

# Bir Narkissos efsanesi: Yapay zekâ ve nörobilim

**Prof. Dr. Lütfü Hanoğlu**



1962'de Manisa'da doğdu. 1985'te Ege Üniversitesi Tıp Fakültesinden mezun oldu. Nöroloji ihtisası yaptığı Bakırköy Ruh ve Sinir Hastalıkları Hastanesinde Nöropsikoloji Laboratuvarı ve Davranış Nörolojisi Konsültasyon Polikliniğini kurdu ve yönetti. 2000 yılından itibaren devlet hizmetinden ayrılarak özel sektörde çalışmaya başladı. Hanoğlu, halen Medipol Üniversitesi Tıp Fakültesi Nöroloji Ana Bilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.

Yapay zekâ (YZ) hepimizin gözleri önünde geliyor. Bu gelişmenin ufku üzerine sürekli pek çok film izliyoruz ama YZ, şimdiden satranç ve Go ustalarını yenebilecek, makale ve konuşma üretebilecek, pek çok dili birbirine çevirebilecek, hastalara insan doktorlardan daha iyi tanı koyabilecek, büyük miktardaki biyolojik verinin analizi ve anlamlı hale getirilmesini sağlayabilecek ve başka pek çok şeyi yapabilecek bir yeteneğe ulaştı. Bu gelişmelerin bilgisayarların artan işlem gücü ve yeni istatistik yaklaşımların geliştirilmesi gibi pek çok faktör ile ilişkisi var, ancak perde arkasında sinirbilimin katkıları hepsinden önemlidir. Psikoloji ve sinirbilim yapay zekâ tarihinde kilit bir rol oynamıştır. Bu ilişki hakkında yazan Hassabis; *"Hebb, Warren, McCulloch, Minsky gibi kurucu figürler aslında beynin nasıl çalıştığını anlama arzusuyla motive oldular. Aslında 20. yüzyılın sonlarında sinir ağlarını geliştiren anahtar işlerin çoğu matematik veya fizik laboratuvarlarında değil, psikoloji ve nörofizyoloji bölümlerinde gerçekleşti"* diyor. (1)

Diğer yandan 1940'larda ilk bilgisayarların gelişmeye başlaması ile birlikte beyin/zihin ilişkisinin anlaşılmasında bilgisayarların daha önce kullanılan saat, telgraf vb. metaforların yerini aldığını görüyoruz. Analoji çok nettir, fiziksel donanımı beyin sağlarken, zihnimiz de yazılım işlevini üstlenir. Günümüz nöro-bilimine kapı açan önemli bir akım olan bilişsel bilimi (cognitive science) psikoloji içerisinde başlatan önemli amiller-

den biri George Miller'ın Dil ve İletişim kitabı olmuştur. Kitapta bilişimde ve dilbilimde geçen kavramlar vasıtasıyla zihinsel dünyanın derinlemesine incelenebileceği ileri sürülmüştü. Benzer şekilde matematikçi John von Neumann kitabında insan sinir sisteminin işlevinin "ilk izlenime göre sayısal" olduğunu net bir şekilde dile getirdi. (2) Nihayet 1980'lerde Mc Clelland ve grubu günümüzde de hala yaygın kullanılan "Paralel Dağıtık İşleme Modeli"ni ileri sürdü. Şimdi ise yapay zekâyı ve sinirbilimi bir araya getirmek, her iki alan için de analogilerin ötesinde faydalar ve korkular vaat ediyor. Belki yakın bir gelecekte bu iki "zekâ" türünün farklı etkileşimlerinden bahsedeceğiz.

## Yapay Zekâyı Geliştirmek için Nörobilimi Kullanmak

Alan Turing yapay zekâ çağını başlatan 1950 tarihli ünlü yazısının girişinde "Makineler düşünebilir mi?" sorusunu sorduğunda, karmaşık hesaplamaları gerçekleştiren bilinen tek sistem biyolojik sinir sistemleriydi. Bu nedenle yeni doğmakta olan YZ araştırmacılarının örnek alabilecekleri ilk şeyin beyin olması şaşırtıcı değildir. (3) Halen YZ'nin izlediğimiz başarılarının ortaya çıkışında nörobilimle ortaya çıkan interaksiyonla geliştirilmiş bazı yaklaşımlar şu şekilde sıralanabilir. En temel yaklaşımın beyin benzeri devreleri kullanarak akıllı hesaplama yapmak için nöronal (sinir) devrelerini modellemek olduğu söylenebilir. Bu oldukça indirgemeci bir tutum olarak tanımlanabilir, ama işe yaramıştır.

