

Moore Kanunu

ve Post-Silisyum Çağına Doğru



Birbirine paralel çalışan 6 çekirdekli mikroçip AMD Opteron



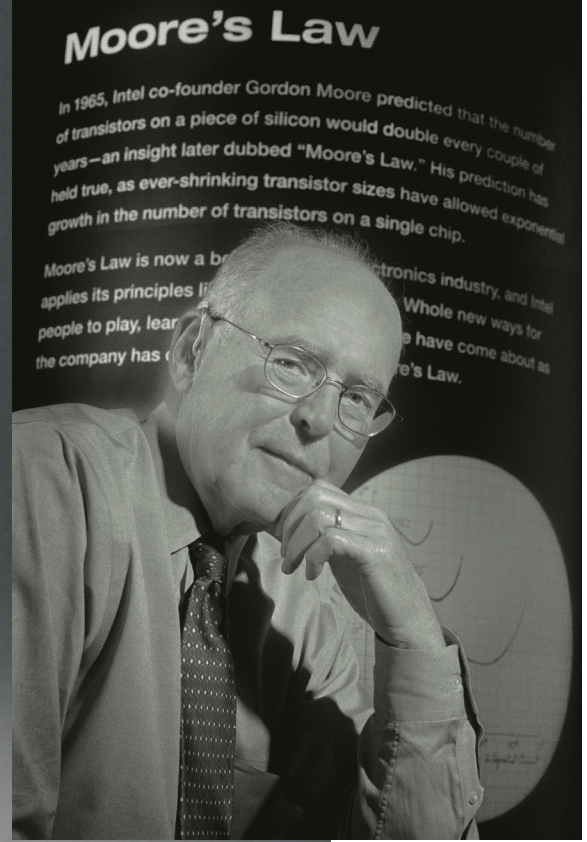
90'lı yılların başından itibaren bilgisayarların kapasitesinde ve işlem gücünde yaşanan ve yıllar öncesinden Gordon Moore tarafından da öngörülen baş döndürücü hızlanmanın nefesi son yıllarda kesilmeye başladı. Gordon Moore, sadece Moore Kanunu olarak da bilinen bu efsanevi öngörünün kâşifi değil, aynı zamanda dünyanın en büyük yarı iletken üreticisi olan Intel'in kurucularından. Fakat bu yavaşlamanın nedeni, birçok kullanıcının düşündüğü gibi üreticilerin daha yüksek kapasiteli bilgisayar üretimini gerekli görmemesi değil, aksine günümüz elektroniğinin ve bilgisayarlarının ham maddesi sayılan silisyum elementinin bazı özelliklerinden kaynaklanan doğal sınırlamalar. Efsanevi Moore Kanunu'nun 2020 başlarında geçerliğini yitirmesi ve bunu takiben post-silisyum çağına girilmesi bekleniyor. O zamana kadar mikroişlemci üretimindeki başlıca faktör olan silisyumun yerini alacak yeni bir maden bulunamaması veya yeni bir teknoloji geliştirilememesi durumunda ise yeni bir ekonomik krizin daha dünya ekonomisinin kapısını çalması hayli yüksek bir olasılık.

Moore Kanunu'nun kâşifi
Gordon Moore

Gordon Moore

3 Ocak 1929'de ABD'nin Kaliforniya eyaletinin San Francisco kentinde doğan Gordon Earle Moore, dünyaca ünlü yarı iletken üreticisi Intel'in kurucusu ve mikroelektronik alanında Moore Kanunu olarak bilinen en önemli fiziksel gözlemlerden birinin sahibidir. 1950 yılında Kaliforniya Üniversitesi'nde (*University of California*) kimya alanında lisans öğrenimini tamamladı, 1954'te ise Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde (*California Institute of Technology*) kimya ve fizik dallarında doktora derecesi aldı. 1965 yılında tarihe kendi adıyla geçen Moore Kanunu'nu keşfederek dikkat çeken Gordon Moore, 18 Temmuz 1968'de Robert Noyce ile birlikte günümüzün en büyük yarı iletken üreticisi olan Intel'i kurdu.

