

## Kuantum Devrelerinde Kapı ve Giriş Tespiti için YOLO Tabanlı Bir Yöntem

Reyhan YILMAZ<sup>1</sup>, Orhan YAMAN<sup>2\*</sup>, Mehmet KARAKÖSE<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup> ryrehyanyilmaz@gmail.com, <sup>2</sup> orhanyaman@firat.edu.tr, <sup>3</sup> mkarakose@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22/03/2023;

Kabul/Accepted: 12/06/2023)

**Öz:** Tersinir kuantum devreleri farklı türde ve sayıdaki kuantum kapıları kullanılarak oluşturulmaktadır. Kuantum devreleri oluşturulurken kullanılacak kapı sayısının optimize edilmesi maliyeti ve karmaşıklığı azaltmaktadır. Tersinir kuantum devrelerinde durum tablolarının elde edilmesi ve optimizasyonu için giriş sayısı, çıkış sayısı ve kapı sayılarının bilinmesi önemlidir. Ayrıca bu parametreler kuantum devrelerinde oluşabilecek arızaların tespit edilmesinde de kullanılmaktadır. Literatürde kuantum devreleri için giriş, çıkış ve kapı sayılarının tespitinde eksiklik vardır. Ayrıca, literatürde yapılan uygulamaların test edilebilmesi için sınırlı sayıdaki standart kuantum devreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılabilir veri setlerinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi çalışmamızın amacını, önerilen yöntem ise çalışmamızın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Bu çalışmada Yolo (You Only Look Once) tabanlı yöntemler kullanılarak kapı sayısı ve giriş sayısı tespit edilmiştir. "MATLAB" ve "RCViewer+" programları kullanılarak CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışmada, 1-8 kapı sayısına ve 3-7 giriş sayısına sahip toplamda 5000 adet kuantum devre oluşturulmuştur. Elde edilen veri setleri üzerinde kapılar ve girişler etiketlenmiştir. Etiketlenen veri setleri üzerinde 80:20 eğitim ve test oranı ile YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x yöntemleri uygulanmıştır. YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x yöntemleri için sırasıyla %87.1, %89.7 ve %89.3 mAP hesaplanmıştır. Önerilen yöntem 2800 iterasyon çalıştırılmış ve en iyi sonuç YoloV7 algoritması ile elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kuantum, kuantum devresi, derin öğrenme, kapı tespiti, YoloV4, YoloV7.

### A YOLO-Based Method for Detection of Gate and Input in Quantum Circuits

**Abstract:** Reversible quantum circuits are constructed using different types and numbers of quantum gates. Optimizing the number of gates to be used while creating quantum circuits reduces the cost and complexity. It is important to know the number of inputs, outputs, and gates for obtaining and optimizing state tables in reversible quantum circuits. In addition, these parameters are also used to detect faults that may occur in quantum circuits. There is a lack of determination of the input, output, and gate numbers for quantum circuits in the literature. In addition, a limited number of standard quantum circuits are used to test the applications made in the literature. It has been determined that there are very few datasets that can be used in this context. Elimination of these deficiencies in the literature constitutes the aim of our study, and the proposed method constitutes the originality of our study. In this study, the number of gates and inputs were determined by using Yolo (You Only Look Once) based methods. A large dataset consisting of CNOT, Feynman, and Toffoli gates was created using the "MATLAB" and "RCViewer+" programs. In this study, a total of 5000 quantum circuits with 1-8 gate numbers and 3-7 input numbers were created. Gates and inputs are labeled on the obtained datasets. YoloV4, YoloV7, and YoloV7x methods were applied to the tagged datasets with a training and testing ratio of 80:20. 87.1%, 89.7% and 89.3% mAP were calculated for the YoloV4, YoloV7 and YoloV7x methods, respectively. The proposed method was run for 2800 iterations and the best result was obtained with the YoloV7 algorithm.

