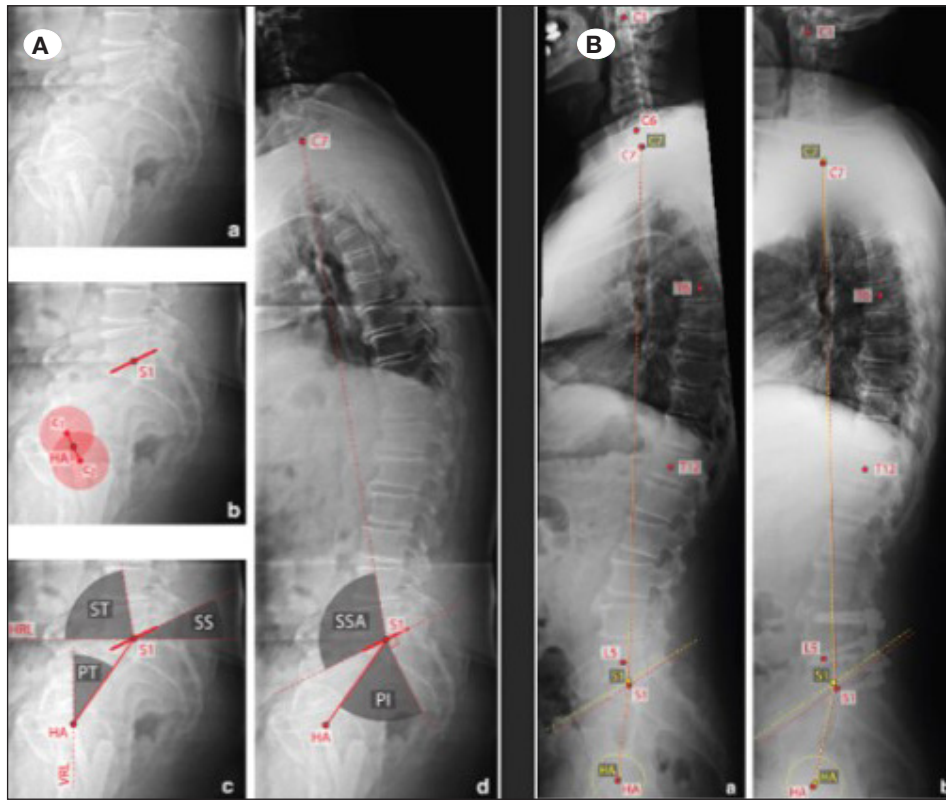
Araştırmacılar, radyografilerdeki YZ'nin başarılı tanımlamalarından sonra BT ve MR tabanlı YZ çalışmalarına ağırlık vermeye başladılar. Lumbosakral BT görüntülemelerine göre Kambin üçgeninin, manuel ve DÖ ile değerlendirildiği bir çalışmada, DÖ ve manuel değerlendirmelerinin her ikisinin de başarılı ve güvenilir olduğu, birbirlerine üstün olmadıkları sonucuna varılmıştır. MRG üzerinde YZ'nin disk, vertebra ve spinal segment tanımlamaları için nesnel tanımlama, lokalizasyon ve klasifikasyon kavramları kullanılmıştır (Şekil 4). MRG bazlı ilk YZ çalışmalarından birinde, bir YZ modeli, %89,41'lik bir vertebra sınıflandırma oranı ve %97,8'lik disk etiketleme oranı yakalamıştır (16). Biyomühendislik dalında 2017 yılında ödül alan, Jamaludin ve ark'ın çalışmasında; MRG'de disk etiketleme ve disklerin radyolojik sınıflandırılması (dejenerasyon, diskopati, spondilolistezis, spinal stenoz) için bir YZ modeli olan KSA kullanıldı. Çalışmada, YZ, disk tespiti ve etiketleme açısından %95,6 doğruluk sağlarken, radyolojik sınıflandırmada YZ'nin artık insan performansıyla aynı seviyede olduğu belirtildi (11).