Moore uluslararası alanda birçok ödülün de sahibi. 1990'da kendisine dönemin ABD Başkanı tarafından Ulusal Teknoloji Madalyası, 2002'de yine dönemin ABD Başkanı George W. Bush tarafından Başkanlık Özgürlük Madalyası verildi. Moore, son olarak 2008 yılında New York merkezli Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) tarafından entegre devre alanındaki çığır açan çalışmaları ve MOS bellekleri, bilgisayar mikroişlemcileri ile yarı iletken endüstrisinin gelişimine yaptığı önderlikten dolayı IEEE Onur Madalyası'na layık görüldü.



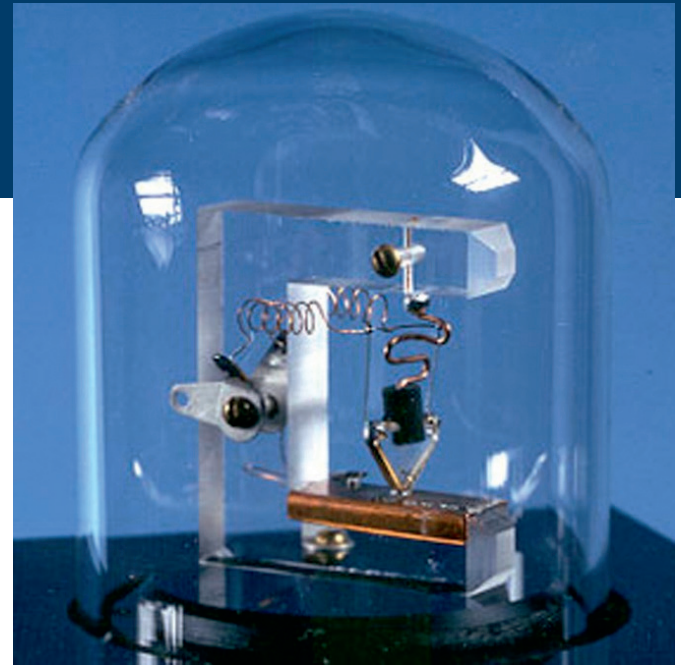
Transistör

İlk transistör Avusturya-Macar asıllı bilim adamı Julius Edgar Lilienfeld ile Alman bilim adamı Oskar Ernst Heil'in 1925 ile 1934'te geliştirdikleri temel fikirlere dayanarak 1947 yılında Bell Laboratuvarları'nda çalışan ABD'li bilim insanları W. Shockley, J. Bardeen ve W. Brattain tarafından geliştirildi. Bu elektronik yapı taşına transistör adını veren kişi ise ABD'li bilim adamı John R. Pierce'tir. Transistörler, aynı bir vananın keserek veya açarak su akışını kontrol etmesi gibi, bir devredeki elektrik akımını ileterek veya keserek o devredeki elektrik akımının kontrol edilmesini sağlayan elektronik bir yapıtaşı olarak düşünülebilir. Shockley, Bardeen ve Brattain 1956 yılında, yarı iletkenler üzerine çalışmalarından ve transistör etkisinin keşfinden dolayı Fizik dalında Nobel Ödülü'ne layık görüldüler.

