



# Nöroşirürjide Büyük Veri ve Yapay Zekâ: Görüntüleme Uygulamaları

## Big Data and Artificial Intelligence in Neurosurgery: Implementation in Imaging

Mehmet Özgür YILMAZ<sup>1</sup>, Serdar Onur AYDIN<sup>1</sup>, Oğuz BARAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Koç Üniversitesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı, Mikro-Endo Nöroşirürji ve Nöroanatomi Laboratuvarı, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Koç Üniversitesi Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

**Yazışma adresi:** Mehmet Özgür YILMAZ ✉ mehmetozguryilmaz@gmail.com

### ÖZ

Yapay zekâ popülaritesi gün geçtikçe artmakta ve yakın gelecekte klinik uygulamaları, tanı, tedavi takibi ve prognozun belirlenmesinde çok daha önemli bir yere sahip olacaktır. Nöroşirürjide bir sonraki önemli teknolojik devrimin de yapay zekâ ve makine öğrenmesinin tanı, tedavi planlaması, prognoz takibi ve intraoperatif kullanımı olacağı düşünülmektedir. Otomasyon sistemleri düzgün kurgulandığı ve doğru verilerle yapıldığı zaman muhtemel medikal hataları azaltıp maliyetleri düşürebilir. Otomasyonun öncelikle tıbbi veriler üzerinden girişimsel olmayan tıbbi konularda yer edineceği düşünülse de görüntü işleme ve robotların gelişmesiyle ameliyathane pratiğinde yer edinmesi de mümkün görünmektedir. Bu derlemenin amacı yapay zekâ ve makine öğrenmesinin nöroşirürjide kullanımının potansiyel risk ve faydaları, görüntüleme uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalarla ilgili literatürde yazılmış makaleleri derlemek ve güncel uygulamaların bir özetini sunmaktır.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Yapay zekâ, Makine öğrenmesi, Büyük veri, Derin öğrenme

### ABSTRACT

The popularity of artificial intelligence is increasing day by day and it will have a much more important place in clinical applications, diagnosis, treatment planning, and prognosis determination in the near future. It is thought that the next important technological revolution in neurosurgery will be the use of artificial intelligence and machine learning in diagnosis, treatment planning, prognosis, follow-up, and intraoperative monitoring. Automation systems can reduce possible medical errors and reduce costs when properly designed and produced with correct data. Although it is thought that automation will take its place primarily in non-invasive medical issues and through medical data first, it could play a role in operating room practice with the development of image processing and robots. The purpose of this review is to compile the potential risks and benefits of the use of artificial intelligence and machine learning in neurosurgery, to review the articles on imaging applications, and to present a summary of current practices.

**KEYWORDS:** Artificial intelligence, Machine learning, Big data, Deep learning

### ■ GİRİŞ

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi'nin popülaritesi gün geçtikçe artmaktadır ve yakın gelecekte klinik uygulamaları, tanı, tedavi takibi ve prognozun belirlenmesinde

çok daha önemli bir yere sahip olacaktır (67,83). Bilgisayarlı Tomografi (BT), Manyetik Rezonans (MR), Nöromonitör, Mikroskop, Nöronavigasyon sistemleri artık günümüzde nöroşirürjide çok önemli bir yere sahiptir. Nöroşirürjide bir sonraki önemli teknolojik devrimin de yapay zekâ ve makine

öğrenmesinin tanı, tedavi planlaması, prognoz takibi ve intra-operatif kullanımı olacağı düşünülmektedir (6,63). Otomasyon sistemleri düzgün kurgulandığı ve doğru verilerle yapıldığı zaman muhtemel medikal hataları azaltıp maliyetleri düşürecektir (63,79). Otomasyonun öncelikle tıbbi veriler üzerinden girişimsel olmayan tıbbi konularda yer edineceği düşünülse de görüntü işleme ve robotların gelişmesiyle ameliyathane pratiğinde yer edinmesi de mümkün görünmektedir (79,87,92). Bu derlemenin amacı yapay zekâ ve makine öğrenmesinin nöroşirürjide kullanımının potansiyel risk ve faydaları, görüntüleme uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalarla ilgili literatürde yazılmış makaleleri derlemek ve güncel uygulamaların bir özeti sunmaktır.

### Big Data-Büyük Veri Nedir?

Bilgisayarın icadından bu yana çok büyük miktarda dijital veri üretilmiştir. Mobil cihazlar, dijital sensörler, iletişim, bilgi işlem ve depolama alanındaki gelişmeler büyük miktarda verinin depolanmasını mümkün kılmıştır (8). Industrial Development Corporation'a (IDC; 2011) göre dünyadaki toplam veri miktarı beş yıl içinde dokuz kat artmıştır (25). Bu rakamın iki yılda bir ikiye katlanması beklenmektedir (13). Büyük veri terimi, Yahoo, Google ve Facebook gibi büyük şirketlerin büyük miktarda veriyi analiz etme ihtiyacından kaynaklanan yeni bir terimdir (26).

Büyük veri yalnızca büyük ve homojen bir veri koleksiyonundan ziyade veri analizi metodolojisine uygulanan geniş bir terimdir (91). Günümüzde radyolojik görüntüleri, laboratuvar sonuçları ve hastaların kişisel medikal öyküleri çok büyük miktarda veri olarak üretilip depolanmaktadır. Günümüze kadar bunlar sağlık profesyonelleri tarafından değerlendirilmekteydi. Bu verilerin insanlar tarafından değerlendirilmesi günümüzdeki veri büyüklüğünden dolayı hem gittikçe zorlaşmakta hem de

subjektif yaklaşımlar güvenilirliği azaltmaktadır. Yapay zekâ otomasyonları bu büyüklükte verinin işlenmesi konusunda bize yardımcı olabilir. Ayrıca insanlar tarafından tümör, nekroz veya hematoma gibi lezyonlar tanımlanabilse bile bu lezyonların her kesitte nicelik olarak tanımlanması pek mümkün görünmemektedir. Ancak otomatize uygulamalar tek tek her kesiti inceleyip niceliksel özelliklerini bize sunabilir (2,46). Bilgisayar destekli uygulamalar görüntüleri analiz edip yüksek doğrulukta tanısallık ve prognostik veriler sağlayabilir (64). Görüntü işleme uygulamalarıyla ileride patolojik tanıya gerek kalmadan gliom tanısı konulabileceği gösterilmiştir (11,92).

