

OPTİK BİLGİ İŞLEM: BİLGİ İŞLEMCİLERİN VE PROBLEM ÇÖZMENİN GELECEĞİ Mİ?



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.

 STM ThinkTech

1. GİRİŞ

Google'ın geliştirdiği yapay zekâ AlphaGo'nun, 2016'da Güney Koreli Go şampiyonu Li Sedol'u yenmesiyle, yapay zekânın insanlık için bir tehdit olup olmadığı gündeme gelmiştir. AlphaGo'nun başarısı küçümsenemez, ancak bunun gözden kaçırılmaması gereken bir bedeli olmuştur: Sistem, Li'yi yenebilmek için yaklaşık bir megavat elektrik harcamıştır^[1]. Buna karşılık Li'nin beyninin harcadığı enerji 20 vat kadardır.

21'inci yüzyılda insanlık yapay zekâdan daha büyük bir sorunla karşı karşıyadır: Küresel iklim değişikliği. Teknoloji küresel iklim değişikliğinde hem "sorun" hem de "çözüm" tarafında yer almaktadır^[2]. Küresel dijital medeniyet, elektrik üzerine kuruludur ve gerek dijital cihazların üretilmesinde gerekse insanlığın her saniye ürettiği muazzam miktarda verinin (saniyede yaklaşık 45.000 TB)^[3] saklanması ve bunların dünyanın dört bir yanına (ve uzaya) iletilmesinde büyük miktarda enerji tüketilmektedir. Enerji üretimi ve tüketimi, dünyanın bir numaralı sera gazı emisyonu kaynağıdır. Öte yandan küresel iklim değişikliği ile mücadelede pek çok sektörde sera gazı emisyonlarını azaltacak yöntemlerin uygulanabilmesi için teknolojiden daha fazla yararlanılması önerilmektedir^[2]. Bu sorunla başa çıkabilmek için, tarımdan ulaşıma, enerjiden sağlığa kadar hayatın tüm alanlarında, teknolojinin sağladığı verimlilik, optimizasyon, hassasiyet ve inovasyon kabiliyetlerine başvurulması gerektiği vurgulanmaktadır.

Peki, daha az enerji tüketirken tüm sektörlerin artan bilişim ihtiyacı nasıl karşılanacak? Elektroniğe dayanan Bilişim ve İletişim Teknolojileri (BİT), dünyada devrim yaratmış ve yaşamın ayrılmaz unsurları hâline gelmiştir.

Elektronik cihazlar, bilişim teknolojilerinde hızlı ilerlemeye yol açmış, bu ilerleme ise yüksek performanslı BİT'e talebi önemli ölçüde artırmıştır. Nesnelerin interneti, yapay zekâ, yeni nesil mobil iletişim, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, bilgisayarlı görü, robot teknolojisi ve daha pek çok yeni teknoloji bilgisayarların performansının artmasının sonucu olmuş, bu yeni teknolojiler ise daha fazla bilgi işlem gücüne ihtiyacı beraberinde getirmiştir. Gelişmekte olan sürücüsüz araçlar, metaverse, derin öğrenme, makine öğrenmesi, otonom araçlar gibi teknolojiler için de daha fazla bilgi işlem gücüne ihtiyaç duyulacaktır.

Daha düşük enerji sarfiyatıyla ve daha küçük hacimle daha hızlı, daha çok veriyi işleyebilen işlemciler ve diğer bilgisayar bileşenlerinin geliştirilmesi için araştırmalar ara vermeden sürmektedir. Son yıllarda yeni nesil bilgi işlem teknolojisi arayışında kuantum bilgisayarlar ve optik bilgi işlem, araştırmaların iki odak noktasını oluşturmaktadır^[4].

Optik bilgi işlem, hesaplamalar ve veri işleme görevlerini gerçekleştirmek için ışığı kullanırken, kuantum bilgi işlem, "kuantum mekaniğinin" ilkelerine dayanmaktadır. İki bilgi işlem türünün birbirine üstün yanları bulunmaktadır. Ne var ki kuantum bilgisayarlarını geliştirmenin önündeki mühendislik zorlukları^[4] ve bu bilgisayarların yüksek enerji tüketimi, oda sıcaklığında ısıya yol açmadan bilgi işlem sağlayan optik teknolojilerin daha ön plana çıkmasına yol açmıştır.

Bu gelişmeler olurken, optik devrelerin avantajlarından yararlanarak kuantum bilgi işlem yapabilecek bilgisayarlar geliştirilmesi için de çalışmalar başlatılmıştır.

Yeni nesil kuantum hesaplamaların, optik bilgi işlem teknolojisi üzerine inşa edileceğini savunanların sayısı giderek artmaktadır.

Genel olarak hem optik bilişim hem de kuantum bilişim, bilgi işlem ve veri işleme alanında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Farklı güçlere ve sınırlamalara sahip olsalar da her iki teknoloji de karmaşık sorunları çözmek ve dünya anlayışımızı ilerletmek için heyecan verici yeni olanaklar sunmaktadır.

Optik bilişim de kuantum bilişim de birbirine paralel çok sayıda veri akışına imkân veren yapay sinir ağlarının gelişmesini sağlayabilirler. Yapay sinir ağları, 5G ve gelecekte 6G mobil teknolojileri ile nesnelerin interneti uygulamalarının yaygınlaşmasıyla ortaya çıkacak veri patlamasına yanıt verebilir. Dolayısıyla optik bilgi işlem, yakın gelecekte büyük veri analizi, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları gibi teknolojilerin daha fazla gelişmesini ve yaygınlaşmasını sağlayabilir. Analizimizde optik bilgi işlem teknolojisinin temelleri ve yapılan çalışmalar incelenecek ve optik bilgi işlemin gelecekte elektronik bilgi işlemin yerini alıp alamayacağı sorgulanacaktır.

2. YENİ BİR BİLGİ İŞLEM TEKNOLOJİSİ İHTİYACI NASIL ORTAYA ÇIKTI?

Bilgisayarların ve elektroniğin geçmişi 19'uncu yüzyıla kadar gitmektedir. İlk transistörler ise 1940'lı yıllarda ortaya çıkmıştır. Ancak gerçek anlamda elektronik devriminin, ABD merkezli Texas Instruments'ın 1954 yılında ilk silikon transistörü tanıtmasıyla başladığı genel bir kanıdır. Dünyada en çok bulunan elementlerden biri olan silikonun (silisyum -Si) kullanılması, elektronik bileşen ve cihazların kitlesel üretiminin yolunu açmış ve kimilerine göre "Üçüncü Sanayi Devrimi" olan "Bilişim Devrimi"nin kapılarını aralamıştır^[5].

Tüm modern bilgi işlem cihazları, güçlerini transistörlerle dolu silikon çiplerden alır ve bu transistörler çok küçüktür. Çapları birkaç nanometreden fazla değildir veya insan saçı genişliğinden yaklaşık bin kat daha küçüktür. Modern elektronik işlemcilerdeki transistör boyutları, mikro elektronikteki gelişmeler (nano transistörler, nano silikon tabakaları vb.) sayesinde birkaç nanometreye, bir başka deyişle neredeyse atomik boyutlara kadar küçülmüştür^[6]. Transistörlerin boyutunun küçülmesi ve saflarının sıklaşması (Gelişmiş elektronik çiplerde transistörler arası mesafe 10 nanometreye (nm) kadar düşürülmüştür.) elektrik tasarrufu sağlarken işlem gücünü artırmaktadır.

Ne var ki bu durum sürdürülebilir görünmemektedir. Intel'in kurucularından Gordon Moore tarafından 1965 yılında ortaya atılan, her yıl elektronik bileşenlerin neredeyse yarı yarıya küçüldüğü gözleminden yola çıkarak, "her 18 ayda bir tümleşik devre üzerinde konumlandırılacak bileşen sayısının ikiye katlanacağını" ve böylelikle her bir parçanın maliyetinin azalacağını savunan "Moore Yasası"nın sonunun geldiği artık sıklıkla ifade

edilmektedir^[7]. Silikon yerine karbon nanotüpler gibi yeni malzemelerle atomik veya moleküler düzeyde transistör geliştirilmesi yönünde çalışmalar sürmektedir^[8]. Ancak elektrik sarfiyatı sorununun çözümü için yeni bir paradigma ya ihtiyaç duyulduğu da sıklıkla dile getirilmektedir.

Transistörlerin fiziki sınırına ulaşırken işlem gücünü artırma problemi, çok sayıda paralel elektronik işlemci kullanılarak aşılabilmektedir. Ancak bu çözüm çok daha fazla ısı oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan ısının devreleri eritmemesi için elektronik cihazlarda soğutucu sistemler kullanılmaktadır. Soğutma sistemleri ise bir başka sorunu ortaya çıkarmaktadır: daha fazla elektrik sarfiyatı. Google, 2009 yılında kendi arama motorunda yapılan bir aramanın yaklaşık bir kJ enerji harcadığını ve 0,2 gram karbondioksit ürettiğini bildirmiştir. Buna göre, 10 saniyelik bir aramanın yol açtığı enerji sarfiyatı, bir insanın bir günde yiyecek tüketerek elde ettiği enerjiye (8000 kJ) eşittir^[9]. Nitekim günümüzde üretilen dijital verilerin veri merkezlerine depolanması ve verilerin internet üzerinden dünya geneliyle paylaşılması için kullanılan sistemlerin, yıllık yaklaşık 200 teravat elektrik tükettiği tahmin edilmektedir^[10]. Çok sayıda ülkenin bir yılda tükettiği elektrikten daha fazla olan bu miktarın küresel elektrik üretiminin yüzde 3,6'sı ile yüzde 6,2'sine eşit olduğu değerlendirilmektedir^[11]. Veri merkezlerinin elektrik tüketimi konusunda adım atılmazsa, bunların elektrik tüketiminin dünya elektrik tüketimindeki payının 2030 yılında yüzde 8'e kadar çıkabileceği kaydedilmektedir^[10]. Bu durum, yeni bir bilişim arayışının gerekliliğini savunanların başlıca gerekçelerinden biridir.

Ancak elektronik bilişimin bir kenara bırakılmasının önünde önemli ekonomik zorluklar bulunmaktadır. Öncelikle silikon transistör tabanlı işlemciler ve diğer elektronik devrelerin üretimi, dünyada yarım yüzyılı geride bırakmış köklü bir endüstri hâline gelmiştir. Yarı iletken üretim tesisleri yüksek yatırım maliyetlidir (15-20 milyar dolar)^[12]. Yüksek yatırım maliyeti nedeniyle çok az ülkede firmalar bu yatırıma girişirken, 2022 yılında yaşandığı gibi tedarik krizleri de ortaya çıkabilmektedir^[13]. Buna karşılık yarı iletken üreticilerinin çiplerini kullanan geniş bir elektronik sektörü bulunmaktadır. Dolayısıyla bu sektörde köklü değişim yaratacak teknolojik değişimlerin iyi planlanarak uygulanması gereklidir.

