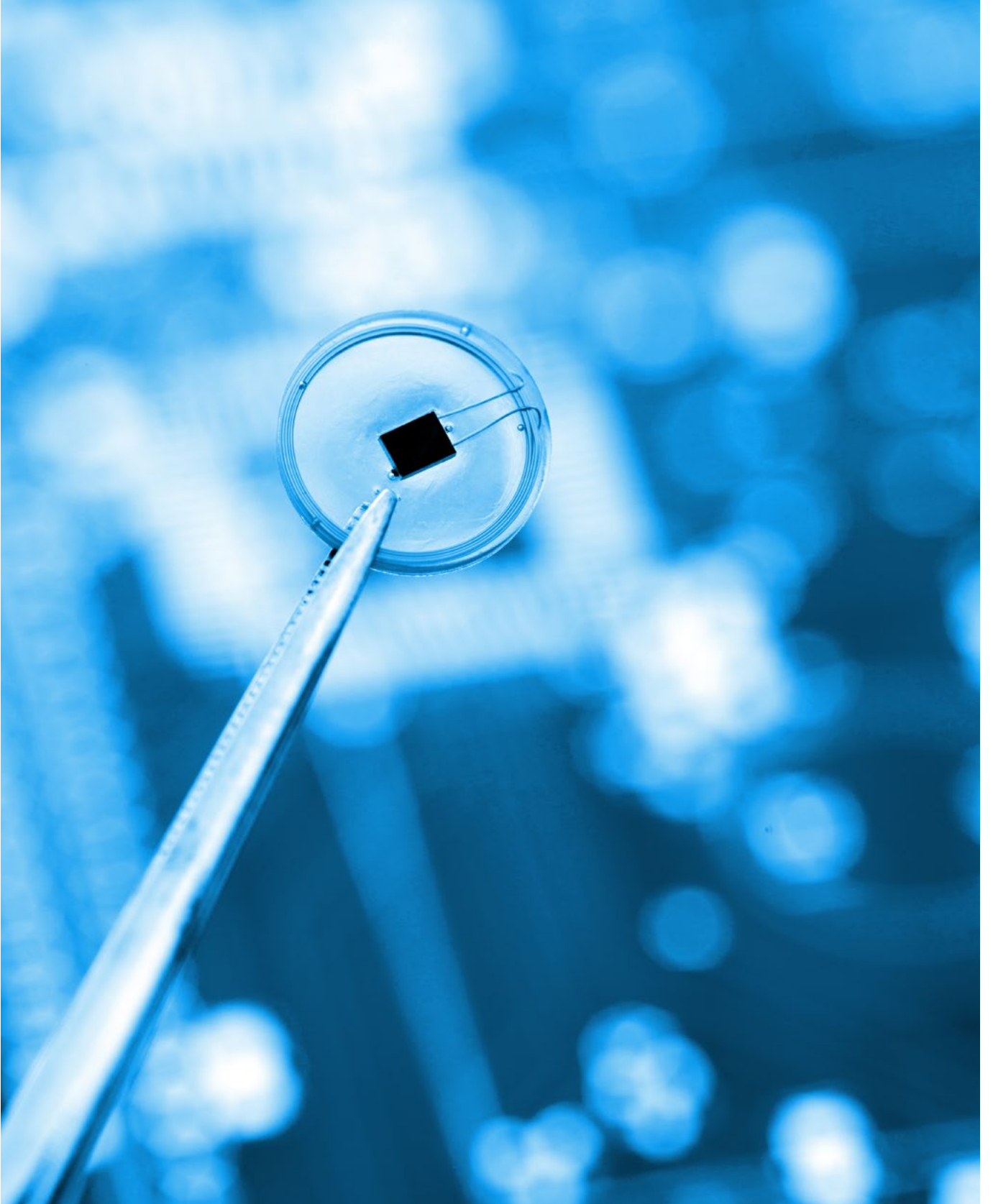


MOORE YASASI'NIN SONU NE ANLAMA GELİYOR?



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

1965 yılında, sadece üç yıl sonra teknoloji devi Intel'in kurucularından biri olacak Gordon Moore tarafından ortaya atılan, her yıl elektronik komponent, yani bileşenlerin neredeyse yarı yarıya küçüldüğü gözleminde yola çıkarak, 18 ayda bir tümleşik devre üzerinde konumlandırılacak bileşen sayısının ikiye katlanacağını ve böylelikle her bir parçanın maliyetinin azalacağını savunan Moore Yasası'nın sonunun geldiği, son yılların dikkat çeken konuları arasında yer almaktadır^[1].

İlk olarak Moore'un 1965'te yayımladığı bir makaleyle ortaya atılan iddia 10 yıllık süreçte doğruluğunu kanıtlayınca yasa halini almış ve bu yasanın 18 aylık gelişim süreci daha sonra Moore tarafından 24 ay olarak güncellenmiştir. Mevcut verilere göre en az 2015 yılına dek geçerliliğini sürdüren yasanın özellikle son beş yıldır artık geçerli olmadığı, zira artık böyle hızlı bir gelişimin imkânı olmadığı iddia edilmektedir. Ancak bugün kullandığımız akıllı telefonlardan uygun fiyatlı laptoplara, GPS'ten otonom araçlara hemen her teknolojinin Moore'un öngörüsünün bir yansıması olduğunu ifade etmek gerekmektedir. Moore Yasası'nın getirileri öyle kapsamlıdır ki, yasanın temelini oluşturan tümleşik devreler geçtiğimiz yıllarda ekonomistler tarafından, "1974'ten bu yana ABD verimlilik artışını sağlayan faktör" olarak tanımlanmıştır^[2]. Peki artık bileşenlerin iki yılda bir, yarı yarıya küçülmeyeceği, dolayısıyla iki yılda bir bileşen sayısının da ikiye katlanamayacağı düşüncesi nasıl öne çıkmıştır? Bu iyimser yasanın ortadan kalkmasıyla, bizleri neler bekliyor?

Bunu anlayabilmek için önce, "katlanarak artma" prensibinin kısa sürede ulaşabileceği öngörülmesi zor yükselişi irdelemek ve Moore'un bu yasayı ortaya koyduğu yılları analiz etmek şarttır.

