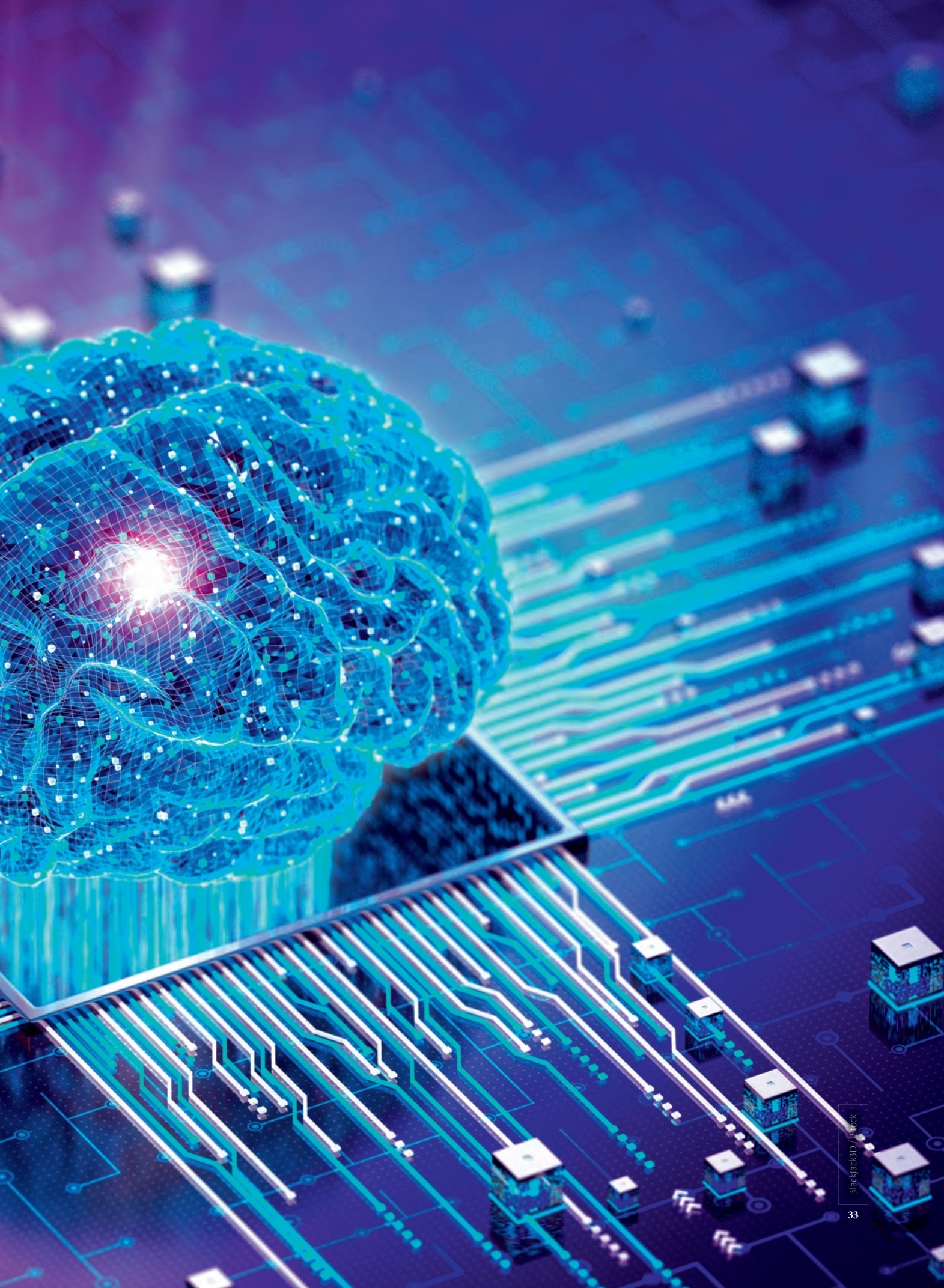
Beyin Gibi Çalışan Bilgisayarlar
Nöromorfik Hesaplama

Murat Can Işık [*Stanford Üniversitesi*

Bilgisayarlar, hayatımızın hemen her alanında işlerimizi kolaylaştırıyor. Giderek daha güçlü işlemciler, daha büyük veri depolama kapasiteleri ve daha hızlı ağ bağlantıları ile donatılan bilgisayarlar, günlük yaşamdan endüstriyel süreçlere kadar her alanda vazgeçilmez hâle geldi. Ancak tüm bu teknolojik gelişmelere rağmen insan beyninin karmaşıklığını, esnekliğini ve düşük enerji tüketimiyle inanılmaz işlem kapasitesini taklit edebilme konusuna hâlâ çok uzağız.