3. OPTİK BİLGİ İŞLEM ANA AKIM OLABİLİR Mİ?

Albert Einstein'ın "Görelilik Teorisi"nde belirttiği üzere, "Işık o kadar hızlı hareket eder ki, uzayda hiçbir şey daha hızlı hareket edemez^[14]." Bilgi işlemde "evrendeki en hızlı şeyden" yararlanmak, öteden beri bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Optik bilişim, neredeyse elektronik bilgi işlemle aynı tarihlerde doğmuş bir araştırma alanıdır. Optik Bilgi İşlem (OBİ), 1960'lı yıllardan bu yana üzerinde araştırmalar yapılan bir alandır. Ancak ışının veri iletimi ve işlenmesi için kullanılmasında yaşanan mühendislik sorunları nedeniyle gelişme sağlamamış; küresel endüstri, bunun yerine bakır kablolarla elektron iletimi ve

transistörlü işlemcilerin kullanılmasına yönelmiştir.

OBİ terimi, dijital bilgi işlem için bir ışık kaynağı (genelde lazerler ve LED) tarafından üretilen fotonları kullanan bir bilgi işlem paradigmasını ifade etmektedir. Yaygın olarak “fotonik bilgi işlem” olarak da anılan OBİ, büyük miktarlarda veriyi yüksek hızda işleme olanağı sağlayan bir paralel bilgi işlem dizgesini ifade etmektedir^[15].

3.1 Optik Bilgi İletişimin Kilometre Taşları

Silikon transistörlere dayanan elektronik bilgi işlemde yavaş yavaş vazgeçilirken optik bilişim, yumuşak bir geçiş için en uygun çözüm olabilir. Çünkü dünya genelinde yaygın kullanımı bulunan fiber optik kablolar, optik bileşenler ve cihazlar sayesinde optik bilişim, kendini ispatlamış ve oldukça olgun bir sektör yaratmıştır. 1970’lerin ortalarından bu yana yapılan araştırmalar sayesinde, bir elektronik bilgisayarda elektron akışlarını düzenleyen devre anahtarlarının, mantık geçitlerinin ve bellek bileşenlerinin yerine optik alternatifleri geliştirilmiştir.

Dünyanın ilk fiber optik kablo uygulaması 1975 yılında yapılmış, ilk okyanus altı fiber optik kablo ise 1996 yılında döşenmiştir^[16]. İnternetin yaygınlaşması ve daha gelişmiş elektronik işlemciler sayesinde, dünya genelinde 1990’lı yıllarda ortaya çıkan veri patlaması, ağ sağlayıcılarının veri kayıplarına yol açan yavaş bakır kablolar yerine; elektrik değil ışık ileten fiber optik kablolarla geçişi hızlandırmıştır. Optik kablo pazarı bugün dünya genelinde belli bir olgunluğa ulaşmıştır. Günümüzde ışık hızında, kayba yol açmadan veri iletimini sağlayan fiber optik kabloların sadece deniz ve okyanuslara döşenen kısmının uzunluğunun yaklaşık 900.000 kilometreye çıktığı^[17], karasal fiber optik internet ağları katıldığında ise küresel fiber optik ağının dört milyar kilometreyi bulduğu, bir başka deyişle Dünya ile Neptün arasındaki mesafeye eşit uzunluğa ulaştığı belirtilmektedir^[18]. Bilim insanları, birbirine karışmayan farklı dalga boylarında ışıklar kullanılarak aynı fiber optik kablolardan daha fazla veri akışı sağlamaya da başlamışlardır^[19].

Fiber optik kablolar sayesinde OBİ yıllardır günlük yaşamın bir parçasıdır. Veri merkezleri arasında fiber optik bağlantılar bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, ticari olarak piyasaya sunulan bilgisayarların önemli bir bölümünde, devre kartları aralarında veri akışının sağlanmasında da optik bağlantılardan yararlanılmaktadır. Bazı elektronik devre kartları üzerinde, çipler ve diğer bileşenler arasında da nano fiber optik kablolar^[20] kullanılmaya başlanmıştır.

OBİ’de bir sonraki aşama, tümüyle optik işlem yapabilen bilgisayarların geliştirilmesidir. Bir optik bilgisayar veya optik ana işlemci geliştirilmesine yönelik çalışmalar 1970’lerin ortasında başlamıştır. Bu alanda “araştırmaların altın çağı” olarak anılan 1980-2004 döneminde^[21] ABD, Fransa ve Çin başta olmak üzere çok sayıda ülkede pek çok optik bilgi işlem bileşeni geliştirilmiştir. ABD merkezli telekomünikasyon ve teknoloji şirketi AT&T’nin 1990 yılında tanıttığı optik işlemci bunlardan biridir. Laboratuvar ortamında geliştirilen monolitik (tek parça) işlemci, tümüyle optiktir. Ancak bu deneysel çip, tıpkı ilk elektronik bilgisayarlar gibi neredeyse bir oda büyüklüğündedir.

AT&T’nin Bell Laboratuvarları’nda lazer optik işlemciyi geliştiren ekibin lideri Alan Huang, geliştirdikleri optik çipin ölçek sorununun, elektronikte olduğu gibi kısa sürede halledilebileceğini, optik bilgisayarların hızla küçülebileceğini ve “2000 yılına kadar dijital optik teknolojiye dayalı bir bilgisayar geliştirilebileceğini” öngörmüştür^[22]. Ancak 2023 yılına gelmesine rağmen optik bilgi işlem hâlâ emekleme aşamasındadır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, optik bilgisayarların temel mimarisini oluşturacak, düşük maliyetli küçük optik çiplerin ve optik entegre devrelerin geliştirilmesinde yaşanan zorluklardır. Ancak 2000’li yılların ortalarından itibaren gelişmeye başlayan bir teknoloji, bu konudaki sorunların aşılmasını sağlayabilir: Silikon fotonik^[23].

Optik entegre devrelerin, tıpkı elektronik devreler gibi silikon tabakalar arasında imal edilmesini sağlayan silikon fotonik teknolojisi, OBİ için büyük bir atılımı ifade etmektedir. Zira silikon fotonik teknolojisi, optik bilişim devrelerinin tıpkı elektronik devreler gibi düşük maliyetle büyük ölçekte üretilebilmesine imkân tanımaktadır. Silikon fotonik, aynı zamanda ışığı elektron gibi manipüle ederek karmaşık hesaplamalarda kullanılmasını da sağlamaktadır. Silikon fotonik devrelerde ışık, silikon kalıp içine kazınmış kapalı ve ışık sızdırmaz yollar olan “dalga kılavuzları” (wave guides) ile optik mantık devrelerine yönlendirilebilmektedir. Bu da elektronik devreler gibi optik devrelerin geliştirilebilmesini sağlamaktadır ve dolayısıyla optik mikroçiplerin geliştirilmesinde en önemli adımlardan biridir.

Silikon fotonik, yarı iletken teknolojileri şirketlerinin büyük ilgisini çekmektedir. Dünyanın belli başlı bütün büyük yarı iletken üreticileri silikon fotonik ürünler üretmek için çalışmalar yapmakta veya bu alanda ilerleme kaydetmiş start-up firmalarını bünyelerine katmaktadır. Yakında silikon fotonik üretim platformlarında geliştirilmiş ürünlerin çeşidinde büyük bir patlama yaşanabilir. Nitekim 2020’de bir milyar dolar büyüklüğündeki silikon fotonik pazarının 2025 yılına kadar üç milyar dolara çıkması beklenmektedir^[24].

Bu patlama günümüzde de yaşanmaktadır. Mikroelektronik litografi teknikleri kullanılarak kritik öneme sahip optik cihazlar ve parçalar üretilmektedir. Örneğin ABD merkezli Lightmatter şirketi, birkaç optik işlemciyi piyasaya sunmuştur. Silikon fotonik yöntemiyle geliştirilen bu ürünler fotonik devrelere sahiptir ve bunlar ışığın yönünü değiştirerek optik bilgi işlem yapılmasına imkân tanımaktadır. Ancak söz konusu işlemcilerin oldukça pahalı olduğu ve sadece büyük veri işleme, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve benzeri uygulamalarda “hızlandırıcı” görevi üstlenebileceği belirtilmektedir. Lightmatter’ın ürünleri sonuç itibarıyla genel kullanıma yönelik bilgisayarlar için değil, veri merkezlerinde konuşlandırılan, kullanıcıların bulut bilişimle erişebileceği cihazlardır. Şirketin CEO’su Nickolas Harris, optik bilişimin, ışık boyutu ve fiziksel özelliklerinden ötürü şimdilik sadece lineer aritmetik hesaplar için uygun olduğunu, karmaşık mantıksal hesaplara uygun olmadığını ileri sürmektedir. Bu nedenle Harris, OBİ’nin kısa vadede taşınabilir (dizüstü, akıllı telefon vb.) cihazlarda genel bilgi işlem amacı ile

kullanılmasının mümkün olmadığına inanmaktadır. Ancak Harris, uzun vadede genel amaçlı optik bilgisayarların geliştirilebileceğini ifade etmektedir^[25].

Yine de, Harris'in iddiasına rağmen, optik bilgisayarların geliştirilmesine yakın olduğu izlenimi veren ilerlemeler de kaydedilmektedir. Örneğin ABD merkezli IBM ile Rusya'nın bir teknoloji enstitüsü olan Skoltech tarafından 2021 yılında tanıtılan bir optik bileşen, önemli bir atılım olabilir. İki kuruluş önderliğindeki uluslararası bir araştırma ekibi, son derece enerji verimli bir optik devre anahtarı (switch) geliştirmişlerdir. Bu devre anahtarı, tıpkı elektronik çiplerde olduğu gibi, fotonları manipüle ederek "kapalı" (0) ve "açık" (1) olarak ikili dijital kodlara dönüştürebilmekte, bir başka deyişle bir elektronik transistörün görevini yerine getirebilmektedir^[26]. Yarı iletken bir polimerden yapılan 35 nanometre çapında devre anahtarı, fotonları küçük bir odacığa hapsedip bir atomun parçaları gibi hareket etmeye zorlamaktadır. Geliştirilen optik devre anahtarının günümüzün birinci sınıf ticari transistörlerinden 100 ila 1.000 kat daha hızlı olduğu, saniyede bir trilyon işlem yapabildiği^[27], oda sıcaklığında çalışabildiği, soğutma gerektirmediği ve dolayısıyla enerji tüketiminin çok düşük olduğu belirtilmektedir. Ancak tıpkı silikon transistörlerin ticari kullanıma sunulmasının yıllar aldığı gibi, optik devre anahtarlarının da piyasaya sunulmasının uzun zaman alabileceği belirtilmektedir.

Almanya Münster Üniversitesi ile İngiltere'nin Oxford ve Exeter üniversitelerinin 2022 yılında tanıttığı yeni teknoloji ise optik bilgisayarlara doğru büyük bir adım olabilir. Söz konusu üniversitelerden bilim insanları hem optik işlem yapabilen hem de bunu optik belleğinde saklayan küçük bir çip geliştirdiklerini duyurmuşlardır. Bu buluş "insan beyni gibi çalışan bilgisayar" geliştirildiği yorumlarına yol açmıştır^[28]. Zira insan beyin nöronları arasındaki sinapslar hem bilgiyi işlemekte hem de depolamaktadır. Elektronik bilgisayarlarda ise işlemciler ile bellekler ayrı tutulmakta, işlemci ile bellek arasındaki alışverişler gecikmelere neden olabilmektedir.