2. MOORE YASASININ DOĞDUĞU KOŞULLAR

Öncelikle, herhangi bir teknolojiyi 18 ay ya da 24 ay gibi nispeten uzun bir zaman diliminde katlayarak geliştirebilme fikri kağıt üzerinde çok da zor görünmese de, bir matematik hikâyesi, "katlanarak artma" prensibinin boyutlarını tahayyülde yararlı olacaktır. Rivayete göre satrançta kralı yenen oyuncu, kralın "Dile benden ne dersen" teklifine, 64 kareli satranç tahtasının ilk karesine 1 buğday tanesi konulmasını, her karede konan buğday sayısının ikiye katlanmasını ve 64'üncü kareye konan sayıda buğday tanesi istediğini belirtmiştir. Bu istek krala son derece makul gelse de hesaplandığında satranç oyuncusunun 18 katrilyondan fazla buğday tanesi istediği, bunun da milyarlarca ton ağırlığa denk geldiği fark edilmiştir. İşte "katlanarak artma" prensibiyle tek bir buğday tanesi, sadece 64 seferde, böyle inanılmaz miktarlara erişebilmektedir. İnsanlığın uzun yıllardır aynı prensibe dayanan Moore Yasası'nın gereklerini teknolojide başarabiliyor olması, bu nedenle son derece etkileyicidir^[3].

Ancak tıpkı hikâyedeki kralın bu miktarı ödeyemeyeceğinin aşikâr olması gibi, gerçek hayattaki bilim insanları da Moore Yasası'nın, katlanarak artma prensibine ayak uydurabilirler ancak "bir noktaya kadar" ilerleyebileceği; bu gelişim hızının sürdürülebilir olmadığını iddia etmektedir. Moore Yasası'nın son beş yılda aldığı eleştirilere ve geleceğe dair "yeni" öngörülere geçmeden önce, bu öngörünün ortaya çıktığı ilk dönemi ve onu takip eden süreci de irdelemek önemlidir.

2.1 Yasanın Ortaya Çıktığı Dönem

1960'lı yılların başında, bugünün Silikon Vadisi'nde bir şirkette yönetici olan Gordon Moore ve ekibi, silikon

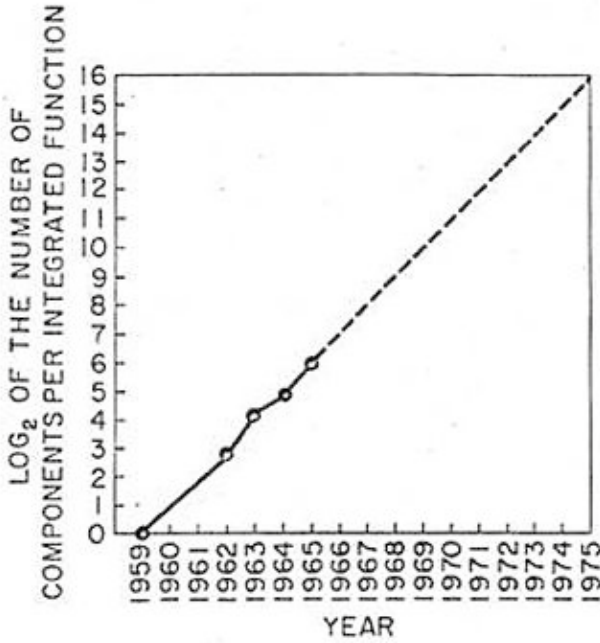


Fig. 2 Number of components per integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.

Şekil 1: Gordon Moore'un 1965 yılında çizdiği grafik. Tümleşik devreye bağlı bileşen sayısı-Yıl karşılaştırması^[4].

elektronik cihazlar tasarlamakta, transistörler üzerine yoğunlaşmakta ve sektörde öne çıkmaya başlamaktadır. Aynı şirketten Jean Hoerni'nin 1959 yılında düzlemsel transistörü icat etmesiyle mühendislerin telleri transistörden yukarıda konumlandırabilmesi mümkün olmuş; bu icadı daha da geliştiren iş arkadaşı Robert Noyce sayesinde de 1961 yılında "modern" tümleşik devre insanlığa sunulmuştur. (İlk tümleşik devre, Moore'un makalesinden yedi sene önce, Texas Instruments'tan Jack Kilby tarafından geliştirilmiştir.) 1965 yılında ise şirket, 64 bileşenli bir çipi piyasaya sürmeye hazırlanmaktadır.

O dönemde tüm bu önemli gelişmeleri yakından takip eden Gordon Moore'un, Moore Yasası'na evrilecek öngörülerini de bu gelişmelerden hareketle son derece iddialıdır ve hatta o dönemde sıra dışı olarak nitelendirilmiştir. *Electronics* isimli bir dergi için teknolojinin ve elektronik parçaların gelecek 10 yılını öngören, daha sonra Moore Yasası'nın temelini oluşturacak makaleyi yazması rica edilen Moore, öngöründe bulunabilmek için önce şirketin o güne dek katettiği gelişmeleri incelemiştir. Moore, şirketin geçmişten o güne dek tümleşik devreleri, Hoerni ve Royce'un icatlarının da yardımıyla; düzenli olarak artan bir karmaşıklıkta tasarladıklarını fark etmiştir. Bileşen sayısı öyle bir hızla ve katlanarak artmaktadır ki Moore, makalesine şu iddialı cümleyle giriş yapmıştır: "Elektronik bileşenlerinin geleceği, elektroniğin geleceğidir^[5]."

2.2 "Murphy Yasası'nın Yegâne İhlali"

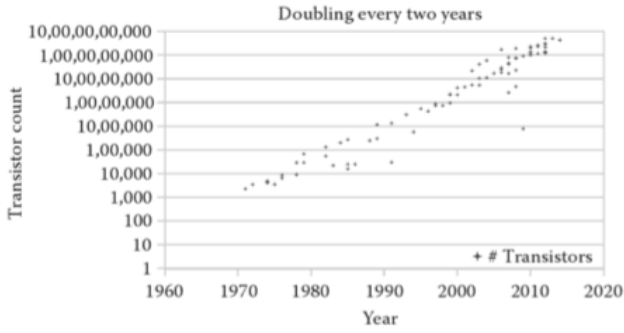
2017 yılında Moore Yasası'nı oluşturma sürecine dair verdiği röportajda Moore, makale için araştırma yaparken, 1959'da iki boyutlu ilk transistörün ortaya çıkışından bu