İlk önceleri germanyum adlı bir elementten üretilen transistörler 1950'lerin sonuna doğru silisyumdan üretilmeye başlandı. 1960'lı yıllardan itibaren verimsiz ve kullanışsız elektron tüplerinin yerini almaya başlayan transistörlerle önceleri sadece yüzlerce, sonra binlerce, daha sonra

da yüz binlerce ve milyonlarca transistöre sahip entegre devreler ve mikroçipler üretilmeye başlandı ve dijital çağın kapısı aralandı. Günümüzde bir mikroişlemci genelde milyarlarca transistörden oluşmaktadır. Eğer transistörler icat edilmeseydi modern mikroelektronik mümkün olmayacak ve dolayısıyla bilgisayarlar ve başka birçok elektronik aletin geliştirilmesi mümkün olmayacaktı. Dijital çağın mikroelektronik ile başladığını, mikroelektronik dolayısıyla da bilgisayar alanındaki gelişmelerdeki hızlanmanın transistörlerin küçülmesiyle doğru orantılı olduğunu tekrar hatırlarsak, transistörlerin hayatımızdaki önemi daha da iyi anlaşılacaktır.

Çalışan ilk transistörün sonradan yapılmış bir modeli



Bilgisayar ve elektronik endüstrisinin dünya başkenti Silisyum Vadisi (San Francisco, ABD)



Moore Kanunu ve Silisyum Çağı

Bilgisayar dünyasının sürekli gelişmesindeki en önemli faktörlerden biri bilgisayarların "beynini" temsil eden mikroişlemcilerin işlem gücüdür. Günümüzde üretilen her mikroişlemci milyarlarca transistörden oluşur. Genel olarak bir mikroişlemcide kullanılan transistör sayısı arttıkça, mikroişlemcinin işlem gücü de bu sayıyla doğru orantılı olarak artar. Bundan dolayı bir mikroişlemcinin transistör sayısı o mikroişlemcinin kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Örneğin henüz 70'li yılların başlarında mikroişlemcilerin sadece 2000-3000 transistörü varken, bu sayı 2011'de 2.270.000.000'a günümüzde ise 5.000.000.000'a ulaşmıştır (bkz. Ege, B., "Kumdan Mikroişlemciye Uzanan Uzun İnce Yol", *Bilim ve Teknik*, s. 44-47, Nisan 2012). Görüldüğü gibi bir mikroişlemcide kullanılan transistör sayısı neredeyse yıldan yıla katlanarak artıyor, fakat bu süreç nereye kadar devam edebilir? Bu soruya en iyi cevabı yine Gordon Moore veriyor. Moore bu gerçeği belki de herkesten önce görmüş ve elektronik dünyasındaki bu gelişimi Amerikan elektronik dergisi *Electronics*'de 19 Nisan 1965'te yayımlanan makalesinde dile getirmişti. Moore Kanunu olarak da bilinen bu öngörüye göre bir mikroişlemcideki transistörlerin sayısı en geç iki yılda bir ikiye katlanıyor. Moore Kanunu hâlâ geçerliğini koruyor, bunun en önemli nedeni de günümüzde yarı iletken teknolojisinin temel taşı olan silisyum elementinin kullanımında doğal sınırlara ulaşılmamış olması. 2007'de bir konferansta yöneltilen bir soru üzerine Gordon Moore'un kendisi de, kendi adıyla anılan bu kanunun en geç 2020 başlarında geçerliliğini yitirmesini beklediğini belirtmiştir.

Silisyum

Silisyum doğada çok fazla miktarda bulunan kimyasal elementlerden biridir. Sembolü Si, atom numarası 14'tür. Silisyum, hem bir yarı metal hem de bir yarı iletkenidir. Doğada, özellikle kumda çok fazla silisyum bulunur. Bundan dolayı transistör, bellek, mikroişlemci gibi elektronik yapı taşlarının üretimindeki ana malzemelerden biri kumdur (silisyum, az miktarda olsa da insan vücudunda bile bulunur). 1817'de İskoçyalı kimyager Thomas Thomson tarafından (1773-1852) silisyumun İngilizcede silicon olarak adlandırılması teklif edilmiştir. Buna göre -on eklentisi silisyumun, karbon (carbon) ve bor (boron) ile "akrabalığını" simgeler.