Doğal nöronal ağın karmaşık bir doğası vardır. Kortikal ağlarda bölgesel ve uzun menzilli yan bağlantıları da içerecek şekilde zengindir ve hem yukarıdan aşağı hem aşağıdan yukarı asosiasyonları içerir. Doğuştan gelen bağlantı örüntüleri, insanın bilişsel yeteneklerini yönlendiren mekanizmalar sağlar. Makine insan beynini taklit ederek başarılı olur. "Derin ağ" (Deep network) mimarisi olarak bilinen günümüz YZ formunda beyinden esinlenen bu model, biyolojik muadilleri olan sinapslara benzetilen ayarlanabilir ağırlıklarla bağlanan nöron benzeri elemanların ardışık katmanlarından inşa edilmiştir. (3) Bu "derin ağlar"ın ve ilgili yöntemlerin YZ sistemlerine uygulanması dönüştürücü nitelikte olmuştur.

Bilgisayarlı görme (yüz/patern tanıma), konuşma tanıma ve karmaşık oyunlar oynama gibi yapay zekâ araştırmalarının merkezi alanlarında önceden bilinen yöntemlerden daha üstün olduklarını kanıtlamışlardır. Derin ağlardaki temel problem giriş sinyallerinden istenilen çıktıları üretmek için sinapsların ayarlanmasıdır. Ayarlama istenen çıktılarla birleştirilen girdi düzenleri tarafından sağlanan bir dizi eğitim örneğine göre otomatik olarak gerçekleştirilir. Öğrenme süreci daha sonra eğitim girdi modellerinden istenilen çıktıları üretmek için ağırlıkları ayarlar. Başarılı öğrenme, ağın eğitim örneklerini ezberlemenin ötesine geçmesine ve öğrenme sürecinde karşılaşılmayan yeni girdi modellerine genelleme ve doğru çıktılar verebilmesini sağlar.(3)



Derin ağlara ek olarak YZ modelleri, beyin benzeri hesaplamaların bir başka önemli yönü de beyindeki ödül/haz mekanizmasının taklidini içermesidir ki bu ödül sinyallerinin davranışı değiştirmek için kullanıldığı "takviyeli öğrenme" reinforcement learningdir (RL). RL uygun davranış karşılığında ödül sinyalleri alan bir yapı (bir kişi, hayvan veya robot) bağlamında kullanılır. Bu öğrenme biçiminde yer alan beyin mekanizmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bunun sonucunda yapay zekâ alanlarında, özellikle robotikte bu hesaplama modelleri kullanılmıştır. Ancak sonuç olarak sadece "Basitleştirilerek taklit" söz konusudur. Yine de YZ'ye rehberlik etmek için sinirbilimi kullanma açısından, doğal sinir devrelerinin karmaşıklığı ile karşılaştırıldığında ağ modellerinin bu basitleştirilmiş modellerinin başarısı şaşırtıcıdır.

İkinci sorun şu anda biyolojik devrenin hangi yönlerinin hesaplama açısından gerekli/yararlı olduğu ve ağ tabanlı YZ sistemleri için de yararlı olabileceğinin belirsiz olmasıdır, özellikle her iki yapı arasındaki farklılıklar ve doğal sinir sisteminin her bakımdan (anatomik, kimyasal, organizasyonel vb.) karmaşıklık göz önüne alındığında. Yine de bir takım ipuçları mevcuttur. Derin ağ modellerinin ampirik fizyoloji bakımından fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI) ve davranışsal veriler ile primat görsel sistemi ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda, fizyolojik ve model yanıtlar arasındaki benzerlikler,

nöronal yanıtların sonraki bölümlerine kıyasla erken işleme dönemlerine daha yakın bulunmuştur. Bu da mevcut derin ağ modellerinin erken işleme aşamalarını daha sonraki bilişsel aşamalara kıyasla daha iyi yakalayabileceğini düşündürmektedir.(3)