yana, bir çipteki karmaşıklığın her sene iki katına çıktığını fark ettiğini belirtmiştir. 1965'te, yani makaleyi yazdığı yılda devre üzerine bağlanabilen bileşen sayısının 60'ı geçtiğini gözlemleyen Moore bundan hareketle, bugüne dek elde edilen gelişimin önümüzdeki yıllarda da devam edeceğini; bunun da elektronik ürünleri ucuzlatacağını iddia etmiştir^[6]. Moore Yasası'nın temelini oluşturacak söz konusu makalede Moore, 1965'ten 1975'e uzanan 10 yıllık bir değerlemeye yer verir ve yaklaşık 60 olan bileşen sayısının düzenli olarak katlanarak, 10 yılın sonunda 60 bine çıkacağını iddia eder. 1975 yılında bu sayı gerçekten de 64'ten 65 bine çıkmıştır^[5]. 2017 yılındaki röportajında, "Öngörüm tuhaf bir şekilde doğru çıktı" diyen Moore, bunu Murphy Yasası'nın yegâne ihlali olarak tanımlamıştır. Öngörüsünün tutmasının akabinde bu katlanarak artma prensibi, Gordon Moore'un iş arkadaşları tarafından "Moore Yasası" olarak adlandırılmıştır^[6].

Dört sayfalık makalesinde aslında bugün sahip olduğumuz bilgisayarları, akıllı telefonları ve otonom otomobilleri de öngören Moore'un yasası, 1975 yılından sonra da gerçekleşmeye devam etmiş ve kaynaklara göre en az 2015 yılına dek doğru çıkmıştır. Bu süreçte bileşen sayısı, tıpkı Moore'un iddia ettiği gibi katlanarak artmış, elektronik ürünler daha ulaşılabilir hale gelmiştir. Örneğin makalenin kaleme alındığı 1965 yılında çok az sayıda şirketin tümleşik devre yapabildiğini, bunların maliyetinin son derece yüksek olduğunu ve ancak NASA ve ABD Ordusu gibi müşterilerin satın alabildiğini eklemek gerek. Moore ise, birden fazla transistör kullanmanın, yani tümleşik devrelerle ilerlemenin daha ekonomik olacağından emindir. Takip eden yıllarda da Intel ve tüm markaların işlemcilerinde kullanılan -birkaç sene önce yalnızca NASA ve ordu tarafından alınabilen- transistörlerin sayısı da hızla artış göstermiştir. 1965 ve 2015 yılları arasında geçen 50 yılda, tümleşik devre transistörü değeri 30 dolardan nanodolar seviyesine dek düşmüştür. Pahalı, yüksek performanslı parçaların yerini ucuz ve yine de yüksek performans sergileyen ürünler almıştır^[5].

Microprocessor	Year of Introduction	Transistors
4004	1971	2,300
8008	1972	2,500
8080	1974	4,500
8086	1978	29,000
Intel286	1982	134,000
Intel386™ processor	1985	275,000
Intel486™ processor	1989	1,200,000
Intel® Pentium® processor	1993	3,100,000
Intel® Pentium® II processor	1997	7,500,000
Intel® Pentium® III processor	1999	9,500,000
Intel® Pentium® 4 processor	2000	42,000,000
Intel® Itanium® processor	2001	25,000,000
Intel® Itanium® 2 processor	2003	220,000,000
Intel® Itanium® 2 processor (9MB cache)	2004	592,000,000

Şekil 2: 1971-2004 yılları arasında Intel işlemcilerin transistör sayıları^[4].



Şekil 3: 1970-2020 yılları arasında işlemcilerin transistör sayıları^[7]. Transistör sayılarının yıllar içindeki değişimi son derece değerli bir analiz fırsatı sunsa da, Intel firması elektronik cihaz üretimlerinde kullanılan transistör sayılarını 2017 yılından beri açıklamamaktadır^[8].

3. MOORE YASASI'NIN SONU NASIL GELDİ?

Moore Yasası'nın 50 yılı aşkın başarısı yadsınamaz bir gerçekken; bu yasanın sonunun geldiğini ifade edenlerin temellendirmeleri ikiye ayrılmaktadır. İlk grup bu yasanın zamanla, öngörülen ziyade sektörel beklentileri belirleyebilecek güce ulaştığını ve böylece etkisini sürdürdüğünü belirtmektedir. Yani Moore Yasası'nın geleceğe dair bir öngörülen, vadettiği gelişimi fark eden mühendislerin ve şirketlerin yakalamak için kıyasıya çabaladıkları bir ideale, hatta kehanete evrildiği iddia edilmektedir^[5]. Örneğin Tarihçi Cyrus Mody, Moore Yasası'nın bu kadar uzun süredir etkinliğini sürdürmesinin sebebini, yasanın tüm sektörü tek bir hedefe doğru ilerlemek için koordine ve teşvik eden bir güce dönüşmesi olarak açıklamıştır^[9].

Diğer yandan, Fizikçi Michio Kaku da dahil olmak üzere bazı bilim insanları bu yasanın artık varlığını sürdürmemeye sebebini, mevcut teknolojinin ulaştığı gerçekçi limitlerle açıklar. Günümüzde tümleşik devre üretiminin önemli bir parçası olan fotolitografi sürecinin 10 nanometre kadar kısa dalga boyuna sahip ultraviyole ışınlarla dayalı olduğuna dikkat çeken Kaku, modern üretim teknikleriyle mevcut transistörlerden daha da küçülmesinin mümkün olmadığını iddia etmektedir. Doktor Kaku'nun Moore Yasası'na karşı tek argümanı bu değildir. "Transistörler öyle küçük olacak ki Kuantum Teorisi ve atom fiziğiyle incelenebilecek" diyen Kaku, elektronların tellerden sızacağı konusunda uyarılarda bulunmaktadır. "Örneğin bilgisayarınızdaki en ince katman 5 atom uzunluğunda olacak. Bu aşamada, fizik kurallarına göre, Kuantum Teorisi devreye girer." diyen Kaku, Heisenberg Belirsizlik Kuramı'na göre bir partikülün hem pozisyonunu hem de ivmesini aynı anda bilemeyeceğimize dikkat çekmektedir. Kaku, atomik seviyede elektronun yerinin bilinmemesi sebebiyle ultra ince bir tel ya da katmandan sızıntının da, kısa devre ile sonuçlanacağını ifade etmektedir^[7]. Elektron sızıntısının elektronik cihaz kapalıyken dahi gerçekleşebileceğini ortaya koyan çalışmalar; bunun hem enerji kaybı hem de cihaza duyulan güvenin zedelenmesine sebep olacağını belirtmektedir.