Alman ve İngiliz bilim insanlarının geliştirdiği küçük çipler işlem yapıp veriyi saklayabildikleri gibi, diğerleriyle birlikte yapay sinir ağı oluşturabilmektedir. Araştırmacılar, böyle bir optik sinir ağının bilgiyi tıpkı bir beyin yapabildiği gibi "öğrenebildiğini" ve bunu, hesaplama ve örüntüleri tanımlayabildiği için bir esas olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir^[28]. Sistem, geleneksel elektroniklerle değil, yalnızca ışıkla çalıştığından, verileri çok daha hızlı işleyebilmektedir. Ancak Oxfordlu uzmanlar tam anlamıyla bir optik bilgi işlem teknolojisinin işlerlik kazanmasının zaman alacağını belirtmektedir^[29].

3.2 Optik Bilgi İşlemin Sunduğu Avantajlar

OBİ, çeşitli görevleri yerine getirmek ve çeşitli hesaplamalar yapmak için fotonları kullanır. Bu temel özelliği OBİ'nin çok sayıda avantaj sunmasına yol açmaktadır.

3.2.1 Enerji Tasarrufu

Google'ın AlphaGo örneğinde olduğu gibi yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknolojileri

elektronik yapay sinir ağları üzerine kuruludur ve bunlar aşırı bir elektrik tüketimine de neden olmaktadır. Bilgisayar bilimcileri, beyin sinir ağlarından ilham alarak elektronik bilgisayarlar tasarlamışlardır. Bu makineler, nöron benzeri işlemcileri ve bu nöronlar arasındaki bağlantıları kullanarak çalışmaktadır. Ağlar katmanlar hâlinde oluşturulur ve işlem gücünü oluşturan bu katmanlardır. Ne kadar çok katman olursa, bilgisayarın karar verme yeteneği o kadar karmaşık olur. Yapılan araştırmalar sonucunda 1990'da bu ağlar, bir milyon nöral bağlantıyı temsil eden bir katman derinliğine ulaşmıştır^[30]. Bugün en güçlü ağlar onlarca katman ve milyarlarca bağlantı içermekte, ancak çok sayıda bağlantı büyük miktarda enerji tüketmektedir. Çünkü elektrik direnci ısı üretmektedir. Elektrik akımı elektronik sistemlerde ısı oluşturur ve bu durum donanımına zarar vermektedir.

Masaüstü ve taşınabilir bilgisayarlarda ısı sorununun bertarafı için fanlar ve başka soğutma sistemleri kullanılır. Veri merkezleri gibi çok sayıda elektronik cihazın birlikte bulunduğu mekânlarda soğutma için daha gelişmiş soğutma sistemleri gerekmektedir ve bu tür mekânların enerji tüketimi yüksektir. Veri merkezi olan veya yöneten kurumlar soğutma sistemleri ve elektrik sarfiyatına milyarlarca dolar harcamaktadır. Nitekim veri merkezi soğutma sistemleri pazarının 2027'de 12 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir^[31]. Bazı kuruluşlar soğutma maliyetini azaltmak için veri merkezlerini ABD'nin Alaska eyaleti gibi soğuk bölgelere taşımak^[32] veya açık denizlerde deniz tabanlarına yerleştirmek^[33] gibi planları değerlendirmektedir.

Ortam sıcaklığından etkilenmeyen ve ısınma yaratmayan fotonların bilgi işlem sistemlerinde kullanılması enerji tüketimini de azaltır. Çünkü fotonlar izole ortamlardan geçerken dirençle karşılaşmaz^[34]. Dolayısıyla düşük enerji ile rahatça çalışabilen fotonik sistemler ciddi bir tasarruf sağlamaktadır^[35]. İsviçre'nin Lozan Politeknik Üniversitesinden Türk bilim insanı Uğur Teğin liderliğinde bir ekip tarafından yapılan bir çalışmada, yapay sinir ağlarında optik bilgi işlem unsurlarının kullanılmasının, söz konusu sistemlerde enerji sarfiyatını 100 kat azalttığı görülmüştür^[30].

Düşük enerji sarfiyatının çevre açısından da olumlu sonuçları bulunmaktadır. Zira 2019'da yapılan bir çalışmaya göre, derin öğrenme ile çalışan bir doğal dil işleminin öğretilmesi için bir otomobilin bütün kullanım süresince ürettiği karbondioksit emisyonlarının beş katının üretildiği ortaya çıkarılmıştır^[36].

Silikon fotonik yöntemiyle ölçeklendirilebilir optik bilişim teknolojisi, telekomünikasyon ve veri hizmetleri sektörüne çeşitli açılardan yardımcı olmaya başlamıştır. OBİ ile veri merkezleri, daha küçük yer kaplayabilir ve daha yoğun veri akışı sağlayabilir. OBİ, sağladığı enerji tasarrufu ile veri merkezlerinin ek soğutma sistemleri ihtiyacını ortadan kaldırabilir ve yerden tasarruf sağlayabilir. Bu amaçla şimdiden çeşitli optik ürünler piyasaya sunulmuştur. Fiber optik kablolar, optik giriş alıcı-verici cihazlar (transceiver) ve holografik bellekler bunlardan bazılarıdır. OBİ ayrıca, sızılması güç fiber optik teknolojisi

üzerine inşa edildiğinden veri merkezlerinin bilgi güvenliğini de artırmaktadır.

3.2.2 Yüksek Bilgi İşlem Gücü

Dünya yeni bir veri patlaması ile karşı karşıyadır. Yapılan tahminlere göre 2030 yılına kadar dünya genelinde mobil veri trafiği, 2022 ile kıyaslandığında en az 30 kat^[37], internete bağlı nesnelerin interneti uygulamalarının sayısı iki kat^[38], otonom otomobillerin sayısı ise en az üç kat^[39] artacaktır. Bu talebi karşılamak içinse bilgisayarların bilgi işlem güçlerinin en az 10 kat^[40] artırılması gerecektir. Bu trafik artarken, küresel iklim değişikliği ile mücadele kapsamında, veri hizmeti sağlayan şirketlerin enerji verimliliğini katbekat artırması beklenecektir. Bu ihtiyaç yeni teknolojilerin aranmasına neden olmaktadır.

OBİ, bu yeni teknoloji olabilir. OBİ, elektronik bilgi işlem ile karşılaştırıldığında daha istikrarlı, daha hızlı ve daha hassastır. Bunun nedeni küçük ışık paketleri olan fotonların, geleneksel bilgi işlem cihazlarında kullanılan elektronlardan daha büyük bir bant genişliği sağlamasıdır. Çünkü, fiber optik kablolarda olduğu gibi, farklı dalga boylarında birbirine karışmayan birden fazla fotonla paralel işlemler gerçekleştirmek mümkündür. Dolayısıyla optik işlemciler birden çok işlemi aynı anda yapabilir. Bu da mevcut modellere göre 100.000 kat daha hızlı işlem yapabilme kapasitesine sahip olunabileceği anlamına gelmektedir. Sonuçta OBİ, elektronik bilgi işleme kıyasla daha yüksek performans vadetmektedir.

Ancak her türlü OBİ, elektronik bilgi işlemde daha yüksek bilgi işlem gücü vadetmemektedir. OBİ iki türe ayrılabilir: Dijital optik bilgi işlem (DOBİ) ve analog optik bilgi işlem (AOBİ). Yukarıda değinildiği üzere, IBM ile Skoltech'in geliştirdiği devre anahtarları gibi düzenekler, fotonların dijital hesaplamalarda kullanılmasını sağlayabilecek düzeneklerdir. Bu düzeneklerle tıpkı elektronik bilgi işlemde olduğu gibi, Boole Cebiri üzerine kurulu dijital işlemler 1990'lı yıllardan itibaren yapılmaya başlanmıştır. Ancak neredeyse atomik boyutlara indirgenmiş milyonlarca transistöre sahip elektronik çiplerle karşılaştırıldığında dijital optik bilgi işlemin sınırlı hesaplama gücü bulunmaktadır ve gelecekte bu farkın kapatılacağı kuşkuludur^[27].

Analog optik bilgi işlem ise, belirli hesaplamaları yapmak için, ışığın fiziksel özelliklerinin yanı sıra ışık ve optik yapılar arasındaki etkileşimlerden yararlanır. Bu etkileşimler mantıksal hesaplamalara uygun olmamakla birlikte lineer cebir hesaplamalarında benzersiz bir güç sunmaktadır. Dolayısıyla analog optik bilgi işlem, örneğin tanıma ve sayısal hesaplama dahil olmak üzere özel uygulamalarda daha yüksek veri işleme hızına ulaşabilir. Elektronik bir işlemci ile 100.000 saat, yani 11 yıldan uzun sürecek bir işlem, analog optik bir işlemci ile bir saatten kısa sürede tamamlanabilir^[27]. Bu sayede derin öğrenme ve yapay zekâ gibi yüksek veri transferi gerektiren işlemlerin daha kolay bir şekilde yapılmasına imkân sağlanmaktadır.

1980'lerden bu yana önemli ölçüde ilerleme kaydederek bilişimin en etkili alanlarından biri olan yapay zekâ, insan beyninin işleyişine benzer şekilde yapay sinir ağları (YSA) inşa etmeye çalışmaktadır. YSA'lar birçok işlem

yapan eleman veya düğümleri olan, ileri derecede paralel bilgi işlem donanımlarıdır. Sinirsel bilgisayarların bazıları, birbirine bağlı on binlerce düğümden oluşmaktadır. Sinir ağlarının matrisleri üzerindeki her bir düğümden yer alan işlemciler oldukça basit işlemleri, genellikle bir matris vektör çarpımını tekrar tekrar yapar. Sinirsel bilgisayarlar giriş ve çıkış bitleri akıntısı biçiminde çalışırlar. Bilinen anlamda bir programlamaya ihtiyaç duymazlar; eğer programa ihtiyacı varsa bu düğümlerin bağlantılarındaki parametreleri değiştirmek içindir^[15].

Elektronik sinir ağları boyut ve güç olarak büyüdükçe ve işlenmesi gereken veri miktarı arttıkça yüksek enerji sarfiyatı, gecikme, yavaşlama ve kapasite sorunları yaşanmaktadır. Bu nedenle bazı bilim adamları, umut verici, yeni nesil yapay zekâ ortamı olarak OBİ üzerinde araştırmalara odaklanmıştır.

Sinir ağlarının optik hâle getirilmesi üzerinde 1990'lardan beri durulmaktadır^[41]. Özellikle derin öğrenmeye göre kurgulanan bilişim sistemleri için sinir ağları işlemlerinde elektronlar yerine optik işlemciler ile fotonların kullanılmasının, ihtiyaç duyulan yüksek hızda veri işlenmesinde avantaj sağladığı pek çok çalışmada kanıtlanmıştır. Optik yapay sinir ağları bir ışık kaynağından çıkan fotonları sinyal olarak kullanmaktadır. Işığın doğrusal olmasından dolayı fotonik devreler karmaşık mantık işlemlerinden lineer cebir işlemlerine uygundur. Lineer cebir ise yapay sinir ağlarının temelini oluşturmaktadır. Dolayısıyla optik sanal ağlar olağanüstü hızlarda çalışabilmektedir.