Buradan hareketle ortaya çıkan soru gelecekte neyi model almamız gerektiğidir. Beynin hangi yönlerinin YZ'nin geliştirilmesi için özellikle önemli olması muhtemeldir? Şu anda açık bir cevabımız yok, çünkü beyin ve nöral organizasyon hakkındaki anlayışımız da hala çok sınırlı. Ancak bazı özellikler önemli görünüyor; örneğin deney ve doğuştan getirilen yapılar meselesi gibi. Mevcut yapay zekâ modellemesi nispeten basit ve tek tip ağ yapıları ile büyük ölçüde eğitim verileri üzerinden öncelikle genişletilmiş öğrenmeye dayanarak ampirik tarafa doğru eğilir. Bunun aksine insan bilişsel sistemi evrim yoluyla anlamlı kavramların ve bilişsel becerilerin kazanılmasını kolaylaştıran ve doğuştan gelen temel yapılarla donatılmıştır. Biyolojik sistemler genellikle öğrenme öncesi devrede kodlanmış, önceden var olan belirli ağ yapılarını temel alarak sınırlı eğitimle karmaşık davranışsal görevleri yerine getirmeyi başarır.(3) Bu da klasik çevre/deney ve doğuştan getirilen yapılar meselesini (nurture/nature) bu kez farklı bir bağlamda yeniden üretmektedir.

Diğer bir öne çıkan durum ise dış dünya ile interaksiyon, yani bir bedene

Ortaya çıkan soru gelecekte neyi model almamız gerektiğidir. Beynin hangi yönlerinin yapay zekânın geliştirilmesi için özellikle önemli olması muhtemeldir? Şu anda açık bir cevabımız yok çünkü beyin ve nöral organizasyon hakkındaki anlayışımız da hala çok sınırlı. Ancak bazı özellikler önemli görünüyor; örneğin deney ve doğuştan getirilen yapılar meselesi gibi. Mevcut yapay zekâ modellemesi nispeten basit ve tek tip ağ yapıları ile büyük ölçüde eğitim verileri üzerinden öncelikle genişletilmiş öğrenmeye dayanarak ampirik tarafa doğru eğilir.

sahip olmak ile ilgili olabilir gibi görünüyor. Andy Clark YZ'nin gelişebilmek için hareket etme ve dünyada değişiklikler yapma, modellerini test etme yeteneğine ihtiyacı olduğunu ya da temel olarak "eylem" ve "algı"ya karşılık gelen bir şeye sahip olması gerektiğini söylüyor. Bunun son noktada gerçek bir "genel zekâ" geliştirmek için gerekli olduğunu, şimdiki durumda satranç oynama ile otonom otomobili kullanma sistemlerinin aynı olmamasının bir sorun olduğunu, bunu aşmanın yolunun dünya ile somutlaşmış bir etkileşim olduğunu iddia ediyor. (5) Ancak tüm yaklaşımlar bu kadar olumlu değildir, bazı yazarlar YZ alanında sağlanan kayda değer ilerlemelere rağmen, YZ algoritmaları ve tekniklerinin genellikle zekânın tecrit edilmiş, çok dar yönlerine odaklanmış olmasının bir sorun olduğu görüşündeler. Bu indirgemeci yaklaşım bir yandan alt bileşenleri tek başına incelemek, onları daha iyi anlamak ve dış faktörlerden ayırmak için işe yarar olabilirken, diğer yandan asıl anlamak istediğimiz şeyin, yani karmaşık akıllı davranışın bütüncül yapısının çözülebilmesi için uygun yöntem olmayabilir. Diğer bir uyarı YZ için örnek olarak biyolojiye bakmanın verimsiz olabileceği konusundadır. Bu fikrin ana argümanı uçan makinelerin tarihinden geliyor. Halen Paris'te sergilenmekte olan Avion III, Clément Ader tarafından 1892-1897 yılları arasında kuşlar, özellikle yarasalar model alınarak inşa edilmiş, buharla çalışan mafsallı kanatları olan ve çalışması bunların çırpılmasına dayanan ilkel bir uçaktı. Ancak araç uçamadı ve araştırma durduruldu. Buna karşın ilk uçan makine bilindiği gibi Wright kardeşler tarafından tasarımı kuşlardan ilham alınarak değil, aerodinamik prensibinin incelenmesine dayanılarak oluşturuldu. (4) Bu nedenle, bu örnek genellikle biyolojiden kopyalamanın mahzurları için önemli bir argüman olarak düşünülebilir.