BlackJack3D / iStock

İnsan beyni, nöronlar (sinir hücreleri) ve sinapslar (iki sinir hücresi veya bir nöron ile bir diğer hücre arasında elektriksel sinir uyarılarının iletildiği bölge) arasında iletişim kuran karmaşık bir biyolojik ağ yapısına sahiptir. Bu yapı öğrenme, karar verme ve adaptasyon gibi süreçlerde olağanüstü bir performans sergiler. Örneğin bir çocuk bir kedi gördüğünde beynindeki nöronlar, kediyi tanımlamak ve onunla ilgili geçmişteki deneyimlerini hatırlamak için saniyeler içinde işlem yapabilir. Bu süreç, neredeyse hiç enerji harcamadan gerçekleşir. Buna karşın bir bilgisayarın aynı seviyede bir görev yapması büyük miktarda enerji tüketimi ve yüksek işlem gücü gerektirir.

Peki, bilgisayarlar bu biyolojik işleyişi taklit edebilir mi? Beynimiz gibi enerji verimli, hızlı ve esnek bir şekilde çalışmaları mümkün mü? İşte nöromorfik hesaplama, bu soruların cevabını arayan ve beyin gibi çalışan bilgisayarların temelini atan bir teknoloji olarak karşımıza çıkıyor. Bu teknoloji, yalnızca mevcut bilgisayarların sınırlarını genişletmekle kalmaz aynı zamanda yapay zekâ, makine öğrenimi ve otonom sistemler gibi alanlarda çığır açıcı gelişmelere öncülük edebilir.

Nöromorfik Hesaplamanın Önemi

Nöromorfik hesaplama, yalnızca bir teknoloji olarak değil, aynı zamanda insan beynini anlamaya yönelik bir bilimsel araç olarak da dikkat çeker. Beynin nasıl çalıştığını anlamak, sinir bilim (nöroloji) ve psikoloji gibi disiplinlerin yanı sıra yapay zekâ, bilişim ve mühendislik alanlarında da büyük bir öneme sahiptir. Bu bağlamda nöromorfik hesaplama, insan beyninin işleyişini modelleyerek hem daha gelişmiş teknolojiler geliştirmemize hem de insan zihninin karmaşıklığını daha iyi kavramamıza olanak tanır.

Bu teknoloji, bilgisayarların insan beyninin çalışma prensiplerini taklit ederek bilgi işlemesini sağlayan bir yaklaşıma dayanır. İnsan beyninde nöronlar ve sinapslar elektrik sinyalleri aracılığıyla iletişim kurar ve bu sayede hızlı, verimli ve enerji tasarruflu bir şekilde karar alma süreçlerini yürütür. Nöromorfik çipler, bu biyolojik işleyişi elektronik bir modelle taklit ederek geleneksel bilgisayar mimarilerinin sınırlarını aşmayı hedefler. Bu sistemler, insanların

öğrenme yetilerinden ilham alarak geliştirilen yapay zekâ ve derin öğrenme gibi modern teknolojilerle kıyaslandığında enerji verimliliği ve işlem hızında önemli avantajlar sunar.

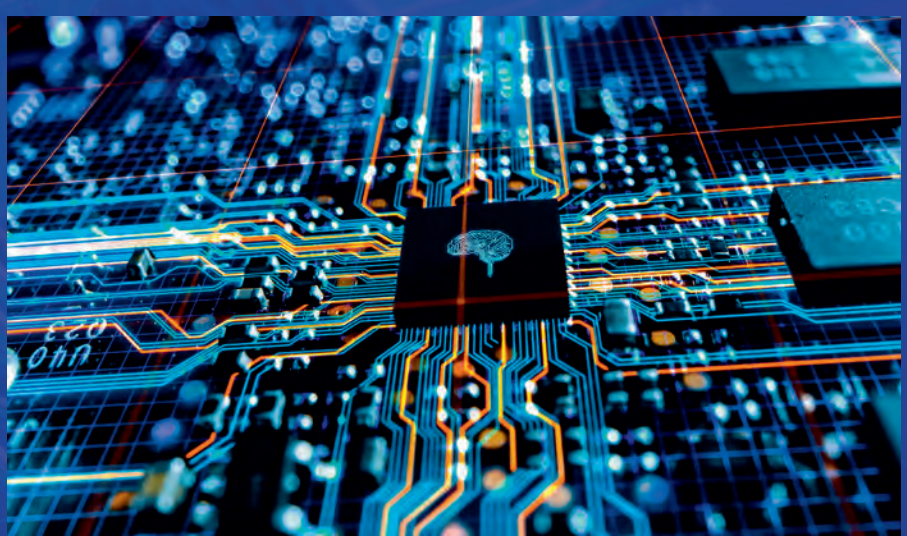
Nöromorfik hesaplama, geleneksel bilgisayar mimarilerinden belirgin farklılıklar gösterir. Geleneksel bilgisayarlar genellikle Von-Neumann mimarisine dayanır: Bu mimaride komutlar ve veriler aynı bellekte saklanır. Bellek ve işlemci arasında tek bir veri yolu bulunduğundan komut (işlemin nasıl gerçekleştirileceğini tanımlayan talimat) getirme ve veri işleme eş zamanlı gerçekleştirilemez. Aynı zamanda işlemci ve bellek arasındaki veriler sürekli olarak taşınır ve bu durum yüksek enerji tüketimine neden olur.