### Artificial Intelligence (AI) - Yapay Zekâ Nedir?

Dijital bir bilgisayarın veya bilgisayar kontrollü bir robotun, genellikle akıllı varlıklarla ilişkili görevleri yerine getirme yeteneğine "Yapay Zekâ" denir. Yapay zekâ ve güçlü işlemciler yardımıyla yapılabilecek analizler sayesinde tanı, tedavi planlanması ve prognoz takibinde insan beyninin limitlerini aşabilir. Hatta görüntü işleme algoritmalarının gelişmesi ve robotik cerrahinin kombine edilerek geliştirilmesiyle ilerde ameliyathanelerde otokontrollü robotların daha düşük hata paylarıyla operasyon dahi yapabilmeleri mümkün görünmektedir (62,63,79,90). Yapay zekâ ile oluşturulmuş otomasyon sistemlerinde etik sorunlar ve muhtemel hataların ne gibi sonuçlara sebebiyet vereceği henüz açıklığa kavuşmamıştır. Yapay zekâyla ilgili sık kullanılan terimler ve anlamları Tablo 1'de verilmiştir.

### Machine Learning (ML) - Makine Öğrenmesi Nedir?

İlk bilgisayarlar belirli matematiksel işlemleri hesaplayan ve belirli komutlarda öngörülebilir işlemler yapan makinelerdi. İnsanın sahip olduğu muhakeme, analiz yetisi yoktu. Bu konuda Alan M. Turing 1950 yılında yazdığı "Computing Machinery and Intelligence?" adlı makalesinde yapay zekâ adına ilk adımı atmıştır (84). Machine Learning terimi ilk olarak 1959'da Arthur

**Tablo 1:** Yapay Zekâ ve İlgili Tanımlamalar

Algorithm - Algoritma	Problem çözümünde kullanılacak kurallar kümesi (96).
Artificial Intelligence, AI – Yapay zekâ	İnsan zekâsı gerektiren görevleri yerine getirebilen yapay algoritmalar (94).
Machine Learning, ML – Makine öğrenmesi	Önceden belirlenmiş bir veri kümesiyle eğitilmiş ve insan müdahalesine gerek duymayan, verileri okuyarak algoritma tanımlaması gerekmeksizin deneyim üzerinden algoritma geliştiren bir yapay zekâ alt kümesidir. Yapılandırılmış veri gerektirir. Yanlış sonuç vermesi durumunda algoritmalara müdahale edilerek yeniden eğitilmesi gerekir (93).
Deep Learning, DL – Derin öğrenme	Bir görevi tekrarlamak ve aşamalı olarak öğrenmek için yapay sinir ağlarını ve çoklu algoritma katmanlarını kullanan bir makine öğrenmesi alt kümesidir. Yapılandırılmış veriye gerek duymaz. Veri yetersizse hatalı sonuçlar çıkarabilir.
Data Mining, DM – Veri madenciliği	Veri kümelerinin özelliklerine odaklanmış bir bilgisayar bilimi alanıdır. Diğer veri işleme biçimleri için bir ön koşuldur. Verilerden algoritma üretir.
Artificial Neural Networks, ANN – Yapay Sinir ağı, YSA	Yapay sinir ağı olarak da bilinir ve insan beyninin çalışma şeklini taklit ederek bir veri kümesindeki temel ilişkileri tanımayı amaçlar. Algoritmalar değişen girdilere uygun şekilde uyarlanır. ML nin bir sonraki evrimsel aşaması olarak tanımlanır.
Expert Systems – Uzman sistemler	İnsanların yargılarının taklit edildiği tıbbi teşhis gibi alanlarda tavsiyede bulunmak ve karar almak için yapay zekâ teknikleri kullanan yazılımları ifade etmek için kullanılır (95).

Samuel tarafından “bilgisayarlara programlanmadan öğrenme becerisi” sunan algoritmaları tanımlamak için kullanıldı ve bilgisayarlar dama oynamayı öğrendi. Bunun akabinde yapay zekâyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. ML, dijital asistanlar (siri, bixby, alexa, google asistan), spam filtreleri, görüntü işleme, otopilot uygulamaları olmak üzere birçok teknolojinin temelidir (34). Yapay zekânın tarihsel gelişimi Tablo II’de özetlenmiştir.

ML kendi kendine daha önceden belirlenmiş verileri referans alarak öğrenen ve kendini geliştiren ve sonrasında karşılaşılan gerçek durumları bu referanslara göre değerlendiren algoritmalar yaratan Yapay Zekâ’nın bir alt dalıdır. Yapay zekânın eğitimi için kullanılan veri ne kadar büyük ve özenli girilmiş verilerden oluşturulursa çıkaracağı sonuç da o denli kararlı ve güvenilir olacaktır. Bu verilerle eğitilmiş bir algoritma yeni karşılaşılan bir vaka konusunda öngöründe bulunabilir ve tanı koymamızda yardımcı olabilir (73). 1960’ların sonunda araştırmacılar yapay zekâyı doğa bilimlerine uygulamaya başladılar (95).

Bilgisayarlara erişimin artmasıyla birlikte, 1980’lerde akıllı bilgi işlem sistemlerine olan kamu ve kurumsal ilgi arttı. Yapay zekânın toplumda devrim yaratması bekleniyordu ve sağlık hizmetleri bu beklentilerin temel odak noktasıydı (48,49,58,59,65,95,96). Ancak o dönemlerde bilgisayarların depolama ve işlem gücü bunun için yetersizdi ve yapay zekânın sağlık sisteminde devrim yaratacağı fikri rafa kaldırılmıştı

(66). 1990 yılında insan genom projesinin başlatılmasıyla yapay zekâyı ilgi yeniden arttı. Bu büyüklükte bir verinin işlenmesi için yapay zekâ ile çalışan uygulamalar gerekiyordu ve bu veri bilimine olan ilgiyi yeniden canlandırdı ve yapay zekâ üzerine çalışmaları yoğunlaştırdı (30,32,53,76). Makine öğrenmesinin birçok alt öğrenme stratejisi olmasına rağmen bunların arasında Deep Learning (DL) potansiyel açısından klinik kullanımda ön plana çıkmaktadır. Diğer ML tekniklerinde kullanıcının veriyi sınıflaması beklenirken DL otodidaktiktir yani böyle bir sınıflamaya gerek kalmaksızın yapay zekâ ham veri üzerinden kendini eğitebilir (93). Sadece işlenmemiş data ve sonuçların kategorize edilmesi gerekmektedir (27). Örüntü tanıma, verilerdeki desenleri ve düzenlilikleri otomatik olarak tanımak için ML algoritmalarını kullanan bir veri analiz yöntemidir. Bu veriler metin, görüntü veya sestten herhangi biri olabilir. Pattern İngilizcede a repeated decorative design (tekrar eden dekoratif tasarım), Pattern Recognition ise Türkçeye “örüntü tanıma” olarak çevrilmiştir. Pattern Recognition bir beyin veya bilgisayarın veriler, görüntüler veya diğer duyuşsal uyarılardaki örüntüleri algılaması olarak tanımlanır (35).