Silisyum, en azından içinde bulunduğumuz dönem için, bilgisayar ve elektronik yani yarı iletken endüstrisinin olmazsa olmazıdır. Entegre devrelerin mikroişlemcilerin ve daha başka birçok mikro mekanik sistemin geliştirilmesi silisyum madeni sayesinde mümkün olmaktadır.

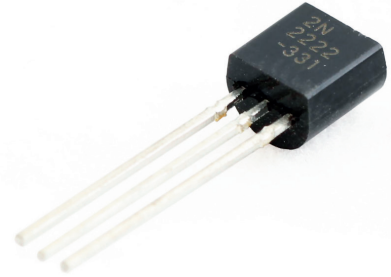
Silisyum Vadisi (*Silicon Valley*)

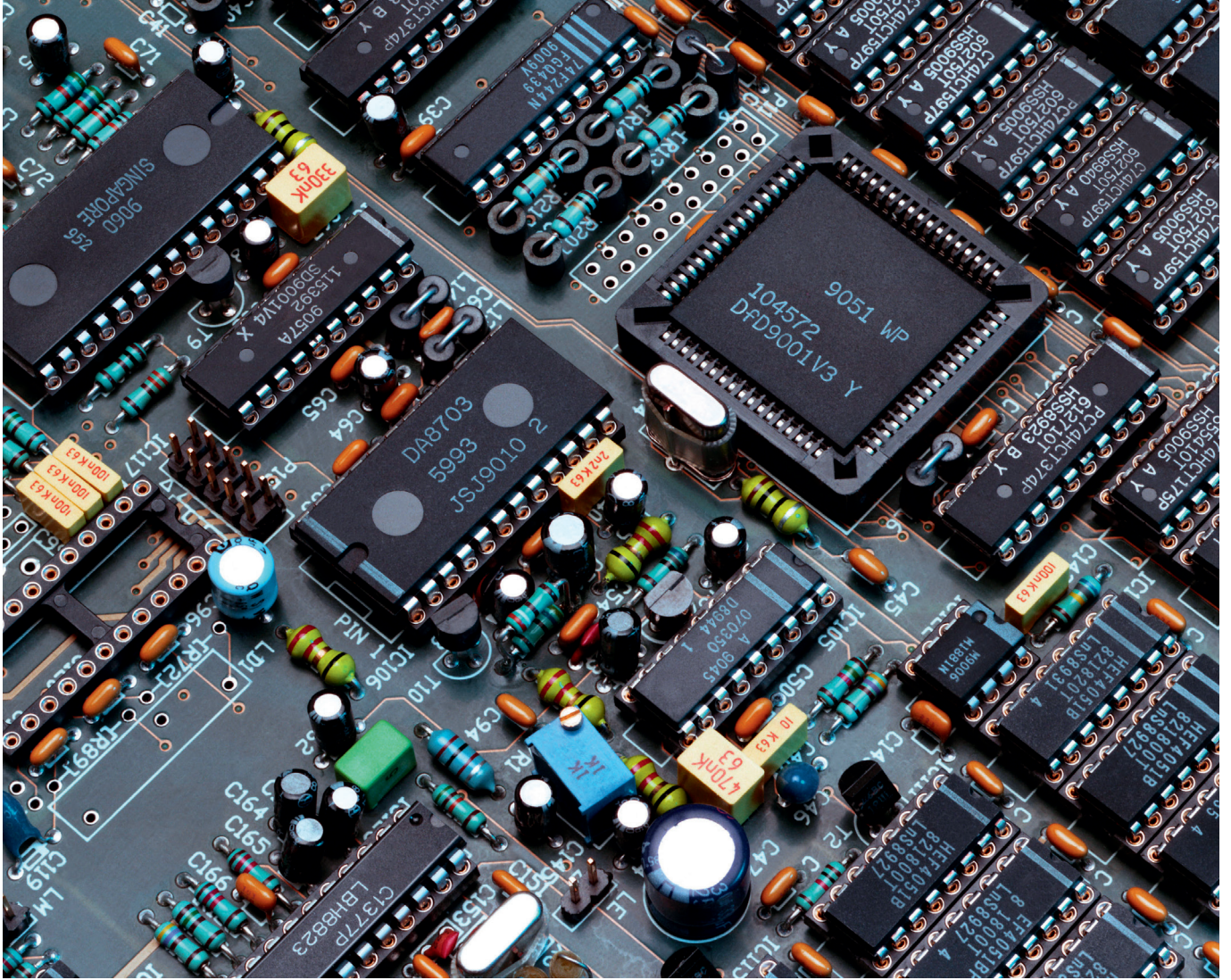
Bilgisayar ve elektronik endüstrisinin kalbi *Silicon Valley* (San Francisco, ABD) ismini silisyum madeninden alıyor. Yani "silisyum" sözcüğünün İngilizce karşılığı *silicon*'dur, dolayısıyla vadinin isminin de Türkçeye Silisyum Vadisi olarak çevrilmesi gerekir. İngilizcesi *silicon* olan silisyum ile İngilizcesi *silicone* olan silikon arasında doğrudan bir ilgi bulunmamasına rağmen, bu iki sözcük çoğu zaman birbirleriyle karıştırılır.