**Key words:** Quantum, quantum circuit, deep learning, gate detection, YoloV4, YoloV7.

#### 1. Giriş

Modern bilgisayarların gelişmesi ile birlikte çözülebilmesi zor veya zaman alabilen problemler çok daha hızlı bir şekilde çözülebilmektedir. Fakat daha hızlı çözülmesi gereken problemlerde klasik fizik ile açıklanan bu bilgisayarların yeterli gelmeyeceği bilinmektedir. Bu durumda kuantum fizik ile açıklanabilen kuantum bilgisayarlar ortaya çıkmıştır. Kuantum fizik ve klasik fizik birbirinden farklı iki çalışma alanıdır. Kuantum mekaniği ise klasik fiziğin bir alt kümesi olarak tanımlanabilir. Kuantum mekaniği, atomların, moleküllerin ve parçacıkların davranışlarını açıklamak için kullanılmaktadır. Klasik fizik makroskobik sistemlerin davranışlarını açıklarken kuantum mekaniği mikroskobik sistemlerin davranışlarını açıklamaktadır. Kuantum mekaniği,

\* Sorumlu yazar: [orhanyaman@firat.edu.tr](mailto:orhanyaman@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5899-0957, <sup>2</sup> 0000-0001-9623-2284, <sup>3</sup> 0000-0002-3276-3788

doğadaki bazı yönlerin rastgele olduğunu açıklamaktadır. Bir sistemin belirli özelliğinin ölçülebilmesi için o özelliğin belirli bir olasılık dağılımına sahip olduğunu belirtmektedir. Bu olasılık durumu dalga fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [1]. Kuantum mekaniği alanındaki gelişmeler kuantum bilgisayarların ortaya çıkmasına katkı sağlamıştır. Kuantum bilgisayarlar henüz başlangıç aşamasında olsa bile, bu teknolojinin gelişmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Gelecekte kuantum teknolojisinin gelişmesi ile birlikte çok daha hızlı kuantum bilgisayarları ortaya çıkacaktır. Sınırlı teknolojiye sahip klasik bilgisayarların yerini kuantum bilgisayarların alması ön görülmektedir. Günümüzde kuantum bilgisayarlar için özel olarak tasarlanmış algoritmalar mevcuttur [2]. Genetik algoritmalar [3], Back Tracking algoritması [4], derin öğrenme [5], kenar çıkarım algoritması [6], ve sinyal işleme [7] gibi algoritmalar geliştirilmiştir.

Kuantum bilgisayarlar ile klasik bilgisayarların çalışma mimarisi ve programlanması aralarındaki temel farkı oluşturmaktadır. Klasik bilgisayarlarda çalışma mimarisi ve programlama "bit" denilen ikili sayı sistemine göre yapılmaktadır. Her bir bit 0 veya 1 değerini alabilmektedir [8–11]. Bu durum klasik fizik ile açıklanabilmektedir. Fakat kuantum bilgisayarların temeli "kubit" yapısına dayanmaktadır. Kubitlerin yapısı ve davranış şekilleri kuantum mekaniği ile açıklanmaktadır [8–11]. Klasik bilgisayar teknolojisinde her bir bit fiziksel olarak ya 0 yada 1 durumunda olabilir. Yani klasik bilgisayarların çalışma yapısında bir kesinlik söz konusudur. Kuantum bilgisayarlar ise nesnelere kuantum durumlarını örnek almaktadır. Kuantum teknolojisine göre bir kubit aynı anda ve farklı oranlarda hem 0 hem de 1 değeri alabilmektedir [12]. Bu duruma "süperpozisyon" denilmektedir. Ayrıca, kuantum bitler arasında karmaşık etkileşimler denilen belirli bir bağlantı türü kurulabilir. Bu, kuantum bilgisayarların geleneksel bilgisayarlardan farklı hesaplama ve veri işleme yeteneklerine sahip olmasını sağlamaktadır [5].