### Nöroşirürjide Yapay Zekâ ve Görüntüleme Uygulamaları

Otomatik tümör segmentasyonu, epileptojenik bölgenin belirlenmesi, vazospazm riski olan SAK, iskemik inmede tedavi etkisi ve hasarlı doku tahmini ve epileptik cerrahi için uygun adayların belirlenmesi gibi konularda yapay zekâ uygu-

**Tablo II:** Yapay Zekâ Tarihindeki Kilometre Taşları

1950	Alan M. Turing “ <b>Computing Machinery and Intelligence</b> ” makalesini yazdı
1955	Logic Theorist - RAND Corporation tarafından piyasaya sürülen ilk AI yazılımı
1960s	Araştırmacılar yapay zekâyı doğa ve fizik bilimlerine uygulamaya başladılar.
1970	İlk kez bilgisayar destekli otomatize EKG okuması yapılmıştır.
1978	CASNET bilgisayar destekli glokom tanısı koyan sistemi tanıtmıştır.
1988	Bilgisayar destekli subkortikal lezyon eksizyonu.
1988	Otomatize periferik akciğer lezyonlarının saptanması
1990	İnsan genom projesinin başlaması
1997	Deep Blue ilk kez Dünya satranç şampiyonu Garry Kasparov’u yendi
1997	Dragon software - ilk konuşma tanıma tanıtıldı
1998	Image checker - Mamografi için bilgisayar destekli tanı sistemi
2004	Retinal hastalıklarda bilgisayar destekli erken tanı
2007	IBM Watson - konuşabilen ve soruya cevap verebilen AI uygulamasını geliştirdi
2011	Dijital asistanlar bireysel kullanıma açıldı. (Siri, alexa, google asistan, bixby etc.)
2012	Beyin görüntülemelerinin segmentasyonu
2012	Bilgisayar destekli beyin tümörü gradelemesi
2017	Chatbots introduced for patient intake
2018	FDA Stroke triyajında AI destekli klinik karar destek sistemini onayladı.
2020	Yapay Sinir Ağı ile EKG değerlendirilmesi

lamalarının karar vermemizde yardımcı olması mümkündür (14,16,18,19,20,45,60). Nöroonkolojide ve travma hastalarında sağ kalımı öngörme konusunda yapay zekâ algoritmaları kullanılmış ve hekimlerin kararlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir (12,21,64,71,98). Yine, erken retrospektif çalışmalar, klinisyenlere kıyasla belirli prognostik görevlerde algoritmaların üstünlüğünü göstermektedir (20,21,71). Yapay Sinir Ağları diğer 4 ML algoritmasıyla karşılaştırılmış ve genç hastalarda, hidrosefali etiolojisini saptamada, uzun süreli hastane yatışı olanlarda ve endoskopi destekli şant operasyonunda şant başarısızlığını saptama konusunda istatistiksel olarak anlamlı değişkenler saptanmıştır (28). Doğum ağırlığı, ilk şant operasyonu yaşı, şant revizyon ameliyatlarının sayısı, erken doğum öyküsü, meningomiyelosele, ventrikül içi kanama ve çakışan enfeksiyonların olduğu retrospektif bir çalışmada Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır ve şant revizyon öyküsü şant enfeksiyonunu öngörmeye en önemli faktör olarak bulunmuştur (27). ETV başarısını tahmin etmek için bir grup çocukta etioloji, yaş, cinsiyet, hidrosefali tipi ve vücut ağırlığı ile bir Yapay Sinir Ağı modeli geliştirildi ve %93.7-97.6 doğruluk oranıyla ETV başarı oranını saptamıştır (3). Chiari malformasyonu tanılı hastaların MR görüntülemelerini yapay zekâ ile değerlendirilmesi sonucunda morfometrik özelliklerini %87 doğruluk oranıyla saptamıştır (86). 200 olguluk intrakranial hemorajili serinin yapay zekâ ile değerlendirilmesi sonucunda intrakranial hemorajili vakalarda %95 oranında doğru şekilde triyaj yapılırken, ICH olmayan vakaların %88,2'si doğru şekilde negatif olarak sınıflandırılmıştır (68). İntrakranial hemorajili hastalarla yapılan çalışmada Derin Öğrenme tabanlı yapay zekâ tanı sistemi Computed tomography planimetri (CTP) yöntemine kıyasla daha yüksek doğruluk ve verimlilikle akut spontan intrakranial hemoraji hacimlerini doğru şekilde ölçmüştür (89). Spinal hastalıklarda; pediatrik bel ağrısı, normal ve anormal servikal vertebra, skolyoz deformitesi, posterior lomber omurga füzyonunu takiben komplikasyonların gelişimi ve risk faktörlerinin tanımlanması için Yapay sinir ağları başarıyla test edilmiştir (5,29,43,54,56,72,78).

