

EEB MÜHENDİSLİKLERİNDE KUANTUM HESAPLAMA EĞİTİMİ

Mustafa TOYRAN¹

¹TÜBİTAK, UEKAE
P.K.: 74, 41470, Gebze, Kocaeli

¹mtoyran@uekae.tubitak.gov.tr

ÖZET

Bu çalışmada kuantum hesaplama ve önemine kısaca değinildikten sonra, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar (EEB) mühendisliklerinde okutulmak üzere örnek bir kuantum hesaplama dersinin hazırlanması amaçlanmaktadır. Kuantum hesaplama, hesaplamanın kuantum mekaniğine dayanan yeni ve en doğru modelidir. Çağımızın bir gereği olarak ülkemiz EEB mühendisliklerinde de bu yeni hesaplama modeli ile ilgili çalışmaların ve eğitimin bir an önce yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Çalışma içinde bu konuda yurtiçindeki ve yurtdışındaki üniversitelerin bugünkü durumları ile bu yeni hesaplama alanının gelişiminden ve bugünkü durumundan da kısaca söz edilmektedir.

1. GİRİŞ

Teorik bilgisayar bilimi oldukça geniş bir konu alanına sahiptir. Ancak hiçbir hesaplamaya kadar temel ve yararlı değildir. Hesaplama alanı üzerinde çalışıldığında sorulabilecek en temel soru kesinlikle “Hesaplama ile ne başarılabilir?” şeklinde olacaktır.

Böyle bir soruyu cevaplayabilmek için işe öncelikle hesaplamanın ne olduğunun tanımlanarak başlanması gerekir. Bu, geçen yüzyıl matematikçiler tarafından başlatılan ve günümüzde de yoğun olarak devam eden bir iştir. Yirminci yüzyılın başlarında ilk teoristler Alan Turing, Alonso Church, Kurt Gödel ve Emil Post herbiri birbirinden bağımsız olarak hesaplamanın, hesaplama makinelerinin nasıl gerçekleştirildiklerine bağlı olmaksızın, *matematiksel* modellerini geliştirmişlerdir. Bu bilim insanları hesaplamayı fiziksel varsayımlardan yoksun, daha çok da matematiksel bir süreç olarak tanımlamışlardı. Başka bir ifadeyle, teorisyenlerin çoğu hesaplamanın en azından mekaniksel, önceden programlanmış belirli ve küçük bir dizi adımların bir uygulaması ile problemleri çözmek anlamına geldiğinde anlaşmıştı. Yaptıkları çalışmaların, özellikle Turing’inkilerin, günümüz bilgisayarlarının ve bilgisayar biliminin gelişmesinde etkisi büyüktür. Hesaplama hakkında ortaya atılan bu temel filozofik fikirlerden sonra, hesaplamanın bir modelinin tanımına ilerlenmesi, bu temel fikirlerin formalize edilmesi ve hesaplama hakkında fikir yürütebilmek için bir iskeletin oluşturulması gerekir. Model hem olduğunca gerçeğe

uygun (yani bugünlerde bir bilgisayar ile görülenden çok fazla sapmamalı) hem de mümkün olduğunca evrensel ve güçlü olmalıdır. Eldeki makul bir model ile sonuçta “Ne hesaplanabilir ve hesaplanamaz?” ve “Birşey ne kadar verimli olarak hesaplanabilir?” gibi temel soruları ortaya atmaya ve bunları çözmeye ilerleyebiliriz.

“Ne asla hesaplanamaz (yani, herhangi bir hesaplama aracı ile neler çözülemez?)” ve “Ne verimli olarak hesaplanamaz?” gibi sorular ve cevapları, pratik bir anlamda, ulaşılamaz hedeflere ulaşmaya çalışmanın önlenmesinde bize katkıda bulunur. Ayrıca, bu olumsuz sorulara cevapların elde edilmesi sürecinde, neyin çözülebileceğine ilişkin daha iyi karakterizasyonlar da elde ederiz ve bazen bir çözümün daha iyi metodlarına da ulaşırız [1].