Kuantum bilgisayarda hesaplama işlemleri kubit denilen kuantum bitleri ile yapılmaktadır. Sıradan bir bilgisayarda veriler 0 veya 1 değeriyle depolanmaktadır. Üç bit ile 8 farklı veri kombinasyonu oluşturulabilir (000, 001, 010, vb.) ve klasik bilgisayar aynı anda bunlardan sadece biri üzerinde çalışabilir. Kubitler ise aynı anda hem 0 hem de 1 değerlerine sahip olabilir ve süperpozisyon denilen bu durumda, bilgisayar 8 veri kombinasyonu üzerinde aynı anda işlem yapabilmektedir. Kuantum bilgisayarlarda eklenen her bir kubit ile bilgi işlem gücü katlanarak artmaktadır. Araştırmacılara göre 300 kubitlik bir kuantum bilgisayar, aynı anda evrendeki atomlardan daha fazla hesaplama yapabileceği öngörülmektedir [13]. Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları ve sembolleri Tablo 1'de gösterilmiştir [12,14–16].

Kuantum bilgisayarda hesaplama işlemleri kubit denilen kuantum bitleri ile yapılmaktadır. Sıradan bir bilgisayarda veriler 0 veya 1 değeriyle depolanmaktadır. Üç bit ile 8 farklı veri kombinasyonu oluşturulabilir (000, 001, 010, vb.) ve klasik bilgisayar aynı anda bunlardan sadece biri üzerinde çalışabilir. Kubitler ise aynı anda hem 0 hem de 1 değerlerine sahip olabilir ve süperpozisyon denilen bu durumda, bilgisayar 8 veri kombinasyonu üzerinde aynı anda işlem yapabilmektedir. Kuantum bilgisayarlarda eklenen her bir kubit ile bilgi işlem gücü katlanarak artmaktadır. Araştırmacılara göre 300 kubitlik bir kuantum bilgisayar, aynı anda evrendeki atomlardan daha fazla hesaplama yapabileceği öngörülmektedir [13]. Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları ve sembolleri Tablo 1'de gösterilmiştir [12,14–16].

### 1.1. Kuantum Kapıların Programlanmasında Kullanılan Araçlar

Herhangi bir kuantum devresi tasarlamak için temel tersinir kapılara, programlama bilgisine ve tasarım görüşüne ihtiyaç vardır. Kuantum bilgisayarlarında kubitleri tasarlamak ve hesaplamak için Qiskit (IBM), pyQuil (Google), ProjectQ (ETH), Revkit ve RCViewer + gibi simülatör araçları vardır [17].

- **Qiskit:** Kuantum devrelerinin sentezlenmesinde simülasyonunda kullanılan açık kaynaklı bir araçtır. Aynı zamanda, kuantum devre hata analizi olarak kullanılabilir. IBM tarafından geliştirilen bu araçta, standart kapılar, Boole mantık devreleri kapıları, birçok genelleştirilmiş kapı, birçok aritmetik devre, toplayıcı, karşılaştırıcı ve veri kodlama devreleri işlemler gerçekleştirilebilmektedir [17].
- **pyQuil:** python platformunu kullanarak kuantum programlama için geliştirilmiştir. Bu pyQuil aracı ile; kuantum kapıları ve işlemleri için program geliştirme, python'da quil programlarını derlemek ve simüle etmek ve bir kuantum işlemcisi gibi bir quil programı oluşturabilmektedir [17].
- **ProjectQ:** kuantum hesaplama devrelerini analiz etmek için geliştirilen açık kaynaklı bir araçtır [17]. Python'da kuantum programları aracılığıyla kuantum devresini sentezleyebilmektedir.
- **Revkit:** Tersinir devrelerin sentezi, optimizasyonu ve doğrulanmasında kullanılan açık kaynaklı bir araçtır [18].
- **RCViewer +:** Tersinir devrelerin tasarlanmasında ve parametre çıkarımında kullanılan bir araçtır. Bu

aracın avantajı, .tfc dosyamız varsa, .tfc dosyasını kullanarak kuantum devresini oluşturabilmektedir. Oluşturulan kuantum devreleri bitmap formatında kaydedilebilmektedir [18]. Ayrıca RCViewer+'da bir optimizasyon özelliği vardır. Optimizasyon özelliği sayesinde, bazı kuantum kapılarını ve optimal devre formunu birleştirebilmektedir. Optimal bir devrenin avantajı, performans parametrelerinin kuantum maliyeti gibi iyi olmasıdır. Daha az kuantum maliyetinin faydası, kuantum devrelerinde daha az sayıda kuantum kapısına ihtiyaç duymasındır [17].