Silisyum Transistörleri

Bugünkü teknolojiyle üretilen en küçük transistörün çapı 30 atom civarında. Bilim insanları daha da ufak transistörler üretmek için sürekli yeni fikirler geliştiriyor, ama bu sürecin sonsuz olmasına da imkân yok. Bunun birinci nedeni transistörler küçüldükçe akım yollarının da doğru orantılı olarak kısalması. O zaman, çok daha hızlı çalışan transistörlerin ürettiği ısının uzaklaştırılması daha da zorlaşıyor ve transistörler neredeyse kendi kendilerini eritecek kadar ısınıyor. İkinci ama bir o kadar önemli neden de kalınlığı yaklaşık 5-10 atomdan daha az olan transistörlerin üretiminin, bu büyüklükteki transistörlerin sağlıklı çalışması için gerekli elektriksel yüke sahip olamaması ve kuantum teorisinin belirsizlik ilkesine göre yine bu büyüklükteki bir yapıdaki elektronların konumlarının belirsizliğinin kısa devreye yol açması.

Tüm bu gerçekler artık silisyumdan yapılan transistörlerin, dolayısıyla günümüz bilgisayar üretim teknolojisinin yavaş yavaş da olsa sınırlarına dayanmakta olduğunu ve bilgisayar teknolojileri üretiminin başkenti Silisyum Vadisi'nin bir an önce silisyum teknolojisine alternatif teknolojiler bulması gerektiğine işaret ediyor.

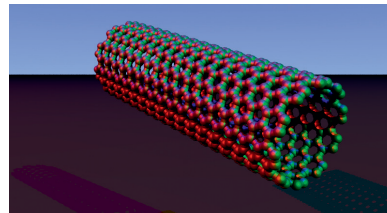




Post-Silisyum Çağına Doğru

Post-silisyum çağına doğru hızla ilerlerken, bilim insanları silisyumun yerinin hangi elementle veya hangi yapay maddeyle doldurulabileceği üzerine kara kara düşünmeye devam ediyor. Bu konudaki düşünceler sadece bir veya birkaç atom büyüklüğündeki transistörlerin üretiminden, hesaplamaların elektronlar yerine fotonlarla yapıldığı optik bilgisayarlara ve yine hesaplamalar için DNA ve proteinler gibi biyolojik moleküllerin kullanıldığı biyo bilgisayarlara (DNA bilgisayarlara) kadar uzanıyor. Hesaplamaların elektronlar yerine atomlarla yapıldığı kuantum bilgisayarlara da yine başka bir ümit kapısı (bkz. Ege, B., “Kuantum Mekaniğinden Kuantum Bilgisayarlarına”, *Bilim ve Teknik*, s. 12-14, Ekim 2012). Sonuç olarak bu alandaki yenilikçi düşünce ve fikirlerden ne kadarının bir gün laboratuvarlardan çıkıp gerçekten seri üretime geçebilecek olgunluğa erişebileceği henüz meçhul, ama kesin olan bir şey varsa o da bu sürecin henüz daha emekleme döneminde olduğu, dolayısıyla gelişmesi için daha çok zaman ihtiyaç duyulduğu.