2. KUANTUM HESAPLAMA VE ÖNEMİ

Yirminci yüzyıl fiziksel bilimlerde devrimsel fikirlerin doğuşuna tanıklık etti. Bu fikirler Newton’un, hatta Galileo’nun bile, günlerine kadar uzanan evrene geleneksel bakışı sallamaya başladı. Albert Einstein genellikle astronominin çok büyük makrosistemlerinin davranışını modellemede kullanılan bir teori olan “görelilik teorisi”nin yaratıcısı olarak tanımlanır. Fiziksel dünyanın bir diğer yeni bakışı ise mikrodünyadaki fenomeni, yani atomik büyüklükteki parçacıkların davranışını, tanımlamada başarılı olan “kuantum fiziği” tarafından sağlanmıştır.

Otomatik bilgi işlemenin ilk fikirlerinin oldukça eski olmasına rağmen, yirminci yüzyıl bilgisayar biliminin doğumuna da tanıklık etti. Bir sayısal cihaz fikri 1930’larda Alan Turing tarafından bir “Turing makinesi” olarak matematiksel bir forma kristalize olmuştur. Bundan sonra bilgisayar biliminin gelişimi çok büyük oldu. Son 50 yıldır bilgisayar teknolojisinde önemli bir minyatürleşme (küçülme) yaşanmaktadır. Bununla birlikte, şu ana kadar bir bilgisayarın neler yapabileceğine dair temel anlayışımızda bir değişiklik olmamıştır. Bu, kısmen, bilgisayarın içindeki küçük bileşenlerin tüm önemli noktalarda halen klasik fiziğin yasalarına göre davranıyor olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, minyatürleşme eğilimi devam ederse

bilgisayarımızın temel işlemlerini tanımlamak için kuantum fiziğini kullanmaya zorlanacağımız bir noktaya gelinecektir. Dikkat etmek gerekir ki, kuantum yasaları genellikle klasik yasalardan çok farklıdır. Sonuç olarak, böyle mikroskopik ölçeklerde bilgisayarların neler yapabileceğine ilişkin teorinin bile tekrar gözden geçirilerek düzeltilmesi gerekir. *Kuantum hesaplama* alanı bu kaçınılmaz adımın bir önceden tahmini olarak meydana çıkmıştır.

Hesaplama ve makineleri ile ilgili teorilerin ve modellerin olması şartıtcı gelebilir. Ancak, bu çalışmaların başta savunma, elektrik-elektronik, haberleşme ve iletişim sektörleri olmak üzere hemen hemen tüm sektörlerde önemi büyüktür. Peter Shor'un sözleriyle açıklanırsa: "Eğer kuantum bilgisayarları inşa edilirse, bütün casuslar bunlardan edinmek isteyecekler. Bütün kodlarımız çözülecek ve e-postalarımızı okuyabilecekler. Ta ki biz kuantum şifreleri yazana ve onların gözlerini korkutana kadar." Sırf bu örnek bile, ulusal bilgilerimizin güvenliği ve ulusal güvenliğimiz açısından kuantum hesaplamının önemini açıklamak için yeterlidir.

Kuantum hesaplamadaki araştırmacılar ilk olarak geleneksel bir bilgisayarın temel işlemlerinin kuantum mekaniksel etkileşimler kullanılarak nasıl başarılabileceğini anlamaya çalıştılar. Bununla birlikte, kısa bir süre sonra kuantum fiziğinin gerçekten yeni birtakım şeyler sunduğunu fark ettiler.