YZ sayesinde Spinal Patolojiyi Belirleme

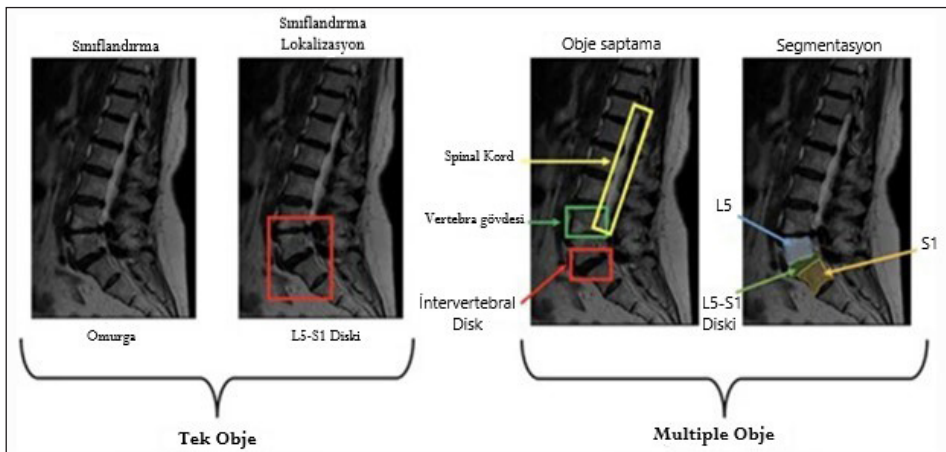
YZ modellerinin, normal spinal anatomiye başarıyla tanımlanabilmesi, başta radyologlar, spinal cerrahlar ve bilgisayar bilimciler olmak üzere birçok bilim insanını spinal patolojilerin tanımlanması konusunda YZ'yi kullanmakta cesaretlendirmiştir. Böylelikle, radyolojik görüntülerde skolyoz, spinal stenoz ve osteoporotik fraktür gibi spinal patolojileri saptayan YZ modelleri geliştirilmiştir. Basit, hızlı ve ucuz bir inceleme olan düz radyografilere uygulanan DÖ metodlarıyla osteoporotik vertebra kırıklarının tespitinin incelendiği birçok çalışmada; yüksek başarı oranları raporlanmıştır. Örneğin; Shen ve ark'nın 11.397 düz radyografinin incelendiği çok merkezli çalışmasında, DÖ modeli; iskelet lokalizasyonu ve segmentasyon uygulamasıyla tüm vertebra kırık tiplerinde yüksek doğruluk (%97,41) ve çabukluk göstermiştir (18). Metastatik



Şekil 2: Üç adımlı DÖ modeli olan KSA kullanılarak radyografilerde vertebra tanımlama prensibi. KSA: Konvolüsyonel sinir ağı.



Şekil 3: A) DÖ modeli için sakral uç plak ve C7 vertebra korpusunun tanımlanması. B) Preoperatif (a) ve postoperatif (b) manuel (sarı) ve DÖ (kırmızı) tarafından yapılan ölçüm çizgileri.



Şekil 4: YZ'da; klasifikasyon, lokalizasyon, nesnel tanımlama ve segmentasyon metodları ile disk, spinal segment tipi (lomber-torakal), vertebra gövdesi, spinal kord ve spinal kanal gibi anatomik yapıların MRG'de tanımlanması.

epidural spinal kord kompresyonunun (MESKK) BT görüntüleri üzerinde, bir DÖ modeli tarafından Bilsky skorlamasının yapıldığı 2022 yılında yayınlanan çalışmada, önce BT'de kırın, kemik ve omurga penceresi DÖ modelinde tanımlandı. Herhangi bir MESKK derecesinin tespiti için DÖ modelleri, yüksek hassasiyet (%83,0–92,7) ve özgüllük (%92,2–96,8) göstermiştir (8). Aynı ekibin bu kez MESKK'nun Bilsky sınıflandırmasının MRG üzerinde değerlendirildiği ve DÖ modelinin test edildiği çalışmada, DÖ modeli, hem deneyimli nöroradyologlara hem de omurga cerrahlarına göre istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek hassasiyet ve doğruluk göstermiştir (9). Bu ve bu gibi çalışmalara bakıldığında; omurga radyolojisinde, YZ'nın yakın gelecekte daha çok yer alacağı düşüncesi gün geçtikçe ağırlık kazanmaktadır.