Yapay sinir ağlarını daha verimli hâle getirmek için de çalışmalar yürütülmektedir Princeton Üniversitesi bağlantılı olan Luminous şirketi, "Lazer Siniri" adını verdikleri yeni ve güçlü bir sinir ağı projesi üzerinde çalışmaktadır. Bu sinir ağlarının biyolojik sinir ağlarını taklit edebildiği ve aynı insan beyni gibi çok düşük enerjiyle çalışabildiği ileri sürülmektedir^[42].

Optik sinir ağları ilk olarak yüksek çözünürlükte ve yüksek hızda yüz tanıma sistemleri geliştirmek için kullanılmıştır^[43]. Çok da uzak olmayan bir gelecekte yapay sinir ağlarının akıllı ev elektroniği, hafif insansız hava araçları ve sürücüsüz arabalarda kullanılması için çalışmalar sürmektedir. Çalışmalara Türk bilim insanları da önemli katkılarda bulunmaktadır. Çalışmalarını ABD'nin Los Angeles kentindeki Kaliforniya Üniversitesinde sürdüren Dr. Aydoğan Özcan, 2018'de *Science* dergisinde yayınlanan bir makalede, elektronları hiç kullanmadan tamamen optik matris cihazların nasıl oluşturulacağına açıklık getirmiştir. Dr. Özcan ve ekibi yapay bir sinir ağının katmanlarına benzer yığınlar hâlinde tasarlamıştır. Bu amaçla birbirinin üzerine yerleştirmek için her biri bir posta pulu boyutunda, özel olarak imal edilmiş ince cam levhaları kullanmışlardır. Bu kırımlı optik sinir ağı, her biri ışığı kırabilen veya dağıtabilen binlerce piksel sahip bir katman yığınının oluşur. Bu kırımlı özellikleri, bir sinir ağındaki nöronlar olarak hizmet eder. Derin öğrenme, her katmanı tasarlamak için kullanılır, böylece ışık biçimindeki giriş yığın üzerinde parladığında, çıkış ışığı, görüntü sınıflandırması veya görüntü yeniden yapılandırması gibi karmaşık görevlerden gelen verileri kodlar. Tüm bu bilgi işlem, aydınlatma ışığı dışında güç tüketmez^[44].

ABD'nin Kaliforniya Teknik (Caltech) Üniversitesinde de bir dönem çalışan Koç Üniversitesinden Dr. Uğur Teğin, tümüyle optik sinir ağlarını kullanarak görüntü tanıma sistemlerini düşük çözünürlüklü resimler üzerinde "eğitmek" konusunda çalışmaktadır. Dr. Teğin 2021 yılında *Nature Computational Science* dergisinde yayınladığı makalesinde, yeni bir tür fiber optik kablo ile ışığın paralel sinyaller taşıyabileceğini de kanıtlamıştır^[43]. Optik yapay sinir ağlarındaki gelişmeler özellikle makine öğrenmesinin bir alt kümesi olan derin öğrenmenin daha fazla gelişmesi ve uygulama bulması için önem taşımaktadır. Optik yapay sinir ağları derin öğrenme için gerekli yüksek hızda veri transferini sağlayabilir. Derin öğrenme sırasında ihtiyaç duyulan yüksek veri diğer taraftan aşırı bir güç tüketimine de neden olmaktadır. Düşük enerji ile rahatça çalışabilen fotonik sistemler bu alanda da ciddi bir tasarruf sağlamaktadır^[35].

3.2.3 Daha Gelişmiş Bilgisayarlı Görü, Optik Algılama ve Görüntüleme

Optik sinir ağları ile gelişmiş yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknolojilerinin gelişmesi, optik ile elektroniği birleştiren bilgisayarlı görüş, optik algılama ve optik görüntüleme teknolojilerinde etkisini gösterebilir. OBİ destekli optik algılama teknolojileri, üzerinde buldukları platformların algılama sürecini kısaltmakta, görüşü netleştirme ve isabetli tahmin oranını artırmaktadır. Geleneksel görüntü algılamada, bir görüntü bir kamera tarafından toplanır ve elektronik bir sinir ağı ile işlenir. Bir optik sinir ağına sahip sistemlerde ise, bir sahnenin tam görüntüsünü sensör dizisine aslına sadık bir şekilde yeniden üretmek yerine, bir optik sinir ağı yazılımı bunun yerine görüntüyü önceden işler, yalnızca son kullanımı için gerekli olan görüntü bilgilerini sıkıştırıp açıklarak bilgiyi sunar. Daha kısa süreçlere sahip bu sistem, optik sensörlerin küçülmesinin de yolunu açmaktadır^[45].

Bilgisayarlı görüş, bilgisayarların dünyayı insan gözü gibi görmesini sağlamaya çalışan disiplinler arası bilimsel bir alandır. Bilgisayarlı görüş, iki veya üç boyutlu her türlü görsel sayısal verinin özellikle akıllı algoritmalarla anlaşılmasını amaçlamaktadır. Standart kamera görüntülerinin yanı sıra medikal görüntüler, uydu görüntüleri ve üç boyutlu nesne ve sahnelerin bilgisayar ortamında modellenmesi bilgisayarlı görüşün ilgi alanına girmektedir. Son yıllarda özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi hem matematiksel hem de hesaplama kuramına dayalı tekniklerin geliştirilmesini ve gerçekleşmesini araç olarak kullanan "bilgisayarlı görüş" bu problemleri çözmektedir^[46].

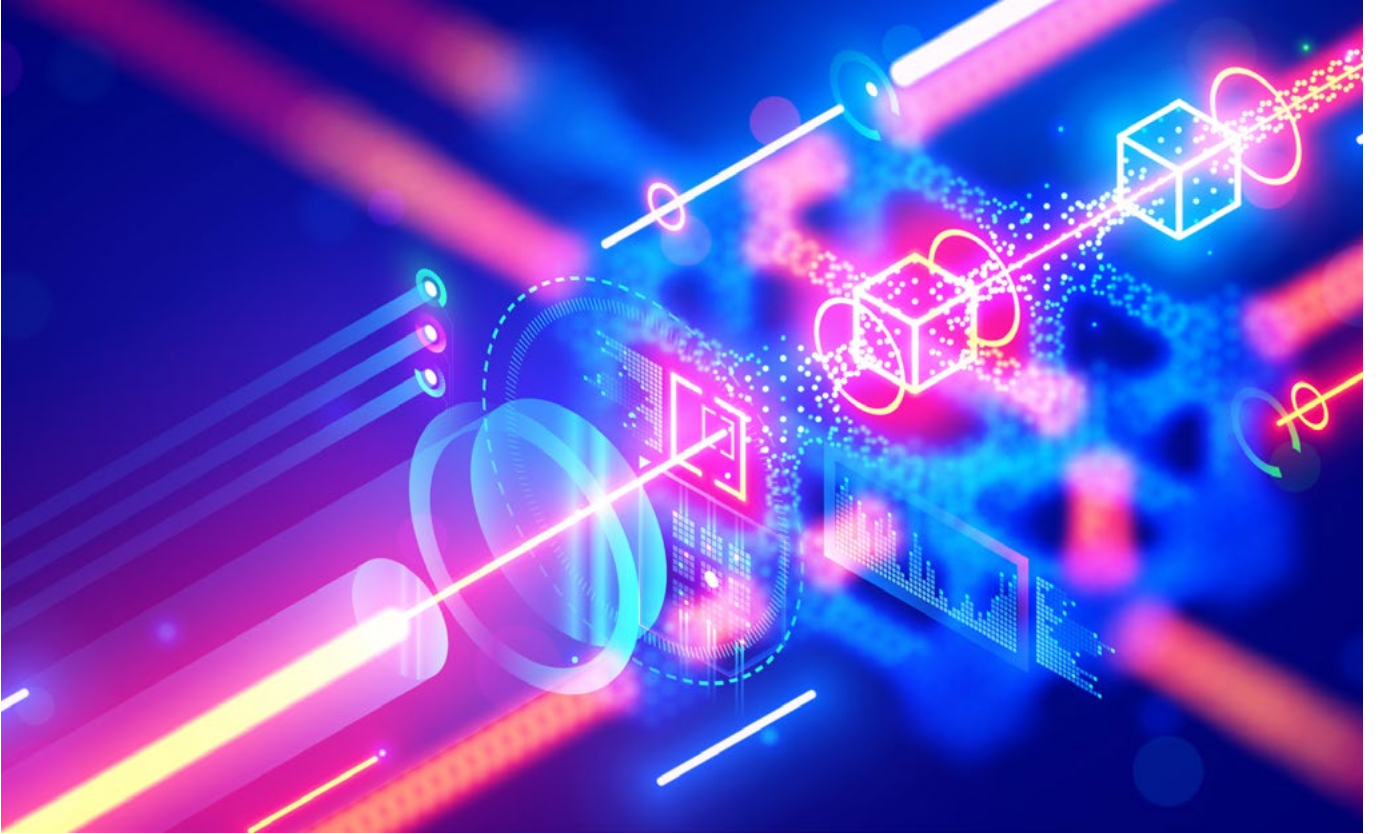
Bilgisayarlı görüş, günümüzde başta yüz tanıma teknolojisi (YTT) olmak üzere yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yüz tanıma teknolojisi bankacılıktan havancılığa kadar pek çok alanda yaygın kullanım bulan güvenilir bir kimlik tespit ve doğrulama yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır^[47]. Ancak yüz tanıma sistemleri insanların kimliklerini tespit yetenekleri, zayıf aydınlatma, düşük kaliteli görüntü çözünürlüğü ve yetersiz görüş açısı gibi zorlu koşullar altında farklılık göstermektedir. Zorlu ortamlar YTT sistemlerinin isabetli teşhis oranını

düşürmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar çok kanallı optik sinir ağlarının bilgisayarlı görüş uygulamalarının her türlü zorlu koşulda isabetli tanılama kabiliyetini artırdığını göstermektedir^[48]. Bu gelişme sadece YTT sistemlerinin değil, makine görüşü, robotlar ve diğer otonom sistemlerinin görüş sistemlerinin de iyileşmesini sağlayabilir.

Optik bilgi işlem, düşük gecikme hızı, paralel işlem kabiliyeti ve enerji sarfiyatıyla optik sensörlerin verimini artırmada da önemli rol oynayabilir. Optik sensörler ışık yoğunluğunu algılar ve ölçer, ışık ışınlarını elektrik sinyallerine dönüştürür. Sensör, ışık değişikliklerine duyarlı bir elektrikli tetikleyiciye bağlıdır. Hedef nesne tarafından yansıtılan veya kesilen ışık, ahşap, metal, plastik, şeffaf veya renkli ürün gibi malzemenin türüne bağlı olarak çeşitli optik cihazlar tarafından değerlendirilir.