Fakat masamızın üstündeki bilgisayarlar elektronlarla hesaplama yapmaya devam ettiği sürece insanoğluna bu alandaki en büyük yardım şu iki alandan gelecek gibi görünüyor: Nanoteknoloji ve paralel hesaplama. Günümüzde nanoteknoloji alanında karbon ve karbon nanotüpler ile yapılan çalışmalarda daha şimdiden müthiş gelişmeler yaşansa da ve bu alan orta vadede en çok gelecek vaat eden araştırma alanlarından biri olarak gözükse de, kısa vadedeki tek gerçek çözüm kaynağı paralel hesaplama gibi görünüyor.



Tek katmanlı karbon nanotüp

Paralel Hesaplama

Bilgisayarların performansının artırılması konusunda şu an için en elle tutulur ve ümit verici çözüm paralel hesaplama demiştik. Paralel hesaplama hayli basit ama o derece etkili bir fikre dayanıyor: Bir mikroçipe birden fazla mikroişlemci yerleştirilerek bunların her işlemi ortaklaşa yapmasının sağlanması ve böylece tüm işlemlerin bir tek işlemcinin gerçekleştirebileceğinden çok daha kısa bir sürede yapılması. Intel ve AMD gibi dünyanın en büyük yarı iletken üreticileri günümüzde halen aktif bir şekilde yararlanan bu teknolojiden, bir mikroçipe yerleştirilen çekirdeklerin sayısını mümkün olduğunca artırarak daha da fazla yararlanmaya çalışıyor. Dört çekirdekli işlemcilerin artık akıllı telefonlarda bile neredeyse standart haline geldiği günümüzde çıta çoktan yükselmiş durumda; hem de sekiz çekirdekli ve on iki çekirdekli mikroçiplere.

Yine paralel hesaplama ilkesine göre çalışan süper bilgisayarların ise genelde yüz binlerce hatta milyonlarca mikroişlemcisi yani çekirdeği var. Örneğin Haziran 2013 itibarıyla dünyanın en hızlı süper bilgisayarı unvanına sahip olan Çin yapımı *Tianhe-2*'nin toplam 3.120.000 çekirdeği var. Cray Inc. (ABD) tarafından üretilen dünya ikincisi *Titan*'ın 560.640, IBM (ABD) tarafından üretilen dünya üçüncüsü *Sequoia*'nın ise toplam 1.572.864 mikroişlemcisi var. IBM tarafından açıklandığına göre *Sequoia*, 6.700.000.000 kişinin hesap makinesi kullanarak 320 senede yapabileceği işlemi sadece bir saat içinde gerçekleştiriyor, sadece bu gerçek bile paralel hesaplamanın gücünü gözler önüne seriyor (bkz. Ege, B., "Süper Bilgisayarlar", *Bilim ve Teknik*, s. 62-66, Mayıs 2012). Fakat kolaylıkla tahmin edilebileceği ve yukarıdaki kısa listenin de işaret ettiği gibi mikroişlemci sayısı kadar her mikroişlemcinin kapasitesi (örneğin mikroişlemcinin önbellek büyüklüğü, işlem hızı) ve tüm sisteme ait genel mimarinin de performansa çok büyük etkisi var. (Dikkat edilirse *Titan*'ın daha az mikroişlemcisi olmasına rağmen işlem gücü *Sequoia*'ninkinden daha yüksek.) Sonuç olarak gerek süper bilgisayar olsun gerekse çok çekirdekli masa üstü bilgisayarınız hatta akıllı cep telefonunuz, çok çekirdekli bir sistemde yüz binlerce hatta milyonlarca mikroişlemciyi birbiriyle uyumlu bir şekilde çalıştırmak hayli zor. Bu ancak özel olarak geliştirilmiş yazılımlar yoluyla gerçekleştirilebilir. Söz konusu yazılımlar, bir yandan her bir çekirdek arasındaki görev dağılımını yaparken diğer yandan dona-