Klasik olarak bir benzeri bulunmayan hassas kuantum fenomenleri kullanarak, belirli işlemleri bir klasik bilgisayar, hatta bir süper bilgisayar ile bile, yapılabileceğinden çok daha verimli olarak yapmak mümkündür. Üstelik, aynı kuantum fenomenler bilginin ışınlanması, kırılmaz varsayılan kodların kırılması, gerçek rasgele sayıların üretilmesi ve arada iletişim hattını dinleyen birinin varlığını açığa çıkaran mesajlarla haberleşme gibi daha önce bir benzeri görülmemiş işlemlerin gerçekleştirilmesine de izin vermektedir [2].

3. KUANTUM HESAPLAMA EĞİTİMİ

Yukarıdaki nedenlerden dolayı, kuantum hesaplama alanlarında ülkemizde ve ülkemiz üniversitelerinde uzun vadeli temel araştırmalar desteklenmeli ve teşvik edilmelidir. Ülkemizin bu teknolojilere geri kalmadan, etkin bir şekilde sahip olması sağlanmalıdır. Bu konularda çalışmak üzere bir "Ulusal Kuantum Hesaplama Merkezi"nin kurulması da çok yararlı olacaktır. Türkiye gibi gelişmiş ülkeler bu alanlarda yatırımlarını ve kurumsal yapılarını kurmuşlar veya kurma çabası içindedirler. Ülke çapında üniversitelerin ve büyük sanayi kuruluşlarının bu konudaki araştırmaları yaygınlaştırılmalıdır.

Aşağıda, ülkemiz üniversitelerinde de kuantum hesaplama eğitimi vermek üzere, örnek bir kuantum hesaplama dersi sunulmaktadır.

Tablo 1. Örnek kuantum hesaplama dersi.

Ders Adı:	Kuantum Hesaplama
Dersin Tanıtımı:	Bu kurs yeni bir alan olan <i>kuantum hesaplama</i> alanı ile ilgilidir. Kuantum hesaplama, kuantum mekaniksel ilkelere dayanan hesaplama türüdür. Ders bir bilgisayar bilimi bakış açısından öğretilir. Derste kuantum hesaplama modeli açıklanır ve kuantum bilgi teorisinin temelleri ile birlikte temel kuantum algoritmalar ve karmaşıklık sonuçları kapsanır. Bu konudaki mevcut uygulamalardan söz edilir.
Dersin İçeriği:	<ol style="list-style-type: none"> Giriş: Kuantum mekaniğinin temel ilkeleri, karmaşıklık teorisi, lineer cebir. Kuantum hesaplama: Klasik hesaplama, kuantum algoritmalar (Deutsch-Jozsa algoritması, Bernstein-Vazirani algoritması, Simon'un algoritması, Çarpanlara ayırma için Shor'un algoritması ve RSA gibi günümüz kriptografisini kırmak için uygulaması, Grover'in veritabanı-arama algoritması ve uygulamaları, Kuantum Fourier dönüşümü), kuantum kapılar ve devreler. Kuantum bilgi: Klasik bilgi teorisi ve kriptografi, kuantum kriptografi, ışınlama ve yoğun (dense) kodlama, kuantum iletişim karmaşıklığı. Tutarsızlık, hatalar ve hata düzeltme: Tutarsızlık ve diğer hata kaynakları, ölçme ve hataların düzeltilmesi, hataya-dayanıklı hesaplama. Fiziksel gerçeklemler: İyon tuzağı, Katı-hal cihazları, Nükleer Manyetik Rezonans. Gelecekte beklenenler: Gelecekte beklenenler üzerine bir değerlendirme.
Ders Kitabı:	Ders için ana kaynak: <ul style="list-style-type: none"> Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, 2000.
Diğer Kaynaklar:	Gerekirse bazı ilave kaynaklar da verilebilir: <ul style="list-style-type: none"> Dersin Web sayfasında ders notları, kaynaklar v.b. öğrencilerin ihtiyaç duyabileceği yararlı bilgiler verilebilir, bir mesajlaşma listesi oluşturulabilir. John Preskill [3] ve Robert Griffiths'in [8] Web sayfasında kuantum hesaplama konusunda yararlanılabilecek çok güzel kaynaklar ve ders notları bulunmaktadır. Kuantum hesaplama ile ilgili araştırma makalelerine [34]'ten erişilebilir.
Dersin Kredisi:	3