### **Yapay Zekâ Nörobilimi İleri Taşımaya Yardım Edebilir mi?**

Sonuç olarak, çok uzun zamandır özünde her iki disiplin de aynı merkezi problemi -zekâyı- çözmeye çalışıyor, ancak farklı açılardan ve farklı soyutlama seviyelerinden. Yapay zekâ da bilim insanları makinelerin dilini kullanarak verimli, etkili öğrenmenin gizemlerini matematiksel olarak kırmaya çalışıyorlar. Sinirbilimde çeşitli modern

nörogörüntüleme yöntemleriyle beynimizi inceliyoruz ve zekâyı anlamaya çalışıyoruz. (5,6) Gerçekten son dönemde YZ araştırmalarının nörobilimin ilerlemesi için bir metafor olmanın epey ötesine geçtiğini görüyoruz.

Modern derin öğrenmenin kökleri 1960'larda görme yollarını inceleyen çalışmalarda yatmaktadır. Şimdi tersine sinirbilimcilerin yapay zekâyı, beyinlerimizin duyu ve hareketleri nasıl işlediğine dair fikirleri yeniden incelemek için kullanmaları durumu ortaya çıkmıştır. Doğal olarak görmeyi veya işitmeyi taklit eden algoritmalar beynin bu görevleri nasıl çözdüğü konusunda fikir verebilir. (Fan 2019) Hatta çok daha karmaşık olmasına rağmen duyuları ve hareketi çözmek için aynı strateji daha soyut beyin fonksiyonlarını anlamaya yardımcı olabilir. (5-7) YZ nörobilimcilerin nöral kodu, (biz buna en genel anlamda "bilincin nöral karşılıkları" hipotezi diyoruz) yani bir düşüncenin veya davranışın altında yatan, ona özgü bireysel nöron gruplarının aktivasyon kalıplarının gizeminin anlaşılmasına yardımcı olacağını umuyoruz. Bu arada bilincin nöral karşılıkları sorununun diğer yandan zihin felsefesinin bir sorunu olduğunu hatırlatalım.

Nörobilimin bir kolu beynin gizemlerini çözmek için hücresel düzeyde reseptörleri, nörotransmitterleri, sinyal moleküllerini gözlemleyerek çalışıyor. Ama yakın dönemde "büyük veri" çağı başladı. Böylece sinirbilimciler tek tek proteinleri, genleri ve beyin bölgelerini incelemek yerine profiller ortaya koymak veya nöral bağlantıları dijital olarak yeniden yapılandırmak için araçlara sahip oldular. Örneğin biyokimyada belirli bir biyoloji seviyesinin beyin çapında "profil" olarak çalışması demek olan "omik" (genomik, epigenomik, metabolomik) adı verilen teknik ortaya çıktı. (6) Yakın dönemde YZ'nin hesaplama gücü sayesinde araştırmalardan elde ettiğimiz çok büyük miktardaki veriyi anlamlı bir resim haline getirebilme imkanına kavuşmuş olduk gibi görünüyor. Yani YZ teknikleri büyük verileri işlemek için bir araç olarak da kullanışlıdır. Beyinden çeşitli görüntüleme teknikleri ile elde edilen veriler son derece karmaşık, bu nedenle makine öğrenmesinden gelen tekniklerin kullanımını son derece etkili olmaya başladı. Makine öğreniminin temel gücü, insanların fark edemeyeceği kadar büyük veri kümelerinde çok ince veya fazla örtük olabilecek kalıpları tanımda yarar. (7) Bu nörobilimde çözüm bekleyen



temel problemler için yeni bir umut ışığı sağlayabilecek gibi görünüyor. Ancak sonuç olarak insan beyni ve onunla ilişkili işlevler son derece karmaşıktır. Sinirbilimciler insan beyninin nasıl çalıştığına kesin mekanizmalarının çoğunu bilmiyorlar. Örneğin bilim insanları genel anestezinin beyinde tam olarak nasıl çalıştığını veya neden uyuduğumuzun veya hayal ettiğimizi gösteren nörolojik mekanizmaları bilmiyorlar. Benzer şekilde, bilgisayar bilimcileri, karmaşıklık nedeniyle derin öğrenmenin sonuçlarına nasıl ulaştığını tam olarak bilmiyorlar.(8) Bu noktada biz bir çözüm umarken zihin felsefesine ilişkin sorunların YZ ile de karşımıza yeni biçimlerde çıktığını izliyoruz sanki.