Şimdiden, son teknoloji çiplerin üzerinde konumlanan milyarlarca transistör insan gözüyle görülemez küçüklüğe sahiptir. Moore Yasası'nın 2050'ye dek sürmesi için mühendislerin tek bir hidrojen atomundan da küçük transistörler yapması gerektiği ifade edilmektedir. Ayrıca, yenilenen her çip için yeni üretim tesisleri kurmanın maliyeti son derece yüksektir^[10].

3.1 Dennard Ölçeklemesindeki Sınır Aşıldı

Moore Yasası'nın günümüzde etkisini kaybetmesinin bir diğer sebebi de Dennard ölçeklemesinde belirtilen limitin geçilmiş olmasıdır. Hatta 2000'li yılların başında transistör büyüklüğünün Dennard'ın ölçeklemesindeki 100 nanometre sınırına yaklaşmasıyla, yasanın ilk kez sorgulanmaya başlandığı ifade edilmektedir. Elektron sızıntısı problemi de, bu sınıra yaklaşılmasıyla yakından bağlantılıdır. Artık transistörleri daha da küçültmek; onları daha hızlı ve daha etkin kılmamaktadır. Zaten modern transistörleri daha da küçük kılmak, trend analizimizin ilerleyen bölümlerinde detaylarıyla açıklanacak sebeplerden dolayı; hız ve güç tüketimi sabit kalsa dahi, son derece zordur. Böylece Moore Yasası artık performanstan ziyade üretim maliyetini düşürmekle ilişkilendirilmeye başlanmış; çipler küçüldükçe performansın artmadığı, sadece maliyetin azaldığı görülmüştür^[5]. Maliyetin azalmasının ardındaki bir diğer sebep de elbette Moore Yasası'nın uzun yıllardır sağladığı güven hissidir. Yıllardır kanıtlanmış maliyet düşüşü ve gelişim öngörüsü elektronik parça üreticilerine güven sağlar; onların daha uzun vadeli planlar yapabilmesini ve daha gelişmiş ürünler için rahatça yatırım yapabileceğini de sağlamaktadır^[11].

4. PEKİ ŞİMDİ NE OLACAK?

Artık üreticiler yatırım yaparken daha mı temkinli davranacak? Ya da, bir çip üzerindeki transistör sayısı her iki senede bir iki katına ulaşmıyorsa, bu gelişimin son bulunduğu anlamına mı gelmektedir? *Digital Trends* sitesinde yayımlanan Mart 2018 tarihli ve Luke Dormehl imzalı makalede bunun tam tersi, yani Moore Yasası'nın sektördeki etkisini yitirmesiyle, sektörde iyileşme yaşanacağı iddia edilmektedir. Programlamacıların, birkaç sene içinde işlemci kapasitesinin artmasıyla "zaten daha iyi çalışacağı" düşüncesiyle kodlarını iyileştirmedikleri ifade edilen makalede, Moore Yasası'nın ortadan kalkmasıyla bu sorunun çözüleceği, yazılımcıların daha etkin rol üstleneceği ifade edilmektedir. Ayrıca Dormehl, yasanın ortadan kalmasıyla grafik işletim ünitesi (GPU) gibi daha özelleşmiş ve yavaşlama problemini hafifletecek teknolojilerin hız kazanacağını altını çizmektedir^[10].

GPU teknolojisi, Moore Yasası'nın etkisini yitirmesinden sonra teknoloji üreticilerinin özellikle otonom araçlar ve altyapı ağlarında etkinleşen itici gücü olarak öne çıkmıştır. Grafik gibi bilgisayarın belirli bir alanı üzerine yoğunlaşan ve "accelerator", yani "hızlandırıcı kart" olarak tanımlanan GPU ve benzer teknolojiler, Moore Yasası sonrası hem üretim sektörünün hem de akademik

çalışmaların odak noktası haline gelmiştir. Son yıllarda işlemci hızındaki artış oranı beklenen seviyede olmayanca yönelinen bu hızlandırıcı kartlar elektronik aletlerin performansını ciddi seviyede artırarak Moore Yasası sonrasına dair endişeleri bir nebze dindirmiştir. Ancak *Extreme Tech* Yazarı Joel Hruska, Google'ın TPU'su başta olmak üzere GPU, FPGA ve ASIC gibi ünitelerin yine performans gelişimiyle, dolaylı olarak da, performans gelişiminin bağlı olduğu transistör küçülmesiyle orantılı ilerlediğine dikkat çekmektedir^[12].

4.1 Moore Yasası Sonrası Kurtarıcımız GPU ve Benzeri Teknolojiler mi?

Princeton Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünden Profesör David Wentzloff ve doktora öğrencisi Adi Fuchs'un çalışması da bunu doğrular niteliktedir. Yüksek kapasiteli bir işlemci (CPU), ona kıyasla daha düşük kapasiteli bir GPU, çeşitli işlem düğümleri ve düğüm gelişimini sağlayacak güç aralıkları kullanarak yapılan DARPA destekli çalışmada; çiplerin gelişim için daha fazla transistöre bağlanmaya hâlâ bağımlı olduğu, hızlandırıcı kartların sisteme bazı sınırlamalar getirdiği ve özellikle uzun vadede alınan verimin son derece kısıtlı olduğu ortaya konmuştur^[13]. Sonuç olarak, hızlandırıcıların olumlu etkisinin ortada olduğu ancak bunun ne kadarının HW/SW optimizasyonundan geldiğine dikkat edilmesi gerektiği, hızlandırıcıların etkisinin uzun vadede azalmakta olduğu ve Moore Yasası'nın gidişine çare olarak çip temelli özelleştirmelerin uzun vadeli bir sonuç olmadığı ifade edilmektedir^[14].

Mevcut GPU ünitelerinin iyileştirmesi üzerine yoğunlaşan NVIDIA destekli bir çalışma ise, olumlu bir çerçeve çizmektedir. GPU temelli yüksek performansın transistör küçülümüne bağlı olduğu vurgulanan çalışmada, Moore Yasası'nın sona ermesiyle tek yongalı GPU performansının yetersiz kalacağı itiraf edilmektedir. Ancak birden fazla GPU modülünü bir araya getirerek daha büyük bir GPU inşa eden araştırmacılar, Moore Yasası'nın işaret ettiğinden de yüksek ve sürdürülebilir bir performans artışı elde edebilmiştir. Parçalara ayrılan GPU'ları kolayca üretilen GPU modülleri haline getiren araştırmacılar, bunu başarmak için onları geniş bant aralığında ve enerji verimliliği yüksek sinyal teknolojileriyle bir araya getirmiştir. Üç farklı mimari optimizasyon uygulayarak model test eden ekip, optimize edilmiş bu sistemin sıradan MCM-GPU'ya göre yüzde 22,8; sisteme takılabilecek en büyük tek yongalı GPU'ya göre ise yüzde 45,5 daha yüksek hız sağladığını ortaya koymuştur^[15].

