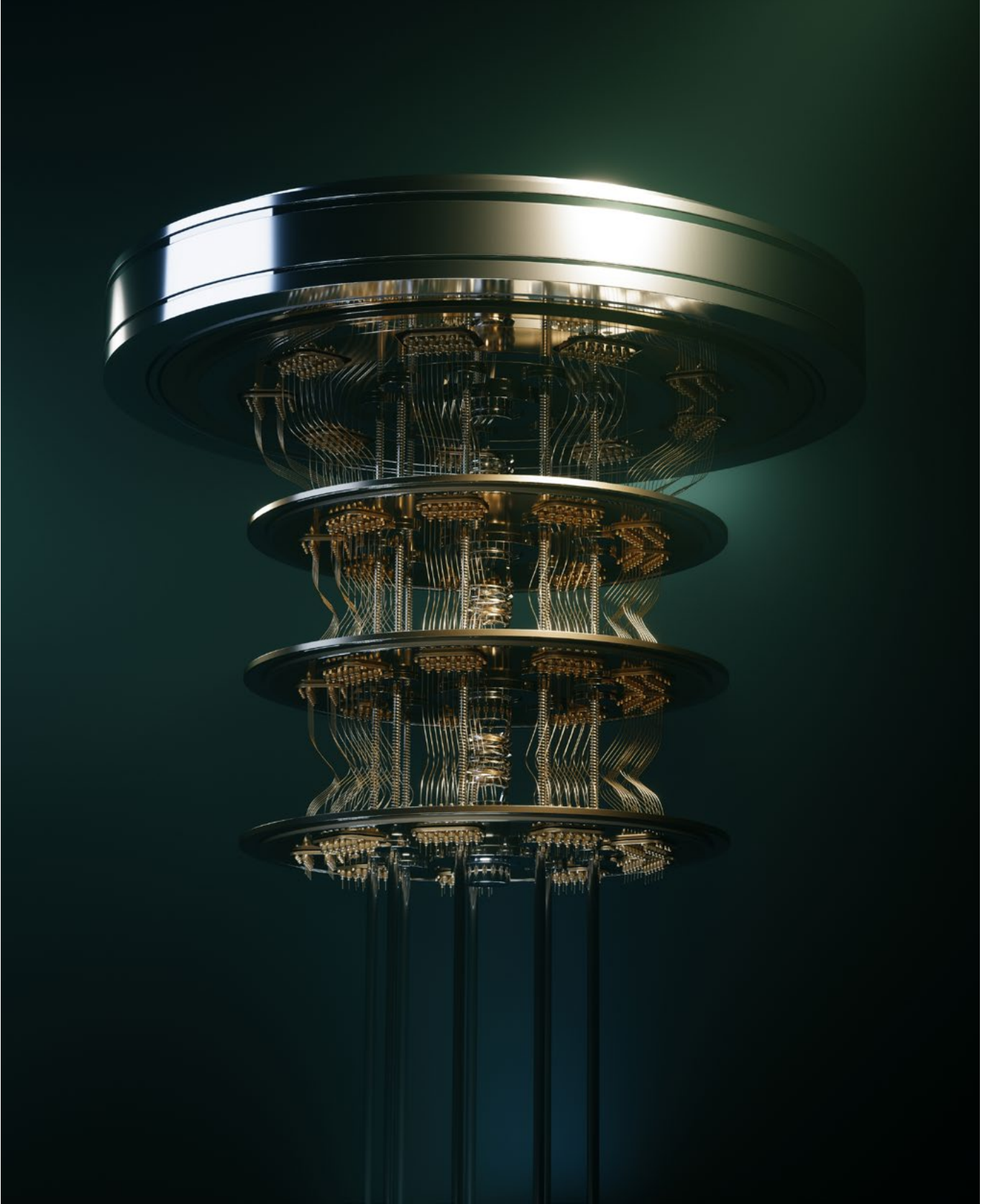


ÇİP BOYUTU İLE KUANTUM



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.



1. GİRİŞ

Dünya, teknoloji ilerledikçe gelişmiş ve bu gelişim beraberinde yeni çağların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Öncelikle askeri alanda kendini gösteren devrim niteliğindeki yeni teknolojiler, toplumlar geliştikçe sivil alanlarda da ciddi etkiler yaratmış ve dünyanın gelişimine büyük destek sağlamıştır. Teknolojideki ilerlemeyle bilgisayarlar insanların hayatına girmiş, zamanla sadece askeri sistemler için tasarlanan internet, herkesin vazgeçilmez hâline gelmiş ve beraberinde akıllı telefonlar geliştirilerek insanların benzeri görülmemiş bir şekilde dijital ortamlarda buluşması sağlanmıştır.

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelerden özellikle dikkat çeken kuantum teknolojisi ve bu teknolojiyi destekleyen araçlar, yeni nesil bir devrimin yaşanması için bir imkân ortaya çıkarmıştır. Kuantum teknolojisinin vazgeçilmez bileşenlerinden biri olan kuantum çipleri bu devrimin ne kadar hızlı gelişeceğini en önemli etkenlerdendir. Kuantum çipleri geleceğin bilişim dünyasında büyük değişiklikler yaratabilme potansiyeline sahiptir.

Analizimizde, günümüz ve geleceğin sistemlerinde özellikle büyük öneme sahip olan kuantum çiplerinin gelişimi, etkileri ve pazar verilerine değinilecektir. Ülkelerin kuantum çip teknolojisi üzerine çalışmalarının da değerlendirileceği çalışmada, yakın zamanda üretimi kolaylaştıracak en yeni gelişmelere yer verilecektir.

2. KUANTUM TEKNOLOJİSİ

Kuantum teknolojisi, kuantum mekanikleri (atom altı parçacık fiziği) prensipleriyle, kuantum dolaşıklığı ve kuantum süper pozisyonunu da kapsayan bir teknoloji sınıfıdır. Günümüzde günlük hayatımızın bir parçası olan akıllı telefonlar dahi bir çeşit kuantum teknolojisi ürünü sayılmaktadır. Akıllı telefonların kullandığı yarı iletkenler kuantum fiziğinin bir ürünüdür.

Yaklaşık 50 yıl önce nükleer enerji ile tekrar gündeme gelen kuantum teknolojisi, günümüzde gelişen mühendislik uygulamaları ve araştırmalarla daha büyük bir potansiyel sergilemeye başlamıştır. Günümüzde daha fazla kontrol edilebilen kuantum dolaşıklığı ve kuantum süper pozisyonu ile yeni teknolojilerin birleşimi, çok daha fazla cihazın ve teknolojinin gelişimini desteklemektedir. Bu cihazlar ve teknolojiler arasında daha güvenilir navigasyon/konumlama ve zamanlama sistemleri, daha güvenli iletişim sistemleri, çok daha doğru sonuç verebilen sağlık görüntüleme sistemleri ve çok güçlü bilişim sistemleri bulunmaktadır^[1].