REMBRANDT Kanseri görüntü arşivinden alınan 130 adet histopatolojik beyin tümörü tanısı olan hastanın MR görüntülemeleri Convolutional Neural Network (Evrişimsel Sinir Ağı) CNN (AlexNet), Karar Ağacı, Lineer Ayrıcılık, Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi, KNearest Neighbour ve Ensemble olmak üzere yedi derin ve ML tekniği modeli üzerinde eğitilmiş ve test edilmiştir. Deep Learning modeli CNN (AlexNet), tüm çok sınıflı veri kümeleri için diğer tüm makine öğrenimi sınıflandırıcılarından daha iyi performans gösterdi. İki sınıflı veriler (normale karşı tümörlü) için tüm çapraz doğrulama protokolleriyle en yüksek sınıflandırma doğruluğu (%100) elde edildi (80). Yapılan bir çalışmanın sonucunda derin öğrenme algoritmalarıyla kranial BT taramalarında kritik bulguları yüksek isabet oranıyla saptanabilmektedir. Bu algoritmalarla BT taramalarının triyaj sürecini otomatize etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu yaklaşım radyologlara yardımcı olabilir ancak aşırı güven sonucu yanlış negatif sonuçların gözden kaçmasına sebep olabilir (15). Önceden belirlenmiş landmarklar kullanılarak kranial ve spinal cerrahide görüntü işleme yardımıyla operasyon mikroskopunun yarı otomatik konumlandırılması mümkündür (6,44). Ayrıca preoperatif veya

intraoperatif elde edilen görüntüleri kullanarak, görüntü işleme teknikleriyle yönlendirme, açı ayarlama ve navigasyon amaçlarıyla kullanılmaktadır (17,22,61,62). Diğer potansiyel faydalar arasında eloquent alana girildiği veya önemli vasküler yapılarla yaklaştığı zaman yapay zekâ cerraha uyarıda bulunabilir (52). Hali hazırda kullanılan Mazor Robotics firması tarafından üretilmiş Mazor X isimli cihaz sayesinde pedikül vidası gönderilirken giriş yeri ve açısı hesaplanabilmektedir (40). Diğer bir örnek radyocerrahi için kullanımda olan CyberKnife'dir. Dokuya temas etmeden görüntü yardımıyla cerrahi planlanan alanın belirlenmesi mümkündür (1). Hipofiz makroadenomu, kraniyofarenjiyom ve Rathke yank kisti tanıları olan hastaların MR görüntülemeleri Yapay Sinir Ağı modeliyle incelendiğinde ayırıcı tanıda duyarlılık nöroradyologlar ve genel radyologlar arasında bir yerde bulunmuştur (47).

### Girişimsel İşlemler

Nöroşirürjikal girişimlerde hataların sebebi %23.7 ile %27.8 arasında cerrahi teknikle kaynaklanmaktadır (69). Otomatik konumlanan mikroskoplar ve endoskopların kullanılması insan faktörüne bağlı teknik hataların minimize edilmesinde ve yapılan işin daha hızlı ve hatasız yapılmasında yardımcı olur (6,79,90). Cerrahi robotların sahip olduğu haptik, vizüel ve kinematik sensörler sayesinde insan el becerisinin ötesine geçmesi ve cerrahin yönlendirmesiyle daha az hatayla prosedürü gerçekleştirmesi mümkündür (50,74).

### Nöroşirürjide Otomasyonun Güncel Yeri ve Geleceği

Günümüzde görüntülemelerin değerlendirilmesi ve analizi daha çok insan bağımlıdır. Ancak otomasyon dizi seçiminden görüntü yorumlamaya ve belirli koşulların hızlı tespitine kadar görüntüleme süreci üzerinde önemli bir etki potansiyeline sahiptir (7,20,82,92,98). Bugüne kadar tümör sınıflaması, gliom özelliklerinin belirlenmesi, iskemi ve anevrizmanın tanınması yapay zekâ destekli uygulamalar tarafından başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bazı uygulamalarda yapay zekâ uzman hekim sonuçlarını yakalamış hatta daha kesin sonuçlar alınmıştır (4,10,14,18,20,45,47,81). Makine öğrenmesinin en büyük avantajı insan tarafından değerlendirilmesi mümkün olmayan derecede büyük verilerle çalışabilmesi ve daha niceliksel özellikleri kolaylıkla belirtebilmesidir (2,70,92,97,98). Otomasyonda faydalanabileceğimiz diğer alanlar histopatoloji, elektrofizyoloji, gen analizi ve kayıtlı kişisel verilerin işlenmesidir (10,24,81). Yakın gelecekte cerrahi operasyonlar da kısmen veya tamamen otomatize hâle gelebilir. Cerrahi robotların geniş açılı kabiliyeti, yorulmaması, titreme olmadan ve ölçülenebilir hassas hareketlerle çalışması avantajlar arasında sayılabilir (50). Ayrıca görsel, haptik, hareket algılama ve kinematik sensörler sayesinde insan algısının ötesine geçebilir, kısmen veya tamamen otomatize cerrahiler yapılmasına olanak sağlayabilir.

### Otomasyonun Olası Riskleri

Otomasyon ile radyoloji tanı, prognoz ve tedaviye karar verme konusunda hatalar olabilir (83). Bu konuda gerçek bir örnek olarak (International Business Machine Corp.) IBM'in ürettiği ve dünya genelinde kullanılan Watson kanser yapay zekâ algoritması örnek verilebilir (41,42). Sınırlı sentetik verilerle eğitilmiş olan uygulama kanama bozukluğu olan hastaya yan etki olarak kanama riskini artıran bir ilaç olan

bevacizumab önermiştir. Ayrıca program beklenmedik değişkenlerle karşılaştığı zaman hata verebilir. Örneğin daha önce karşılaşmadığı vücutta yabancı bir cisim veya artefakt yapan bir nesne görüntüyü tanımlayamamasına neden olabilir (94). Doğru algoritmayı oluşturmak için çok sayıda verinin değerlendirilmesi gerektiğinden bu büyüklükte veriye ulaşım değerlendirmek kişisel verilerin kullanılması açısından da handikap oluşturmaktadır (75). Bu durumda klinisyenin bilgi birikimi, becerileri ve muhakeme yeteneği tanı ve tedavi kararı vermede yapay zekânın önüne geçmektedir. Cerrahide hataların %18 ile %37'si eksik ekipman veya ekipman arızasına bağlıdır (69). Girişimsel robotik cihazlar şu anda gelişmekte olsa da daha önce belirttiğimiz gibi bazı yarı ve tam otonom cihazlar kullanımdadır. Otomatik mikroskoplar, endoskoplar, veya robotlar gelecekte insanların iş yükünü azaltacak ve insan gücüne ihtiyacı azaltacaktır (6,44,63,79,90).