YZ'nın Hasta Seçimi ve Sonuç Tahmin Etmedeki Etkisi

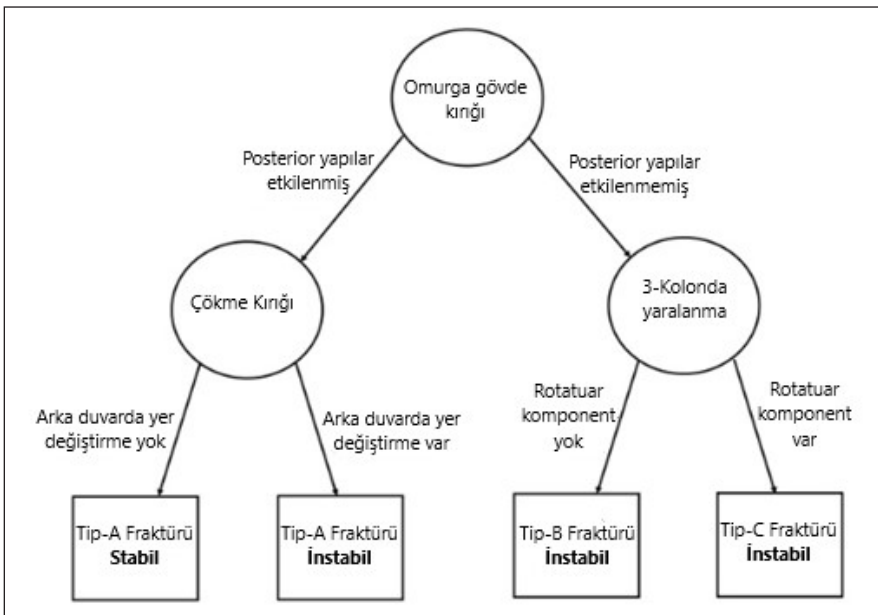
Standart MÖ modellerinden bazıları olan sınıflandırma ve regresyon ağaçları (SVRA) ya da rastgele ormanlar; çeşitli potansiyel tedavi kararların görsel bir değerlendirmesini sağlar. SVRA modelleri, ağacı birden fazla küçük dala bölen birçok düğümden dolayı çok karmaşık olabilir. Şekil 5'deki AOSpine kriterlerine dayalı stabilite veya instabilite konusunda rehberlik sağlayan torakolomber kırıkların sınıflandırılmasına yönelik bir karar ağacı örneğinde olduğu gibi, YZ, cerrahi/cerrahi dışı kararlara rehberlik sunabilir (4). Omurga cerrahları, torakolomber vertebra kırıklarının cerrahi tedavisine karar verirken sıklıkla torakolomber yaralanma sınıflaması ve ciddiyeti skorunu (TLICS) göz önünde bulundurlar. BT üzerinde posterior longitudinal ligaman bütünlüğü (PLL) ve TLICS'ni değerlendiren bir DÖ modeli, yüksek doğruluk göstermiştir (TLICS'te; %86,3, PLL bütünlüğünde; % 90) (6). Önümüzdeki yıllarda, omurga cerrahisi tanı ve tedavi sınıflandırma/skorlamalarının, YZ tarafından kullanılarak karar vermede cerrahlara yardımcı olması; sürpriz olmayacaktır.

Omurga cerrahlarının ve hastaların en istemediği şey şüphesiz ki; cerrahi sırasında ve sonrasında gelişen komplikasyonlardır. Cerrahin, hastayı tedavi öncesinde, hastalığın ve tedavinin sonucunun yanı sıra beklenen ve beklenmeyen komplikasyon olasılıkları hakkında bilgilendirmesi oldukça

önemlidir. Bu, hasta-hekim ilişkisinin sürdürülebilirliğine, hastanın tedaviyi kabul edip etmeme tercihine ve cerrahın cerrahi stratejisini seçerken riskleri göz önünde bulundurmasına yardımcıdır. YZ'yı kullanarak, tedavi sonucu, nüks ve komplikasyonları tahmin etmeyi amaçlayan çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Harada ve ark, her spinal cerrahın karşısına çıkabilen nüks lomber disk hernisi olasılığı hesaplayan bir MÖ analitiğini kullandılar (10). Amaçladıkları kişiselleştirilmiş risk tahmini sayesinde, nüks lomber disk hernisinin öngörülebilir bir sonuç olduğunu ve dekompresyon sonrası yeniden herniasyon profili olarak bilinen riskleri azaltan-artıran önemli faktörlerin olduğunu MÖ sayesinde teyid etmiş oldular. Ayrıca Kim ve ark; cinsiyet, yaş, etnik köken, diyabet, sigara içme, steroid kullanımı, koagülopati, fonksiyonel durum, vücut kütle indeksi, pulmoner komorbiditeler ve kardiyak komorbiditeler gibi demografik verilerle eğitilen lojistik regresyon (LR) ve YSA gibi MÖ modellerinin kullanarak lomber spinal cerrahide önceden tahmin edilebilen komplikasyonları araştırdılar (13). Bu modeller, 22.629 hastanın cerrahisi sonrası, kardiyak komplikasyonlar, yara komplikasyonlarını, venöz tromboembolizmi (VTE) ve mortaliteyi tahmin etmek için kullanılmış, YSA ve LR tüm bu komplikasyonları tahmin etmede Amerikan Anesteziyologlar Derneği'nin (ASA) sınıflamasına göre daha başarılı olmuştur.