Aslında ilk olarak 20'nci yüzyılın başlarında ortaya çıkan çok önemli iki gelişmeden biri olan kuantum teorisi, enerjinin kuantum olarak adlandırılan birbirinden bağımsız paketlerden oluştuğunu öne sürmektedir. Bu sayede atom altı parçacıklarla ilgili çalışmalar güçlenmiştir. Bilim insanları Niels Bohr ve Max Planck'ın yaptığı çalışmalar ile ilk kuantum devrimi ortaya çıkarmıştır^[2].

2.1 Kuantum Devrimi Aşamaları

Teknolojik olarak yaşanan ilk kuantum devrimi, atomlardaki enerji durumları gibi fiziksel niceliklerin ayrık doğasına dayanmaktadır. Elektromanyetik radyasyonun fotonları, iyi tanımlanmış enerji durumlarını manipüle etmemize izin vermektedir^[3].

İlk kuantum devrimi ile ortaya çıkan yarı iletkenler, küresel konumlama sistemleri (GPS), manyetik görüntüleme sistemleri (MRI) ve lazerler hızlı bir şekilde insanların hayatına dahil olmuş ve gelişmiştir.

İkinci kuantum devrimi olarak adlandırılan kuantum bilişimi, simülasyonlar ve iletişim sistemleri günümüzde önemli bir yer edinmeye başlamıştır. ABD'nin Florida Atlantik Üniversitesinde fizik profesörü olan Warner Miller'a göre kuantum bilişiminden yararlanmak, diğer gelişmelerin yanı sıra, hack'lenemez bilgisayar sistemlerini, mevcut yeteneklerin ötesinde doğruluk taşıyan kuantum GPS'i ve yapay zekâ ilerlemelerini sağlamıştır^[4].

Teknolojinin gelişmesiyle gündeme gelen ve kuantum geleceğinin şekillenmesinde önemli rol olabilecek kuantum bilgisayarları ise günümüz dünyasının en güçlü makineleri olma yolunda ilerlemektedir. Kuantum bilgisayarlarının doğru çalışabilmesi için ihtiyaç duyduğu en önemli ekipman ise kuantum çipleridir.

3. KUANTUM ÇİPLERİ

Kuantum çipleri kuantum bilgisayarlarının işlemcileridir. Kuantum çiplerinin geleneksel çiplere göre en büyük avantajı bit ve kubitleri içerebilmesidir. Klasik bir çip modeliyle yapılan bilişim değerleri 0 ve 1'lerden oluşmaktadır. Ancak kubitler 0 ve 1 veya her ikisini de içerebildiğinden algoritma ve denklem işlemlerinde inanılmaz bir hıza ulaşmaktadır. Şimdilik çok küçük ölçekte üretilenler de kuantum çiplerinin yakın gelecekte günlük hayatta yer edinmesi beklenmektedir^[5].

Kuantum çipleri geleneksel çiplerin 9.000 yılda gerçekleştirebileceği bir işlemi mikro saniyeler içinde tamamlama potansiyelindedir. Kanada kökenli Xanadu firması tarafından test edilen ve Borealis adı verilen kuantum işlemcisiyle yapılan araştırmalarda Gauss Bozonu Örnekleme'sinin (Gaussian Boson Sampling -GBS) 36 mikro saniyede tamamlandığı gözlemlenmiştir. Aynı işlemin geleneksel süper bilgisayarlarla bile 9.000 yıl gibi insan üstü bir sürede tamamlanacağı hesaplanmıştır. Xanadu'nun Borealis kuantum çipinde 219 foton bazlı kubit bulunmaktadır. Xanadu'nun araştırmalarına devam ettiği ve 433 kubit içerecek olan osprey adlı bir işlemcisi daha bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar hâlen deneysel aşamada olduğundan şimdilik günlük kullanımdan uzaktır^[6].

Kuantum işlemcilerinin olağanüstü hızları, çok karmaşık problemleri dahi çözebilecek kapasiteleri, karmaşık simülasyonları oynatma kabiliyetleri bu teknolojinin öne çıkmasına destek olmaktadır. Bilimsel araştırmalar için molekül modelleme, hızlı veritabanı araştırması, kriptografi çalışmaları ve hava tahmin modellerinde kullanılabilen kuantum bilişimi için kuantum çipleri vazgeçilmezdir^[7].

Kuantum çiplerinin günümüzde test edilen ve gelecekte yaygınlaşması beklenen çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır:

- **Moleküler Modelleme:** Kimyasal ve biyolojik modellemelerin hatasız yapılabilmesi için çok detaylı planlanması gerekebilmektedir. Bu konuda özellikle yüksek detayla modellemelerin yapılabilmesine imkân veren kuantum bilişimi çağımızın en büyük problemlerinden biri olan COVID-19 gibi salgınlarla mücadelede virüsün genetik modellemesinin oluşturulması veya atıkların azaltılması için doğada çözülebilen polimer bazlı malzemelerin üretilmesi alanında araştırmalara destek olabilir^[8].
- **Hızlı Veritabanı Araştırması:** Günümüz veritabanları hızla büyümektedir. Bu veritabanlarında bilgilerin aranması ve bir araya getirilmesi ise her geçen gün daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Süper bilgisayarların bile çok uzun zamanda yapabileceği arama ve analiz işlemleri kuantum işlemcileri ve bilişimi sayesinde mikro saniyeler içinde tamamlanabilmektedir. Bir hastalıkla ilgili tüm dünyadan toplanan milyonlarca verinin saniyeler içinde incelenerek tedavi için taslak hazırlanması da kuantum bilişimi ile mümkündür^[9].
- **Kriptografi:** Kriptografi, verileri şifreleme veya yalnızca doğru anahtara sahip birinin okuyabilmesi için düz metni karıştırılmış metne dönüştürme işlemidir. Kuantum kriptografisi ise uzantı olarak, verileri şifrelemek ve hack'lenemeyecek bir şekilde iletmek için basitçe kuantum mekaniğinin ilkelerini kullanmaktadır. Bu tanımlama basit gibi görünse de asıl karmaşıklık, kuantum kriptografisinin arkasındaki kuantum mekaniği ilkelerinde yatmaktadır.

Bu ilkeler incelenecek olursa^[10];

- Evreni oluşturan parçacıklar doğası gereği belirsizdir ve aynı anda birden fazla yerde veya birden fazla varlık durumunda var olabilmektedir.
- Fotonlar, iki kuantum durumundan birinde rasgele üretilmektedir. Bir kuantum, özelliği değiştirilmeden veya bozulmadan ölçülemez.
- Bir parçacığın bazı kuantum özellikleri klonlanabilir, ancak tüm parçacık klonlanamamaktadır.

Tüm bu ilkeler, kuantum kriptografisinin nasıl çalıştığı konusunda önemli rol oynamaktadır.