Ders Saatleri:	1. gün (örneğin Çarşamba): 2 saat (örneğin 10:00 – 12:00). 2. gün (örneğin Cuma): 2 saat (örneğin 10:00 – 12:00).
Dersin Verilmesi:	Çarşamba günü eğitim verilir. Her bölüm işlenirken yardımcı ders notları , dersin kitabından çalışılacak bölümler v.b. mutlaka verilir. Ayrıca, her Çarşamba günü ödev sorular verilir ve sonuçları sonraki Çarşamba günü istenir. Cuma günü uygulama yapılır. Çarşamba günü verilen dersler değerlendirilir, öğrencilerin kendi başlarına neler yapabilecekleri tartışılır, soru(n) çözüme v.b. yapılır. <i>Kısa sınavlar da yapılabilir.</i> Alıştırma dersleri 1 veya 2 asistan tarafından verilebilir.
Değerlendirme:	Ödev: Her dersin sonunda verilir. Ödevlerin toplam değeri: %20'dir. Yıl içi sınavı: Bir tane yapılır. Yerine bir araştırma konusu da verilebilir. Değeri: %30'dur. Final sınavı: Bir tane yapılır. Yerine bir araştırma konusu da verilebilir. Değeri: %50'dir. Bütünleme sınavı: <i>İsteğe bağlı.</i> Kısa sınav: <i>İsteğe bağlı. Final sınavına katılım hakkı konusunda bir değeri olabilir.</i> Final sınavına katılabilmek için aşağıdaki şartlar istenebilir: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tüm derslere ve uygulamalara öğrenciler devam etmelidir. ▪ Her bir ev ödevi zamanında teslim edilmelidir. Problemlerin gruplar halinde tartışılması teşvik edilmelidir, ancak herkes kendi ev ödevini kendisi yapmalıdır. Geç gelen ödevler kabul edilmemelidir. ▪ <i>Kısa sınavlarda en az iki alıştırma doğru olarak çözülmelidir.</i> Sınavlarda kitap/notlar açık olabilir.

Kapsamı yukarıda verilen örnek kuantum hesaplama dersine benzer dersler yurtdışında pek çok üniversitede okutulmaktadır [3-10]. Ülkemizde ise nispeten çok azdır [11-14]. Kuantum hesaplama dersleri çoğunlukla bir bilgisayar bilimi bakış açısından öğretilmektedir. Böyle bir derste bilgisayar bilimi, kuantum fiziği ve kuantum teknolojilerinin temelleri kapsamaktadır.

4. GELİŞMELER [15]

Kuantum hesaplama teorisi ile ilgili çalışmalar, 1982'de Richard P. Feynman'ın bir *kuantum bilgisayarın* geleneksel bir bilgisayardan çok daha verimli olabileceğini öneren makalesi [16] ile başlamıştır. Yine 1982'de Benioff tarafından çeşitli kuantum mekaniksel hesaplama modelleri inşa edildi [17]. Ancak Deutsch [18]'de Benioff'un modelinin sıradan bir bilgisayar ile mükemmel bir şekilde benzetiminin yapılabileceğini tartışmıştır. Ayrıca, 1985'te yayınladığı yine bu önemli makalesinde [18] ilk kez hesaplama için tamamen kuantum bir model tanıttı ve bir "evrensel kuantum bilgisayar"ın tanımını verdi. Daha sonra da, [19]'da kuantum ağları tanımladı. Bir "evrensel kuantum Turing makinesi"nin inşası Bernstein ve Vazirani tarafından [20]'de iyileştirildi. Burada yazarlar diğer herhangi bir kuantum Turing makinesinin "polinomsal verimlilikle" benzetimini yapabilecek bir evrensel kuantum Turing makinesinin nasıl inşa edilebileceğini gösterdiler.