4.2 Intel ve 3 Boyutlu Transistörler

Moore Yasası sonrası yaşanan olumlu gelişmelere bir örnek de, Intel'in yeni ve üç boyutlu transistör sistemidir. Bu teknolojiye yatırım yapan şirketlerden biri Intel'dir. Düz bir yüzey yerine üç boyutlu bir modelde inşa ettiği transistörler üreten Intel, bu sayede transistörleri devreye çok daha fazla sayıda yolla bağlayabilmeyi başarmıştır^[10]. Ayrıca, üç boyutlu transistör teknolojisini ilk kez 22 nanometrelilik işlem düğümleriyle kullanan ve transistör maliyetlerini düşürmeyi başaran şirket, 7 nanometrelilik bir

GPU sistemi geliştirdiğini duyurmuştur. Bu hızlandırıcının 2021 yılında üretilen Aurora süperbilgisayarında kullanılacağı belirtilmiştir^[16]. 7 nanometrelilik başarıdan sonra Intel, kısa süre içinde 5 nanometrelilik GAA çiplerinin de piyasaya sürüleceğini bildirmiştir. Yeni teknolojinin bilgisayar performansını yüzde 3 artırırken; enerji tüketimini yüzde 50 ve çipin kapladığı alanı yüzde 45 azalttığı ifade edilmektedir^[17]. 7 nanometreye geçişin 16/14 nanometreye kıyasla ciddi bir gelişim sağlayacağı ifade edilirken, 5 nanometreye geçişin ise maliyet artışı sebebiyle sürdürülebilir olmadığından kuşku lanılmaktadır^[18].

Yasa sonrasına dair olumlu öngörülerde bulunan makaleler bunlarla da sınırlı değildir. Yaklaşık beş yıldır, bitiş teknoloji dünyasında endişelere sebep olan Moore Yasası'ndan sonra yaşanacaklara dair araştırmalar yapılmakta ve bulgular kamuoyuyla paylaşılmaktadır. *IEEE Spectrum*'da 2015 yılında yayımlanan "Moore Yasası'nın Sonu Gelişimi Hızlandıracak" başlıklı makalede de, transistörleri küçültme eğiliminin son bulmasıyla birlikte, açık kaynak yazılımların yükselişe geçeceği vurgulanmıştır. Yasanın sonunun üreticiler ve tüketiciler için de faydalı olduğu belirtilen yazıda, Moore Yasası ile açıklanan "teknolojik minyatürleşme dönemi"nin son bulmasıyla, uzun süredir hiçbir çaba harcamadan devrelerin karmaşıklıklaşıp iyileştirilmesini bekleyen programlamacıların artık devreye gireceği ifade edilmiştir^[19].

Aynı yıl yayımlanan bir başka *IEEE Spectrum* makalesinde ise bilgisayarlarda enerji tüketimine bağlı verimlilik ile Moore Yasası'nın ilişkisine değinilmektedir. Bugün verimliliğin yasada bahsedilen zaman diliminde iki katına çıkmasının imkânsız olduğu ifade edilen makalede; diğer yandan, buna gerek de olmadığı, zira modern bilgisayar ve diğer akıllı cihazların eskiye kıyasla çok daha az enerji tükettiği ve çok daha kısa süre maksimum kapasitede çalıştığı; artık hızlı işlemcili bilgisayarlardan ziyade laptop, cep telefonu, tablet gibi mobil cihazlara yönelim olduğu vurgulanmaktadır. Makalede ayrıca, artık cihazların kullanım esnasında tükettiği enerjiden ziyade, kapalı ya da bekleme konumundayken tükettiği enerjinin önemli olduğuna ve bunun da sifıra yaklaşmakta olduğuna dikkat çekilmektedir^[20].

4.3 Moore Yasası'na Veda Etmekte Erkenci mi Davranıyoruz?

Görülüyor ki Moore Yasası'nın etkisini yavaşça kaybetmeye başladığı son birkaç yıllık dönemde bilim insanları mevcut teknolojiyi her sene birkaç adım daha öteye taşıyabilmek için alternatif bir teknoloji geliştirmeyi sürdürmekte ya da mevcut sistemleri iyileştirmektedir. *MIT Technology Review*'da yayımlanan Martin Giles imzalı bir makale ise bilim insanlarına, Moore Yasası'na veda etmekte erkenci mi davrandıkları konusunu sorgulatmaktadır. Karbon nanotüpler, yani her biri tek karbon atomu genişliğinde duvarlara sahip silindireler kullanarak bugüne dek üretilen en gelişmiş çipi geliştirdiği ifade edilen MIT araştırmacıları, bunun bugünkü sistemde kullanılan silikona alternatif bulmada çok ciddi bir dönüm noktası olduğunu iddia etmektedir. Nanotüp transistörler silikona kıyasla daha hızlı olmakla kalmamakta; aynı zamanda 10

kat daha yüksek enerji verimliliği ile dikkat çekmektedir. Tek sorun, karbon nanotüplerin iki iletkenle yapılması; ilk yarı iletkenin tümleşik devre inşasına uygun olmasına rağmen, elektrik akımını bir kablo gibi ileten ikincisinin daha fazla enerji emmesi ve bunun da devre performansını düşürmesi olarak belirtilmekte, bu etkinin azaltılması için çalışmaların süreceği ifade edilmektedir^[21].