nım kaynaklarını ihtiyaca göre tahsis edip her bir çekirdekten gelen işlem sonuçlarını büyük bir hızla ve doğru bir şekilde birleştirmek zorunda.

Fakat paralel hesaplama konusunda daha kat edilmesi gereken uzun bir yol olduğunu bize sadece bu konu üzerine çalışan bilim insanları değil, tabiat ana da söylüyor. Nitekim en müthiş bir şekilde paralel çalışan sistemlerin başında insan beyni geliyor. Manyetik Rezonans Görüntüleme (*Magnetic Resonance Imaging*, kısaca MRI) yoluyla elde edilen görüntülerde düşünmekte olan bir beyinde aynı anda farklı bölgelerin birden etkinleştiği gözlemleniyor. Bilim insanlarının açıklamalarına göre bu, insan beyninin bir görevi milyarlarca parçaya bölerek bunların her birini beynin farklı farklı bölgelerinde işleme koyduğunu ve daha sonra her bir bölgeden gelen sonuçları birleştirerek mükemmel sonuçta eriştiğini gösteriyor. Bu durum aynı zamanda bilim insanları tarafından, saatte ancak 360 km'lik bir hızla birbirleriyle iletişim kurabilen nöronların, neredeyse ışık hızıyla çalışan bilgisayar ve süper bilgisayarlardan nasıl daha hızlı ve mükemmel bir şekilde çalıştığının da tek açıklaması ve kanıtı sayılıyor.

Sonuç

Moore Kanunu'nun geçerliliğini yitirmesi kaçınılmaz olarak sadece silisyum çağının sonunu haber vermekle kalmıyor aynı zamanda yakın bir gelecekte itibaren dünyamızın günümüzdeki elektronik tabanlı bilgisayarların yanı sıra kuantum, optik veya DNA tabanlı bilgisayarları kullanmaya başlaması gerektiğine de işaret ediyor. Bu aynı zamanda tüm hesaplamaların elektronlar yerine atomlar, fotonlar veya biyolojik moleküllerle yapılmaya başlanarak şu anda silisyumdan üretilen elektronik tabanlı transistörlerde yaşanan büyüklük problemlerinin de önemli ölçüde aşılması demek. Dolayısıyla ilk başta her ne kadar kulağa ürkütücü gelse de, dünya medeniyetinin en önemli unsurlarından birini temsil eden elektronik sistemler de bir gün ömrünü doldurarak insanlığa veda edecek gibi görünüyor.

Kaynaklar

- Kaku M., *Die Physik der Zukunft-Unser Leben In 100 Jahren*, Rowohlt Verlag GmbH, 3. Basım, s. 289-292, Aralık 2012.
- Fischetti, M., "Künftige Mikrochips – Alternativen zum Silizium", *Spektrum der Wissenschaft - Spezial*, Sayı 3/13, s.6-12, 2013.
- Radack, D.J., Zolper, J.C., "A Future of Integrated Electronics: Moving off the Roadmap", *Proceedings of the IEEE* 96, 2 Şubat 2008.
- Ran, T., Kaplan, S., Shapiro, E., "Molecular Implementation of Simple Logic Programs", *Nature Nanotechnology*, Sayı 4, s. 642-648, Ağustos 2009.