### Ve Gelecek! İnsanın Yeniden Tanımlanmasına Doğru...

İnsanın kendi zekâsına olan hayranlığı ve ondan daha güçlüsünü ortaya çıkarma isteği nasıl sonuçlanacak? Narkissos efsanesindeki gibi sonuç güzel bir çiçek ile temsil edilen güçlü ve iyi bir sentez mi olacak? Ya da yine efsanenin diğer anlamı içerisinde bir yok oluşa sürükleniş mi? YZ ürünü bazı modern robotlar insanlara bakım vermek için yapılıyor ve insana benzeme konusunda çok başarılılar, ama onlara ne anlam vermeliyiz? Ekim 2017’de, 50’den fazla yüz ifadesine sahip bir sosyal robot olan Sophia Suudi Arabistan vatandaşı oldu. Bu sadece bir espiri midir? Yoksa ilerlediğimiz yolu mu gösteriyor? Son zamanlarda yapılan bir araştırma insanların robotlara çok insani bir şekilde davrandıklarını gösteriyor. “Lütfen beni kapatma!” diye yalvaran bir robot araştırmacıların deneklerden robotu kapatmalarını istemelerine rağmen, insanların neredeyse %30’unun robota kulak vermesi ile sonuçlandı. İnsan hemen Uzay macerası 2001 ve Hall 9000’i hatırlıyor. Bu konuyu farklı sonuç ve boyutlarıyla işleyen pek çok sanat ürünü (kitap, film) ortaya çıktı ve sayıları giderek artıyor. Ama etki sadece sanat ile sınırlı değil. Şimdiden Uluslararası Nöroetik Derneği (INS) adlı sinirbilimdeki gelişmelerin sosyal, yasal, etik ve politika sonuçlarını inceleyen profesyonel bir organizasyon var. Misyonu beyin bilimindeki ilerlemelerin sorumlu kullanımı konusunda araştırma ve diyalogu teşvik etmek ve ilham vermek. Yine bu sorunları tartışan birçok yayın iki alanın kesişim noktasında etik konularını ele almaktadır. (9-11) Bu

konudaki en ilginç ve gelecek vizyonunu özetleyen yaklaşım Bess’in ortaya koyduğu kısmen ahlaki/hukuki durumu da göz önünde bulunduran yakın gelecekte ortaya çıkabilecek “varlık türleri” sınıflaması olabilir. Bu varlıkların tartışmalı olmakla beraber temelde sekiz farklı varlık türünden oluşabileceğini ve bunları üç ahlaki/hukuki kategoriye düşüğünü öne sürüyor Bess.(12)

**Hayvanlar:** Değiştirilmemiş hayvanlar, orta derecede değiştirilmiş hayvanlar

**Kişiler:** Radikal olarak yükseltilmiş hayvanlar, değiştirilmemiş insanlar, antropomorfik olarak tasarlanmış makine varlıklar, orta derecede değiştirilmiş insanlar

**Varsayılan kişiler:** Radikal olarak değiştirilmiş eski insanlar, antropomorfik olarak tasarlanmamış süper akıllı makine varlıklar

