



# Atanmış Bilgisayarlar ile Kuantum Ağların Dağıtık Benzetimi

## Distributed Simulation of Quantum Networks with Embedded System Devices

Osman Semi CEYLAN  
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Bilgisayar Mühendisliği  
Çanakkale - Türkiye  
osman.semi.ceylan@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-0442-0913

İhsan YILMAZ  
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi  
Bilgisayar Mühendisliği  
Çanakkale - Türkiye  
iyilmaz@comu.edu.tr  
ORCID: 0000-0002-0442-0913

### Öz

Günümüz kuantum ağ yapısı mimari bakımdan klasik ağ yapıları referans olarak kurulmuştur. Fakat kuantum ağı oluşturan aygıtların parçacık kontrol mekanizmaları nedeniyle klasik aygıtlara göre daha maliyetlidir. Deneysel bir kuantum ağın gerçekleştirme maliyetini arttıran bu sebepten dolayı bir kuantum ağ kurmadan önce olurluk benzetimleri yapılmaktadır. Fakat kuantum dolaşıklığın mevcut benzetim yöntemlerindeki üstel artan veri depolama kapasitesi gerektirdiğinden dolayı güçlükler yaşanmaktadır. Bu çalışmada bu probleme bir çözüm olarak kuantum ağların deneysel olarak birden fazla klasik cihaz yardımıyla dağıtık benzetim kullanarak daha az maliyetli olarak nasıl gerçekleştirilebileceği önerilmektedir. Bu amaç için geliştirilen eklenti yazılımı ile farklı ağ senaryolarında elde edilen sonuçlar dağıtık benzetim modelinin mevcut modellere göre daha etkin olduğunu göstermektedir.

**Anahtar sözcükler:** Kuantum Ağlar, Dağıtık Benzetim Modeli, Kuantum Benzetim

### Abstract

Today's quantum network structure was established architecturally by taking classical network structures as a reference. However, devices that create quantum networks are more costly than classical devices due to their particle control mechanisms. For this reason, which increases the cost of implementing an experimental quantum network, feasibility simulations are performed before establishing a quantum network. However, difficulties arise because quantum entanglement requires exponentially increasing

data storage capacity in existing simulation methods. In this study, as a

solution to this problem, it is suggested how quantum networks can be experimentally implemented in a less costly manner using distributed simulation with the help of multiple classical devices. The results obtained in different network scenarios with the plug-in software developed for this purpose show that the distributed simulation model is more effective than existing models.

**Keywords:** Quantum Networks, Distributed Simulation Model, Quantum Simulation

### 1. Giriş

Yarı iletken teknolojilerinde yaşanan gelişmelere paralel olarak araştırmacılar mikro ölçekli sistemler için boyut olarak daha küçük, ölçüm ölçütlerinde daha hassas ve kararlı çalışan aygıtlar üretmişlerdir. Bu gelişmelerin kuantum teknolojilerdeki yansımalarına bir örnek olan kuantum belleğin [1] geliştirilmesi yeni kuantum algoritmalar ve aygıtlar geliştirilmesine yol açmıştır. Böylelikle kuantum ağların yapıtaşısı olan kuantum yönlendirici ve yineleyici aygıtlar için deneysel çalışmalara ve yeni yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır [2-7]. Yerel olmayan kuantum bellek içeren iki kuantum aygıtın fotonik kanallar gibi iletişim kanalları [8-9] kullanarak bağlanması sonucunda deneysel kuantum ağlar üzerinde çalışmaların yapılması mümkün olmuştur. Bu gelişmelerin yanı sıra yerel kuantum işleme [10-12] ve çeşitli kuantum hata önleme [13, 15] tekniklerindeki gelişmeler ardından kuantum internet [16] kavramı ortaya atılmıştır. Kuantum internet birbirleri arasında yerel olmayan düğümler içeren bir topolojiden oluşan ve kuantum ağ aygıtlarının yanında klasik kontrol mekanizmaları içeren bir kuantum ağı

tarif etmektedir. Günümüz deneysel kuantum ağları [17-19] aslında kendi aralarında kapalı birer kuantum internetidir.