- **Hava Tahminleri:** Meteoroloji alanında, tahminler oluşturmak için çok büyük miktarda veriye ve birçok farklı değişkene ihtiyaç vardır. Süper bilgisayarlar bile hava durumunu büyük bir doğrulukla tahmin etmekte zorlanmaktadır. Kuantum bilişimi hava durumu tahminlerinde karmaşık işlemlerde gösterdiği, hızlı sonuç üretme özelliği ile daha gerçekçi tahminler sunabilmektedir^[7].
- **İletişim:** Büyük ölçekli kuantum bilgisayarların üretimi henüz çok zor olduğundan daha küçük cihazlar

oluşturmak ve bunları bulut üzerinden birbirine bağlamak kuantum ölçeğinde dolaşıklığı sağlamak için daha mantıklıdır. Kuantum iletişimi genel olarak, güvenli iletişim için bulut üzerinden bağlı küçük ölçekli kuantum cihazlarının güvenli kuantum kanalları üzerinden bağlantısını geliştirmekle ilgilidir. Kuantum Anahtar Dağıtımı (Quantum Key Distribution -QKD) bu alanda en çok araştırma yapılan konulardan biridir. QKD, mesajların şifrenmesine ve şifrenin çözülmesine izin veren anahtar çiftleri oluşturmak için kuantum ışınlanma fenomeninden yararlanır^[11].

Kuantum teknolojisi geliştikçe güçlenen kuantum bilişimi gelecekte çok daha fazla kullanım alanı bulabilir. Bu gelişmelerin en önemli etkilerinden biri kuantum işlemcileriyle gerçekleşmektedir. Daha fazla kübit içeren ve çok daha hızlı işlem kabiliyetine sahip işlemciler geliştirildikçe kuantum teknolojisi yaygınlaşarak günlük hayatın bir parçası hâlini alacaktır. Ancak kuantum çiplerinin gelişiminin yanında üretimi de önemli bir konudur. Üretim yöntemleri, hammadde ihtiyacı ve maliyetleri dikkatlice araştırılmalıdır.

3.1 Kuantum Çipleri Nasıl Üretilir?

Dünyanın dört bir yanındaki araştırma ekipleri, kuantum etkileşimlerini entegre edebilen çalışan bir bilgi işlem çipi tasarılmasının farklı yollarını araştırmaktadır^[12].

Kuantum bilgisayarlarına can veren kuantum çipleri çok küçük boyutlarda üretilmektedir. Ancak kuantum çipleriyle ilgili temel sorun, bu işlemcilerin soğutulması aşamasında ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla kuantum çipleri ne kadar küçük olursa olsun devasa soğutma sistemleriyle desteklenmektedir^[13].

IBM'in kuantum bilgisayarı olan ve 127 kübitten oluşan Eagle, süper iletken devrelerden oluşmaktadır. Bilgisayarın kuantum işlemcisini oluşturan kübitlerin kendileri ise niyobyum adı verilen süper iletken bir malzemeden yapılmıştır. Sistemin düzeni, kondansatöre paralel bir indüktöre benzerdir. Bu iki eleman devredeki akımı kontrol etmektedir. İndüktör, alüminyum oksit nano ölçekli bir bağlantı olan Josephson Kavşağı adı verilen doğrusal olmayan bir elemandan oluşmaktadır.

Temel olarak, tüm kuantum çipleri, kuantum işlemciyi çalıştırmak için kullanılan elektronik özelliğe sahip bir kontrol sistemine bağlıdır. Çiplerin yarattığı dalgalar bağlantılar aracılığıyla kübitleri beslemektedir. Her kübit, ışığın rengi gibi kendi frekansına sahiptir. Bu durum her kübitin kendi seri numarasına sahip olması gibi düşünülebilir^[14].

Geleneksel çip üretim yöntemlerinde yaşanan maliyet, soğutma ve tasarım sorunlarını aşmak amacıyla çeşitli çalışmalar da yürütülmektedir.

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology -MIT) araştırmacıları, mikroskopik olarak ince elmas dilimlerinde olan atomik ölçekli kusurlarla entegre edilerek üretilen yapay atomları fotonik devre ile birleştirerek türünün en büyük kuantum çipini üretmek için bir süreç geliştirmiştir. 0'lar ve 1'ler ile temsil edilen bitleri kullanarak bilgileri işleyen ve depolayan

klasik bilgisayarların aksine, kuantum bilgisayarlar, aynı anda 0, 1 veya her ikisini temsil edebilen kuantum bitleri veya kübitler kullanarak çalışmaktadır. Bu özellik, kuantum bilgisayarların aynı anda birden fazla hesaplama yapmasına ve klasik bilgisayarlar için zorlu olan sorunları çözmesine olanak tanımaktadır. MIT'nin geliştirdiği yeni çipteki kübitler, kuantum bilgisi taşıyan fotonlar yaymak için görünür ışık ve mikrodalgalarla üretilen elmasdaki kusurlardan yapılmış yapay atomlardır. Bu şekilde üretilen çiplerin hibrid bir yöntemle, yani birden fazla elmas bazlı kübit içeren özenle seçilmiş kuantum mikro yongaların bir alüminyum nitür fotonik entegre devre üzerine yerleştirilmesiyle yapılmaktadır^[15].

Kuantum çiplerin üretimiyle ilgili bir diğer araştırma ise, daha ekonomik kuantum çip üretiminin yolunu açma potansiyeli göstermektedir. Melbourne Üniversitesi liderliğindeki bir ekip tarafından geliştirilen yeni teknik, tekil atomları üst üste gelen silikon katmanlara yerleştiren bir yöntemi denemektedir. Bu yöntemle geleneksel cihazları oluşturmak için kullanılan teker teker yansıtma yöntemiyle ucuz ve güvenilir bir şekilde kuantum çiplerinin üretilebileceği düşünülmektedir^[16].

Temel olarak kuantum çipler foton bazlı veya süper iletken bazlı olarak tasarlanmaktadır. Uluslararası alanda Google, IBM, Çin Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (University of Science and Technology of China -USTC), Xanadu, Intel, Rigetti, IonQ ve D-Wave firmaları kuantum çip üretimini gerçekleştirmektedir^[17].

3.2 Kuantum Çiplerin Maliyeti

Google, IBM, Intel, Microsoft ve başka büyük şirketler, hayal edilebilecek en büyük, en güçlü kuantum bilgisayarlarını oluşturmak için yarışa girmiştir. Günümüzün kuantum bilgisayarları hâlâ maliyet, işlem ve kontrol zorluklarının yanı sıra kübitleri kontrol etmek için kullanılan mikrodalgalar tarafından üretilen ısıyı yönetmenin karmaşıklıklarıyla mücadele etmektedir. Son teknoloji kübitlerin çalışabilmeleri için mutlak sifra yakın sıcaklıklarda tutulmaları gerekiyor. Çözümler binlerce kübit içerdiğinde, ısı yönetimi kuantum makinelerini ölçeklendirmek için büyük bir engel oluşturmaktadır. Kontrol ve ısı yönetimi kuantum çiplerinin maliyetlerini büyük ölçüde artırmaktadır.