Tesla Motors ve SpaceX şirketlerinin de kurucusu olan Elon Musk’ın kurduğu Neuralink adlı yeni bir şirket insan beynini bilgisayar ara yüzlerine bağlayacak teknolojiler üzerinde çalıştıklarını açıkladı. İşte bu fikir bahis konusu çağa geçişin belki de zihinsel işaret fişeği olarak düşünülebilir. Neuralink aslında klasik beyin bilgisayar ara yüzü sistemlerini geliştirmek için çalışıyor ve özellikle felçli hastalar için teknolojik çözümler geliştirmeyi resmi olarak hedefliyor ama Musk nihai amacın “insanüstü bilinç” olduğunu vurguluyor. Musk insanın YZ’yi ancak onun kanallarına girerek kontrol edebileceğini düşünüyor ve bilimkurguyu bir kez daha gerçek kılmayı hedefliyor.(13) Bu noktada sinirbilimciler ve YZ’ciler arasındaki bakış açısı farkını belirtmemiz gerek. Sinirbilimde şimdiye kadar doğal sinir ağlarını açıklamak konusunda çok az ilerleme kaydedildi, oysa YZ de ilerleme neredeyse günlük olarak gerçekleşmekte. Belki de bu yüzden tüm sinirbilimciler oldukça kötümserler (ya da bana göre gerçeği soğukkanlılıkla görebiliyorlar) ve insani seviyedeki YZ ye ulaşmanın yüzlerce yıl alacağını öngörüyorlar. YZ alanında çalışanlar ise tam tersine alabildiğine iyimserler ve 20-50 yıl arasında bu dönüşümün gerçekleşeceğini düşünüyorlar. (14)

Sonuç olarak her iki bilim alanı birlikte insanlığın geleceğini önemli ölçüde şekillendirebilecek atılımlar üretiyor. İn-

san zekâ sına bir nazire olan YZ’nin ilk kriteri Turing testi bir bilgisayarın akıllı davranışının, bilişle ilgili görevlerde insan düzeyinde performansla ulaşma yeteneği olabileceğine dayanıyordu. Ancak ulaştığımız noktada kendi modelini geride bırakabilecek ve hatta onun “insansı” ihtiyaçlarına sahip olmayacak bir zekâ neye benzer? Neyin peşine düşer? Bu noktada tekrar soralım, “doğal zekâ” nedir, YZ Nedir?

### Kaynaklar

1) Hassabis 2019 <https://deepmind.com/blog/article/ai-and-neuroscience-virtuous-circle> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

2) Epstein 2016 <https://aeon.co/essays/your-brain-does-not-process-information-and-it-is-not-a-computer> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

3) Ullman S. Using neuroscience to develop artificial intelligence. *Science* 2019 363 (6428), 692-693. DOI: 10.1126/science.aau6595

4) Lomonaco V. Towards Neuroscience-Grounded Artificial Intelligence. 2019 <https://towardsdatascience.com/towards-neuroscience-grounded-artificial-intelligence-9d592ace4314> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

5) Segal M. A More Human Approach to Artificial Intelligence. *Nature* 2019; 571, S18 doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02213-3> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

6) Fan S. Three Invaluable Ways AI and Neuroscience are Driving Each Other Forward. 2019 <https://singularityhub.com/2019/08/08/three-invaluable-ways-ai-and-neuroscience-are-driving-each-other-forward/> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

7) Savage N. How AI and Neuroscience Drive Each Other Forwards. *Nature* 2019;571, S15-S17 doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02212-4> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

8) Rosso C. The Symbiotic Nature of AI and Neuroscience. 2019 <https://www.psychologytoday.com/us/blog/the-future-brain/201903/the-symbiotic-nature-ai-and-neuroscience> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

9) Yuste R, Goering ,S at all. Four Ethical Priorities for Neurotechnologies and AI *Nature* 2017;551:159-163

10) Ienca M. Neuroethics meets artificial intelligence. 2019 <http://www.theneuroethicsblog.com/2019/10/neuroethics-meets-artificial.html> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

11) Kellmeyer P. Artificial Intelligence in Basic and Clinical Neuroscience: Scientific Opportunities and Ethical Challenges. *Neuroforum* 2019; 25(4): 241–250

12) Bess M. Eight Kinds of Critters: A Moral Taxonomy for the Twenty-Second Century *Journal of Medicine and Philosophy*. 2018;43: 585–612, 2018 doi:10.1093/jmp/jhy018 (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

13) Musk E. An Integrated Brain-Machine Interface Platform with Thousands of Channels. *bioRxiv* 2019 doi: <https://doi.org/10.1101/703801> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)

14) Culurciello E. Can We Copy the Brain? 2017 <https://towardsdatascience.com/can-we-copy-the-brain-9d592ace4314> (Erişim Tarihi: 19.02.2021)