Optik sensörler günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Uzaktan algılama uyduları, biyomedikal cihazlar, tüketici elektroniği (akıllı telefonlar, akıllı saatler, giyilebilir elektronik ürünleri vb.), enerji ve endüstri tesisleri, tarım, ulaşım ve ticari alanlar (AVM, iş merkezleri vb.) bunlar arasında bulunmaktadır. Son yıllarda, optik devrelere sahip cihazlar ve biyolojik sensörler hızlı bir gelişim kaydetmiştir. Hâlen piyasada bunlara sahip çok sayıda ticari ürün bulmak mümkündür. Örneğin Rockley Photonics 2021 yılında, silikon optik devrelere dayalı gerçek zamanlı, invaziv olmayan, giyilebilir bir biyolojik algılama platformunu tanıtmıştır^[49]. Biyosensörlere sahip bu ürün, kalp atış hızı, kan basıncı, çekirdek vücut sıcaklığı ve glikoz göstergesi dahil olmak üzere çeşitli ölçümleri desteklemektedir. Optik devrelerin ve çiplerin daha da geliştirilmesiyle, tüketicilerin refahını ve yaşam kalitesini önemli ölçüde artıran daha fazla işlevsellik sahibi ürünlerin gelecekte piyasaya sunulması beklenmektedir.

Optik bilişim, lazer algılama teknolojilerini de ileriye taşımaktadır. 1980'li yıllarda geliştirilmiş olmasına rağmen 2010'dan sonra kullanımı yaygınlaşan lazerler, çok yönlü bir araç hâline gelmiştir. Lazerlerin etki yarattığı bir alan da üç boyutlu lazer optik algılayıcılarıdır. Son yıllarda tüketici elektroniği sistemleri, endüstri ve otomotiv sektöründeki pek çok optik uygulama, gelişmiş 3D sensör sistemlerine dayanmaktadır. Üç boyutlu sensörler arasında ise "Dikey Kavite Yüzeğe Yayılan Lazer (Vertical Cavity Surface Emitting Laser -VCSEL) kullanımı ön plandadır. VCSEL, bir yarı iletken, dikey boşluğu silindirik olan, ışını dikey olarak üretilmiş bir silikon devre yüzeyinden ışık yayan bir çeşit lazer diyottur^[34]. Son derece düşük düzeyde enerji harcayan, üç boyutlu güvenli algılama imkânı veren VCSEL lazerler, endüstride, tüketici elektroniğinde ve sürücüsüz araç teknolojisi başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Endüstriyel sensör uygulamaları, oksijen ölçümünden optik enkoderlere^[50] ve atom saatlerine kadar uzanmaktadır. Hız, mesafe, derinlik ve yakınlık ölçümlerinde de kullanılan VCSEL teknolojisi, yüksek hacimli, düşük maliyetli ve hassas üretime yardımcı olmaktadır. Tüketici elektroniğinde VCSEL, özellikle akıllı cep telefonlarında yüz tanıma ve bazı uygulamalarda hassas ölçüm aracı olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe, yeni nesil 3D



sensör sistemleri için yeni uygulamaların sayısı gittikçe artmaktadır. Bunlar arasında otonom araçlar, LİDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri ve sürücü kontrol sistemleri de yer almaktadır.

Yeni nesil 3D sensör sistemleri sürücüsüz araçlar ve diğer otonom nesnelerin dünya ile bağlantısını sağladığı gibi algı isabetini de artırmaktadır. Son yıllarda VCSEL kullanılarak gelişmiş LİDAR, sürücü ve yolcu denetimi ile sürücü kontrol sistemleri geliştirilmiş ve tanıtılmıştır. Fotonik entegre devrelere sahip LİDAR teknolojisi, sürücüsüz araç teknolojisinin daha ileriye taşınmasına öncülük etmektedir. LİDAR veya üç boyutlu lazer tarama, hedefi darbeleri lazer ışığıyla aydınlatarak ve yansıyan darbeleri bir sensörle ölçerek hedefe olan mesafeyi belirleyen bir ölçme yöntemidir^[51]. Daha basit bir ifadeyle LİDAR, ses yerine ışık (lazer) kullanan radarlardır. Günümüzde pek çok alanda kullanılan LİDAR, sadece sürücüsüz araçların değil tüm otonom araçların vazgeçilmez cihazlarından biridir. LİDAR, özerk araçların, 360 derecelik çevresini aynı anda görmesini sağlayan gözü niteliğindedir. Sürücüsüz araçlar açısından bakıldığında LİDAR sadece görüş sağlamakla kalmaz, çevredeki yayaların, trafik ışık ve işaretlerinin yerini, mesafesini ve hızını yüksek hassasiyet ve isabetle tahmin etmeye de yardımcı olmaktadır.

Hâlen sürücüsüz araçlar için geliştirilen LİDAR'ların önemli bölümü büyük ve hantal yapıdadır. Daha düşük hacimli silikon tabanlı bir optik LİDAR geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. 2017'de Intel tarafından satın alınan İsrail merkezli bir teknoloji firması olan Mobileye^[52], 2021 yılında, sürücüsüz araçlar için silikon optik işlemciye sahip bir LİDAR'ı tanıtmıştır. Ancak optik

işlemcili LİDAR'ın maliyet, etkinlik ve hız sorunları devam etmektedir.

3.2.4 Güçlü ve Güvenli İletişim

Günümüz dünyasında artan iletişim ve bilişim ihtiyacının karşılanması için güçlü veri transferi sistemleri ve işlemcilerle ihtiyaç duyulmaktadır. Fotonlar, elektronların aksine işlemciler üzerinde yol katederken güç kaybetmez ve gecikme yaratmaz. Dolayısıyla OBİ anında hatasız hesaplama sağlar ve optik yollar (ışık demetleri) çakışsa dahi veriden kayıp olmaz.

Optik bilgisayarlar günümüzde dijital iletişimdeki güvenlik sıkıntılarını ortadan kaldırabilir. Burada çok sınırlı bilgilere erişilebilir çünkü optik bilgi işlem, verileri hareket hâlindeyken analiz eder. Verileri bu şekilde yanlış amaçlarla ele geçirmek çok daha zor olduğundan, bu otomatik olarak bilgisayar sistemine daha yüksek güvenlik sağlar.

Yine de olası güvenlik açıklarına karşı optik veri şifreleme teknolojileri de geliştirilmiştir. "Sapp" gibi programlar optik verilere sadece gönderenlerin ve alıcıların erişebileceği baştan sona kriptolama sağlamaktadır^[53].

3.2.5 Yüksek Veri Depolama Olanakları

Elektronik bilgi işlemin en önemli bileşenlerinden biri olan manyetik sabit disklerin kapasiteleri artmakla birlikte bazı sorunları bulunmaktadır. Söz konusu diskler en fazla 20-30 yıl çalışabildikleri gibi sıcaklık, nem, mekanik arızalar ve manyetik alana karşı duyarlıdırlar.

Buna karşılık yapılan çalışmalar sonucu geleneksel manyetik veri depolamaya göre çok büyük depolama kapasitesine ve veri koruma güvenliğine sahip optik bellek

birimleri geliştirilmiştir. 1990'lı ve 2000'li yıllarda yaygın olarak kullanılan CD-ROM, DVD-ROM ve Blue Ray teknolojileri verinin optik depolanmasını sağlamıştır. CD'ler tek katmanda DVD'ler ise üç katmanda veri depolanmasına imkân tanımıştır. Günümüzde ise optik kristaller çok daha küçük yüzeylerde, çok daha fazla katmanda çok daha büyük depolama kapasitesi sunmaktadır ve üstelik bunlar yüzyıllarca dayanabilecek niteliktedir. Beş mikrometre kalınlığındaki nano tabakalardan oluşması nedeniyle "Beş boyutlu veri depolama" bunlardan biridir^[54]. İlk kez İngiltere'nin Southampton Üniversitesi bilim insanları tarafından geliştirilen beş boyutlu veri depolama diski, fiber optik kabloda kullanılan aynı cam malzemeden yapılmıştır ve boyut olarak, yaklaşık yarım santimetre kalınlığında ve bir madeni para çapındadır. Veriler, 20 nm boyutundan daha küçük çukurlar oluşturan çok katmanlı optik diskin tek bir katmanı üzerinde güçlü bir lazer ışını ile kaydedilmektedir. Her çukur, sekiz bitlik veriyi tek bir çukurda depolamak için 256 farklı varyasyonla oluşturulacaktır ve bu da tek bir plaka üzerinde çok boyutlu bir etki yaratmaktadır. Bu çok boyutlu yapı, her katmanda trilyonlarca çukur oluşturmaya olanak tanımaktadır. Southampton Üniversitesinden bilim adamları, yarım santimetre kalınlığındaki tek bir cam parçasında 200 katman oluşturmuşlardır. Yapılan çalışmalarda 12 santimetre çapında bir diske 50 TB veri sığdırılabilmektedir. Üstelik bilim insanlarının tahminlerine göre bu diskler 13 milyar yıl bozulmadan kalabilmektedirler^[55]. Microsoft tarafından 2019 yılında duyurulan benzer bir cam diskin, "camın kaynar suya atılması, fırınlanması, mikrodalga fırına konulması, manyetik alana maruz kalması ve hatta sel sularına kapılması hâlinde" dahi bilgilerin korunduğu öne sürülmüştür^[56]. Microsoft Araştırma Laboratuvarları tarafından yürütülen ve "Project Silica" adı verilen projede veriler ultra kısa lazer darbeleri ile disklere yüklenmektedir. Ancak veri kaydetme işleminin henüz uzun süre aldığı ve sürecin hızlandırılması için çalışmaların sürdüğü kaydedilmektedir.

Microsoft araştırmanın "Project HSD" isimli bir holografik veri depolama yöntemi üzerinde de çalışmaktadır. Çalışmanın amacı dijital verilerin daha küçük bir alanda tutulmasını sağlamaktır. Bir holografik bellek, verileri bir kristal içinde hologram biçiminde depolayabilir. Bir lazer, bir referans ışınına ve bir sinyal ışınına ayrılır. Sinyal ışını mantık geçidinden geçer ve bilgi alır. İki ışın daha sonra tekrar buluşur ve girişim deseni kristalde bir hologram oluşturur^[57]. Holografik veri depolama, ortamın hacmi boyunca bilgileri kaydeder ve ışığı farklı açılardan kullanarak aynı alanda birden çok görüntüyü kaydetme yeteneğine sahiptir^[58]. Böyle bir veri depolama yöntemi, teorik olarak mevcut manyetik veri depolama cihazlarından çok daha büyük bir bilgi yoğunluğuna imkân tanıyabilir.

3.2.6 Ölçeklendirme ve Maliyet Avantajı

Işığın doğrusal hareketini manipüle etmenin güçlüğünden ötürü optik devrelerin ölçeklendirilmesi genellikle güçtür. Ancak gelişen bir malzeme ve imalat yönetimi, optik devrelerin daha küçük boyutlarda ve daha düşük maliyetle üretilmesine olanak sağlamaktadır: Silikon fotonik, Intel ve IBM gibi kuruluşların 2000'li yıllardan bu

yana üzerinde çalıştığı silikon fotonik, silikon katmanları arasında optik devrelerin imal edilmesine imkân tanımaktadır. Bu da optik devrelerin mevcut yarı iletken fabrikalarında büyük çaplı yatırım gerektirmeden üretilmesini yolunu açmaktadır^[59].