Kuantum kapılarının tasarlanmasında kullanılan araçların özellikleri incelendiğinde veri seti oluşturmak için "RCViewer +" programı tercih edilmiştir. Bu programın tercih edilmesinin nedeni, veri seti oluştururken üretilen .tfc dosyalarının kuantum devrelerine dönüştürülebilmesidir. Aynı zamanda üretilen kuantum devrelerinin bitmap formatında görüntü olarak kaydedilebilmektedir.

**Tablo 1.** Tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapılar [12,14–16].

	Kapı Adı	Sembolü	Açıklama
Tek kubitlik kuantum kapılar	Hadamard		Hadamard kapısı, kubitleri süperpozisyona sokmaktadır. Süperpozisyon, kuantum mekaniğindeki önemli bir kavramdır ve bir kubitin birden fazla durumda olabilmesine izin vermektedir.
	Pauli-X, NOT		Pauli X veya NOT kapısı olarak adlandırılan bu kuantum kapısı verilen kubit değerini tersine çeviren bir girişli ve bir çıkışlı kapıdır.
	Pauli-Y		Pauli Y kapısı, Pauli X kapısına benzer şekilde Bloch küresi üzerinde döndürme yapar. Pauli X kapısı X ekseninde döndürme yaparken Pauli Y kapısı ise Y ekseninde döndürme yapar.
	Pauli-Z		Pauli Z kapısı ise Bloch küresi üzerinde Z ekseninde döndürme işlemi yapmaktadır.
Çok kubitlik kuantum kapılar	CNOT (controlled-NOT) (2 kubit)		Kontrollü NOT kapısı 2 girişli ve 2 çıkışlı kubit bulunan terslenebilir bir kuantum kapısıdır. CNOT kapısında ilk kubit 1 olunca, ikinci kubit tersine çevrilmektedir.
	Swap (2 kubit)		2 girişli ve 2 çıkışlı bir kuantum kapısıdır. Swap kapısı girişindeki kubitleri yer değiştirmektedir.
	controlled-Z (2 kubit)		Kontrollü Z kapısı iki girişli ve bir çıkışlı kuantum kapısıdır. İlk kubit 1 olması durumunda hedef kubitte Z kapısı uygulanmaktadır.
	Toffoli (3 kubit)		3 girişli ve 3 çıkışlı bir kuantum kapısıdır. Toffoli kapısı, CNOT kapısına bir kontrol girişi daha eklenmesi ile oluşmaktadır. CCNOT kapısı olarak adlandırılabilir. İlk iki kubit 1 olması durumunda üçüncü kubit tersine çevrilmektedir.

Tablo 1'de verilen tek kubitlik ve çok kubitlik kuantum kapıları kullanılarak kuantum devreleri oluşturulmaktadır.