Tek bir kübitin maliyeti yaklaşık 10 bin dolar civarındadır. Bu kübitin çalışması için büyük kontrollü odalar gerektiren bir dizi mikrodalga kontrol elektronığı, koaksiyel kablolama ve diğer malzemeler tarafından desteklenmesi de gerekmektedir^[18].

Kuantum çiplerden oluşan kuantum bilgisayarların maliyeti ise çok daha yüksek rakamlara çıkabilmektedir. Kanadalı şirket D-Wave'in ilk ticari bilgisayarı D-Wave One, 50 kübit gücünde ve 10 milyon dolar değerindedir. D-Wave'in yeni çıkardığı D-Wave 2000 ise 15 milyon dolar değerindedir.

Çin kökenli bir firma olan SpinQ tasarımı kuantum bilgisayarının ise 2011 yılında çıkardığı ilk tasarım 10 milyon dolar değerindeyken, yeni açıklanan ve 2 kübit gücünde olan basitleştirilmiş versiyonu 5.000 dolara kadar inmektedir. Mevcut yüksek bütçeli kuantum bilgisayarların aksine çok

düşük kapasite ama düşük bütçede olan bu versiyonun kamusal kullanıma uygun bir bütçe ile sunulması olasıdır. Ancak bu bütçelerle yapılacak bir kuantum bilgisayarının büyük araştırmalara konu olan ve milyon dolarlarla değerlendirilen kuantum bilgisayarlara göre çok daha düşük kapasitede olması günümüz şartlarında kaçınılmazdır^[19].

SpinQ tasarımı kuantum bilgisayarı çok basitleştirilmiş bir versiyon olsa da sivillerin kuantum bilgisayar kullanımına imkân verme potansiyeli kuantum teknolojisinin geleceğinde önemli bir rol oynamaktadır.

SpinQ kuantum masaüstü bilgisayarı 55 kg ağırlığında olup nükleer manyetik rezonans kullanmaktadır. Bu durum molekülleri, güçlü manyetik alanlarda hapsedmekte ve atomların dönüş durumunu değiştirmek için onları radyo frekansı darbeleriyle patlatmaktadır. Bu nedenle kuantum bilgisayarın, ayrıca aşırı soğutulmuş süper iletken mıknatıslar kullanmasa da güçlü bir manyetik alan üreten kalıcı mıknatıslarla donatıldığı için dikkatle konumlandırılması gerekmektedir^[20].

4. KUANTUM ÇİP ÜRETEN ÜLKE VE BÖLGELER

Kuantum çiplerinin üretimi birçok büyük ülke tarafından gerçekleştirilmektedir.

Kuantum bilişim alanında çalışmalar yapan ülkeler kendi çip teknolojilerini de geliştirmektedir. ABD, Çin, Kanada, İngiltere ve Avrupa Birliği üyesi bazı ülkeler bu alanda ciddi çalışmalar yapmaktadır^[4].

4.1 ABD

ABD, 2022 yılında kuantum teknolojisinin bir ürünü olan yarı iletken çiplerin gelişimi için 52,7 milyar dolarlık bir bütçe ayırmıştır. Bu bütçenin kuantum çipleri ile ilgili üretim araştırmalarını da kapsamı beklenmektedir. Ayrıca 2023 ve 2027 yılları arasında planlanan ve yıllık 100 milyon dolar bütçe alan Kuantum Ağ Altyapısı programı da oluşturulmuştur. Bu program çerçevesinde kuantum teknolojisinin ihtiyaç duyduğu tedarik zinciri, ağ altyapısı ve çip üretimi gibi faaliyetler planlanmaktadır. 2023 ve 2027 yıllarında oluşturulan programa ek olarak yıllık 15 milyon dolarlık bir ek bütçe de kuantum ağ uygulamaları için ayrılmıştır^[21].

ABD’de 2021 yılı istatistiklerine göre, bilinen 60 kuantum bilişim girişimi bulunmaktadır^[22]. 2022 yılı istatistikleri ise bu girişimlerin sayısının 89’a yükseldiğini göstermektedir. PsiQuantum, Rigetti Computing, Atom Computing, ColdQuanta, Zapata Computing, Quantum Xchange ve Seeq bilinen kuantum bilişim üreticileri arasındadır^[23].

ABD kökenli Google’ın 2019 yılında tanıttığı 53 kübitlik kuantum çipi kabul edilebilir standartlarda kullanıma en yakın olanlardan biridir. Intel’in 2018 yılında tanıttığı 49 kübitlik Tangle Lake adlı çipten daha yüksek kapasiteye sahip olan Google çipinin adı Sycamore’dur.

IBM ise daha önce yaptığı yüksek kübitli kuantum işlemcilerden sonra 2021 yılında 127 kübit kapasiteye sahip Eagle adlı çip ile dikkatleri çekmiştir.

ABD kökenli bir diğer firma olan Rigetti tasarımı Aspen M multi çip teknolojisi, iki adet 40 kübitlik işlemciden oluşmaktadır. Rigetti’nin Aspen-11 adlı sadece 40 kübitten oluşan daha küçük bir kuantum işlemci modeli de bulunmaktadır^[24].

4.2 Çin

2021 yılı itibarıyla Çin’de bilinen kuantum bilişim girişimlerinin sayısı sekizdir. Bu girişimlerden biri olan Origin Quantum, 2022 yılında yaklaşık 148 milyon dolarlık bir yatırım almıştır. 2017 yılında kurulan şirket, kuantum bilişim uygulamalarının ticarileştirilmesi konusunda çalışmaktadır. Origin Quantum, kuantum yazılımları, kuantum çipleri, kuantum ölçüm cihazları ve kontrol sistemleri üzerinde çeşitli araştırmalar yürütmektedir^[25].

Çin’in lider kuantum bilişim şirketleri Baidu Research, Ciqtek, Huawei Cloud, Qasky’de çeşitli kuantum teknolojileriyle ilgilenmektedir^[26].

Baidu’nun geliştirdiği 36 kübit işlem kapasitesine sahip kuantum bilgisayarı kullanıcılara bulut üzerinden erişim imkânı sunmayı hedeflemektedir. Quin Shi adı verilen kuantum bilgisayarı süper iletken özelliği göstermektedir. Son yıllarda birçok farklı şirket kuantum sistemlerinde süper iletkenlerin kullanımını artırmıştır^[27].

Çin 14’üncü beş yıllık gelişim planında 2030 yılına kadar kuantum bilişim ve iletişimi konusuna daha fazla önem verileceğini ve bu alanın geliştirileceğini açıklamıştır. Çin 2019 ile 2021 yılları arasında kuantum teknolojileri gelişimine 11 milyar dolara yakın bir yatırım yapmıştır^[28].