Kuantum ağın ölçeği, fiziksel konumu, üzerinde çalıştırılması ayrıntılarda oluşabilecek tutarsızlıklar ağın tamamen çalışmamasına yol açabilir. Her ne kadar bir kuantum ağ aygıtları günümüz klasik tasarımlar temelli olsalar da kuantum ağ aygıtların parçacıkları işleme yetenekleri de barındığından dolayı klasiğe göre mühendisliği ve üretimi daha zordur. Bu nedenle kuantum ağ benzetimi gerçekleştirebilen yazılımlar geliştirilmiştir. Kuantum ağ simülatör yazılımlarında kuantum durumun oluşturulması, kuantum operatör (kapı) uygulanması, kuantum gürültü modellenmesi, Kuantum Anahtar Dağıtım (QKD) protokolleri uygulanması, dolaşıklık takası uygulanması, Bell ölçümü, ağ ölçeklenebilirlik analizi, benzetim optimizasyonları, kuantum hata düzeltme işlemesi gibi çok çeşitli başarımlar ölçütleri çerçevesinde incelenmektedir. Fakat hiçbir mevcut genel amaçlı kuantum ağ benzetirleri tam teşekküllü bir ağ benzetimine olanak tanımamaktadır [20].

Kuantum durum hazırlama bağlamında kuantum ağ benzetirleri arka planda kübit benzetimleri için çeşitli modeller kullanmaktadır. Örneğin NetSquid [21], SimQN [20], QuISP [22] ve QuNetSim [23] matris tabanlı durum vektörleri kullanmaktadır. SQUANCH [24] ve QDNS [25] ise Clifford cebri tabanlı [26] da benzetim gerçekleştirebilirler.

Kuantum gürültü modellenmesi bağlamında QuNetSim, SimulaQron [27], SeQuEnCe [28] gibi kuantum ağ benzetirleri kanal gürültülerini uygulaması bulunmamaktadır. Bunlardan biri olan SimulaQron kullanıcıların ağ-katmanına bu özelliği elle eklemesi beklemektedir.

Ölçeklenebilirlik analizi ise kuantum ağ benzetirinin ne kadar fazla düğümü içeren bir kuantum ağını benzetebileceği ile ilgilenmektedir. Bu en büyük etken benzetirin bağımsız veya olay bağımlı olmasıdır.

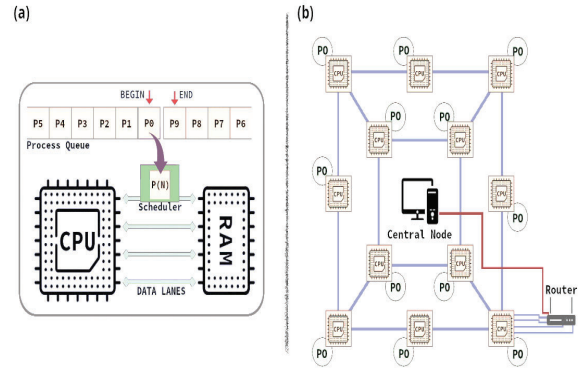
İşlevsellik bağlamında bazı kuantum ağ benzetirleri kuantum düğümlerin ağ-katmanını kullanıcıların olası gereksinimleri doğrultusunda hazır sistemler içermektedir. Örneğin QDNS ve QuNetSim kuantum ağa otomatik olarak yönlendirme ve kuantum yineleyici aygıtları ekleme özelliği bulunmaktadır.

Olay bağımlı yöntemle çalışan benzetirlerin klasik bilgisayarlarda çalıştırılmasında örneğin dolaşık parçacıkların benzetiminin gerçekleştirilmesi durumunda üstel olarak artan depolama kapasitene ihtiyaç olduğundan dolayı ölçeklenmesi güçtür [29]. Mevcut benzetirler sadece merkezi yürütme modeli kullanarak klasik bilgisayar üzerinde paralel benzetimler yapabilmektedir. Yukarıdaki probleme çözüm üretilmesi bağlamında bu çalışma orta ve büyük ölçekli kuantum ağların benzetimi için bilgisayarların paralel işlem gerçekleştirme yeteneğini dağıtık yürütme modelinde kullanarak kuantum ağların birden fazla klasik aygıtlar yardımıyla benzetimlenebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda bunun QDNS simülatöründe gerçekleştirilmesi için dağıtık yürütme modeli sağlayan eklenti yazılımı geliştirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen analizler QDNS'e eklenen eklenti yazılımı sonucunda elde edilmiştir.