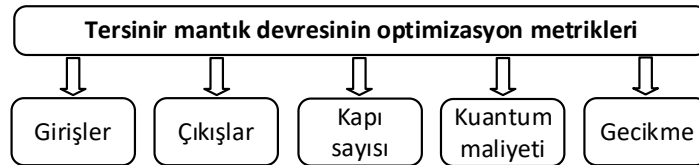
## 1.2. İlgili Çalışmalar

Kuantum devrelerinde oluşabilecek arıza modelleri için literatürde çalışmalar mevcuttur [5,19–24]. Kheirandish vd. [12] kuantum devrelerinde doğruluk ve geçerliliği sağlamak için arıza tespitinin önemli olduğunu vurgulamışlardır. Tersinebilir kuantum devrelerin test edilebilirliğini elde etmek için kuantum maliyeti ve hata kapsama oranı açısından geliştirilmiş iki teknik sunmuşlardır. Bu yönü göz önüne alındığında, bu tekniklerin ana odak noktası, arızaların %100 doğrulukla verimli bir şekilde tespit edilmesi ve konumlandırılmasıdır. Tersinebilir devre tasarımında arıza tespitine yönelik bu teknikler, doğru çıkışları üretebilmenin yanı sıra, hâlihazırda daha yüksek bir maliyetle yapılmış olan arıza yeri tespiti için de bilgi sağlayabilmektedir. Önerdikleri yaklaşım ile tüm SMGF, MMGF, PMGF, RGF ve SBF türleri için başarıyla test etmişlerdir. Önerilen şemanın işlevsel doğruluğunu sağlamak için tersinir bir tam toplayıcı devresi üzerinde de test etmişlerdir. Kheirandish vd. [15] herhangi bir flip-flops olmadan doğrudan geri besleme tekniğinin optimize edilmiş bir versiyonunu önermiştir ve sayaçlar ve kaydırma yazmaçları gibi birkaç tersinir devre tasarımı örneği üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Doğrudan teknikteki kısmi değişikliklerle, kuantum maliyetinin ve diğer maliyet ölçümlerinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda, düşük maliyetli tasarımına sahip tersinir paralelden seriye dönüştürücünün bazı verimli tasarımlarını da

sergilemiştir. Analiz ve karşılaştırma, önerilen tüm yeni tasarımların, kuantum maliyeti, T kapı sayısı ve devrenin T derinliği dâhil olmak üzere performans değişkenleri açısından mevcut çalışmaları optimize edildiğini göstermiştir. Handique vd. [16] NOT, CNOT, Toffoli kapıları (NCT kütüphanesi) ile tasarlanmış tersinir bir devrede köprüleme arızalarını tespit etmişlerdir. Kuantum devrelerindeki hataları tespit etmek için Otomatik Test Modeli Oluşturma (ATPG) yöntemi önermişlerdir. Deneysel sonuçların analizi, önerilen yöntemin %100 hata kapsamına sahip olduğunu ve test seti boyutunun mevcut yöntemlerden daha küçük olduğunu göstermişlerdir. Pathak vd. [17], Qiskit (IBM), pyQuil (Google), ProjectQ (ETH), Revkit ve RCViewer+ gibi süper pozisyon, dolaşıklık ve kuantum programlama araçları gibi kuantum özellikleri hakkında temel bilgiler sunmuşlardır. Kuantum devresini ve Toffoli, Fredkin, Peres gibi kapıların ayrıştırılmış devresini ve yeni hata toleranslarını hesaplamışlardır. Ayrıca, algoritmayı, doğrulamaya dayalı olarak genişletilmiş kuantum devresine dönüşüm kaskadı olarak önermişlerdir. Klasik bilgisayar kapıları ile kuantum kapılarının özelliklerini karşılaştırmışlardır. Literatürde kullanılan kuantum simülasyon araçları hakkında bilgi vermişlerdir.

Gaur vd. [19] tersine çevrilebilir mantık devrelerinde farklı arıza modellerinin tanımlanması için çeşitli test metodolojileri önermişlerdir. Çeşitli performans parametrelerine göre ölçeklendirmiştir. Tüm alanı verimli bir şekilde keşfederek optimuma yakın bir çözüm elde etmeyi amaçlayan literatürden arıza modellerine, performans parametrelerine ve çevrimdışı test yaklaşımlarına ilişkin toplu bilgileri getirmiştir. Makale, araştırmacılar tarafından bildirilen ve otomatik test modeli oluşturma (ATPG) ve test edilebilirlik için tasarım (DFT) metodolojileri olmak üzere iki geniş sınıflandırmada sunulan bir dizi test stratejisini eleştirel bir şekilde analiz etmiştir. Lukac vd. [25] kuantum devrelerinde oluşabilecek arıza modellerini açıklamıştır. Arıza türlerini; “Stuck-at”, “Delay”, “Missing Gate”, “Wrong Gate” ve “Bridging” arızaları olarak vermiştir. Perkowski vd. [26] kuantum devrelerinde arıza oluşturma ve arızaların konumlarının tespiti için bir çalışma yapmışlardır. Genel olarak standart devrelerin testinde kullanılan yöntemleri takip edilse de iki önemli fark vardır: (1) arızaları tespit etmek için hem deterministik hem de olasılıksal testleri kullanılmaktadır, (2) dâhili durumları belirlemek için özel ölçüm kapıları kullanılmaktadır. Olasılık bilgilerini içeren bir Hata Tablosu oluşturulur. Daha sonra standart devrelerde bilinenleri genelleştiren “olasılıksal küme kaplama” ve “olasılık uyarlanabilir ağaçlar” kullanılır [26]. Kızılırmak tez çalışmasında [27] kuantum hata düzeltme yöntemlerinin temelleri, işleyiş mekanizmaları ve bu mekanizmaların kuantum geçitler yoluyla hayata geçirilmesi ve kuantum devrelere uygulanması incelenmiştir.