Buna karşın nöromorfik sistemler, bilgiyi paralel olarak işleme yetenekleriyle öne çıkar. İnsan beyninin biyolojik yapısını taklit eden bu sistemler, "diken" adı verilen elektriksel sinyaller aracılığıyla çalışır ve dikenli sinir ağları (Spiking neural network, SNN) olarak isimlendirilen bir yaklaşım kullanır. Nöromorfik sistemlerde nöronlar, yalnızca sinapslardan aldıkları sinyalin gücü belirli bir eşik değere ulaştığında aktifleşir yani "diken" üretir ve bilgi işler. Ayrıca birden fazla nöron aynı anda bilgi işleyebilir yani paralel bilgi işleme mümkündür.

Nöromorfik sistemler olay tabanlı çalışır. Yani nöronlar sadece "diken" ürettiğinde hesaplama yapar. Nöromorfik sistemlerin bir özelliği de asenkron olmasıdır. Geleneksel yapay sinir ağlarında veri, ağı oluşturan katmanlar arasında eş zamanlı olarak aktarılır. Nöromorfolojik sistemlerde ise nöronlar sinyal gücü belirli bir eşik değere ulaştığında "diken" ürettiğinden bilgi, katmanlar arasında asenkron yani eş zamanlı olmaksızın iletilir.

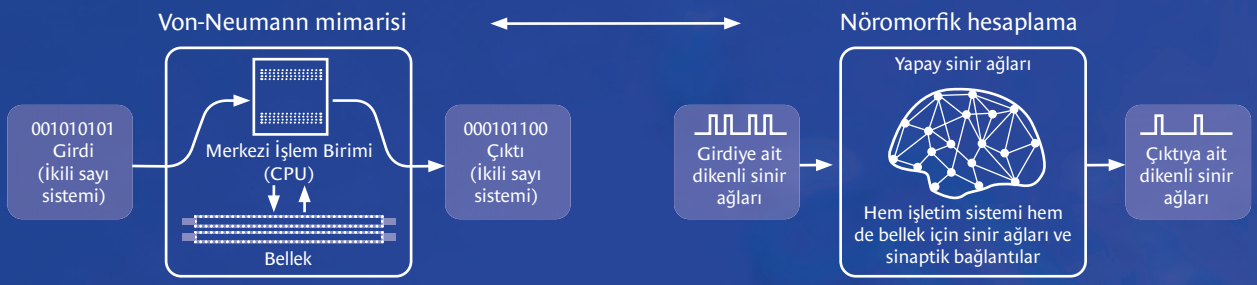
Ayrıca Von Neumann mimarisine dayanan geleneksel bilgisayarlarda bilginin depolandığı ve işlendiği birimler birbirinden ayrıyken nöromorfik sistemlerde bellek ve işlemci birimleri birbirinden ayrı değildir, nöronlar ve sinapslar hem bilgiyi depolayabilir hem de işleyebilir.