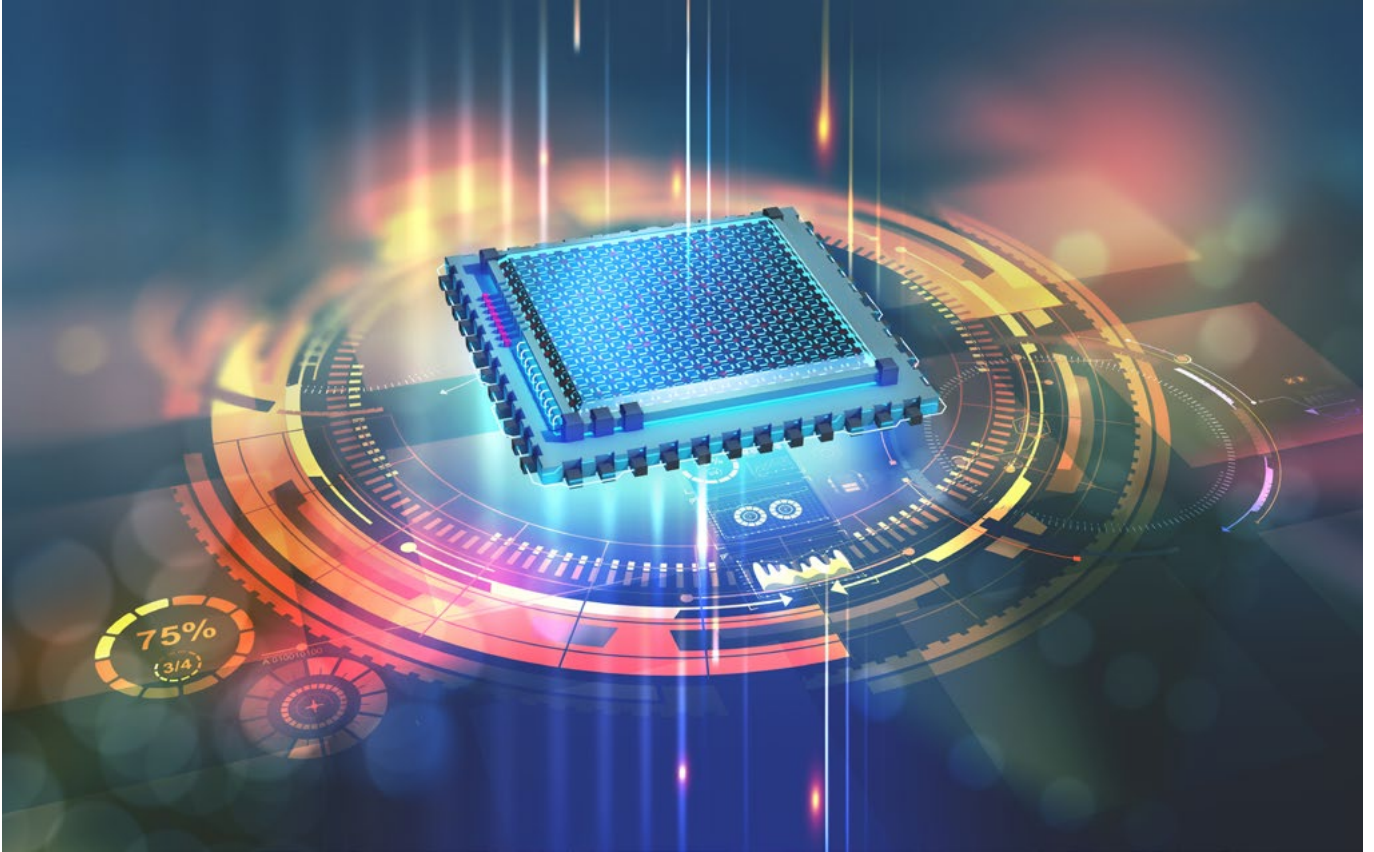
Çinli bir diğer girişim şirketi olan SpinQ’nun düşük bütçeli kuantum bilgisayar çalışmaları, bu alandaki yapılan önemli çalışmalardan biridir. SpinQ’nun ilk modeli olan Gemini 50 bin dolar değere sahiptir. SpinQ’nun yeni tasarımı ise 5.000 dolarlık fiyatı ile en düşük fiyatlı kuantum bilgisayardır. 2 kübit işlem gücüne sahip bilgisayarın kuantum çipin bulunduğu kısım SpinQuasar olarak adlandırılmaktadır^[29].

4.3 Kanada

Kanada ilk kuantum bilgisayarı olan Anyon’u 14 Haziran 2022’de tanıtmıştır. Anyon Systems tasarımı olan bilgisayar, Yamaska adlı 12 kübitlik bir kuantum çip ile çalışmaktadır. Kuantum bilgisayarı Kanada Dijital Araştırma İttifakı’nın bir parçası olan Calcul Quebec’de yapılacak araştırmalara destek sağlamak amacıyla yapılmıştır^[30].

2020’de tanıtılan ve birbirine bağlı birçok işlemciden oluşan D-Wave kuantum sistemi 5.000 kübitin üzerinde kapasiteye sahiptir. Bu sistem çoklu çip teknolojisi ile tasarlandığından ortak çalışan bir makine gibidir. Kanada kökenli D-Wave’in kuantum işlemci sistemini tasarlamadaki amacı, karmaşık şirket problemlerinin çözüme ulaştırılmasıdır^[24].

Kanada kökenli bir diğer önemli kuantum teknoloji şirketi olan Xanadu Quantum Technologies’in buluttan erişime izin veren Borealis kuantum bilgisayarı ile yaptığı çalışmalar dikkatleri üzerine çekmiştir. 216 kübit işlem kapasiteli bilgisayar kuantum teknolojilerin geleceği için önemli bir gelişmedir^[31].



4.4 İngiltere

İngiltere’de aktif olarak faaliyet gösteren 38 kuantum bilişim girişimi bulunmaktadır. Bu girişimlerden ilk sıralarda olanları Cambridge Quantum Computing, Quantum Circuits Limited, PQShield, Riverlane, Orca ve QLM’dir^[32].

Bu şirketler içinde Cambridge Quantum Computing, daha çok kuantum bilgisayar yazılımları üzerine çalışmalar yapmaktadır. Quantum Circuits ise süper iletken kübit özellikli çipler üzerinde çalışmaktadır^[33].

İngiltere Savunma Bakanlığı, İngiltere’nin savunma gücünü artırmak amacıyla araştırmalarda kullanılacak ilk kuantum bilgisayarını temin ettiğini açıklayarak İngiltere’nin kuantum teknolojisine verdiği önemi göstermiştir. Orca bilgisayar sistemleri ile ortaklaşa yürütülen çalışmalarda, küçük PT-1 modeli kuantum bilgisayar tasarımı kullanılarak oda sıcaklığında çalışabilen türünün ilk örneği bir sistem denenmektedir^[17].