D. Deutsch'ün öncü çalışmasından sonra, 1994'te Peter W. Shor polinom zamanda tamsayıları çarpanlarına ayıran ve ayrık logaritmaları alan ünlü kuantum algoritmalarını [21] tanıttı. Bunu, 1996'da Grover'ın arama algoritması izledi [22]. Shor'un çalışmasına kadar kuantum hesaplama, yine de hesaplama teorisi içinde bir kenarda bir merak olarak kalmıştı. Shor'un çarpanları bulan algoritmasının önemi iyi bilinmektedir: gizli haberleşmeler için tasarlanan ünlü RSA kriptosisteminin güvenilirliği, çok büyük tamsayıların çarpanlarına ayrılmasının üstesinden gelinemez bir problem olarak

kalması varsayımına bağlıdır. Ancak, Shor eğer bir kuantum bilgisayar inşa edilirse bunun doğru olmadığını gösterdi. Böylece kuantum bilgisayarlar kullanarak kod-kırma araştırmaları hız kazandı ve büyük devletler tarafından da parasal olarak desteklenmeye başladı.

Bununla birlikte, teori pratikten çok daha gelişmiş durumdadır: henüz geniş-ölçekli bir kuantum bilgisayar inşa edilemedi. Temel bir zorluk birbiriyle çelişen iki gereksinimden ortaya çıkmaktadır: bir taraftan, mikroskopik bir kuantum sistemden oluşan bilgisayar belleği, çevre ile olan yıkıcı etkileşimi önlemek amacıyla mümkün olduğu kadar mükemmel bir şekilde izole edilmelidir; diğer taraftan, hesaplamanın devam etmesi ve bir "denetçi"nin kuantum sistemin istenen şekilde işlediğinden emin olması için "kuantum işlemci birimi" tamamen izole edilemez. Shor [23] makalesinde kuantum bilgisayarlar için hata-düzeltilme sistemlerinin nasıl inşa edilebileceğini gösterdi; böylece, "kuantum hata-düzeltilme kodları"nın teorisini kurdu. J. Preskill [24] makalesinde, kuantum hata-düzeltilme kodlarının kullanılmasıyla bir gün geniş-ölçekli bir kuantum bilgisayarının inşa edilebileceğini vurguladı; ancak, beklenip görülmesi gerekecek.

Kuantum bilgisayarlar ve bu bilgisayarlarla kod kırma cephesinde yukarıdaki gelişmeler yaşanırken, çok-güvenli mesajları göndermek ve almak üzere tamamen kuantum bir sistem, şimdiden, 100 km'nin üzerinde bir mesafe için gerçekleştirilmiş durumdadır [25,26]. Kuantum teknolojilerinden etkin olarak yararlanmak için 2020 yılı hedef gösterilmektedir, en azından böyle ümit edilmektedir [2]. Ülkemizin de kuantum hesaplama alanındaki 2020 hedefi "kendi teknolojisini üretmek ve katma değeri yüksek teknoloji ürünlerini rekabetçi pazarlarda satılabilmek" olmalıdır.

Kuantum hesaplama ve çalışmaları hakkında daha fazla bilgi edinmek için [27-40]'taki yerli ve yabancı kaynaklardan ve referanslarından faydalanılabilir.

Ayrıca, kuantum hesaplamadaki yeni gelişmeleri öğrenmek üzere Los Alamos arşivini [34] takip etmek de yararlı olabilir. Los Alamos arşivi 1994'ten bu yana kuantum hesaplama alanı üzerine yayınlanan çok sayıda makaleyi içermektedir.