Bu süreçler hem bilgi işleme hızını artırır hem de enerji tüketimini büyük ölçüde azaltır. Nöromorfik hesaplama, yalnızca enerji verimliliği



gorodenkoff / iStock

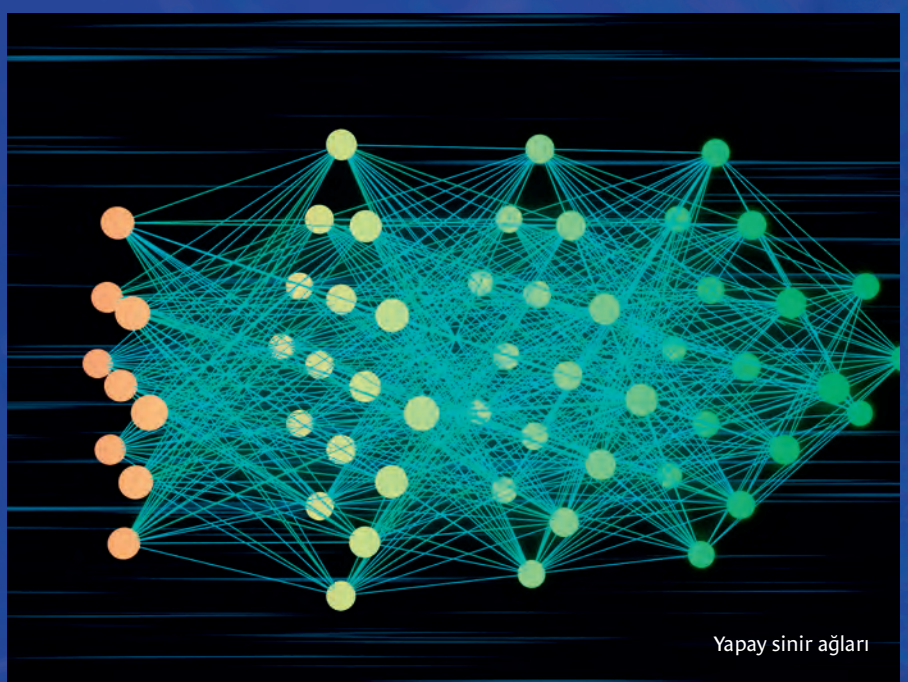
Beyin gerçek zamanlı veri işleme ve karar verme yeteneğine sahipken mikroçipler, bu yeteneklerin elektronik dünyadaki fiziksel temsilidir.



Nöromorfik hesaplama, geleneksel bilgisayar mimarilerinden belirgin farklılıklar gösterir.

sağlamaz aynı zamanda gerçek zamanlı analizler, karmaşık veri setlerinin işlenmesi ve makine öğrenimi süreçlerinin daha verimli hâle getirilmesi gibi zorlu görevlerde de etkin bir çözüm sunar. Bu durum, özellikle büyük veri analizleri, sağlık hizmetleri ve otonom sistemler gibi enerji ve işlem gücünün kritik olduğu alanlarda büyük avantajlar sağlar. Ayrıca nöromorfik sistemlerin biyolojik sistemlerin işleyişini anlamada yeni kapılar açması, bilimsel araştırmalarda çığır açıcı sonuçlar elde edilmesine olanak tanır.

Geleneksel bilgisayarlar, belirli görevlerde yüksek enerji tüketir ve genellikle sabit algoritmalarla çalışır. Buna karşın nöromorfik çipler, düşük enerji tüketimleriyle karmaşık görevleri daha hızlı yerine getirebilir. Örneğin karmaşık bir görüntü tanıma işlemi için geleneksel bir işlemci büyük miktarda enerji harcarken bir nöromorfik çip, aynı işlemi çok daha düşük enerjiyle tamamlayabilir.



Yapay sinir ağları

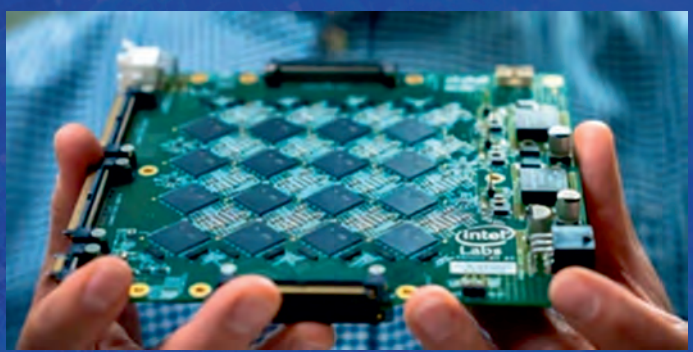
Dragon Claws / iStock

Nöromorfik hesaplama fikri ilk olarak 1980'lerde ortaya atıldı. Carver Mead'in "Analog VLSI and Neural Systems" kitabında biyolojik sinir sistemlerinin elektronik devrelere nasıl uyarlanabileceği tartışılmıştı. 1990'larda ise bu alandaki ilk uygulamalar ortaya çıkmaya başladı. Örneğin sinirsel modellemelerde kullanılan analog devreler, bugün nöromorfik çiplerin temelini oluşturdu. Günümüzde Intel, IBM gibi büyük şirketler bu teknolojiyi geliştirmeye devam ediyor. Bu süre zarfında nöromorfik hesaplama teknolojisinin gelişimi, yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi alanlardaki ilerlemelerle birleşerek hız kazandı. Özellikle 2010'lardan sonra derin öğrenme algoritmalarındaki gelişmeler, nöromorfik sistemlerin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağladı.