4.5 Avrupa Birliği

Avrupa Birliği üyesi ülkelerin birlikte yürüttüğü çeşitli kuantum teknolojisi çalışmaları da bulunmaktadır.

Avrupa Birliği ilk olarak 2018 yılında oluşturduğu Kuantum Teknolojileri Amiral Gemisi Projesi ile 10 yıllık bir süreçte yaklaşık 1 milyar avroluk yatırım desteği sağlayarak araştırma projelerini desteklemeyi hedeflemiştir. Projenin ilk üç yılında toplam 24 girişime 152 milyon avroluk yatırım yapılmıştır. Bu girişimler içinde kuantum bilişimi, kuantum simülasyonları, kuantum iletişimi, kuantum metrolojisi ve sensörleri bulunmaktadır^[34].

Avrupa Birliği Kuantum Teknolojileri Amiral Gemisi Projesi kapsamında geliştirilen ilk kuantum bilgisayarı 24 kübit işlem kapasitesindedir. Avusturya Innsbruck Üniversitesi Deneysel Fizik enstitüsünde geliştirilen kuantum bilgisayarı AQT Bulut Erişim üzerinden bütün kullanıcılar erişebilmektedir^[35].

Küresel ölçekte devam eden kuantum teknoloji yarışında öne geçmek için çağrıda bulunan Hollanda, Avrupa Birliği bünyesinde kuantum bilişimi çalışmaları yürüten ülkelerden biridir. Hollanda Araştırma Enstitüsü QuTech ve Quantum Delta NL tarafından inşa edilen House of Quantum aldıkları yatırımlarla kuantum yarışında varlıklarını göstermektedir. House of Quantum 12.000 metrekairelik yerleşkede şirketleri, yatırımcıları ve araştırmacıları bir araya getirmektedir. Quantum Delta NL yaptığı başarılı çalışmalar neticesinde Ulusal Büyüme Fonu’ndan 615 milyon avro yatırım almıştır^[36].

Avrupa Birliği küresel yarı iletken çip üretiminin yüzde dokuzunu üstlenmektedir. Avrupa Birliği bu oranı iki katına çıkarabilmek için silikon çip ve benzeri teknolojilere 48 milyar dolarlık bir yatırım planlamıştır. Bu hedefle yarı iletken çip pazarında yüksek bir pay alınması planlanırken, gelişen kuantum çip pazarı gibi alanlarda hâkimiyet kurmak amaçlanmaktadır.

Avrupa Birliği ülkeleri hâlihazırda 30 milyar dolarlık kamu yatırımla yüksek teknoloji üreticilerini desteklemektedir. Avrupa Çip Yasası ile Avrupa Birliği üyesi en küçük ülkelerin dahi, yüksek teknoloji kuantum çipleri gibi alanlarda sınır olmaksızın araştırma yapmasına imkân verilmiştir^[37].

4.6 Türkiye’de Kuantum Çalışmaları

Türkiye’de kuantum bilimi ile ilgili kayıtlı 108 yüksek lisans ve doktora tezi ve yazılmış 152 makale bulunmaktadır. Ancak veriler akademik anlamda kuantum bilimine gösterilen ilginin yetersiz kaldığına ve artırılması gerektiğine işaret etmektedir^[38].

Türkiye kuantum teknolojilerine ilgiyi artırmak ve küresel kuantum yarışına dahil olmak için yapılacak kuantum araştırmalarını desteklemeye başlamıştır. Q Turkey bu kapsamda kuantum teknolojileriyle ilgili araştırmalar yürüten kurum ve kişileri bir araya getirmek için oluşturulmuştur^[39].

ASELSAN, Türkiye’de kuantum bilgisayarlarda çalışacak askeri ve kritik sivil alanlarda faydalı algoritmalar üzerinde çalışmaktadır. ASELSAN’ın kuantum bilgisayar algoritmaları ile ilgili araştırmaları devam etmektedir^[40].

Türkiye’de Boğaziçi Üniversitesinde görev yapan araştırmacılar da kuantum bilgisayarlarının temelini oluşturacak birtakım çalışmalara başlamıştır. Teorik sistemler üzerine araştırmalar yapan Türk bilim insanları geleceğin başarı potansiyeli yüksek bilişim teknolojilerini araştırarak kuantum bilişim teknolojilerine girişin kapısını aralamaktadır^[41].

Türkiye’de ayrıca Teknopark İstanbul’da bulunan Quibitrium Teknoloji de kuantum kriptografi, haberleşme ve algılama konularında Ar-Ge çalışmaları yürütmektedir. Quibitrium mevcut imkânlarla tek foton sayaçları, zaman etiketleme ünitesi, kuantum lidar ve mikroskop gibi ürünleri üretebilmektedir. Ayrıca kuantum navigatör ve yer çekimölçer gibi hassas algılama ürünlerini de üretebilecek altyapıya sahiptir^[42].

5. KUANTUM BİLİŞİM PAZARI VE KUANTUM ÇİPLERİN GELECEĞİ

Markets and Markets araştırma şirketi verilerine göre, 2021 yılında 472 milyon dolar olan kuantum bilişim pazarının 2026 yılına kadar 1,76 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Yıllık bazda yüzde 30,2 büyüme beklenen pazarın, teknolojilerin gelişen hızıyla daha da büyümesi olasıdır^[43].

İngiliz araştırmacılar ise küresel ölçekte kuantum teknoloji pazarının 2024 yılına kadar 4 milyar pounda yükselebileceğini ve gelecek 10 yıl içinde 341 milyar poundu geçebileceğini düşünmektedir^[17].

Kuantum bilişim pazarı aslında farklı segmentlerle değerlendirilmektedir. Bunlar bileşen grubu, uygulama grubu, son kullanıcı grubu ve bölgesel olarak ayrılmaktadır. Bileşen grubu donanım, yazılım ve servislerden oluşmaktadır. Uygulama grubu simülasyon, optimizasyon ve örneklemelerden oluşmaktadır. Son kullanıcı grubu savunma, sağlık, ilaç, kimya, bankacılık ve finans ile enerji ve güç alanlarını kapsamaktadır. Son olarak bölgesel grup Kuzey Amerika, Avrupa, Asya-Pasifik, Latin Amerika ile Ortadoğu ve Afrika olarak sınıflandırılmıştır^[44].

İkinci kuantum devrimi ile kuantum bilişimi ve teknolojilerinin günlük hayata dahil edilebilmesi yakın gelecekte mümkündür. Ancak kuantum teknolojileri ile ilgili en büyük soru işareti üretim aşamalarında ortaya çıkmaktadır. Gelecekte araştırmaların da yardımıyla ortaya çıkacak yeni üretim yöntemleri, kuantum teknolojilerinin insan hayatına ne kadar hızlı dahil olacağına önemli bir role sahiptir. Kuantum çiplerinin küçük boyutlarına karşın yüksek ısı üretmesinin önüne geçilebildiğinde, herkesin kullanımına imkân verecek boyutlarda ve maliyetlerde kuantum cihazlarının üretilmesi mümkün olabilir^[45].