IC Insights'ın yayımladığı The McClean Report 2020'de^[22]; son 50 yılda DRAM, taşınabilir bellek, mikroişlemci ve grafik işlemcilerin Moore Yasası'nın belirttiği gelişim çizgisine ne kadar yaklaşabildiği irdelenmektedir. Örneğin Intel'in PC mikroişlemcilerindeki transistör sayısı 2010'a dek yılda yüzde 40 artarken, 2000'li yılların sonuna doğru duran artış süreci, daha sonra yüzde 25 seviyelerinde seyretmiştir. DRAM transistör sayısının 2000'li yıllara dek her sene yüzde 45 oranında arttığı ifade edilen raporda, bu rakamın 16 GB jenerasyonu tanımlayan 2016 yılından sonra ise yüzde 20'ye gerilediği belirtilmektedir. Aynı şekilde taşınabilir bellek yoğunluğu artışı 2012'de yüzde 55-60 civarındayken daha sonra bu oran yüzde 30-35 seviyesine gerilemiştir^[8]. Bu oranların yıllık olduğunu, Moore Yasası'nın ise iki yıllık gelişimi kapsadığını yinelemekte fayda var. Moore Yasası'nın iki yılda bir katlanma öngörüsünün yerine getirilebilmesi için, yıllık yüzde 35'lik büyüme elde edilmesi gerekmektedir^[22].

Bir diğer teknoloji firması Apple'ın iPhone ve iPad'lerde kullanılan A serisi uygulama işlemcilerindeki transistör sayısı da, 2013'ten bu yana yılda yüzde 43 seviyesinde artış göstermektedir. Örneğin en güncel işlemci olan A13, 8,5 milyar transistöre sahiptir. 2020 yılında tanıtılması beklenen yeni iPad Pro'nun ise yeni A13X işlemciye sahip olması beklenmekte; bu işlemcinin transistör sayısı teknoloji çevrelerince merak edilmektedir^[8].

Görüldüğü üzere teknoloji dünyasında Moore Yasası'nın öngördüğü ilerlemenin yavaşlasa da devam ettiği ya da artık bir sınıra ulaşıldığı konusunda birbirleriyle çelişen ifadeler ve araştırmalar mevcuttur. Gordon Moore 1965 yılında yazdığı ve yakın gelecekte bir yasaya dönüşeceğini belki de hiç ummadığı makalesinde, "Bir tümleşik devreye daha çok bileşen bağlamak ev bilgisayarları -ya da en azından merkezi bir bilgisayara bağlı terminaller-, otomobiller için otomatik kontrol, kişisel iletişimde kullanılacak taşınabilir ekipmanlar gibi şaşkınlık verici gelişmelerin önünü açabilir" demiştir. Bugün kullandığımız basit teknolojik aletlerin yanı sıra; kuantum üstünlüğü, yapay zekâ ile keşfedilen moleküller, hatta yaşlanma karşıtı bakımlar bile Moore Yasası'nın bilim insanlarına sunduğu programlama gücünün bir sonucudur. Peki insanlık, bu yasaya veda etmek için gerçekten hazır mı?

4.4 Veda Etmeye Hazır mıyız?

Moore Yasası'nın insanlığa katkıları aşikârken, MIT'den bilim insanlarının yaptığı araştırma, yasanın gerçekten verimli olup olmadığını sorgulatmaktadır. Araştırmaya göre 1971 yılından bu yana yarı iletken araştırmacılarının, yani bu sektörde çalışmalar yapan profesyonel bireylerin sayısı 18 kat artmıştır. Araştırmanın sonuçları,

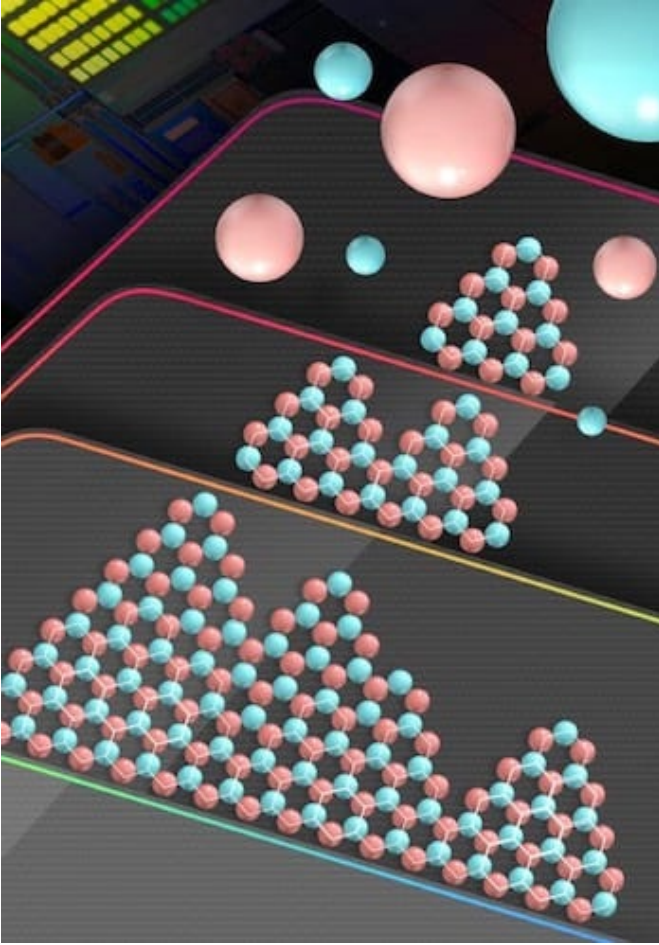
bu 18 kat artış sektörel verimlilikle kıyaslandığında, verimliliğinin aslında yılda yüzde 6,8 oranında düştüğünü göstermektedir^[22]. Dahası, gelişmiş çipler üreten bir fabrikanın işletim maliyetinin her sene yüzde 13 arttığına dikkat çekilmekte ve bu maliyetin 2022 yılına dek en az 16 milyar doları aşacağı öngörülmektedir. Aynı zamanda yeni jenerasyon çipler tasarlama iddiasında olan şirketlerin sayısı 2002'de 25 iken 2020'da sekize, günümüzde ise üçe düşmüştür.

Bu şirketlerden biri de Intel. Şirketin 14 nanometrelik çipi tanıttıktan 10 nanometrelik versiyonu ancak beş sene sonra geliştirebildiğine dikkat çeken MIT üyesi Bilgisayar Bilimcisi Charles Leiserson, Moore Kanunu'nun sonunun kesin olarak geldiğini ifade etmektedir. Carnegie Mellon Üniversitesi üyesi Profesör Erica Fuchs ise, yapay zekâ ve diğer uygulamaları geliştirenlerin Moore Yasası ile gelen maliyet düşüşü ve performans artışının eksikliğini çekeceği konusunda uyarıda bulunmaktadır. Programlamacıların kesin olmayan bir süre içerisinde ancak bir gün mutlaka mevcut teknolojinin sunabildiğinden daha güçlü bir cihaza gereksinim duyacaklarını belirten Fuchs; her amaca uygun çiplerin uzun yıllar neticesinde geliştirildiğini hatırlatarak; bunların yerine neyin geleceğinin bilinmediğini ve özellikle yapay zekâ alanındaki bilim insanlarının uzun vadede donanımsal bazı sıkıntılar yaşayabileceğini belirtmektedir^[2].