Robotik Spinal Cerrahi

Son yıllarda omurga cerrahisinde robotik, popülerlik kazanmaya başladı. Bu teknolojiye, dekompresyonun gerekli olmadığı durumlarda pedikül vidasının yörüngesini belirlemek için bir kamera, bir planlama istasyonu, navigasyon ve YZ sayesinde cerraha kılavuzluk eden bir kol kullanılır (19). Robot yardımlı enstrümantasyon; preoperatif ya da intraoperatif BT, intraoperatif radyografi ve cerrahi navigasyondan elde edilen verileri kullanarak MÖ algoritmalarına dayalı olarak pedikül vidalarının uygun bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanır. Ameliyat sırasında yapılan manipülasyonlardan dolayı kemik fragmanlarının veya hedef bölgenin hareketleri gibi bazı sınırlamalar mevcuttur. Ancak robotiğin, hepimizin günlük pratikte sıklıkla uyguladığımız; floroskopi altında ge-



Şekil 5: AOSpine'nin Torakolomber kırık sınıflandırmasının kullanıldığı bir karar ağacı örneği.

leneksel serbest el tekniğine göre daha yüksek doğrulukta vida yerleştirme, daha az hastane yatışı, komplikasyon ve kan transfüzyonu gereksinimi ile hasta ve cerrahi ekibin daha az radyasyona maruz kalması gibi avantajlar sağladığı bildirilmektedir (15).

YZ ve Araştırma

Tıbbi araştırmalarda genellikle istatistiksel yöntemler kullanılır. MÖ, istatistiksel modelleri bütünleştirir. Ancak bilgisayarlı bir yaklaşıma dayanan MÖ yöntemleri ile matematiksel bir yaklaşıma dayanan istatistiksel yöntemler arasında farklılıklar vardır (3). DÖ'yi de içeren MÖ teknikleri, birden fazla düzeyde dolaylı ilişkilerle daha karmaşık ilişkileri keşfederek bir sonucu tahmin etmek için kullanılabilir. İstatistiksel yaklaşım, genellikle aynı anda bir model kullanırken, MÖ birden fazla modeli paralel olarak kullanılabilir. Buna rağmen, MÖ'nin omurga cerrahisi araştırmalarındaki rolü hâlâ sınırlıdır; ancak erişkin omurga deformitesindeki ilk çalışmalar, sağlık ekonomisini de göz önünde bulundurarak, yaşam kalitesinin, intra-operatif risklerin veya risk-fayda oranının tahmin edilebileceğini göstermektedir (1,4).

SONUÇ

İnsanoğlunun asla vazgeçemediği merak ve keşfetme içgüdü; YZ'nin yine insanoğlu karşısındaki önlenemez yükselişinin temel sebebidir. YZ, yapılan çalışmalar ve geliştirmeler sayesinde her geçen gün daha çok güçlenmekte, daha az hata oranlarıyla tıp alanında kendine yer bulmaktadır. Omurga cerrahisine etkisi konusunda yapılan çalışmalar, bu teknolojiyi özellikle hasta seçimi, robotik, teşhis ve sonuç tahmini konularında başarısının hızla arttığını göstermektedir. Ülkemizde, YZ'ya daha çok yatırım yapılmalı, eğitim programlarına yer verilmelidir.