Thakral vd. [28] tersine çevrilebilir (tersinir) mantık kapılarının kuantum maliyetini hesaplamak için RCViewer+aracı kullanarak kuantum uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Önerilen kuantum uygulama yöntemi, R kapısına uygulanmış ve kuantum maliyetini doğrulamak için RCViewer+ aracı kullanılarak test edilmiştir. Literatürde geliştirilen birçok kapının kuantum uygulaması ve ilgili kuantum maliyeti, literatürde hala bilinmemektedir. Kuantum devrelerinin geliştirilebilmesi için kuantum kapılarının maliyetinin bilinmesi önemlidir. Tersinir mantık devresinin optimizasyon metriklerini Şekil 1’de özetlemiştir [28].



Şekil 1. Thakral vd. [28] tarafından verilen tersinir mantık devresinin optimizasyon metrikleri.

Şekil 1’de görülebildiği gibi tersinir kuantum devrelerinin optimizasyonu için girişler, çıkışlar, kapı sayısı, kuantum maliyeti ve gecikme verileri önemlidir. Thakral vd. [28], kuantum devrelerinin maliyetini hesaplamışlardır. Kuantum maliyetini hesaplamak için RCViewer+ aracı kullanılarak Toffoli kapıları üzerinden uygulama yapmışlardır. Thakral vd. [18,29,30] tarafından kuantum devrelerinin optimizasyonu ve uygulamaları için birçok çalışma geliştirmişlerdir. Thabah vd. [31] tersinir ikili kodlu ondalık toplayıcıyı tasarlamak için bir yaklaşım önerilmişlerdir. Paralel uygulama ile kapıların uygun seçimi ve düzenlemeleri, önerilen tasarımın tersine çevrilebilir performans parametrelerinde iyileştirmeler göstermesini sağlamışlardır. Önerdikleri tasarım, literatürde bulunan mevcut emsallerine kıyasla kuantum maliyetinde en az %10 iyileştirme ile en verimli tasarımı göstermektedir. Ayrıca önerilen tasarım, RCViewer+ aracı kullanılarak kuantum devre ile test etmişlerdir. Kamaraj vd. [32] temel tersinir kapılar ve bazı mevcut kapılar için fonksiyonel kuantum kapıları ve Kontrollü-V ve V + kapı yapısı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Kuantum devresinin kubit kapısı indirgeme prosedürü kullanılarak, fonksiyonel ifadenin kuantum maliyeti ve ilkel kapılarının sayılarını çıkarmışlardır. Kuantum maliyeti, kapı sayısı, çıkışlar ve girişler sentezlendikten sonra optimize edilmemiş devre ile karşılaştırmışlardır. Kuantum devresi ve kontrollü V ve V+ yapısı, .tfc (“Toffoli-Fredkin Cascade”) kodu kullanılarak RCViewer+

aracında gerçekleştirmişlerdir. Sultana v.d. [33] dört giriş ve dört çıkışa sahip Toffoli kapılar kullanarak örnek kuantum devreler üzerinde optimizasyon geliştirmiştir. 16 adet kuantum devresi üzerinde optimizasyon işlemi yaparak kuantum maliyeti, kapı sayıları ve iki kubitli kapı sayıları hesaplanmıştır. Bu parametreler optimizasyon sonucu ile karşılaştırılmış ve karmaşıklıkları verilmiştir. Kalantari vd. [34] tersinir senkron sıralı devrelerin doğrudan ve kompakt bir tasarım önermişlerdir. Ardışık mantık devrelerinin kuantum maliyetini azaltmak için EXOR of Products of EXOR (EPOE) ifadelerini uygulamışlardır. Durum makineleri, sayaçlar ve kaydırma yazmaçları gibi bazı pratik sıralı devreler için tasarımları sunmuşlardır. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için, pratik bir sıralı sistem tasarlamak için tersinebilir kuantum kapılar ve kendi kendini kontrol eden toplayıcılar tasarlamışlardır. Tasarımları performans maliyeti faktörlerini önemli ölçüde azaltmıştır.