Beyinden İlham Alan Çipler

Intel Loihi

Intel'in geliştirdiği Loihi çipi, biyolojik sinir ağlarını taklit eden asenkron dikenli sinir ağlarını kullanıyor. Loihi, öğrenme ve adaptasyon yetenekleriyle özellikle robotik ve otonom sistemlerde tercih ediliyor. Çip, 128 nöromorfik çekirdekten oluşuyor ve enerji verimliliği ile öne çıkıyor.



IBM NorthPole

IBM'in NorthPole çipi ise yüksek işlem kapasitesi ve gerçek zamanlı bilgi işleme yeteneğiyle dikkat çekiyor. Özellikle otonom araçlar ve akıllı şehir uygulamaları gibi enerji verimliliğinin kritik olduğu alanlarda kullanılıyor.

BrainScaleS ve SpiNNaker

Avrupa'da geliştirilen bu nöromorfik platformlar, sinir bilim araştırmalarında kullanılıyor. BrainScaleS, biyolojik sinir ağlarının işleyişinin analog sinirsel simülasyonlar aracılığıyla modellenmesine olanak tanırken SpiNNaker, yüz binlerce nöron ve milyarlarca sinapsı simüle edebiliyor.

Nöromorfik Hesaplama Nerelerde Kullanılabilir?

Otonom Araçlar
Nöromorfik çipler, otonom araçların çevrelerini daha hızlı ve etkili bir şekilde algılamasını sağlar. Bu sayede trafik kazalarının önlenmesi ve enerji tüketiminin azaltılması mümkün olabilir. Örneğin bir nöromorfik çip, geleneksel bir işlemciden çok daha düşük enerjiyle karmaşık bir görüntü işleme görevini yerine getirebilir.

Sağlık Sektörü
Yapay zekâ destekli nöromorfik sistemler, doktorların hastalıkları daha hızlı teşhis etmesine yardımcı olabilir. Ayrıca kişiselleştirilmiş tedavi planlarının oluşturulmasında da kullanılabilir. Özellikle EEG ve EKG verilerinin analizi gibi biyomedikal uygulamalarda nöromorfik çipler büyük bir potansiyele sahiptir. Epilepsi teşhisi veya kalp ritmi bozukluklarının tespiti gibi alanlarda hızlı ve düşük enerji tüketen analizler yapılabilir.

Robotik
Nöromorfik çiplerle donatılmış robotlar, çevrelerindeki değişikliklere hızla adapte olabilir. Örneğin bir üretim hattında çalışan bir robot, yeni bir görev öğrendiğinde yeniden programlanmasına gerek olmadan kendini optimize edebilir. Bu durum, endüstriyel üretim süreçlerinin otonom olarak gerçekleştirilmesinde büyük bir avantaj sağlar.

Akıllı Şehirler
Trafik yönetimi, enerji tasarrufu ve atık yönetimi gibi alanlarda nöromorfik hesaplama, şehirlerin daha sürdürülebilir hâle gelmesine katkı sağlar. Örneğin gerçek zamanlı veri işleme kapasitesi sayesinde trafik yoğunluğunu azaltmaya yönelik anlık çözümler üretilebilir. Ayrıca enerji tüketimini optimize eden akıllı aydınlatma sistemleri de nöromorfik çipler sayesinde daha verimli hâle gelebilir.

Güvenlik Sistemleri
Nöromorfik sistemler hata, saldırı ve değişen durumlara uyum sağlama konularında geleneksel yapay zekâ algoritmalarına göre daha dayanıklı olabilir. Örneğin güvenlik sistemlerinde sahte veri saldırılarına karşı yüksek direnç gösterebilir.