### Cerrahi Becerinin Etkilenmesi

Otomasyonun klinik tanı ve tedavi planlanmasında yaygın kullanılması, hekimin sadece gözetmen olarak rol alması buna bağımlılığı artırabilir ve bu teknolojilerden yoksun kalındığında hekim işini yapmakta zorlanabilir. 2015'te yapılan bir çalışmada otomasyona aşırı güvenen radyologların bu destek olmadan görüntüleri yorumlarken yüksek oranda yanlış negatif yorum yaptıkları saptanmıştır (51). Alt uzmanlaşma, ileri teşhis ve defansif tıp uygulamaları hekimlerin temel becerilerinin gerilemesine ve sezgilerini daha az geliştirilmesine neden olmuştur (23,88). Tıbbi otomasyon artan kullanımı bu gerilemeyi daha artırabilir (9). Özellikle Nöroşirürji ile ilgili olarak temel manuel becerilerin vurgulanması ve otomatize sistemlerin daha az kullanılması vasıfsızlaşmayı azaltabilir. Ancak pratikte zaman kısıtlaması, piyasa güçleri, artan iş yükü ve sorumluluk sorunları gibi faktörler nedeniyle bunu sürdürmek zor olabilir.

### Verilere Erişim

Bir hekimin becerisi daha önce karşılaştığı durumlar sonucu edindiği bilgi birikime bağlıdır. Yapay zekânın insan becerisine yaklaşması için çok çeşitli verilerle eğitilmesi gerekir. Büyük verilerle eğitim için kurumlar arası veri paylaşımını gerektirdiğinden etik ve kişisel veri ihlali açısından sorun oluşturmaktadır (75). Bunu aşmak için tek kurum veya bölgenin verileriyle çalışılması da eğitildiği vakaların demografik özellikleri nedeniyle daha geniş hasta popülasyonuna uygulanmasını sınırlandıracaktır (64).

## ■ SONUÇ

Akıllı bilgisayar sistemleri veri analitiği, büyük veri, tanısal görüntü yorumlanması, karar desteği, hata önleme ve robotik alanlarda gelecek vaad etmektedir. Akıllı cihazlar da diğer tıbbi cihazlarda gibi güvenlik, geçerlilik ve güvenilirlik standartlarına tabidir. Yapay zekâ ve uygulamaları konusunda, şeffaflık, güvenlik ve kişisel verilerin korunması temel etik endişeler mevcuttur. Bu endişeler giderildikten sonra daha yaygın bir kullanım alanı bulacaktır. Yapay zekâ ve makine öğrenmesinin klinikte kullanımının amacı klinisyenin zihinsel ve fiziksel anlamda becerilerini geliştiren ve tamamlayan bir konumda olmalıdır. Klinisyen tarafından yapılan işleri otomatize etmek ve yerini almak yerine klinisyene destek olan, temel becerilerine

katkıda bulunan bir yerde durmalıdır. Nöroşirürjide yapay zekâ kullanımı tıbbi hataları önlemek ve insan ve makine arasında simbiyotik bir ilişki kurmayı amaçlamalıdır. Başlangıçta ne kadar umut verici görünseler de teknolojinin etkinliği, doğruluğu ve güvenilirliği sağlanmalıdır. Erken dönemde bazı tıbbi otomasyon kaynaklı hatalarla karşılaşabiliriz ancak sistem geliştikçe karayolunda ve havacılıkta uygulanan otopilotla olana benzer güvenlik önlemleri yarar sağlayabilir (55,87). Bu bağlamda otomasyon sistemleri süregelen tıbbi hataları düzelterek (57).

## ■ KAYNAKLAR

1. Adler JR Jr, Chang SD, Murphy MJ, Doty J, Geis P, Hancock SL: The Cyberknife: A frameless robotic system for radiosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg* 69(1-4):124-128, 1997
2. Ahn SS, Shin N-Y, Chang JH, Kim SH, Kim EH, Kim DW, Lee SK: Prediction of methylguanine methyltransferase promoter methylation in glioblastoma using dynamic contrast-enhanced magnetic resonance and diffusion tensor imaging. *J Neurosurg* 121(2):367-373, 2014
3. Azimi P, Mohammadi HR: Predicting endoscopic third ventriculostomy success in childhood hydrocephalus: An artificial neural network analysis. *J Neurosurg Pediatr* 13:426-432, 2014
4. Bidiwala S, Pittman T: Neural network classification of pediatric posterior fossa tumors using clinical and imaging data. *Pediatr Neurosurg* 40(1):8-15, 2004
5. Bishop JB, Szpalski M, Ananthraman SK, McIntyre DR, Pope MH: Classification of low back pain from dynamic motion characteristics using an artificial neural network. *Spine (Phila Pa 1976)* 22:2991-2998, 1997
6. Bohl MA, Oppenlander ME, Spetzler R: A prospective cohort evaluation of a robotic, auto-navigating operating microscope. *Cureus* 8(6):e662, 2016
7. Brown AD, Marotta TR: Using machine learning for sequence-level automated MRI protocol selection in neuroradiology. *J Am Med Inform Assoc* 25(5):568-571, 2018
8. Bryant RE, Katz RH, Lazowska ED: Big-Data Computing: Creating Revolutionary Breakthroughs in Commerce, Science and Society. A White Paper Prepared for the Computing Community Consortium Committee of the Computing Research Association, 2008. <http://cra.org/ccc/resources/ccc-led-whitepapers/>
9. Cabitza F, Rasoini R, Gensini GF: Unintended consequences of machine learning in medicine. *JAMA* 318(6):517-518, 2017
10. Campillo-Gimenez B, Garcelon N, Jarno P, Chaplain JM, Cuggia M: Full-text automated detection of surgical site infections secondary to neurosurgery in Rennes, France. *Stud Health Technol Inform* 192:572-575, 2013
11. Chang K, Bai HX, Zhou H, Su C, Bi WL, Agbodza E, Kavouridis VK, Senders JT, Boaro A, Beers A, Zhang B, Capellini A, Liao W, Shen Q, Li X, Xiao B, Cryan J, Ramkissoon S, Ramkissoon L, Ligon K, Wen PY, Bindra RS, Woo J, Arnaout O, Gerstner ER, Zhang PJ, Rosen BR, Yang L, Huang RY, Kalpathy-Cramer J: Residual convolutional neural network for the determination of IDH status in low- and high-grade gliomas from MR imaging. *Clin Cancer Res* 24(5):1073-1081, 2018