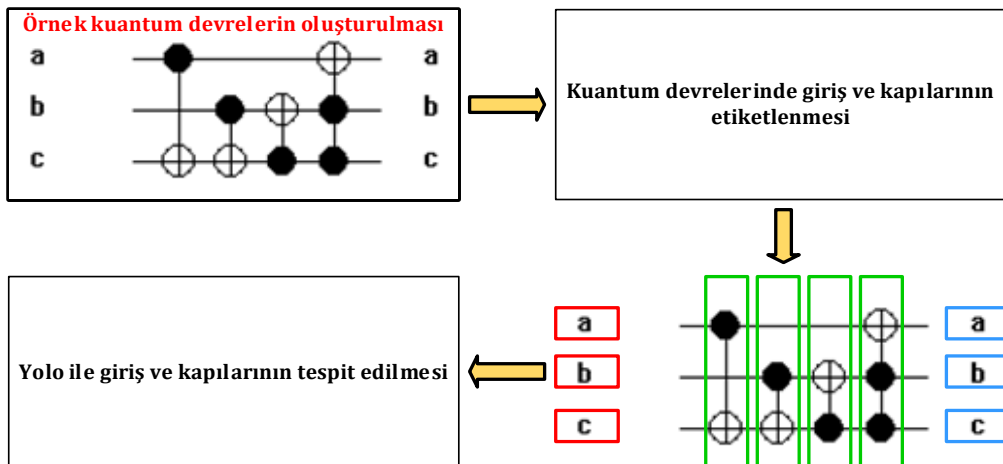
Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde, genellikle kuantum devrelerinde arıza tespiti, doğruluk tablolarının oluşturulması ve optimizasyon için yöntemler geliştirilmiştir. Kuantum devrelerinde kapı arızaları, doğruluk tablolarının oluşturulması ve optimum devrelerin üretilmesi için giriş sayıları, çıkış sayıları, kapı sayıları ve maliyetinin hesaplanabilir olması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda sınırlı sayıda kuantum devreleri kullanılmıştır. Literatürde kuantum devrelerinin sınırlı olması veya bu alanda büyük veri setlerinin olmaması çalışmaları kısıtlamaktadır.

### 1.3. Motivasyon

Literatürde tersinir kuantum devreleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kuantum devrelerinin optimizasyonu için giriş, çıkış ve kapı sayılarının bilinmesinin önemli olduğu görülmektedir [28]. Kuantum devrelerinde giriş, çıkış ve kapı sayılarının otomatik olarak tespit edilebilmesi için literatürde eksiklik olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki bu eksiklik çalışmamızın ana motivasyonunu oluşturmuştur. Aynı zamanda literatürdeki yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan uygulamaların test edilebilmesi için sınırlı sayıdaki standart kuantum devreleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılacak veri setlerinin çok az olduğu tespit edilmiştir. Kuantum kapıları ile ilgili yapılacak çalışmalarda kullanılacak veri setlerinin yetersiz olması çalışmamızın bir diğer motivasyonudur. Bu çalışmada, CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setine ait hem “.tfc” dosyaları hem de “.bmp” görüntüleri mevcuttur. Kuantum devrelerine ait “.bmp” görüntüleri üzerinden giriş ve kapı sayılarının hızlı ve yüksek doğruluk ile tespit edilebilmesi çalışmamızın diğer motivasyonudur. Bu çalışmada CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan veri seti için YOLO tabanlı bir yöntem önerilmiştir.