NanoStockk / iStock

İnsan benzeri bir robotun karmaşık veri akışlarını yönetmesi

Nöromorfik Hesaplamanın Günlük Hayatımıza Etkileri

Nöromorfik hesaplama, gelecekte telefonlar, oyun konsolları ve ev aletleri gibi birçok teknolojik ürünün çok daha akıllı hâle gelmesini sağlayabilir. Örneğin bir akıllı telefon, kullanıcı alışkanlıklarını öğrenerek kişiye özel öneriler sunabilir. Video oyunlarındaki yapay zekâlı rakipler, oyuncunun stratejilerini analiz ederek daha zorlu hamleler yapabilir. Akıllı ev cihazları, enerji tüketimini optimize edebilir ve çevre dostu çözümler sunabilir. Evde kullanılan internete bağlı akıllı cihazlar (Nesnelerin interneti, IoT, cihazları olarak isimlendirilir.), nöromorfik çipler sayesinde enerji verimli hâle gelir ve bu cihazların bağlı olduğu ağ üzerindeki yükü azaltır.

Yapay Zekâ ve Otonom Sistemler

Yapay zekâ, modern teknolojinin merkezinde yer alıyor. Ancak bu sistemlerin enerji tüketiminin yüksek olması, sürdürülebilirlik açısından ciddi bir engel oluşturuyor. Nöromorfik çipler, yapay zekâ uygulamalarının hem enerji tüketimini azaltabilir hem de işlem hızını artırabilir. Özellikle otonom araçlar, insansız hava araçları (İHA) ve robotlar gibi otonom sistemlerde nöromorfik teknolojilerin kullanımı büyük bir potansiyele sahiptir. Örneğin bir otonom araç, nöromorfik çiplerle donatıldığında çevresel sensörlerden gelen bilgiyi gerçek zamanlı olarak işleyebilir, kararlarını daha hızlı alabilir ve enerji tasarrufu sağlayabilir.

Bu teknoloji yalnızca karayolu taşımacılığı ile sınırlı değil: Hava taşımacılığı, denizcilik ve lojistik sektörlerinde de büyük dönüşümlere yol açabilir. Özellikle İHA'ların çevre dostu görevlerde kullanımı, nöromorfik çiplerle optimize edildiğinde büyük verimlilik artışları sağlayabilir. Bu sistemler sayesinde hava trafiği daha güvenli hâle gelirken teslimat süreçleri daha hızlı ve maliyet etkin olabilir.

Çevre Dostu Teknolojiler ve Sürdürülebilirlik

Günümüzde enerji tüketimi, teknoloji dünyasının en büyük zorluklarından biri hâline geldi. Veri merkezleri, dünyanın toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturuyor ve bu da karbon ayak izinin artmasına yol açıyor. Nöromorfik sistemlerin veri merkezlerinde kullanılması, enerji verimliliğini artırarak bu soruna çözüm sunabilir. Örneğin nöromorfik çiplerle çalışan veri merkezleri, geleneksel veri merkezlerine kıyasla çok daha az enerji tüketerek daha çevre dostu bir yapı sunabilir.

Enerji tasarrufunun ötesinde nöromorfik teknolojiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayabilir. Örneğin güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri

gibi enerji elde edilen sistemlerin verimliliğini optimize etmek için nöromorfik algoritmalar kullanılabilir. Ayrıca bu sistemler, akıllı şebekeler aracılığıyla enerji talebini daha iyi yönetebilir ve dağıtım süreçlerini optimize edebilir.

Eğitim ve Araştırmada Yeni Ufuklar

Nöromorfik hesaplama, akademi ve eğitim dünyasında yeni kapılar açıyor. Özellikle sinir bilim, psikoloji, mühendislik ve bilişim gibi disiplinlerde çalışan araştırmacılar, bu teknolojiyi kullanarak daha karmaşık deneyler gerçekleştirebilir. Örneğin nöromorfik modeller, beynin işleyişini anlamak için simülasyonlar oluşturabilir ve bu da nörolojik hastalıkları tedavi etme yöntemlerinde devrim yaratabilir.

Eğitim alanında nöromorfik çiplerle donatılmış yapay zekâ sistemleri, öğrencilere kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sunabilir. Bu sistemler, öğrencinin öğrenme hızını ve tarzını analiz ederek en uygun içerik ve yöntemleri önerebilir. Bu da eğitimde eşitliği artırarak herkes için daha erişilebilir bir öğrenim ortamı sağlayabilir.

Toplumsal Dönüşüm ve İnsan-Makine Etkileşimi

Nöromorfik hesaplama, insan-makine etkileşiminde yeni bir çağın başlangıcını temsil ediyor. Bu teknolojiler, cihazların kullanıcı alışkanlıklarını daha iyi anlamasını ve daha kişiselleştirilmiş deneyimler sunmasını sağlayabilir. Örneğin akıllı ev sistemleri, kullanıcıların davranışlarını öğrenerek enerji tasarrufu sağlayan otomasyonlar geliştirebilir. Akıllı telefonlar, kullanıcıların günlük rutinlerini analiz ederek daha etkili öneriler sunabilir.