12. Chang K, Zhang B, Guo X, Zong M, Rahman R, Sanchez D, Winder N, Reardon DA, Zhao B, Wen PY, Huang RY: Multimodal imaging patterns predict survival in recurrent glioblastoma patients treated with bevacizumab. *Neuro Oncol* 18(12):1680-1687, 2016
13. Chen M, Mao S, Liu Y: Big data: A survey. *Mobile Networks and Applications* 19(2):171-209, 2014
14. Chiang S, Levin HS, Haneef Z: Computer-automated focus lateralization of temporal lobe epilepsy using fMRI. *J Magn Reson Imaging* 41(6):1689-1694, 2015
15. Chilamkurthy S, Ghosh R, Tanamala S, Biviji M, Campeau NG, Venugopal VK, Mahajan V, Rao P, Warier P: Deep learning algorithms for detection of critical findings in head CT scans: A retrospective study. *Lancet* 392(10162):2388-2396, 2018
16. Cohen KB, Glass B, Greiner HM, Holland-Bouley K, Standridge S, Arya R, Faist R, Morita D, Mangano F, Connolly B, Glauser T, Pestian J: Methodological issues in predicting pediatric epilepsy surgery candidates through natural language processing and machine learning. *Biomed Inform Insights* 8:11-18, 2016
17. D'Albis T, Haegelen C, Essert C, Fernández-Vidal S, Lalys F, Jannin P: PyDBS: An automated image processing workflow for deep brain stimulation surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 10(2):117-128, 2015
18. Dolz J, Betrouni N, Quidet M, Kharroubi D, Leroy HA, Reyns N, Massoptier L, Vermandel M: Stacking denoising auto-encoders in a deep network to segment the brainstem on MRI in brain cancer patients: A clinical study. *Comput Med Imaging Graph* 52:8-18, 2016
19. Dumont TM, Rughani AI, Tranmer BI: Prediction of symptomatic cerebral vasospasm after aneurysmal subarachnoid hemorrhage with an artificial neural network: Feasibility and comparison with logistic regression models. *World Neurosurg* 75(1):57-63, 2011
20. Emblem KE, Nedregaard B, Hald JK, Nome T, Due-Tonnessen P, Bjornerud A: Automatic glioma characterization from dynamic susceptibility contrast imaging: Brain tumor segmentation using knowledge-based fuzzy clustering. *J Magn Reson Imaging* 30(1):1-10, 2009
21. Emblem KE, Pinho MC, Zöllner FG, Due-Tonnessen P, Hald JK, Schad LR, Meling TR, Rapalino O, Bjornerud A: A generic support vector machine model for preoperative glioma survival associations. *Radiology* 275(1):228-234, 2015
22. Enchev Y: Neuronavigation: Geneology, reality, and prospects. *Neurosurg Focus* 27(3):E11, 2009
23. Faustinella F, Jacobs RJ: The decline of clinical skills: A challenge for medical schools. *Int J Med Educ* 9:195-197, 2018
24. Fereidouni F, Harmany ZT, Tian M, Todd A, Kintner JA, McPherson JD, Borowsky AD, Bishop J, Lechpammer M, Demos SG, Levenson R: Microscopy with ultraviolet surface excitation for rapid slide-free histology. *Nat Biomed Eng* 1(12):957, 2017
25. Gantz J, Reinsel D: Extracting value from chaos. IDC Iview, 2011. <https://documents.pub/document/idc-report-extracting-value-from-chaos.html>
26. Garlasu D, Sandulescu V, Halcu I, Neculoiu G, Grigoriu O, Marinescu M, Marinescu V: A Big Data Implementation Based on Grid Computing. 11 th Roedunet International Conference (RoEduNet), 2013
27. Habibi Z, Ertiaei A, Nikdad MS, Mirmohseni AS, Afarideh M, Heidari V, Saberi H, Rezaei AS, Nejat F: Predicting ventriculo-peritoneal shunt infection in children with hydrocephalus using artificial neural network. *Childs Nerv Syst* 32:2143-2151, 2016
28. Hale AT, Riva-Cambrin J, Wellons JC, Jackson EM, Kestle JR, Naftel RP, Hankinson TC, Shannon CN, Hydrocephalus Clinical Research Network: Machine learning predicts risk of cerebrospinal fluid shunt failure in children: A study from the hydrocephalus clinical research network. *Childs Nerv Syst* 37:1485-1494, 2021
29. Han Z, Wei B, Leung S, Nachum IB, Laidley D, Li S: Automated pathogenesis-based diagnosis of lumbar neural foraminal stenosis via deep multiscale multi-task learning. *Neuroinformatics* 16:325-37, 2018
30. Hinton G: Deep learning-a technology with the potential to transform health care. *JAMA* 320(11):1101-1102, 2018
31. <http://infolab.stanford.edu/pub/voy/museum/samuel.html>. Accessed March 13, 2022.
32. <https://foreignpolicy.com/2012/10/08/big-data-a-short-history/>. Accessed March 13, 2022.
33. [https://www.google.com/search?q=expert+system&rlz=1C-1CHBF\\_enUS830US831&oq=Expert+system&aqs=chrome.0.0i131i433i457j0l4j69i61I2j69i60.2679j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=expert+system&rlz=1C-1CHBF_enUS830US831&oq=Expert+system&aqs=chrome.0.0i131i433i457j0l4j69i61I2j69i60.2679j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8). Accessed March 13, 2022
34. <https://www.ibm.com/cloud/learn/machine-learning#toc-real-world-Lyja9GSr>. Accessed March 13, 2022.
35. [https://www.lexico.com/definition/pattern\\_recognition](https://www.lexico.com/definition/pattern_recognition)
36. <https://www.lexico.com/en/definition/algorithm>. Accessed March 13, 2022.
37. [https://www.lexico.com/en/definition/machine\\_learning](https://www.lexico.com/en/definition/machine_learning). Accessed Accessed March 13, 2022.
38. <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095426960>. Accessed March 13, 2022.
39. <https://www.toptal.com/machine-learning/machine-learning-theory-an-introductory-primer>. Accessed March 13, 2022.
40. Hu X, Ohnmeiss DD, Lieberman IH: Robotic-assisted pedicle screw placement: Lessons learned from the first 102 patients. *Eur Spine J* 22(3):661-666, 2013
41. IBM pitched Watson as a Revolution in Cancer Care. It's Nowhere Close. *STAT*. <https://www.statnews.com/2017/09/05/watson-ibm-cancer/>. Published September 5, 2017. Accessed April 16, 2019
42. IBM's Watson Recommended "Unsafe and Incorrect" Cancer Treatments, *STAT Report Finds*. <https://www.beckershospital-review.com/artificial-intelligence/ibm-s-watson-recommended-unsafe-and-incorrect-cancer-treatments-stat-reportfinds.html>. Accessed April 4, 2019.
43. Jaremko JL, Poncet P, Ronsky J, Harder J, Dansereau J, La-belle H, Zernicke RF: Estimation of spinal deformity in scoliosis from torso surface cross sections. *Spine (Phila Pa 1976)* 26:1583-1591, 2001