Bu makalenin giriş bölümünde kuantum ağlar için benzetimlerin gerekliliği vurgulanmıştır. Ardından kuantum ağ benzetimleri için dağıtık yürütme modeli önerilmiştir. Makalenin 2. bölümünde dağıtık benzetim modeli verilmektedir. 3. Bölümde modelin QDNS benzetiri üzerinde uygulanması sunulmaktadır. Makalenin 4. Bölümde ise farklı kuantum ağ kurgularında yapılan benzetim testleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

## 2. Dağıtık Benzetim Modeli

Dağıtık benzetim, bir benzetim modelinin çok sayıda bilgi işlem kaynağına veya düğüme yayıldığı dağıtık yürütme modelinin benzetim yaklaşımıdır. Bu modelde benzetim tek aygıtta çalışmak yerine, birbirine bağlı aygıtlardan oluşan bir ağ üzerinden dağıtılır. Her aygıtta, tüm sistemin belirli bir bölümünü benzetme görevi atanır. Dağıtık benzetimler, büyük ölçekli, karmaşık sistemler veya önemli miktarda işlem kaynağı gerektiren işlem yüklerinde kullanılmaktadır. Büyük veri merkezlerinde de benzer sistemler kullanılmaktadır.



Şekil-1: Bir iş yükü için merkezi benzetim ile dağıtık benzetim arasındaki biçimsel farklar [29]. (a) Merkezi benzetim modeli. (b) Dağıtık benzetim modeli.

Şekil-1(a) merkezi benzetim ve Şekil-1(b) dağıtık benzetim modellerinin genel yapısını göstermektedir. Merkezi benzetim modelinde birçok işlemi yürütmek için tek işlemcinin gerekli olduğunu göstermektedir. Dağıtık benzetim modelinde ise ayrı ağlara bağlı çok sayıda işlem biriminin aynı iş yükünü işlediği dağıtılmış bir benzetim modelini göstermektedir.

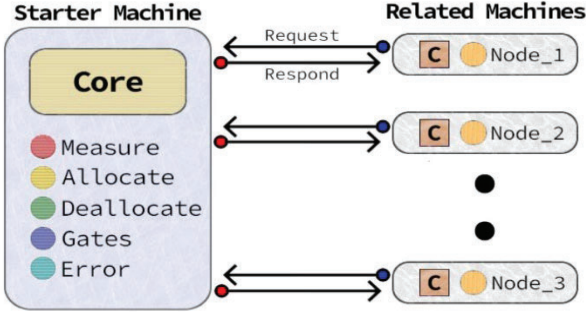
Genellikle, çekirdek sayısının tek bir aygıtta toplanmasının sınırlı olması nedeniyle kapsamlı benzetim iş yüklerini içeren durumlarda çok çekirdekli tek bir işlemci yerine dağıtık benzetim yaklaşımı tercih edilir. Bu bağlamda bu model, çok çekirdekli yürütme modeli ile benzerlik göstermektedir.

## 3. Dağıtık Benzetimin QDNS ile Gerçekleştirimi

Kuantum ağlarda dağıtık benzetim modelini verimli bir şekilde modellemek için benzetim zamanında veri bağımlılıklarına sahip kaynaklar tanımlanmalıdır. Bu nedenle benzetim senaryosu çalışırken kuantum işlemlerin gerçekleştiği taraflar açıkça bilinmelidir.

Şekil-2, dağıtık bir kuantum benzetim senaryosunda, senaryoyu başlatan düğümün benzetim için gereken depolama kaynaklarını nasıl tahsis ettiğini göstermektedir. Gelen istekler, senaryodaki diğer düğümlerin kullanmaları

gereken verilere erişmesine olanak tanır. Benzetim esnasında kuantum dalga fonksiyonu içeren veri-kuantum kaynaklar başka süreçlere ile bağımlılık gösterir ancak bu bağımlılık senaryoyu başlatan düğümlerin süreçleri ile sınırlıdır. Bu nedenle, bir kuantum ağı benzetiminde, merkezi benzetim modelindeki potansiyel darboğaz, birkaç yerel kuantum kaynağının aynı anda dağıtılmasıyla çözülür.



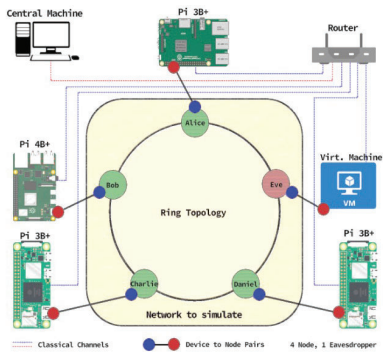
Şekil-2: Dağıtık bir benzetim senaryo esnasında eşleşmiş tarafların görevleri gösterilmektedir [29].