Bu teknolojinin toplumsal etkileri yalnızca bireylerle sınırlı değil. Akıllı şehir projelerinde trafik akışının optimize edilmesi, atık yönetiminin iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin azaltılması gibi süreçlerde nöromorfik sistemlerin kullanılması, şehir yaşamını daha sürdürülebilir hâle getirebilir. Ayrıca bu tür teknolojilerin daha fazla insan tarafından benimsenmesi, teknolojiye olan güvenin artmasına ve dijital dönüşümün hızlanmasına yol açabilir.

Sağlık Hizmetlerinde Devrim

Nöromorfik hesaplama, sağlık sektöründe de çığır açıcı yeniliklere kapı aralayabilir. Beyin ve sinir hastalıklarının teşhisi ve tedavisinde nöromorfik çipler, daha hızlı ve doğru analizler yapabilir. Örneğin epilepsi nöbetlerini önceden tahmin etmek veya Parkinson hastalarının motor becerilerini iyileştirmek için bu sistemler kullanılabilir.

Ayrıca nöromorfik çipler, biyonik uzuvlar ve diğer tıbbi cihazlarla bütünleştirilerek daha doğal ve etkili çözümler sunabilir. Bu, engelli bireylerin yaşam kalitesini artırabilir ve tıbbi cihazların daha erişilebilir hâle gelmesine katkıda bulunabilir.

Uzay ve Savunma Teknolojilerinde Kullanım

Nöromorfik hesaplama, uzay keşfi ve savunma teknolojilerinde de kritik bir rol oynayabilir. Uzay araçlarında düşük enerji tüketimi, uzun görev süreleri için hayati önem taşır. Nöromorfik sistemler, bu gereksinimleri karşılamak için ideal bir çözüm sunar. Ayrıca askeri uygulamalarda gerçek zamanlı karar alma süreçlerini hızlandırarak operasyonel etkinliği artırabilir.

Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Nöromorfik hesaplama, birçok avantajına rağmen bazı zorluklarla karşı karşıyadır:

Donanım Tasarımı:
Bu çiplerin üretimi karmaşık ve maliyetlidir.

Yazılım Desteği:
Nöromorfik sistemler için yazılım geliştirme araçları hâlâ sınırlıdır.

Ölçeklenebilirlik:
Büyük ölçekli uygulamalarda bu teknolojiyi verimli bir şekilde kullanmak zordur.

Nöromorfik hesaplama teknolojisi, günümüzdeki yenilikçi uygulamalardan çok daha ötesine geçerek gelecekte hayatımızın her alanında köklü değişikliklere yol açabilir. Bu alanın büyüme potansiyeli yalnızca teknolojik gelişmelerle sınırlı değil aynı zamanda toplumsal, çevresel ve ekonomik etkilerle de ilişkilidir. İnsan beynini taklit eden nöromorfik sistemlerin yaygınlaşması, daha sürdürülebilir ve akıllı bir dünyayı mümkün kılabilir.

Geleceği Şekillendiren Bir Teknoloji Olabilir mi?

Nöromorfik hesaplama, bilgisayar teknolojilerinde devrim yaratmaya aday bir yaklaşım olarak hem bireylerin günlük yaşamlarını hem de endüstriyel uygulamaları köklü bir şekilde dönüştürme potansiyeline sahiptir. Intel'in Loihi'si, IBM'in NorthPole'u ve Avrupa merkezli BrainScaleS gibi çipler, geleneksel bilgisayar mimarilerinin ötesine geçerek insan beyninin işleyişini daha yakından taklit ediyor. Bu çipler, öğrenme ve karar verme süreçlerini daha doğal ve enerji açısından verimli bir şekilde gerçekleştirebilme yetenekleri sayesinde modern teknolojilerin sınırlarını yeniden tanımlıyor.

Nöromorfik hesaplamanın geleceği, yalnızca teknolojik yeniliklerle sınırlı değil. Aynı zamanda insan yaşamına ve çevresel sürdürülebilirliğe olan etkileriyle de dikkat çekiyor. Enerji verimliliği konusundaki katkıları, özellikle büyük veri merkezleri, yapay zekâ sistemleri ve akıllı şehir altyapıları gibi yoğun enerji tüketen alanlarda oldukça önemli. Örneğin veri merkezlerinin enerji tüketimini azaltmak, karbon ayak izini düşürmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanımını sağlamak açısından nöromorfik çiplerin benimsenmesi kritik bir adım olabilir. Bu, hem çevreye hem de ekonomik sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunabilir.