Silikon fotonik malzeme, optik bilgi işlem devrelerinin boyutunun daha fazla düşürülmesini sağlayabilir. Bu durum optik bileşenlere sahip cihaz ve platformların ağırlığının da düşürülmesini, dolayısıyla daha fazla enerji tasarrufu yapılmasını sağlayabilir. Elektronik devrelere kıyasla daha düşük ağırlığa ve daha düşük enerji tüketimine sahip optik devreler, otonom nesnelerin (insansız hava/kara/deniz araçları, robotlar) yanı sıra uzay araçları, hava araçları ve tüm taşınabilir cihazların menzil veya şarj sorunlarının önemli ölçüde çözülmesine katkı sağlayabilir. Düşük maliyetli, enerji avantajlı silikon fotonik malzeme ile yapılmış, çoğunluğu lazer içeren OBI sistemleri, pahalı veya büyük hacimli olduğu için tercih edilmeyen optik sistemleri daha cazip kılabilir^[60]. Biyomedikal cihazlar, hava araçları, uydular ve diğer uzay araçları ve çok sayıda savunma sisteminde daha fazla optik çözüme başvurulabilir.

4. OPTİK BİLİŞİMİN KISITLARI VE GELİŞTİRİLMESİ GEREKEN ALANLAR

Optik bilişimin muazzam bir potansiyeli bulunmaktadır ve teknoloji şirketlerinin bu alana yoğunlaşan ilgisi, gelecek yıllarda tümüyle fotonlara dayalı optik bilgisayarların geliştirilebileceği beklentisini güçlendirmektedir. Böylesi bir gelişme "elektrik sonrası bir dünyayı" vadetmektedir. Bilişimde elektriğin yerini ışığa bırakması, ekonomiden çevreye, sağlıktan ulaşıma ve uzay çalışmalarına geniş bir yelpazede köklü değişiklikleri beraberinde getirebilir.

Ancak öncelikle yüzde 100 ışığa dayalı optik bilişim önündeki engelleri ortadan kaldırmak gereklidir. Bu engellerin bazıları doğal yapısından dolayı ışığın bilgi işleminde kullanılmasındaki zorluklardan, bir kısmı üretim zorluklarından, bir kısmı da yetersiz algoritmalarından kaynaklanmaktadır.

4.1 Işığın Bilişimde Kullanılmasındaki Güçlükler

Optik (silikon fotonik) devreler tasarım ve unsurları açısından elektronik devrelere benzemektedir. Elektronik devrelerin yapı taşları transistörler (siğaçlar), kapasitörler, direnç elemanları, bir miktar bakır kablodur ve bunlar yarı iletken (çoğunlukla silikon) malzemeden yapılmış yapılar üzerine yerleştirilmektedir. Bir fotonik devrede ise çiplerin yerine geçebilecek devre anahtarları (switch) yeni yeni geliştirilmektedir. Devre aktarım elemanları olarak bakır kablolar yerine silikon kalıplar içine oyulan nano boyutlarda ışık tünelleri olan dalga kılavuzları geliştirilmiştir. Bunun dışında elektronik devrelerde olduğu gibi modülatör/demülatörler de fotonik silikon kartlar üzerine yerleştirilmektedir.

Silikon fotonik devrelerin geliştirilmesinde başlıca

sorun, ışığın mikro boyutlara indirgenmesindeki zorluklardan kaynaklanmaktadır. Fotonlar, atomik standartlarda ele alındığında çok büyüktür. Işığın kullanılabilir en küçük dalga boyu, kızılötesi kuşakta yer almaktadır ve 1.000 nm genişliğindedir. Öte yandan elektronik devreler, neredeyse atomik boyutlara indirgenmiş transistör sayesinde yüksek bilgi işlem gücü sağlayabilmekte ve pek çok platformda kullanılabilir esnek elektronik devrelerin geliştirilmesine imkân sağlamaktadır. Optik bilişimin, elektronik bilişimin yerine geçebilmesi için benzeri işlem gücü ve esnekliği sağlaması gereklidir.

Silikon fotonik üretim ve nano boyutlarda devre üretim tekniği olan litografi^[61] sayesinde, ışığı daha küçük parçalar hâlinde kırarak silikon tabakaları arasına yaymanın yolları geliştirilmiştir. Ancak bunlar henüz yeni nesil işlemcilerin ihtiyacı olan çok hızlı ve çok karmaşık iletim ihtiyacını karşılamaktan uzaktır.

Foton boyutu problemini aşmak ve ışığı yeni nesil bilgisayar performansı için ihtiyaç duyulan ölçeklerde faydalı hâle getirmek için araştırmacılar “yüzey plazmonları” denilen bir fiziki fenomene yönelmişlerdir. Yüzey plazmonları esasen, bir malzemenin yüzeyi boyunca helezonik hareket edecek şekilde uyarılmış elektronlardır. Bu tür yapılar ışığı kırılma sınırından daha küçük dalga boylarına hapsedebilmektedir^[62]. Teorik olarak bu yüzey plazmonları normal bir bakır tel üzerinde oluşturulursa, aynı ortamdaki normal bir elektrondan çok daha hızlı hareket edebilir ve hatta ışık hızına çok yaklaşabilir^[63]. Plazmonlar üzerine yapılan deneylerde ısı sorunu yaşadığı, ancak Rusya’da yapılan deneylerde bu soruna sürdürülebilir bir çözüm geliştirildiği kaydedilmektedir^[64]. Ayrıca araştırmacılar grafen ve karbon nanotüpler gibi yüzey plazmonlarının nano ölçekte taşınmasına izin verebilecek ve fotonik hesaplamayı mümkün kılacak malzemeler üzerinde de çalışmalarını sürdürmektedir^[65].

4.2 OBİ Çiplerinin Üretilmesindeki Güçlükler

Optik bilgi işlem teknolojisi genel olarak iki yönde gelişmektedir. Bir yaklaşım, günümüz bilgisayarlarıyla aynı mimariye sahip olan, elektro optik (hibrid) çipler geliştirerek optik bilişimin gecikmesiz ve hızlı işlem gibi OBİ avantajlarından yararlanılmasıdır. Bu türde yapılara en yaygın örnek, veri merkezlerindeki optik alıcı-vericilerdir (transreceivers). Optik alıcı-vericiler, fiber optik kablolarla taşınan optik verileri elektronik sinyale dönüştürmektedir^[66]. Elektro optik devreler optik sinir ağları ile desteklenerek OBİ’nin paralel işlem kabiliyetinden yararlanılmasını da sağlayabilir. Ancak bu yöntem de elektronik işlemcilerin kabiliyetlerine bağlı kalınacağı ve bilhassa elektrik tasarrufunun sınırlı olacağı gerekçesiyle eleştirilmektedir^[27].

Başka bir yaklaşım, tüm işlevsel işlemleri optik olarak gerçekleştirebilen tamamen yeni bir bilgi işlem mimarisi oluşturulmasıdır. Son yıllarda, bizi nihai olarak gerçek optik bilgisayarlara götürebilecek bir dizi cihaz üretilmiştir. Ancak bir bilgisayarın tümüyle optik sayılabilmesi için optik çiplerin de üretilmesi gereklidir. Ancak optik çiplerin bazı parçalarının üretilmesi ve kullanılmasındaki güçlükler henüz aşılmış değildir.

OBİ için gerekli fotonları sürekli olarak sağlayacak bir ışık kaynağının geliştirilmemiş olması bunların başında gelmektedir. Optik bilgi işlem yapılabilmesi için öncelikle bir ışık kaynağı olması gereklidir. Optik çiplerde kullanılacak ışık kaynağının niteliği konusunda belli kriterler mevcuttur: -40 ila 85°C arasında çalışabilmeli, enerji tüketimi düşük olmalı, yeterli yükseklikte çıkış gücü verebilmeli, mevcut fiber optik ağ ile sorunsuz çalışabilmelidir. Bu kriterlerin yanı sıra optik çiplerin uygun maliyette kitlesel üretiminin mümkün olabilmesi için silikondan (Si) yapılması tercih edilmelidir^[67].

OBİ çipleri için sürekli bir ışık kaynağı olarak genelde lazer ışınları ve ışık yayan diyotlar (LED) üzerinde durulmaktadır. Bu ışık kaynağının üretilmesi için silikondan faydalanmak mümkün değildir, çünkü silikon, ışık üretmek için kullanılabilir bir malzeme değildir. Hâlen araştırmacılar silikon yapıları ışık kaynağı hâline getirmek için araştırmalar yapmaktadır. 2021 yılında bir grup bilim insanı silikon-bor alaşımının oda sıcaklığında LED ışığı kaynağı olarak kullanabileceğini göstermiştir. Silikon-germanyum esaslı lazerlerden ya da çeşitli yarı iletken malzemelerden (III-V grubu yarı iletkenler) üretilen hibrid silikon lazerler üzerinde durulmaktadır^[67]. Intel, Cisco ve Juniper Networks, çip üstünde entegre ışık kaynaklarının bulunduğu veri iletişimine yönelik ticari ürünleri piyasaya sunmuştur^[67]. Ancak bunlar henüz bir standarda ulaşmamıştır.

4.3 OBİ Yazılım Dili ve Algoritmalar

OBİ için belli standart oluşturan yazılım dili veya algoritmalar da henüz geliştirilmemiştir.

Bilgiyi ışıkta kodlamak, bunu elektron kullanarak yapmaktan çok farklıdır. Her şeyden önce, elektronlar birbirlerine güçlü kuvvetler uygulayarak onları manipüle etmeyi ve mantıksal işlemleri mümkün kılan etkileşimleri düzenlemeyi kolaylaştırır. Buna karşılık, ışık fotonları etkileşim olmadan uzun mesafeler kateder, bu da paralel işlem yapabilmeyi kolaylaştırır, ancak iki ışık sinyalini mantıksal olarak birleştirmek için mantık devrelerine ve bunları yönlendirecek yazılımlara ihtiyaç vardır. Analog OBİ için uygun olan algoritmalar üzerine birkaç araştırma bulunmaktadır. “Optik dizi mantığı” bunlardan biridir^[67]. Optik dizi mantığı, basit kodlama, optik korelasyon veya işlem yoluyla herhangi bir paralel komşuluk işlemi gerçekleştirmeye yönelik bir tekniktir. Model mantığı kullanılarak, optik dizi mantığı tarafından uygulanabilen çeşitli paralel işleme türleri gerçekleştirilebilir^[68]. Algoritmalar artık dijital bilgisayar sistemleri için ideal olan Boole mantığı kullanılarak oluşturulmaktadır. Bununla birlikte, Boole mantığı, OBİ’nin sunduğu işlevsel özelliklerden tümüyle yararlanılmasından uzaktır. Bu nedenle OBİ için yeni bir algoritma inşasına ihtiyaç vardır^[27].

4.4 Standardizasyon ve Ölçeklendirme

Silikon fotonik devrelerin mevcut zorlukları, esas olarak tedarik zinciri ve üretim süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Silikon fotonik devrelerin tasarımı, seri üretimi ve paketlenmesi standartlaştırılmamış ve ölçeklendirilmemiştir. Bu durum, düşük üretim kapasitesine, düşük verime ve yüksek maliyetlere yol açmaktadır. Söz konusu

standardizasyona, teknoloji şirketlerinin OBI mimarisine ilişkin çalışmaları belli bir olgunluğa eriştikten sonra, sektörde varılacak konsensüslerle ulaşılabileceğini tahmin etmek güç değildir.