5. SONUÇ

Kuantum hesaplama şu an bilgisayar bilimi, fizik ve mühendislikteki en sıcak konulardan biridir. Bu yeni hesaplama modeli son 60 yıldır kurulan düzeni sarsmaya başlamış durumdadır. Bu konudaki gelişmeler insanların bilgisayarların temel işlemleri, yetenekleri ve en son limitleri hakkındaki düşüncelerini değiştirmekte ve bilgisayar endüstrisinde kesin olarak bir devrime liderlik etmektedir. Yüksek eğitim kurumları kuantum hesaplama dersleri vermeye başlamakta ve bu konuda yeni doktora-sonrası pozisyonlar oluşturulmaktadır. Bilgisayar bilimi, fizik ve nükleer mühendislikten araştırmacılar, olağanüstü kuantum cihazlarını çalışmak üzere, tamamen disiplinler arası bir çabayı ve yeteneklerini birleştirme gayreti içine girmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın öğrencilere, araştırmacılara, öğretmenlere ve bu yeni konu hakkında daha fazla bilgi edinmek isteyen farklı disiplinlerdeki profesyonellere bir çağrı olacağı ümit edilmektedir. Ayrıca, genç bilim insanlarının kariyer yolları için kuantum hesaplamayı seçmelerine bir teşvik olması da ümit edilmektedir. Bugün bilgisayar bilimciler ile fizikçilerin eğitimleri arasında çok büyük bir fark bulunmaktadır. Bundan sonra öğrenciler, yalnızca daha en başından, hesaplama ile fizik birleştirilecek şekilde eğitilirse geçmiş bir çağın önyargılarından kurtulabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Moret B. M., The Theory of Computation, Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- [2]. Williams C. P. ve Clearwater S. H., Explorations in quantum computing, Springer, 1998.
- [3]. <http://www.theory.caltech.edu/~preskill/ph229/>, John Preskill'in "Kuantum Hesaplama" dersi, Erişim Tarihi: 2006.
- [4]. <http://www.media.mit.edu/quant/8.371/>, Isaac Chuang & Peter W. Shor'un "İleri Kuantum Hesaplama" dersi, E. T.: 2006.
- [5]. <http://web.mit.edu/2.111/www/>, Seth Lloyd & Peter W. Shor'un "Kuantum Hesaplama Giriş" dersi, E. T.: 2006.
- [6]. <http://www.cs.berkeley.edu/~vazirani/qc.html>, Umesh Vazirani'nin "Kuantum Hesaplama" dersi, E. T.: 2006.
- [7]. <http://www.cs.berkeley.edu/~vazirani/quantum.html>, Umesh Vazirani'nin "Kuantum Hesaplama" dersi, E.T.: 2006.
- [8]. <http://quantum.phys.cmu.edu/QCQI/>, Robert Griffiths'in "Kuantum Hesaplama ve Kuantum Bilgi Teorisi" dersi, E. T.: 2006.
- [9]. <http://www.dajmi.au.dk/~ivan/QIP.html>, Aarhus University Quantum Information Processing, Ivan Damgård & Louis Salvail, E. T.: 2006.
- [10]. <http://people.cmr.cornell.edu/~mermin/qcomp/CS483.html>, David Mermin'in "Kuantum Hesaplama" dersi, E. T.: 2006.
- [11]. <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~qubit/>, Bilkent University, Turkey Quantum Communications and Information Processing, Alexander Shumovsky & Erdal Arikan, E. T.: 2006.
- [12]. <http://web.deu.edu.tr/tcp/>, Kuantum Hesaplama (Quantum Computing) ve Kuantum Bilgi Teorisi (Quantum Information), Dokuz Eylül University - Physics Department Theoretical and Computational Physics Research Group, TCP Research Group, E. T.: 2006.