44. Kantelhardt SR, Finke M, Schweikard A, Giese A: Evaluation of a completely robotized neurosurgical operating microscope. *Neurosurgery* 72 Suppl 1:A19-A26, 2013
45. Kassahun Y, Perrone R, De Momi E, Berghöfer E, Tassi L, Canevini MP, Spreafico R, Ferrigno G, Kirchner F: Automatic classification of epilepsy types using ontology-based and genetics-based machine learning. *Artif Intell Med* 61(2):79-88, 2014
46. Kahn RE: A new generation in computing: Microelectronics and artificial intelligence may produce advanced computers that are both fast and smart. *IEEE Spectrum* 20(11):36-41, 1983
47. Kickingereder P, Bonekamp D, Nowosielski M, Kratz A, Sill M, Burth S, Wick A, Eidel O, Schlemmer HP, Radbruch A, Debus J, Herold-Mende C, Unterberg A, Jones D, Pfister S, Wick W, von Deimling A, Bendszus M, Capper D: Radiogenomics of glioblastoma: Machine learning-based classification of molecular characteristics by using multiparametric and multi-regional MR imaging features. *Radiology* 281(3):907-918, 2016
48. Kitajima M, Hirai T, Katsuragawa S, Okuda T, Fukuoka H, Sasao A, Akter M, Awai K, Nakayama Y, Ikeda R, Yamashita Y, Yano S, Kuratsu J, Doi K: Differentiation of common large sellar-suprasellar masses: Effect of artificial neural network on radiologists' diagnosis performance. *Acad Radiol* 16(3):313-320, 2009
49. Kulikowski CA, Ostroff JH: Constructing an EXPERT knowledge base for thyroid consultation using generalized AI techniques. *Proceedings of the Annual Symposium on Computer Application in Medical Care*. New York: IEEE, 1980
50. Kulikowski CA, Weiss SM: Representation of expert knowledge for consultation: The CASNET and EXPERT projects. In: Szolovits P (ed). *Artificial Intelligence in Medicine*. AAAS Selected Symposium, Vol. 51. Boulder, CO: Westview Press, 1982
51. Lanfranco AR, Castellanos AE, Desai JP, Meyers WC: Robotic surgery. *Ann Surg* 239(1):14-21, 2004
52. Lehman CD, Wellman RD, Buist DSM, Kerlikowske K, Tosteson ANA, Miglioretti DL: Diagnostic accuracy of digital screening mammography with and without computer-aided detection. *JAMA Intern Med* 175(11):1828-1837, 2015
53. Li Q: Computer-assisted neurosurgery: Yesterday, today and tomorrow. *Neurosurg J* 1(1):1-2, 2017
54. Liang H, Tsui BY, Ni H, Valentim CCS, Baxter SL, Liu G, et al. Evaluation and accurate diagnoses of pediatric diseases using artificial intelligence. *Nat Med* 25(3):433-438, 2019
55. Lin H: Identification of spinal deformity classification with total curvature analysis and artificial neural network. *IEEE Trans Biomed Eng* 55:376-382, 2008
56. List of Self-Driving Car Fatalities. In: Wikipedia.; 2019. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_self-driving\\_car\\_fatalities&oldid=888405215](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_self-driving_car_fatalities&oldid=888405215). Accessed April 17, 2019.
57. Liszka-Hackzell JJ, Martin DP: Categorization and analysis of pain and activity in patients with low back pain using a neural network technique. *J Med Syst* 26:337-347, 2002
58. Makary MA, Daniel M: Medical error-the third leading cause of death in the US. *BMJ* 353:i2139, 2016
59. Matheny ME, Whicher D, Thadaney Israni S: Artificial intelligence in health care. *JAMA* 323(6):509-510, 2020
60. Miller RA: Internist-1/Caduceus: Problems facing expert consultant programs. *Meth Inform Med* 23(1):9-14, 1984
61. Nielsen A, Hansen MB, Tietze A, Mouridsen K: Prediction of tissue outcome and assessment of treatment effect in acute ischemic stroke using deep learning. *Stroke* 49(6):1394-1401, 2018
62. Nimsky C, Ganslandt O, Cerny S, Hastreiter P, Greiner G, Fahlbusch R: Quantification of, visualization of, and compensation for brain shift using intraoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery* 47(5):1070-1080, 2000
63. Pandya S, Motkoski JW, Serrano-Almeida C, Greer AD, Latour I, Sutherland GR: Advancing neurosurgery with image-guided robotics: Technical note. *J Neurosurg* 111(6):1141-1149, 2009
64. Panesar S, Cagle Y, Chander D, Morey J, Fernandez-Miranda J, Kliot M: Artificial intelligence and the future of surgical robotics. *Ann Surg* 270(2):223-226, 2019
65. Panesar SS, D'Souza RN, Yeh FC, Fernandez-Miranda JC: Machine learning versus logistic regression methods for 2-year mortality prognostication in a small, heterogeneous glioma database. *World Neurosurg* X 2:100012, 2019
66. Pople HE Jr: Dialog: A model of diagnosis logic for internal medicine. In *IJCAI'75: Proceedings of the 4th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Tbilisi 1:848-855, 1975
67. Rajkomar A, Dean J, Kohane I: Machine learning in medicine. *N Engl J Med* 380(14):1347-1358, 2019
68. Rava RA, Seymour SE, LaQue ME, Peterson BA, Snyder KV, Mokin M, Waqas M, Hoi Y, Davies JM, Levy EI, Siddiqui AH, Ionita CN: Assessment of an artificial intelligence algorithm for detection of intracranial hemorrhage. *World Neurosurg* 150:e209-e217, 2021
69. Rolston JD, Zygorakis CC, Han SJ, Lau CY, Berger MS, Parsa AT: Medical errors in neurosurgery. *Surg Neurol Int* 5 Suppl 10:S435-S440, 2014
70. Rudie JD, Rauschecker AM, Bryan RN, Davatzikos C, Mohan S: Emerging applications of artificial intelligence in neuro-oncology. *Radiology* 290(3):607-618, 2019
71. Rughani AI, Dumont TM, Lu Z, Bongard J, Horgan MA, Penar PL, Tranmer BI: Use of an artificial neural network to predict head injury outcome. *J Neurosurg* 113(3):585-590, 2010
72. Sari M, Gulbandilar E, Cimbiz A: Prediction of low back pain with two expert systems. *J Med Syst* 36:1523-1527, 2012
73. Senders JT, Arnaout O, Karhade AV, Dasenbrock HH, Gormley WB, Broekman ML, Smith TR: Natural and artificial intelligence in neurosurgery: A systematic review. *Neurosurgery* 83(2):181-192, 2018
74. Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, Leonard S, Krieger A, Kim PCW: Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. *Sci Transl Med* 8(337):337ra64, 2016
75. Shokri R, Shmatikov V: Privacy-preserving deep learning. In: *Proceedings of the 22Nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. CCS '15. New York, NY, USA: ACM, 2015:1310-1321