5. OPTİK BİLİŞİM, KUANTUM BİLİŞİMİ YAYGINLAŞTIRABİLİR Mİ?

Tümüyle optik bilgisayar bir gün gerçek olmasa bile, optik bilişim gücünü yeni kuantum bilişim ile birleştirebilir. Optik bilgi işlem bileşenleri, kuantum bilişimi günlük yaşamın bir parçası hâline getirebilir.

Kuantum bilişim, dünya genelinde pek çok uzman tarafından bir sonraki bilgisayar teknolojisi olarak görülmektedir. Çünkü teorik olarak kuantum bilgisayarlar, çok daha karmaşık hesapları en hızlı biçimde gerçekleştirebilirler. Kuantum mekaniğinden yararlanan kuantum işlemciler (Quantum Processing Unit -QPU), kuantum parçacıkları olarak anılan atom altı parçacıklarının aynı anda birden fazla durumda olma yeteneğinden faydalanabilmektedir. Buna göre QPU'lar blok zinciri uygulamaları, kuantum simülasyonları ve makine öğrenmesini geliştirebilirler ve zorlu optimizasyon problemlerini çözebilirler. Dolayısıyla bilgisayar ve veri güvenliğini ihlal edilemez hâle getirebilirler. QPU'lar maddelerin atomik düzeyde nasıl çalıştığını simüle edebilir ve böylece kimya ve malzeme biliminde önemli ilerlemelerin kapılarını aralayabilirler. QPU'lar karmaşık sorunlarda optimizasyon çözümleri sunarak karar vericilere yardımcı da olabilirler. Son olarak kuantum teknolojisi sayesinde makine öğrenmesi farklı bir boyuta taşınabilir ve Dördüncü Sanayi Devrimi bir başka boyuta taşınabilir^[69].

Günümüzde IBM ve Google gibi teknoloji devleri kuantum bilgisayar geliştirerek kullanıma sunmuşlardır. Ancak bunlar bulut bilişim ile erişilebilen büyük boyutlu ve pahalı makinelerdir. Bunun nedeni, kubitleri oluşturan atom altı parçacıkların aşırı istikrarsız olması özel çevre şartları altında tam verimli çalışmasıdır. Kubitler en hafif sarsıntıya, ortam ısısındaki değişimlere karşı hassas olduğu gibi herhangi bir elektromanyetik çevreden de kolayca etkilenmektedir. Bu nedenlerden dolayı kuantum bilgisayarlar dış ortamdan tamamen izole ve yaklaşık -235 santigrat derece soğukta tutulmalıdır^[70]. Dolayısıyla günümüzde herhangi bir taşınabilir bilgisayar gibi genel amaçlı kullanılacak kuantum bilgisayarlarının geliştirilmesi oldukça uzun vakit alacak gibi görünmektedir.

Öte yandan hibrid bir çözüm kuantum bilişimi günlük hayatımıza daha kısa sürede katabilir. Bu hibrid çözüm, “ışık tabanlı kuantum bilgisayar” veya “Entegre Kuantum Fotonik (IQP)” teknolojisi olarak anılmaktadır. Fotonlar oda sıcaklığında kubitler gibi hareket edebilmektedir

ve dolayısıyla yüksek miktarda enerji harcanarak soğuk ve izole bir ortamda tutulmalarına gerek yoktur. Bu nedenle bilim insanları 2000’li yıllardan bu yana fotonların kuantum özelliklerini kullanarak bir kuantum bilgisayar geliştirmek için çalışmalar yürütmektedir^[70]. Yapılan ilk çalışmalar cesaret kırıcı olmuştur. Zira çalışabilir bir optik kuantum bilgisayar geliştirmek için milyonlarca lazer ışınına ve diğer optik cihazlara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Ancak 2021 yılında yapılan uluslararası bir araştırmada “bozon örnekleme” adı verilen bir yöntemle birkaç lazer ışını, aynalar, prizmalar ve foton dedektörleri ile sınırlı da olsa kuantum hesaplama yapılabileceği ortaya konulmuştur^[71].

Yüksek entegrasyon yoğunluğuna sahip kompakt bir cihaz boyutu elde etmek için silikon tabanlı IQP yoğun bir şekilde incelenmiştir ve bazı modeller ortaya konulmuştur^[72]. Her bir temel bileşeni gerçekleştirmek için gösterilen çeşitli çabalara rağmen, IQP’yi çeşitli malzeme sistemleri ile gerçekleştirmek daha gerçekçidir. Şimdiye kadar, çip tabanlı bir IQP, bilimsel bir zorluk olmaya devam etmektedir. Çip üzerinde başarılı bir şekilde entegre edilmiş bir ışık kaynağı ile tam entegre silikon tabanlı bir IQP, gelecekte ticarileştirme için umut vericidir.

6. SONUÇ

Optik bileşenler, bilgisayarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bununla birlikte, optik bilgi işlem bileşenlerinin geliştirilmesindeki ana odak noktası, iletişim için veya daha temelde bazı optik işlev veya öğelere (optik örüntü tanıma, vb.) sahip sistemler de bilgisayarların bağlantı parçaları olmuş ve olmaya devam etmektedir. Optik dijital bilgisayarlar hâlen gelişim aşamasındadır; bununla birlikte, optik mantık kapıları, optik anahtarlar, sinir ağları ve uzamsal ışık modülatörleri gibi sonunda gerçek optik bilgisayarlara yol açabilecek çeşitli bileşenler geliştirilmiştir. Yüksek performanslı mevcut bilgisayarlar, daha karmaşık fotonik aygıtları ve sistemleri doğru bir şekilde simüle edebilir ve oluşturabilir. Yüzde 100 optik bilgisayarlara ulaşmak için yıllarca beklemek gerekeceği anlaşılmaktadır. Ancak bu yolda yapılacak çalışmalar, genel amaçlı kuantum bilgisayarların pazara sunulması yolunda olumlu sonuçlar doğurabilir. Ayrıca optik bilişimin, yapay zekâ ve derin öğrenme alanında çok önemli bir kilometre taşı olacağı anlaşılmaktadır. Üstelik teknolojinin iklim dostu hâle gelmesi için en iyi seçenek de optik bilişim gibi durmaktadır. Dolayısıyla, optik bilgi işlemin geleceği artık oldukça parlak görünmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Briman, Eran; (2016), "INTELLIGENCE Another look at Alpha-Go vs. Lee Sedol: The Power Angle", *CEVA*, <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/artificial-intelligence-leaps-forward-mastering-the-ancient-game-of-go/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [2] STM ThinkTech, (2021), "Küresel İklim Değişikliği İle Mücadelede Yeni Nesil Teknolojiler", (30 Kasım 2021), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/kuresel-iklim-degisikligi-ile-mucadelede-yeni-nesil-teknolojiler>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [3] *FinancesOnline*, "53 Important Statistics About How Much Data Is Created Every Day", <https://financesonline.com/how-much-data-is-created-every-day/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [4] *STM ThinkTech*, (2018), "BİR DEVRİMİN AYAK SESLERİ: KUANTUM BİLGİSAYARLAR", https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1609000709_stm-kuantum-bilgisayarlar.pdf. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [5] Davutoğlu, Naci Atalay; (ÜÇÜNCÜ VE DÖRDÜNCÜ SANAYİ DEVRİMLERİ ARASINDAKİ TEMEL VE SİSTEMATİK FARKLILIKLARIN DETERMİNİST BİR YAKLAŞIMLA ANALİZİ", *Dergipark*, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1110924>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [6] Bond, Master, (2021), "How to Stake Electronic Components Using Adhesives", *IEEE Spectrum*, (12 Ekim 2021), <https://spectrum.ieee.org/staking-electronic-components>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [7] *STM ThinkTech*, (2020), "Moore Yasası'nın Sonu Ne Anlama Geliyor?", <https://thinktech.stm.com.tr/tr/moore-yasasinin-sonu-ne-anlama-geliyor>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [8] CARTWRIGHT, JON; (2014), "Shrinking electronics to its ultimate limit", *European Commission*, (16 Mayıs 2014), <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/shrinking-electronics-its-ultimate-limit>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [9] *Google Blog*, (2009), "Powering a Google search", (11 Ocak 2009), <https://googleblog.blogspot.com/2009/01/powering-google-search.html>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [10] *enel X*, (2021), "How energy efficient are data centers?", (7 Aralık 2021), <https://corporate.enelx.com/en/stories/2021/12/data-center-industry-sustainability#:~:text=Data%20centers%20consume%20an%20estimated,projected%20total%20global%20electricity%20demand>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [11] Strickland, Jonathan; "How much energy does the Internet use?", *howstuffworks*, <https://computer.howstuffworks.com/internet/basics/how-much-energy-does-internet-use.htm#:~:text=Ultimately%2C%20Raghavan%20and%20Ma%20estimated,to%20170%20to%20307%20Gigawatts>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [12] *Compauand Semiconductor News*, (2022), "How much does it cost to make a semiconductor fab?", (16 Ağustos 2022), <https://www.csfusion.org/semiconductor/how-much-does-it-cost-to-make-a-semiconductor-fab/#:~:text=Building%20a%20semiconductor%20fabrication%20facility,to%20afford%20such%20a%20cost>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [13] *STM ThinkTech*, (2021), "Global Çip Krizi ve Sonuçları", (12 Ağustos 2018), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/global-cip-krizi-ve-sonuclari>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [14] Phelan, Joe; (2022), "Can anything travel faster than the speed of light?", *Live Science*, (25 Nisan 2022), <https://www.livescience.com/can-anything-travel-faster-speed-of-light#:~:text=According%20to%20Albert%20Einstein's,is%20capable%20of%20moving%20faster>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [15] Kahaner, David; (1991), "OPTİK İŞLEM ETKİNLİKLERİ", *Elektrik Mühendisleri Odası*, (Şubat 1991), https://www.emo.org.tr/ek-ler/309cd6396e74460_ek.pdf?dergi=266. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [16] *Fiberplus*, (2019), "A Brief History of Fiber Optic Cables", (14 Haziran 2019), <https://www.fiberplusinc.com/helpful-information/a-brief-history-of-fiber-optic-cables/#:~:text=In%201975%2C%20fiber%20optic%20cables,today%20to%20be%20a%20possibility>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [17] *KV Cable*, (2022), "How Important are Submarine Fiber Optic Cables? Once Cut Off The US Economy Will Collapse. No Wonder It Was Hidden in The Deep Sea", (26 Temmuz 2022), <https://kv-cable.com/how-important-are-submarine-fiber-optic-cables/#:~:text=According%20to%20statistics%2C%20the%20total,circle%20the%20earth%2022%20times>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [18] Jacoby, Mitch; (2020), "As telecom demands grow, optical fibers will need to level up", *Chemical&Engineering News*, (16 Mart 2020), <https://cen.acs.org/materials/photronics/telecom-demands-grow-optical-fibers/98/i10>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [19] *The FOA*, "Fiber Optic Data Links", <https://www.thefoa.org/tech/ref/appln/datalink.html>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [20] *Prof. Dr. Bilsen Beşergil*, "Optik Dalga Kılavuzu (optical waveguide)", <http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/optik-dalga-kilavuzu-optical-waveguide.html>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [21] Ambs, Pierre; (2010), "Optical Computing: A 60-Year Adventure", *Advances in Optical Technologies*, (1 Haziran 2010), <https://www.hindawi.com/journals/aot/2010/372652/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [22] CLARY UPI, ISABELLE; (1990), "ATT announces first digital optic processor", (29 Ocak 1990), <https://www.upi.com/Archives/1990/01/29/ATT-announces-first-digital-optic-processor/4629633589200/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [23] Intel, "Intel® Silicon Photonics 800G DR8 OSFP Optik Alıcı Verici Tanıtımı", <https://intel.ly/3YHXOie>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [24] Handelsman, Lior; Ashkenazi, Renana; (2022), "Silicon Photonics: Revolutionizing Data Centers at the Speed of Light", *Teramount*, (21 Şubat 2022), <https://teramount.com/news/silicon-photonics-revolutionizing-data-centers-at-the-speed-of-light/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [25] Coldewey, Devin; (2021), "Lightmatter's photonic AI ambitions light up an \$80M B round", *Tech Crunch*, (6 Mayıs 2021), <https://techcrunch.com/2021/05/06/lightmatters-photonic-ai-ambitions-light-up-an-80m-b-round>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [26] *IBM*, (2021), "One photon to flip them all: New optical switch approaches peak energy efficiency", (22 Eylül 2021), <https://research.ibm.com/blog/single-photon-switching>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [27] Kazanskiy, Nikolay L.; (2022), "Optical Computing: Status and Perspectives", *National Library of Medicine*, (24 Haziran 2022), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9267976/pdf/nanomaterials-12-02171.pdf>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [28] University of Münster, (2019), "Step towards light-based, brain-like computing chip", *ScienceDaily*, (8 Mayıs 2019), <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/05/190508134459.htm>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [29] University of Oxford, (2022), "World's first ultra-fast photonic computing processor using polarization", *Phys*, (15 Haziran 2022), <https://phys.org/news/2022-06-world-ultra-fast-photonic-processor-polarization.html>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [30] *EPFL*, (2021), "Optical technology can slash the energy required by AI", (25 Ağustos 2021), <https://actu.epfl.ch/news/optical-te>