- [13]. http://cs.bilgi.edu.tr/pages/turing_days/turing2005/Turing2005-Turkce-Program-ve-Bilgilendirme.html, Turing Günleri '05: DNA Hesaplama ve DNA Bilgisayarları 13-14 Mayıs 2005, E. T.: 2006.
- [14]. http://www.yeditepe.edu.tr/7tepe/index_js.shtml?http://www.yeditepe.edu.tr/7tepe/egitim/lisans/muh_mim/bilgisayar_muh/ders_icerik.shtml, CSE 458 Kuantum Hesaplama, E. T.: 2006.
- [15]. Hirvensalo M., Quantum Computing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [16]. Feynman R. P., "Simulating physics with computers", International Journal of Theoretical Physics 21:6/7, s.467-488, 1982.
- [17]. Benioff P. A., "Quantum mechanical Hamiltonian models of discrete processes that erase their own histories: application to Turing machines", International Journal of Theoretical Physics 21:3/4, s.177-202, 1982.
- [18]. Deutsch D., "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer", Proceedings of the Royal Society of London A 400, s.97-117, 1985.
- [19]. Deutsch D., "Quantum computational networks", Proceedings of the Royal Society of London A 425, s.73-90, 1989.
- [20]. Bernstein E. ve Vazirani U., "Quantum complexity theory", SIAM Journal of Computing 26:5, s.1411-1473, 1997.
- [21]. Shor P. W., "Algorithms for quantum computation: discrete log and factoring", Proceedings of the 35th annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science – FOCS, s.20-22, 1994.
- [22]. Grover L. K., "A fast quantum-mechanical algorithm for database search", Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing – STOC, s.212-219, 1996.
- [23]. Shor P. W., "Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory", Physical Review A 52:4, s.2493-2496, 1995.
- [24]. Preskill J., "Robust solutions to hard problems", Nature 391, s.631-632, 1998.
- [25]. Bennet C. H. ve Brassard G., "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing", Proc. Int'l Conf. Computers, Systems & Signal Process., CS Press, s.175-179, 1984.
- [26]. Toyran, M., "Optik Ağlarda Kuantum Kriptografi Kullanarak Akıllı İletişim", Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu – ASYU 2006, s.164-168, 2006.
- [27]. Nielsen M. A. ve Chuang I. L., Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press, 2000.
- [28]. <http://www-math.mit.edu/~shor/>, Peter Shor'un Home Page, E. T.: 2006.
- [29]. <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/index.html>, John Preskill's Home Page, E. T.: 2006.
- [30]. <http://www.qubit.org/>, Centre for Quantum Computation, E. T.: 2006.
- [31]. <http://www.iqi.caltech.edu/index.html>, The Institute for Quantum Information, E. T.: 2006.
- [32]. <http://www.cpi.caltech.edu/index.html>, The Center for the Physics of Information, E. T.: 2006.
- [33]. <http://qso.lanl.gov/qc/>, Quantum Computation at Los Alamos, E. T.: 2006.
- [34]. <http://xxx.lanl.gov/find/quant-ph>, quant-ph preprint archive at Los Alamos E. T.: 2006.
- [35]. <http://www.csee.umbc.edu/~lomonaco/>, Samuel J. Lomonaco'nun Web sayfası, E. T.: 2006.
- [36]. <http://cs.bilgi.edu.tr/~bulent/kuantum.html>, Kuantum Hesaplama Teorisi: Bilgisayar Bilimcilerinin Kuantum Mekanik Keşfi, Bülent Özel, İstanbul Bilgi Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Bölümü, E. T.: 2006.
- [37]. Öztarhan A., Kubilay A. ve Ünal D., "Nicem Hesaplama (Quantum Computation) ve Bilgi Güvenliğinin Yeni Rotaları", Ağ ve Bilgi Güvenliği Ulusal Sempozyumu – ABG 2005, s.153-156, 2005.
- [38]. Toyran, M., "Kuantum Hesaplama ve Günümüz Kriptosistemlerine Etkisi", 3. Savunma Teknolojileri Kongresi – SAVTEK 2006, Cilt 2: Değerlendirme Bildirileri, s.243-252, 2006.
- [39]. www.yasinkaplan.com/docs/QC.pdf, "Quantum Computing", Yasin Kaplan, E. T.: 2006.
- [40]. http://www.atominsan.com/kuantum_bilgisayarlar.php, "Kuantum Bilgisayarlar", Raşit Gürdilek, E. T.: 2006.