Nöromorfik teknolojilerin bireysel yaşamlarımızdaki etkileri de oldukça geniş kapsamlıdır. Gelecekte nöromorfik çiplerle donatılmış cihazlar, kullanıcıların alışkanlıklarını ve ihtiyaçlarını öğrenerek daha kişiselleştirilmiş hizmetler sunabilir. Akıllı telefonlar, video oyun konsolları, ev otomasyon sistemleri ve hatta giyilebilir teknolojiler, bu tür çiplerin avantajlarından yararlanarak hem daha akıllı hem de daha duyarlı hâle gelebilir. Örneğin bir akıllı telefon, yalnızca kullanıcı alışkanlıklarını anlamakla kalmayıp enerji tüketimini optimize ederek daha uzun batarya ömrü sunabilir.

Bilimsel araştırmalar açısından bakıldığında nöromorfik hesaplama, insan beynini daha iyi anlamak ve sinir bilim alanında yeni keşifler yapmak için güçlü bir araçtır. Beyin simülasyonları, sinirsel ağ bozukluklarını anlamak ve yeni tedavi yöntemleri geliştirmek için kullanılabilir. Alzheimer, Parkinson gibi hastalıkların mekanizmalarını daha iyi anlamak ve bireysel tedavi yaklaşımlarını geliştirmek, bu teknolojinin bilimsel potansiyellerinden sadece birkaçıdır. Bununla birlikte nöromorfik hesaplama, psikoloji ve bilişsel

bilimler gibi alanlarda da insan zihninin işleyişine dair yeni bilgiler sunabilir.

Endüstriyel uygulamalar ise nöromorfik teknolojinin önemli fırsatlar sunduğu diğer bir alandır. Otonom araçlar, sağlık hizmetleri, robotik sistemler ve üretim hattı optimizasyonları gibi birçok sektörde bu çiplerin entegrasyonu, iş süreçlerini daha hızlı, verimli ve güvenli hâle getirebilir. Özellikle robotik sistemlerde nöromorfik çiplerin hızlı öğrenme ve adaptasyon yetenekleri, dinamik ortamlarda daha etkili çözümler sunmasını sağlayabilir. Bu durum, fabrikalardan tarım alanlarına kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir.

Sonuç olarak nöromorfik hesaplama, yalnızca bir teknoloji değil aynı zamanda geleceğin dijital dünyasını şekillendiren bir katalizör olarak değerlendirilebilir. Bu teknoloji, enerji tasarrufundan bilimsel ilerlemelere, bireysel yaşam kalitesinden çevresel sürdürülebilirliğe kadar geniş bir alanda etkisini gösterebilir. Intel, IBM ve diğer öncü şirketlerin bu alandaki çalışmaları, nöromorfik hesaplamanın potansiyelini gözler önüne sererken gelecekte bu teknolojinin günlük yaşamlarımızın ayrılmaz bir parçası hâline gelme olasılığını da artırıyor. Bu nedenle nöromorfik hesaplama, teknolojik gelişmelerin ötesinde daha sürdürülebilir ve insan merkezli bir dünyanın temel yapı taşlarından biri olmaya adaydır. ■

Kaynaklar

Mead, Carver. *Analog VLSI and Neural Systems*. Addison-Wesley, 1989.
Furber, S. "Large-scale Neuromorphic Computing Systems." *Journal of Neural Engineering*, 2016.
https://www.intel.com/content/www/us/en/research/neuromorphic-computing.html
https://www.ibm.com/think/topics/neuromorphic-computing
Schuman, C. D., Kulkarni, S. R., Parsa, M., et al. "Opportunities for Neuromorphic Computing Algorithms and Applications." *Nature Computational Science*, 2022.
Roy, K., Jaiswal, A., Panda, P. "Towards Spike-Based Machine Intelligence with Neuromorphic Computing." *Nature*, 2019.
Sandamirskaya, Y., Kaboli, M., Conradt, J., & Celikel, T. "Neuromorphic Computing Hardware and Neural Architectures for Robotics." *Science Robotics*, 2022.
https://open-neuromorphic.org/neuromorphic-computing/
https://www.eetimes.com/what-is-holding-back-neuromorphic-computing/
https://www.ibm.com/think/topics/neuromorphic-computing
https://arxiv.org/html/2310.09692v2
https://www.nature.com/articles/s43588-021-00184-y
https://doi.org/10.1016/j.array.2023.100323
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005623000486?via%3Dihub