KAYNAKLAR

- Ames CP, Smith JS, Pellisé F, Kelly M, Gum JL, Alanay A, Acaroğlu E, Pérez-Grueso FJS, Kleinstück FS, Obeid I, Vila-Casademunt A, Shaffrey CI Jr, Burton DC, Lafage V, Schwab FJ, Shaffrey CI Sr, Bess S, Serra-Burriel M; European Spine Study Group; International Spine Study Group: Development of predictive models for all individual questions of SRS-22R after adult spinal deformity surgery: A step toward individualized medicine. *Eur Spine J* 28(9):1998-2011, 2019
- Benzakour A, Altsitzoglou P, Lemée JM, Ahmad A, Mavrogenis AF, Benzakour T: Artificial intelligence in spine surgery. *Int Orthop* 47(2):457-465, 2023
- Chang M, Canseco JA, Nicholson KJ, Patel N, Vaccaro AR: The Role of machine learning in spine surgery: The future is now. *Front Surg* 7:54, 2020
- Charles YP, Lamas V, Ntilikina Y: Artificial intelligence and treatment algorithms in spine surgery. *Orthop Traumatol Surg Res* 109(1S):103456, 2023
- Cina A, Bassani T, Panico M, Luca A, Masharawi Y, Brayda-Bruno M, Galbusera F: 2-step deep learning model for landmarks localization in spine radiographs. *Sci Rep* 11(1):9482, 2021
- Doerr SA, Weber-Levine C, Hersh AM, Awosika T, Judy B, Jin Y, Raj D, Liu A, Lubelski D, Jones CK, Sair HI, Theodore N: Automated prediction of the thoracolumbar injury classification and severity score from CT using a novel deep learning algorithm. *Neurosurg Focus* 52(4):E5, 2022
- Hamet P, Tremblay J: Artificial intelligence in medicine. *Metabolism* 69S:S36-S40, 2017
- Hallinan JTPD, Zhu L, Zhang W, Kuah T, Lim DSW, Low XZ, Cheng AJL, Eide SE, Ong HY, Muhamat Nor FE, Alsooreti AM, AIMuhaish MI, Yeong KY, Teo EC, Barr Kumarakulasinghe N, Yap QV, Chan YH, Lin S, Tan JH, Kumar N, Vellayappan BA, Ooi BC, Quek ST, Makmur A: Deep learning model for grading metastatic epidural spinal cord compression on Staging CT. *Cancers (Basel)* 14(13):3219, 2022
- Hallinan JTPD, Zhu L, Zhang W, Lim DSW, Baskar S, Low XZ, Yeong KY, Teo EC, Kumarakulasinghe NB, Yap QV, Chan YH, Lin S, Tan JH, Kumar N, Vellayappan BA, Ooi BC, Quek ST, Makmur A: Deep learning model for classifying metastatic epidural spinal cord compression on MRI. *Front Oncol* 12:849447, 2022, 2022
- Harada GK, Siyaji ZK, Mallow GM, Hornung AL, Hassan F, Basques BA, Mohammed HA, Sayari AJ, Samartzis D, An HS: Artificial intelligence predicts disk re-herniation following lumbar microdiscectomy: Development of the "RAD" risk profile. *Eur Spine J* 30(8):2167-2175, 2021
- Jamaludin A, Lootus M, Kadir T, Zisserman A, Urban J, Battié MC, Fairbank J, McCall I; Genodisc consortium. ISSLS Prize in Bioengineering Science 2017: Automation of reading of radiological features from magnetic resonance images (MRIs) of the lumbar spine without human intervention is comparable with an expert radiologist. *Eur Spine J* 26(5):1374-1383, 2017
- Kaul V, Enslin S, Gross SA: History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointest Endosc* 92(4):807-812, 2020
- Kim JS, Merrill RK, Arvind V, Kaji D, Pasik SD, Nwachukwu CC, Vargas L, Osman NS, Oermann EK, Caridi JM, Cho SK: Examining the ability of artificial neural networks machine learning models to accurately predict complications following posterior lumbar spine fusion. *Spine (Phila Pa 1976)* 43(12):853-860, 2018
- Korez R, Putzier M, Vrtovec T: A deep learning tool for fully automated measurements of sagittal spinopelvic balance from X-ray images: Performance evaluation. *Eur Spine J* 29:2295-2305, 2020
- Matur AV, Palmisciano P, Duah HO, Chilakapati SS, Cheng JS, Adogwa O: Robotic and navigated pedicle screws are safer and more accurate than fluoroscopic freehand screws: A systematic review and meta-analysis. *Spine J* 23(2):197-208, 2023
- Oktay AB, Akgul YS: Simultaneous localization of lumbar vertebrae and intervertebral discs with SVM-based MRF. *IEEE Trans Biomed Eng* 60(9):2375-2383, 2013
- Samuel AL: Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM J Res Dev* 3:210-229, 1959
- Shen L, Gao C, Hu S, Kang D, Zhang Z, Xia D, Xu Y, Xiang S, Zhu Q, Xu G, Tang F, Yue H, Yu W, Zhang Z: Using artificial intelligence to diagnose osteoporotic vertebral fractures on plain radiographs. *J Bone Miner Res* 38(9):1278-1287, 2023
- Süner HI, Martínez-Olascoaga DO, Pérez González JL, Pérez RL, Carrascosa-Granada A, Domínguez I: Robotic Spinal Surgery *Türk Nöroşir Derg* 32(2):242-249, 2022