4.5 Intel'in Bulduğu Çözüm

Bu gibi sorunların farkında olan Intel firmasının Teknoloji ve Üretim Grubu Yöneticisi William Holt, 2016 yılında yaptığı açıklamada şirketin bilişim sektörünün geleceğini en az 50 yıllığına güvence altına alacak yeni bir teknoloji arayışında olduklarını duyurmuştu. Bu teknolojinin 4-5 yıl içinde devreye gireceğini açıklayan Holt, şirketin tünel transistör ya da elektronların hareketi yerine manyetik momentlerini, yani bir elektronun dönüşünü ve onun yarattığı manyetik gücü sayısal işlemler yapmada kullanan spintronik teknolojilerinden birini seçeceğini ifade etmişti. Holt, ikisinin de çip tasarımında ciddi değişimler gerektirdiğini ve her durumda hızdan feragat edilirken enerji tasarrufunda artış görüleceğini; bunun da bulut bilişimliliği, mobil cihazlar ve robotik için önemli olduğunu bildirmişti^[23]. 2018 yılının Aralık ayına geldiğimizde ise Intel, Moore Yasası'nın sona ermesine engel olmak için geliştirdiği yeni teknolojisi MESO, yani *magnetoelectric spin orbit*'i tanıtmıştır. Kuantum materyallerini kullanan cihaz, CMOS teknolojisine göre üç kat fazla anahtarlama enerjisine, beş kat az anahtarlama gerilimine, beş kat artırılmış yoğunluğa sahiptir ve günümüz bilişim sektörü için kritik öneme sahip olan standby yani bekleme sürecinde ultra düşük enerji gerektirmektedir^[24]. Diğer yandan, böyle bir buluşun ürünlerde kendine yer bulabilmesi için 12-15 sene kadar geçmesi gerektiği; CMOS'ten MESO'ya geçişin son derece büyük bir adım olduğu ifade edilmektedir. Yine de Intel'in üzerinde yaklaşık 10 yıldır çalıştığı bu projenin umut verici olduğu belirtilmektedir^[18].

Moore Yasası'nın devamı için bir diğer büyük adım da, Rice Üniversitesi bünyesinde birden fazla araştırmacının



Şekil 4: Bor ve nitrit atomları bakırın üzerinde büyük ölçekli ve sıralı altıgen bor nitrat kristalleri oluşturuyor. Bu, geleceğin iki boyutlu elektronik devrelerinin anahtar yalıtım malzemesi olabilir^[27].

katılımıyla atıldı. Kısa bir süre önce *Nature* dergisinde yayımlanan makaleye göre, bilim insanları atom kalınlığında altıgen bor nitrit (hBN) elde etmeyi başardı. Nano ölçekli transistör katmanlarının arasına yalıtkan olarak yerleştirilen hBN elektron dağılımını en üst seviyeye taşıırken; tümleşik devrenin verimliliğini engelleyen elementleri de ortadan kaldırıyor^[25].

Bu gelişmenin iki boyutlu transistör kullanan tümleşik devrelere giden yeni bir yol keşfettiği ifade ediliyor. Ancak hBN kristallerinin gerçekten işe yaraması için içindeki tüm üçgenlerin birbirine bağlı olması ve aynı yöne bakmaları şart. Normal şartlar altında yukarıdan bakıldığında bor ve nitrojen atomlarından oluşmuş, süper

pozisyonda iki uzak üçgen kafes gibi görünen hBN'yi mükemmel şekle kavuşturmak için bilim insanları, onu yüksek ısıda tavllanmış bakırı safir altlıkla ve hidrojen eşliğinde kullanmıştır^[26].

4.6 “Moore Yasası Sonsuza Dek Sürebilir”

İki boyutlu elektronik devreler üzerine yoğunlaşan bir diğer ekip de, Santa Barbara Üniversitesi Kaliforniya, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği bölümünden Profesör Kaustav Banerjee önderliğinde çalışmalarını sürdürmektedir. “Yoğun bir tümleşik devreye sıkıştırılan bileşenler artık birbirlerine karışma ya da fonksiyonelliklerini yitirme sınırında. Güç dağılımını düşürme ve tümleşik devre üretiminin artan maliyeti konusu da sıkıntılar yaşıyor” diyen Banerjee, ancak bunun elektronik aletler için bir üst sınır olmadığını, yeni teknolojilerle Moore Yasası'nın sonsuza dek sürmesinin sağlanabileceğini iddia etmektedir. Bunun yolu da nispeten yeni ve umut vadeden bir teknoloji olan iki boyutlu materyalleri tek yongalı üç boyutlu (M3D) entegrasyon uygulamalarıyla ultra kompakt ancak yüksek performanslı elektronik çipler üretmek. Ekip üyelerinden Kamyar Parto, iki boyutlu materyallerin düz durumdaki ısı iletim katsayısının mevcut teknolojinin kullandığı silikona kıyasla çok daha yüksek olduğuna dikkat çekmektedir.

5. SONUÇ

55 yıldır teknoloji dünyasının bir parçası olan, hatta bazı bilim insanlarına göre teknolojik gelişmelere yön vermiş Moore Yasası hakkında birbiriyle çelişen ifadeler ve akademik çalışmalar mevcuttur. Pek çok bilim insanı özellikle fizik kurallarında bir sınıra ulaşıldığı iddiasıyla iki senede bir bileşen sayısının ikiye katlanmasının artık imkânsız olduğunu beyan etmektedirler. Dahası, Moore Yasası'nın bir yasadan ziyade mühendisleri teşvik eden bir kehanete dönüştüğü ya da bu yasanın verimlilik bazında hiç de yararlı olmadığı iddiaları da gündemi meşgul etmektedir. Diğer yandan, karbon nanotüplerin kullanımı, tavllanmış bakırın etkisiyle kusursuz bir altıgen şekline bürünen bor nitritin geliştirilebilmesi ve iki boyutlu materyaller üzerine yapılabilecek yüksek performanslı çip çalışmalarının Moore Yasası'nın ömrünü uzatabilme potansiyeline sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu yasanın geleceğini ise, çeşitli akademik disiplinlerden farklı yaklaşımlarla fizik kurallarının çevresinden dolanmak isteyen bilim insanları belirleyecektir.