Bu çalışmada önerilen dağıtık benzetim modelini kuantum benzetimlerine entegre etmek için tarafımızdan geliştirilen QDNS kuantum simülatörü seçildi. Dağıtık benzetim geliştirilmesi, QDNS kuantum ağ simülatörünün bir uzantısı olarak uygulandı.

Bu dağıtık benzetimi gerçekleştirilmesini sağlayan eklenti QDNS'in yazılımsal çatı katmanında çalışmaktadır. Bu yöntemde her cihaz, kendine ait bir alıcısı olmasa bile, ağdaki ilgili düğümü taklit eden aygıtta gelen istekleri ve giden yanıtları iletme yeteneğine sahiptir.

#### 4. Sınamalar

Test ortamı 1 adet Raspberry 4B+, 1 adet Raspberry 3B ve 2 adet Raspberry Zero ve 1 adet ARM tabanlı sanal aygıttan oluşmaktadır. Ayrıca merkezi cihaz olarak bir masaüstü bilgisayar yapılandırılmıştır. Şekil-3'te test için kurulumu yapılan aygıtlar ve kurulan yerel ağ gösterilmektedir.



Şekil-3: Dağıtık benzetim için hazırlanan test aygıtlarını, ağ topolojisini ve sorumlu oldukları düğümleri göstermektedir [29].

Güvenli iletişim bağlamında kuantum mekaniği ilkelerini kullanan birçok kuantum iletişim modeli geliştirilmiştir. Bu iletişim modelleri kaynaklarda genelde BB84 [30] ve E91 [31] gibi iletişim protokolü olarak adlandırılmaktadır. Bir kuantum ağ senaryosu ise birbirini takip eden bir dizi protokollerden oluşmaktadır. Bu senaryolar, aşağıda belirtildiği gibi BB84 ve E91 kuantum ağ dağıtım protokollerinin çeşitli sıralarda

uygulanmasını içermektedir. Bu senaryolar BB84 ve E91 kuantum ağ dağıtım protokollerinin çeşitli sıralarda uygulanmasını içermektedir.

• **Ayrık senaryo:** Bu senaryoda benzetim başladığı anda Alice ile Daniel aralarında BB84 ve Bob ile Charlie aralarında E91 protokolü kullanarak anahtar üretimi yapacaktır. Tüm düğümler aynı anda en fazla bir çeşit senaryo gerçekleştirme yetkisine sahiptir [29].

• **Ardışık senaryo:** Benzetim sırasında Alice ve Bob, Bob ve Charlie, Charlie ve Daniel ve Daniel ve Alice adlı düğüm çiftleri BB84 veya E91 protokollerini rastgele yürütmektedir. Bu senaryoda, ağdaki tüm düğümler, ayrık senaryonun aksine birden fazla çeşit senaryo gerçekleştirme yetkisine sahiptir [29].

• **Bileşik senaryo:** Alice, benzetim sırasında Bob, Charlie ve Daniel'in de dahil olduğu BB84 ve E91 protokollerini eşzamanlı ve rastgele uygulamaktadır. Bu senaryo, kuantum kaynaklarının birleşik bir düğümde birleştirildiği durumu incelemektedir [29].

Test sırasında protokol tarafları her senaryoda 30 adet QKD protokolü çalıştırmaktadır. Böylelikle, benzetim sonucunda ayrık senaryonun toplam 60 adet tamamlanmış QKD protokolü, ardışık senaryonun 120 adet tamamlanmış QKD protokolü ve bileşik senaryonun 90 adet tamamlanmış QKD protokolü gerçekleştirmektedir. Eve düğümü ise her bir senaryoda saldırı görevini yürütmektedir [29].