IBM gibi kuantum çipleri üzerine güçlü çalışmalar yapan firmaların kuantum çip hedeflerini yükseltmesi bu teknolojinin geleceği için önemlidir. Kuantum merkezli süper bilgisayarların tasarlanması, kuantum çipleriyle temel işlemciler ve grafik işlemcilerinin ortak kaynaklarla üretilmesi gibi yaklaşımlar kuantum bilgisayarlarının en büyük sorunu olan maliyet ve boyut büyüklüğünü aşma potansiyeli göstermektedir^[46].

Ayrıca ABD kökenli IonQ firmasının tasarımı olan yeni nesil cam bazlı çiplerin kuantum çiplerinin geleceğinde etkili olacağı düşünülmektedir. Bu çipler yakınındaki alanda elektromanyetik olarak hapsolmuş iyonların kuantum durumlarını kullanarak çalışmaktadır^[47].

6. SONUÇ

Kuantum teknolojisi hızla gelişen ve güçlenen bir araştırma alanıdır. Bu alanda araştırma yapan birçok şirket, deneysel aşamada üretilen kuantum bilgisayarlarının, çiplerinin ve yazılımlarının herkesin kullanımına uygun şekilde üretilmesi ve erişimi amacıyla çalışmaktadır.

1998’de ilk kuantum bilgisayarının üretilmesinden bu yana bilgisayarların en önemli bileşenlerinden biri olan kuantum çiplerinin daha yüksek kapasitede çalışması için kübit kapasiteleri artırılmakta, bu çiplerin yardımıyla inanılmaz hızlarda işlemler yapılmakta ve kuantum teknolojisi ile askeri iletişimde veya büyük veri çalışmalarında deneyler gerçekleştirilmektedir.

Kuantum çiplerinin artan kapasiteleri, bu çiplerin küçük boyutlu olmasına rağmen yüksek boyutlu soğutma ekipmanlarına ihtiyaç duymasına ve üretim maliyetlerinin katlanarak artmasına neden olmaktadır. Günümüzde geliştirilen yeni çip üretim teknikleri ve daha dayanıklı hammaddeler bu zorlukların aşılmasına öncü olabilir.