KAYNAKÇA

- [1] Pries, Kim H.; Dunnigan, Robert; (2014), "Big Data Analytics", *CRC Press* (24 Ekim 2014), <https://bit.ly/34vayOq>
- [2] Rotman, David; (2020), "We're not prepared for the end of Moore's Law", *MIT Technology Review*, (24 Şubat 2020), <https://www.technologyreview.com/s/615226/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/>
- [3] Knapp, Alex; (2011), "The Seduction Of The Exponential Curve", *Forbes*, (17 Kasım 2011), <https://www.forbes.com/sites/alexknapp/2011/11/17/the-seduction-of-the-exponential-curve/#756e6fe24807>
- [4] Intel, "Moore's Law", https://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/index.htm?iid=tech_mooreslaw+body_presskit
- [5] Mack, Chris; (2015), "The Multiple Lives of Moore's Law", *IEEE Spectrum*, (30 Mart 2015), <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/processors/the-multiple-lives-of-moores-law>
- [6] Her-An, (2017), "Gordon Moore - Moore Yasası Üzerine", Youtube, (16 Temmuz 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=AzDRaFP9XAo>
- [7] Pries, Kim H.; Dunnigan, Robert; (2015), "Big Data Analytics", *Google*, (5 Şubat 2015), <https://books.google.com.tr/books?id=x1C3BgAAQBAJ>
- [8] *Design & Reuse*, (2020), "Transistor Count Trends Continue to Track with Moore's Law", (5 Mart 2020), <https://www.design-reuse.com/news/47652/transistor-count-trends.html>
- [9] Courtland, Rachel; (2015), "Five Things You Might Not Know About Moore's Law", *IEEE Spectrum*, (30 Nisan 2020), <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/devices/five-things-you-might-not-know-about-moores-law>
- [10] Dormehl, Luke; (2018), "Computers can't keep shrinking, but they'll keep getting better. Here's how", *Digital Trends*, (17 Mart 2018), <https://www.digitaltrends.com/computing/end-moores-law-end-of-computers/>
- [11] Hutcheson, Dan; (2015), "Graphic: Transistor Production Has Reached Astronomical Scales", *IEEE Spectrum*, (2 Nisan 2015), <https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/transistor-production-has-reached-astronomical-scales>
- [12] Hruska, Joel; (2019), "Specialized Chips Won't Save Us From Impending 'Accelerator Wall'", *Extreme Tech*, (4 Mart 2019), <https://www.extremetech.com/computing/286809-specialized-chips-wont-save-us-from-impending-accelerator-wall>
- [13] Fuchs, Adi; Wentzlaff, David; "The Accelerator Wall: Limits of Chip Specialization", *Princeton University*, <http://parallel.princeton.edu/papers/wall-hpca19.pdf>
- [14] Fuchs, Adi; Wentzlaff, David; (2019), "Hitting an Accelerator Wall: When Specialized Chips Meet the End of Moore's Law", *ACM Sigarch*, (4 Şubat 2019), <https://www.sigarch.org/hitting-an-accelerator-wall-when-specialized-chips-meet-the-end-of-moores-law/>
- [15] Arunkumar, Akhil; "MCM-GPU: Multi-Chip-Module GPUs for Continued Performance Scalability", *NVIDIA*, https://research.nvidia.com/sites/default/files/publications/ISCA_2017_MCMGPU.pdf
- [16] *OptoCrypto*, (2019), "Ponte Vecchio, Intel confirms new 'Exascale' HPC graphics card", 19 Kasım 2019), <https://optocrypto.com/ponte-vecchio-intel-confirms-new-exascale-hpc-graphics-card/>
- [17] *OptoCrypto*, (2020), "Intel forecasts commercial availability of 5nm GAA chips in 2023", (11 Mart 2020), <https://optocrypto.com/intel-forecasts-commercial-availability-of-5nm-gaa-chips-in-2023/>
- [18] Hruska, Joel; (2018), "With Spintronics, Intel Sees Efficiency, Density Scaling Far Beyond CMOS", *Extreme Tech*, (4 Aralık 2018), <https://www.extremetech.com/extreme/281684-intel-meso-device-offers-efficiency-density-scaling-far-beyond-cmos>
- [19] Huang, Andrew bunnie; (2015), "The Death of Moore's Law Will Spur Innovation", *IEEE Spectrum*, (31 Mart 2015), <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/design/the-death-of-moores-law-will-spur-innovation>
- [20] Koomey, Jonathan; Naffziger, Samuel; (2015), "Moore's Law Might Be Slowing Down, But Not Energy Efficiency", *IEEE Spectrum*, (31 Mart 2015), <https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/moores-law-might-be-slowing-down-but-not-energy-efficiency>
- [21] Frankel, Felice; (2019), "The world's most advanced nanotube computer may keep Moore's Law alive", *MIT Technology Review*, (30 Ağustos 2019), <https://www.technologyreview.com/s/614247/the-worlds-most-advanced-nanotube-computer-may-keep-moores-law-alive/>
- [22] Bloom, Nicholas; (2017), "Great Ideas Are Getting Harder to Find", *MITSloan Management Review*, (20 Aralık 2017), <https://sloanreview.mit.edu/article/great-ideas-are-getting-harder-to-find/>
- [23] Bourzac, Katherine; (2016), "Intel: Chips Will Have to Sacrifice Speed Gains for Energy Savings", *MIT Technology Review*, (5 Şubat 2016), <https://www.technologyreview.com/s/600716/intel-chips-will-have-to-sacrifice-speed-gains-for-energy-savings/>
- [24] Manipatruni, Sasikanth; (2018), "Scalable energy-efficient magnetoelectric spin-orbit logic", *Nature*, (3 Aralık 2018), <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0770-2>
- [25] Chen, Tse-An; (2020), "Wafer-scale single-crystal hexagonal boron nitride monolayers on Cu (111)", *Nature*, (4 Mart 2020), <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2009-2>
- [26] *Science Daily*, (2020), "A small step for atoms, a giant leap for microelectronics", (4 Mart 2020), <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/03/200304141439.htm>
- [27] Williams, Mike; (2020), "A small step for atoms, a giant leap for microelectronics", *Rice University*, (4 Mart 2020), <https://news.rice.edu/2020/03/04/a-small-step-for-atoms-a-giant-leap-for-microelectronics/>



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