Çizelge-1: Hazırlanan test düzeneğinde bulunan aygıtların bireysel performansı

Donanım	Kaynak Oluşumu	Operatör Uygulama	Durum Hazırlama	Ölçüm
Pi 4B+	1,000	0.6641	0.4912	0.1331
Pi 3B+	0.7406	0.4932	0.3793	0.0992
Pi Zero v2	0.5262	0.3514	0.2624	0.0702
Sanal Makine	0.4547	0.3026	0.2277	0.0651

Simüle edilen senaryolardaki işlem yükleri kaynak üretimi, durum hazırlığı, kapı uygulaması ve ölçüm olarak kategorize edilmektedir. Bu kategoriler, kuantum kaynak yönetimiyle bağlantılı performans ölçümleri üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bunların yanı sıra simüle edilen kuantum ağın iletişim kanal gürültü desenleri ve kuantum protokol sonlandırma eylemleri de etki eden diğer faktörlerdir. Elde edilen bulgular Tablo-1'de sunulmaktadır. Tüm sonuçlar sistemdeki en güçlü cihaz olan Pi 4B+ cihazının kaynak üretme performansına göre ölçeklendirilmiştir. Çizelge-1'den görülebileceği gibi aygıtların birçok parametrede işlem gücüyle doğrudan orantılı sonuçlar sergilediği görülmektedir.

Çizelge-2: Hazırlanan senaryoların çalışma zamanı (saniye)

Senaryo	Merkezi Model	Dağıtık Model	Dağıtık Model (Ağ gecikmesiz)
Ayrık Senaryo (60 QKD)	43.1	26.6	22.3
Ardışık Senaryo (120 QKD)	89.0	32.6	26.2
Bileşik Senaryo (90 QKD)	65.7	97.7	69.2

Test senaryolarına ait sonuçlar Çizelge-2 ile sunulmaktadır. Elde edilen test sonuçları dağıtık benzetim modelinde ayrı ve sıralı senaryolarının merkezi benzetim modeline kıyasla daha hızlı sonlandığını göstermektedir. Bileşik senaryo ise dağıtık benzetim modelinde merkezi benzetim modeline göre daha geç sonlanmaktadır. Aygıtlar arasındaki iletişim ağı gecikmeleri hariç tutulduğunda, bileşik senaryonun dağıtık ve merkezi benzetim modelinde birbirine yakın sürede sonlandığı görülmektedir [29].

Elde edilen sonuçlar, orta ve büyük ölçekli kuantum ağların benzetimi için bilgisayarların paralel işlem gerçekleştirme yeteneğini dağıtık benzetim modelinde kullanarak kuantum ağların klasik aygıtlar yardımıyla daha az maliyet ile kurgulanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma Ankara VIII. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi'nde sözlü sunumu yapılmıştır ve bildiri kitapçığında özeti yayınlanmıştır [32].

## Teşekkür

Hakemlere değerli görüşler ve önerilerinden dolayı teşekkür ederiz.