Kuantum çipleri geleceği değiştirecek bir güce sahiptir. Benzeri görülmemiş bir hızda işlem yapabilen bilgisayarlar savunma, sağlık ve kamu alanında çözümü uzayan veya cevap alınamayan birçok sorunun ortadan kaldırılmasını sağlayabilir. Bu amaçla bir araya gelen bilim insanlarının yaptıkları çalışmaları çağımızın en önemli teknolojilerinden biri olan bulut sistemleri ile paylaşabilmesi ve bu bilgilerin kuantum teknolojileri ile güvenli şekilde iletilmesi yeni bir kuantum devriminin hatta kuantum çağının habercisi olabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Martin, Paul; (2018), "What is quantum technology?", *PA Consulting*, (7 Aralık 2018), <https://www.paconsulting.com/insights/what-is-quantum-technology/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [2] *American Museum of Natural History*, "Quantum Theory", <https://www.amnh.org/exhibitions/einstein/legacy/quantum-theory>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [3] *Research Gate*, "The first quantum revolution of technologies is based on the discrete nature of physical", https://www.researchgate.net/figure/The-first-quantum-revolution-of-technologies-is-based-on-the-discrete-nature-of-physical_fig3_343352556. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [4] Hickey, Alex; (2017), "The quantum revolution: Who, what, when, where, why and how?", *CIO DIVE*, (26 Ekim 2017), <https://www.ciodive.com/news/the-quantum-revolution-who-what-when-where-why-and-how/508195/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [5] *seeqc*, "Quantum Computing Chips: A Guide", <https://seeqc.com/blog/quantum-computing-chips>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [6] Pires, Francisco; (2022), "Quantum Chip Brings 9,000 Years of Compute Down to Microseconds", *tom's HARDWARE*, (8 Haziran 2022), <https://www.tomshardware.com/news/quantum-chip-brings-9000-years-of-compute-down-to-microseconds>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [7] *Future Learn*, (2021), "What is quantum computing? Essential concepts and uses", (15 Ekim 2021), <https://www.futurelearn.com/info/blog/what-is-quantum-computing>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [8] M. Garcia, Jeannette; (2021), "How Quantum Computing Could Remake Chemistry", *Scientific American*, (15 Mart 2021), <https://www.scientificamerican.com/article/how-quantum-computing-could-remake-chemistry/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [9] Matuschak, Andy; Nielsen, Michael; "How the quantum search algorithm works", *Quantum Country*, <https://quantum.country/search>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [10] *Quantumxchange*, "Quantum cryptography, explained", <https://quantumxc.com/blog/quantum-cryptography-explained/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [11] Krause, Julian; (2022), "WHAT ARE QUANTUM COMPUTING AND QUANTUM COMMUNICATION?", *Israel Public Policy Institute*, <https://www.ippi.org.il/what-are-quantum-computing-and-quantum-communication/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [12] *Engineering.com*, (2017), "Want to Build a Silicon Quantum Computer Chip? Here's How", (15 Aralık 2017), <https://www.engineering.com/story/want-to-build-a-silicon-quantum-computer-chip-heres-how>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [13] Chavatte, Leentje; "How to build a quantum computer", *Microsoft Pulse*, <https://pulse.microsoft.com/en/videos/making-a-difference-en/education-en/fa1-how-to-build-a-quantum-computer/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [14] *Popular Science*, "IBM's latest quantum chip breaks the elusive 100-qubit barrier", <https://www.popsci.com/technology/ibm-eagle-127-qubit-quantum-chip/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [15] Ham, Becky; (2020), "Scaling up the quantum chip", *MIT EECS*, (9 Temmuz 2020), <https://www.eecs.mit.edu/scaling-quantum-chip/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [16] *Science Tech Daily*, (2022), "Building a Silicon Quantum Computer Chip Atom by Atom", (13 Mart 2022), <https://scitechdaily.com/building-a-silicon-quantum-computer-chip-atom-by-atom/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [17] de Urquina, Beatriz Valero; "UK government acquires its first quantum computer", *Engineering and Technology*, (9 Haziran 2022), <https://eandt.theiet.org/content/articles/2022/06/uk-government-acquires-its-first-quantum-computer/>
- [18] Levy, John; "1 million qubit quantum computers: moving beyond the current 'brute force' strategy", *seeqc*, <https://seeqc.com/blog/1-million-qubit-quantum-computers-moving-beyond-the-current-brute-force-strategy>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [19] Yawar, Samir; (2022), "How much does a quantum computer cost?", *PureVPN*, (19 Temmuz 2022), <https://www.purevpn.com/blog/quantum-computer-cost/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [20] Isberto, Michael; (2022), "What Is a Quantum Computer?", *Colocation America*, (7 Mart 2022), <https://www.colocationamerica.com/blog/quantum-computer>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [21] *Reuters*, "China's Baidu reveals its first quantum computer called Qianshi", <https://www.reuters.com/technology/chinas-baidu-reveals-its-first-quantum-computer-called-qianshi-2022-08-25/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [22] *Statista*, "Number of quantum computing startups as of 2021, by country", <https://www.statista.com/statistics/1317821/quantum-computing-startups-number/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [23] "Quantum Computing Startups in United States", *Tracxn*, <https://tracxn.com/explore/Quantum-Computing-Startups-in-United-States>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [24] Dargan, James; (2022), "How Many Quantum Chip Companies Are There?", (28 Haziran 2022), <https://thequantuminsider.com/2022/06/28/how-many-quantum-chip-companies-are-there/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [25] Wang, Eudora; (2022), "How Many Quantum Chip Companies Are There?", *Deal Street Asia*, (26 Temmuz 2022), <https://www.dealstreetasia.com/stories/origin-quantum-closes-148m-301743>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [26] Dargan, James; (2021), "9 Leading Chinese Quantum Computing Companies [2022]", *The Quantum Insider*, (20 Nisan 2021), <https://thequantuminsider.com/2021/04/20/9-companies-leading-the-quantum-technologies-race-in-china/yjyjjy>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [27] DEUTSCHER, MARIA; (2022), "China's Baidu debuts its first quantum computer", *Silicon Angle*, (25 Ağustos 2022), <https://siliconangle.com/2022/08/25/baidu-debuts-first-quantum-computer/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [28] CANDELON, FRANÇOIS; (2022), "The U.S., China, and Europe are ramping up a quantum computing arms race. Here's what they'll need to do to win", *Fortune*, (2 Eylül 2022), <https://fortune.com/2022/09/02/quantum-computing-cryptography-companies-arms-race/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [29] ETIM, INEMESİT; (2022), "A desktop quantum computer for \$5,000? So what is the SpinQ device from China", *Quantum Zeitegeist*, (4 Mayıs 2022), <https://quantumzeitgeist.com/a-desktop-quantum-computer-for-5000-sp-what-is-the-spinq-device-from-china/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [30] *Newswire*, (2022), "Canada's first Quantum Computer for Public Research", *CISION*, (14 Haziran 2022), <https://www.newswire.ca/news-releases/canada-s-first-quantum-computer-for-public-research-855935168.html>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [31] *Physicsworld*, (2022), "Xanadu puts quantum advantage in the cloud", (27 Haziran 2022), <https://physicsworld.com/a/xanadu-puts-quantum-advantage-in-the-cloud/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [32] *Tracxn*, (2022), "Quantum Computing Startups in United Kingdom", (7 Eylül 2022), <https://tracxn.com/explore/Quantum-Computing-Startups-in-United-Kingdom>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [33] *Quantum Zeitegeist*, (2020), "5 Promising Quantum Computing companies from the UK to watch", (9 Temmuz 2020), <https://quantumzeitgeist.com/5-promising-quantum-computing-companies-from-the-uk-to-watch/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [34] *European Commission*, "Quantum Technologies Flagship", <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [35] *European Commission*, (2021), "EU innovation moves one step closer to the world's first compact quantum computer", (18 Ekim 2021), <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/eu-innovation-moves-one-step-closer-worlds-first-compact-quantum-computer>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [36] Kabelka, Laura; (2022), "Europe's quantum pioneers call for EU support to reach 'quantum advantage'", *Euractiv*, (7 Eylül 2022), <https://www.euractiv.com/section/digital/news/europes-quantum-pioneers-call-for-eu-support-to-reach-quantum-advantage/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [37] Currin, Grant; (2022), "What Europe's \$48 billion chips plan could do for quantum computing", *Interesting Engineering*, (9 Şubat 2022), <https://interestingengineering.com/innovation/europe-silicon-chips-funding-quantum-computing>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [38] Akçomak, Semih; (2021), "Türkiye'de ve Dünya'da Kuantum Teknolojilerinin Mevcut Durumu: Toplumsal Çerçeveden Bir Bakış", *Research Gate*, (Eylül 2021), https://www.researchgate.net/publication/358243606_Turkiye%27de_ve_Dunya%27da_Kuantum_Teknolojilerinin_Mevcut_Durumu_Toplumsal_Cerceveden_Bir_Bakis. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [39] *Q Turkey*, "About QTurkey", <https://qturkey.org/about-qturkey/>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [40] *ASELSAN*, "KÜANTUM BİLGİSAYAR ÇAĞI BAŞLADI", <https://www.aselsan.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/kuantum-bilgisayar-cagi-basladi-3827>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [41] Boğaziçi Üniversitesi, (2017), "Boğaziçi'nden kuantum bilgisayarın temelleri için adım...", (25 Aralık 2017), <https://haberler.boun.edu.tr/tr/haber/bogaziciden-kuantum-bilgisayar-in-temelleri-icin-adim>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [42] Alpaslan, Soyhan; (2021), "Kuantum teknoloji ilk yerli ürünler sahada", (3 Mayıs 2021), https://www.itohaber.com/haber/teknoloji/216275/kuantum_teknoloji_ilk_yerli_urunler_sahada.html. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [43] *Markets and Markets*, "Quantum Computing Market", <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [44] *Global Newswire*, "Global Quantum Computing Market is estimated to be US\$ 4531.04 billion by 2030 with a CAGR of 28.2% during the forecast period - By PMI", (22 Haziran 2022), <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/06/22/2467264/0/en/Global-Quantum-Computing-Market-is-estimated-to-be-US-4531-04-billion-by-2030-with-a-CAGR-of-28-2-during-the-forecast-period-By-PMI.html>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [45] *Discover Magazine*, (2021), "Quantum Computer Chips Manufactured Using Mass-Market Industrial Fabrication Techniques", (11 Şubat 2021), <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/quantum-computer-chips-manufactured-using-mass-market-industrial-fabrication>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [46] Smith-Goodson, Paul ; (2022), "IBM's Newest Quantum Computing Roadmap Unveils Four New Quantum Processors And Future Plans For A Quantum Supercomputer", *Forbes*, (18 Mayıs 2022), <https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2022/05/18/ibms-newest-quantum-computing-roadmap-unveils-four-new-quantum-processors-and-future-plans-for-a-quantum-supercomputer/?sh=59a01b817ebd>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)
- [47] *VOI*, (2021), "Glass Chips Are The Future Of Quantum Computers, Here's An Explanation", <https://voi.id/en/technology/79176/glass-chips-are-the-future-of-quantum-computers-heres-an-explanation>. (Erişim Tarihi: 11 Ekim 2022)



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