76. Shortliffe EH, Cimino JJ: Biomedical Informatics: Computer Applications in Health Care and Biomedicine. London: Springer, 2014
77. Sinha M, Kennedy CS, Ramundo ML: Artificial neural network predicts CT scan abnormalities in pediatric patients with closed head injury. *J Trauma* 50(2):308-312, 2001
78. Stanley RJ, Long R: A radius of curvature-based approach to cervical spine vertebra image analysis. *Biomed Sci Instrum* 37:385-390, 2001
79. Surgical Robotics. Evaluation of the computer motion AESOP 3000 robotic endoscope holder. *Health Devices* 31(7):256-268, 2002
80. Tandel GS, Balestrieri A, Jujaray T, Khanna NN, Saba L, Suri JS: Multiclass magnetic resonance imaging brain tumor classification using artificial intelligence paradigm. *Comput Biol Med* 122:103804, 2020
81. Tankus A, Yeshurun Y, Fried I: An automatic measure for classifying clusters of suspected spikes into single cells versus multiunits. *J Neural Eng* 6(5):056001, 2009
82. Titano JJ, Badgeley M, Schefflein J, Pain M, Su A, Cai M, Swinburne N, Zech J, Kim J, Bederson J, Mocco J, Drayer B, Lehar J, Cho S, Costa A, Oermann EK: Automated deep-neural-network surveillance of cranial images for acute neurologic events. *Nat Med* 24(9):1337-1341, 2018
83. Topol EJ: High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med* 25(1):44, 2019
84. Turing AM: I.-Computing machinery and intelligence. *Mind* LIX(236):433-460, 1950
85. Ueda D, Yamamoto A, Nishimori M, Shimono T, Doishita S, Shimazaki A, Katayama Y, Fukumoto S, Choppin A, Shimahara Y, Miki Y: Deep learning for MR angiography: Automated detection of cerebral aneurysms. *Radiology* 290(1):187-194, 2018
86. Urbizu A, Martin BA, Moncho D, Rovira A, Poca MA, Sahuquillo J, Macaya A, Español MI: Machine learning applied to neuroimaging for diagnosis of adult classic Chiari malformation: Role of the basion as a key morphometric indicator. *J Neurosurg* 129(3):779-791, 2018
87. US Department of Transportation: Enhanced FAA Oversight Could Reduce Hazards Associated With Increased Use of Flight Deck Automation, 2016. [https://www.oig.dot.gov/sites/default/files/FAA%20Flight%20Deck%20Automation\\_Final%20Report%5E1-7-16.pdf](https://www.oig.dot.gov/sites/default/files/FAA%20Flight%20Deck%20Automation_Final%20Report%5E1-7-16.pdf)
88. Verghese A: How Tech Can Turn Doctors Into Clerical Workers. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/interactive/2018/05/16/magazine/health-issue-what-we-lose-with-data-driven-medicine.html>. Published May 16, 2018. Accessed April 5, 2019
89. Wang T, Song N, Liu L, Zhu Z, Chen B, Yang W, Chen Z: Efficiency of a deep learning-based artificial intelligence diagnostic system in spontaneous intracerebral hemorrhage volume measurement. *BMC Med Imaging* 21(1):125, 2021
90. Weede O, Mönnich H, Müller B, Wörn H: An Intelligent and Autonomous Endoscopic Guidance System for Minimally Invasive Surgery. 2011 IEEE International Conference, 2011:5762-5768
91. West JL, Fargen KM, Hsu W, Branch CL Jr, Couture DE: A review of Big Data analytics and potential for implementation in the delivery of global neurosurgery. *Neurosurg Focus* 45(4):E16, 2018
92. Yu J, Shi Z, Lian Y, Li Z, Liu T, Gao Y, Wang Y4, Chen L, Mao Y: Noninvasive IDH1 mutation estimation based on a quantitative radiomics approach for grade II glioma. *Eur Radiol* 27(8):3509-3522, 2017
93. Yu KH, Beam AL, Kohane IS: Artificial intelligence in health-care. *Nat Biomed Eng* 2(10):719, 2018
94. Yu KH, Kohane IS: Framing the challenges of artificial intelligence in medicine. *BMJ Qual Saf* 28(3):238-241, 2019
95. Yu VL, Buchanan BG, Shortliffe EH, Wraith SM, Davis R, Scott AC, Cohen SN: Evaluating the performance of a computer-based consultant. *Comput Programs Biomed* 9(1):95-102, 1979
96. Zadeh LA: A theory of approximate reasoning. In: Hayes JE, et al, (eds). *Machine Intelligence*, Vol. 9. New York: Halsted Press, 1979:149-196
97. Zhang B, Chang K, Ramkissoon S, Tanguturi S, Bi WL, Reardon DA, Ligon KL, Alexander BM, Wen PY, Huang RY: Multimodal MRI features predict isocitrate dehydrogenase genotype in high-grade gliomas. *Neuro-Oncol* 19(1):109-117, 2017
98. Zhou H, Vallières M, Bai HX, Su C, Tang H, Oldridge D, Zhang Z, Xiao B, Liao W, Tao Y, Zhou J, Zhang P, Yang L: MRI features predict survival and molecular markers in diffuse lower-grade gliomas. *Neuro Oncol* 19(6):862-870, 2017