## Kaynakça:

- [1] Ouartchaiyapong, P., Lee, K. W., Myers, B. A., ve Jayich, A. C. B., *Dynamic strain-mediated coupling of a single diamond spin to a mechanical resonator.*, Nature communications, 2014, 5(1).
- [2] Sangouard, N., Simon, C., De Riedmatten, H., ve Gisin, N., *Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics.*, Reviews of Modern Physics, 2011, 83(1), 33-80.
- [3] Briegel, H. J., Dür, W., Cirac, J. I., ve Zoller, P., *Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication.*, Physical Review Letters, 1998, 81(26), 5932.
- [4] Zukowski, M., Zeilinger, A., Horne, M., ve Ekert, A., *"Event-ready-detectors" Bell experiment via entanglement swapping.*, Physical review letters, 1993, 71(26).
- [5] Dür, W., Briegel, H. J., Cirac, J. I., ve Zoller, P., *Quantum repeaters based on entanglement purification.*, Physical Review A, 1999, 59(1), 169.
- [6] Yuan, Z. S., Chen, Y. A., Zhao, B., Chen, S., Schmiedmayer, J., ve Pan, J. W., *Experimental demonstration of a BDCZ quantum repeater node.*, Nature, 2008, 454(7208), 1098-1101.
- [7] Zhao, B., Chen, Z. B., Chen, Y. A., Schmiedmayer, J., ve Pan, J. W., *Robust creation of entanglement between remote memory qubits.*, Physical review letters, 2007, 98(24), 240502.
- [8] Van Enk, S. J., Cirac, J. I., ve Zoller, P., *Photonic channels for quantum communication.*, Science, 1998, 279(5348), 205-208.
- [9] Gisin, N., ve Thew, R., *Quantum communication.*, Nature photonics, 2007, 1(3), 165-171.
- [10] Spiller, T. P., ve Munro, W. J., *Towards a quantum information technology industry.*, Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 18(1), V1.
- [11] Dowling, J. P., & Milburn, G. J., *Quantum technology: the second quantum revolution.*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 361(1809), 1655-1674.
- [12] Lloyd, S., *Universal quantum simulators.* Science, 1996, 273(5278), 1073-1078.
- [13] Hartmann, L., Kraus, B., Briegel, H. J., ve Dür, W., *Role of memory errors in quantum repeaters.*, Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2007, 75(3), 032310.
- [14] Dür, W., ve Briegel, H. J., *Entanglement purification and quantum error correction.*, Reports on Progress in Physics, 2007, 70(8), 1381.
- [15] Lafiamme, R., Miquel, C., Paz, J. P., ve Zurek, W. H., *Perfect quantum error correction code.*, Physical Review Letters, 1996, 77(1), 198-201.
- [16] Kimble, H. J., *The quantum internet.*, Nature, 2023, 453(7198), 1023-1030.
- [17] Elliott, C., Colvin, A., Pearson, D., Pikalo, O., Schlafer, J., ve Yeh, H., *Current status of the DARPA quantum network.*, Quantum Information and computation III, 2005, Vol. 5815, pp. 138-149.
- [18] Peev, M., Pacher, C., Alléaume, R., Barreiro, C., Bouda, J., Boxleitner, W., ve Zeilinger, A., *The SECOQC quantum key distribution network in Vienna.*, New journal of physics, 2009, 11(7), 075001.
- [19] Sasaki, M., Fujiwara, M., Ishizuka, H., Klaus, W., Wakui, K., Takeoka, M., ve Zeilinger, A., *Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network.*, Optics express, 2011, 19(11), 10387-10409.
- [20] Chen, L., Xue, K., Li, J., Yu, N., Li, R., Sun, Q., ve Lu, J., *SimQN: A network-layer simulator for the quantum network investigation.*, IEEE Network, 2023, 37(5), 182-189.
- [21] Coopmans, T., Kneijens, R., Dahlberg, A., Maier, D., Nijsten, L., de Oliveira Filho, J., ve Wehner, S., *Netsquid, a network simulator for quantum information using discrete events.*, Communications Physics, 2021, 4(1), 164.
- [22] Satoh, R., Hajdušek, M., Benchasattabuse, N., Nagayama, S., Teramoto, K., Matsuo, T., ve Van Meter, R., *Quisp: a quantum internet simulation package.*, In 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (pp. 353-364). IEEE.
- [23] DiAdamo, S., Nötzel, J., Zanger, B., ve Beşe, M. M., *Qunetsim: A software framework for quantum networks.*, IEEE Transactions on Quantum Engineering, 2021, 2, 1-12.
- [24] Joubert, T., Hodson, D. D., ve Grimaila, M. R., *An Examination into SQUANCH and its Conversion to Julia.*, In 2023 Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing (CSCE) (pp. 772-779). IEEE.
- [25] Ceylan, O. S., ve Yılmaz, İ., *QDNS: Quantum Dynamic Network Simulator Based on Event Driving.*, In 2021 International Conference on Information Security and Cryptology (ISCTURKEY) (pp. 45-50). IEEE.
- [26] Smith, K. N., Perlin, M. A., Gokhale, P., Frederick, P., Owusu-Antwi, D., Rines, R., ve Chong, F., *Clifford-based circuit cutting for quantum simulation.*, In 2023 Proceedings of the 50th Annual International Symposium on Computer Architecture (pp. 1-13).
- [27] Dahlberg, A., ve Wehner, S., *SimulaQron—a simulator for developing quantum internet software.*, Quantum Science and Technology, 2018, 4(1), 015001.
- [28] Wu, X., Kolar, A., Chung, J., Jin, D., Zhong, T., Kettimuthu, R., ve Suchara, M., *SeQeNce: a customizable discrete-event simulator of quantum networks.*, Quantum Science and Technology, 2021, 6(4), 045027.
- [29] Ceylan, O. S., ve Yılmaz, İ., *Kuantum ağ benzetimlerinin dağıtık yürütülmesi.*, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye, 2024.

- [30] Shor, P. W., ve Preskill, J., *Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol*, Physical review letters, 1984, 85(2), 441.
- [31] Ekert, A. K., *Quantum cryptography based on Bell's theorem*, Physical review letters, 1991, 67(6), 661.
- [32] Ceylan, O. S., ve Yılmaz, İ., *Gömülü Aygıtlar Kullanarak Kuantum Ağların Dağıtılmış Benzetimi*, In 2023 Ankara International Congress On Scientific Research-VIII. (pp. 762-763).