- chnology-can-slash-the-energy-required-2/. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [31] Fyler, Tony; (2022), “A Green Solution to Data Center Cooling?”, *Techhq*, (7 Eylül 2022), <https://techhq.com/2022/09/cloud-big-data-data-center-cooling-green-solution/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [32] GCI, “Data Center and Colocation”, <https://www.gci.com/business/products/managed-services/data-center-and-colocation>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [33] Roach, John; (2020), “Microsoft finds underwater datacenters are reliable, practical and use energy sustainably”, *Microsoft*, (14 Eylül 2020), <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [34] *elektrik port*, “Optik Bilgisayar Nedir?”, <https://www.elektrikport.com/makale-detay/optik-bilgisayar-nedir/16847#ad-image-0>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [35] *STM ThinkTech*, (2021), “Derin Öğrenmenin Geleceği: Fotonik”, (18 Kasım 2021), https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1637236610_stmblogfotonik.pdf. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [36] *The Royal Society*, (2019), “The future of photonics: sensors and quantum technologies”, (15 Ekim 2019), <https://royalsociety.org/science-events-and-lectures/2019/10/tof-photonics/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [37] *Research Gate*, “Global mobile data traffic forecast by ITU”, https://www.researchgate.net/figure/Global-mobile-data-traffic-forecast-by-ITU-Overall-mobile-data-traffic-is-estimated-to_fig1_331159423. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [38] Vailshery, Lionel Sujay; (2022), “Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2021, with forecasts from 2022 to 2030”, *Statista*, (22 Kasım 2022), <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/#:~:text=The%20number%20of%20Internet%20of,billion%20IoT%20devices%20in%202030>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [39] ResearchAndMarkets, (2022), “Self-Driving Cars Market Global Forecast to 2030: Increasing Demand for Level 1 and Level 2 Cars and Rising Investment in Development of Level 4 and Level 5 Cars Will Propel Market”, *businesswire*, (15 Şubat 2022), <https://bwnnews.pr/3yuBdLa>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [40] *Huawei*, (2020), “Computing 2030”, https://www-file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/giv/industry-reports/computing_2030_en.pdf. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [41] Zhang, Danni; Tan, Zhongwei; (2022), “A Review of Optical Neural Networks”, *Applied Science*, (Mayıs 2022), https://www.researchgate.net/publication/360885086_A_Review_of_Optical_Neural_Networks. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [42] Burt, Jeffrey; (2022), “LUMINOUS SHINES A LIGHT ON OPTICAL ARCHITECTURE FOR FUTURE AI SUPERCOMPUTER”, *The Next Platform*, (17 Mart 2022), <https://www.nextplatform.com/2022/03/17/luminous-shines-a-light-on-optical-architecture-for-future-ai-supercomputer/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [43] *The Economist*, (2022), “LUMINOUS SHINES A LIGHT ON OPTICAL ARCHITECTURE FOR FUTURE AI SUPERCOMPUTER”, (20 Aralık 2022), <https://www.economist.com/science-and-technology/2022/12/20/artificial-intelligence-and-the-rise-of-optical-computing>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [44] CHOI, CHARLES Q.; (2023), “Optical AI Could Feed Voracious Data Needs”, (18 Ocak 2023), <https://spectrum.ieee.org/optical-neural-networks>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [45] Wang, Tianyu; (2022), “Image sensing with multilayer, nonlinear optical neural networks”, *Arxiv*, (27 Temmuz 2022), <https://arxiv.org/pdf/2207.14293.pdf>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [46] *İTÜ Yapay Zekâ ve Veri Mühendisliği*, “Bilgisayarla Görü”, <https://yapayzeka.itu.edu.tr/arastirma/bilgisayarla-goru>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [47] *STM ThinkTech*, (2021), “Yüz Tanıma Sistemlerinin Bugünü ve Geleceği”, (30 Ekim 2021),
- [48] Xu, Zhihao; (2022), “A multichannel optical computing architecture for advanced machine vision”, *Nature*, (18 Ağustos 2022), <https://www.nature.com/articles/s41377-022-00945-y>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [49] *Rockley Photonics*, <https://rockleyphotonics.com/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [50] *RLD*, (2019), “What is encoder?”, (29 Nisan 2019), https://www.rls.si/eng/encoder-handbook/what-is-encoder?gclid=Cj0KCQi-A6rCgBhDVARIsAK1kGPJLkTEjHIH1CWdzcPds5abZyds8F-SJ9Orp943TYgala_LrYfVIOTZkaAqDPEALw_wcB. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [51] *STM ThinkTech*, (2020), “Lidar Teknolojisi ve Kullanıldığı Alanlar”, (21 Ocak 2020), <https://thinktech.stm.com.tr/tr/lidar-teknolojisi-ve-kullanildigi-alanlar>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [52] *Intel*, (2021), “CES 2021: Mobileye Innovation Will Bring AVs to Everyone, Everywhere”, (11 Ocak 2021), <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/ces-2021-mobileye-avson-move.html?wapkw=FCMW%20LiDAR%20%gs.q0dn70>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [53] *DATACYPHER*, (2022), “OPTICAL DATA SECURITY”, (15 Şubat 2022), <https://datacypher.com/optical-data-security/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [54] *Gerçek Bilim*, “Nano Cama 5 Boyutlu Veri Depolama Sayesinde Bir Diske 360 TB Kaydetmek Mümkün”, <https://www.gercekbilim.com/nano-cama-5-boyutlu-veri-depolama-supermen-kristal-hafiza/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [55] *TheSecMaster*, “What Is 5D Optical Data Storage Alias ‘Superman Memory Crystal’?”, <https://thesecmaster.com/what-is-5d-optical-data-storage-alias-superman-memory-crystal/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [56] *BBC*, (2019), “Project Silica: Microsoft’tan ‘yüzlerce yıl dayanabilecek’ veri depolama teknolojisi”, (5 Kasım 2019), <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-50300888>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [57] *UNCW*, “Optical Computers”, https://uncw.edu/phy/documents/raphael_06.pdf. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [58] Acar, Mert; (2022), “Holografik Veri Depolama Nedir ve Nasıl Çalışır?”, (10 Temmuz 2022), <https://thinpo.com/holografik-veri-depolama-nedir-ve-nasil-calisir/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [59] Synopsys, “Silicon Photonics”, <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-silicon-photonics.html>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [60] Angelini, Chris; (2021), “Intel sees bright future for silicon photonics, moving information at light speed in datacenters and beyond”, *VentureBeat*, (24 Mayıs 2021), <https://venturebeat.com/business/intel-sees-bright-future-for-silicon-photonics-moving-information-at-light-speed-in-datacenters-and-beyond/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [61] Ateş, Hakan; Bahçeci, Ersin; (2015), “Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, <https://bit.ly/3Fcvvdp>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [62] *Wikiwand*, “Yüzey plazmonu”, https://www.wikiwand.com/tr/Y%C3%BCzey_plazmonu. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [63] Templeton, Graham; (2016), “Here’s why we don’t have light-based computing just yet”, (29 Şubat 2016), *Extreme Tech*, <https://www.extremetech.com/extreme/223671-heres-why-we-dont>

- have-light-based-computing-just-yet. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [64] *Moscow Institute of physics and technology*, “Physicists develop a cooling system for the processors of the future”, https://mipt.ru/en/news/physicists_develop_a_cooling_system_for_the_processors_of_the_future. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [65] *University of People*, “Light-Based Computing: Is the Future Already Here?”, <https://www.uopeople.edu/blog/what-is-light-based-computing/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [66] Nieweglowski, Krzysztof; (2020), “Electro-optical co-integration of chip-components in optical transceivers for optical inter-chip communication”, *IEEE Xplore*, (5 Ağustos 2020), <https://ieeexplore.ieee.org/document/9159256>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [67] Yang, Junjie; (2023), “From past to future: on-chip laser sources for photonic integrated circuits”, *Nature*, (15 Ocak 2023), <https://www.nature.com/articles/s41377-022-01006-0>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [68] Tanida, Jun; (1988), “Programming of optical array logic. 2: Numerical data processing based on pattern logic”, *Applied Optics*, <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1&rwjcode=ao&uri=ao-27-14-2931&html=true>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [69] *Kuantum Türkiye*, (2020), “Kuantum Bilişim Nedir?”, (28 Nisan 2020), <https://kuantumturkiye.org/kuantum-bilisim-nedir/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [70] Garisto, Daniel; (2020), “Light-Based Quantum Computer Exceeds Fastest Classical Supercomputers”, *Scientific American*, (3 Aralık 2020), <https://www.scientificamerican.com/article/light-based-quantum-computer-exceeds-fastest-classical-supercomputers/>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [71] Aaronson, Scott; Arkhipov, Alex; “The Computational Complexity of Linear Optics”, *scottaaronson.com*, <https://www.scottaaronson.com/papers/optics.pdf>. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)
- [72] *Research Gate*, (2022), “Creative Commons Attribution 4.0 International”, https://www.researchgate.net/figure/Key-milestones-in-silicon-based-IQP-On-chip-quantum-interference-and-integrated-CNOT_fig5_366850374. (Erişim Tarihi: 13 Mart 2023)



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