## 2. Materyal Metot

Bu çalışmada (1-8) kapılı kuantum devreler oluşturulmuştur. Bu devreleri bilgisayar ortamında MATLAB ve “RCViewer+” programları kullanılmış ve 5000 tane farklı giriş ve kapı sayısına sahip kuantum devreleri üretilmiştir. Bu veri setlerini oluşturmamızdaki amaç bu devrelerin giriş-çıkış devre kapı sayılarını öğrenip bu veri setinin durum tablosunu çıkarmak ve istediğimiz durum tablosuyla hatalı devredeki durum tablosunu karşılaştırıp bu devrede hata olup olmadığını tespit edebilmektir. Bu çalışmada önerilen yöntemin grafiksel özeti Şekil 2’de gösterilmiştir.

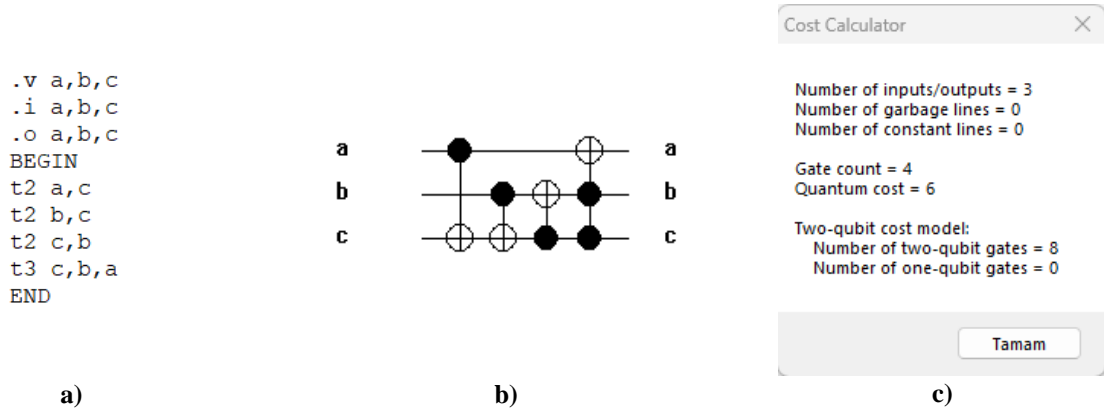


Şekil 2. Kuantum devre ve giriş sayılarının tespiti için önerilen yöntemin grafiksel özeti.

Şekil 2’de görülebileceği gibi ilk olarak klasik bilgisayarlar üzerine kurulan “RCViewer+” kuantum simülatörleri kullanılarak veri seti toplanması amaçlanmıştır. Toplanan veri seti üzerinde giriş ve kapı elemanlarının tespiti için Yolo algoritması kullanılmıştır.

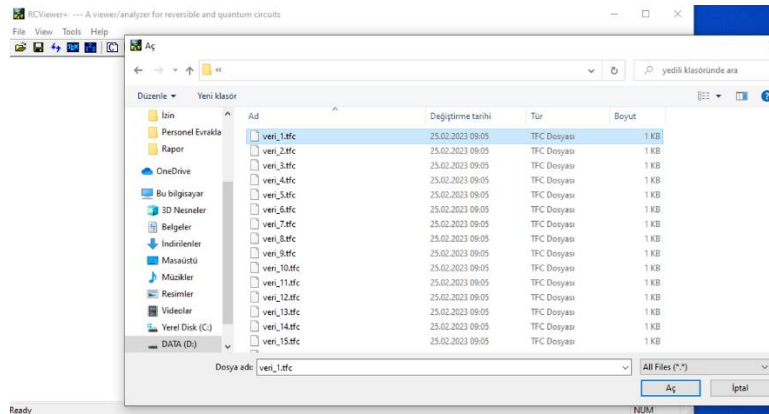
## 2.1. Veri Seti

Önerilen yöntemde ilk aşama olarak örnek kuantum devreleri oluşturulmuştur. Kuantum devreleri oluşturulurken MATLAB programı kullanılmış ve paket program geliştirilmiştir. Bu paket programında “.tfc” dosyaları oluşturulmuştur. “RCViewer+” kuantum simülatörleri kullanılarak “.tfc” dosyaları kuantum devrelerine dönüştürülmüştür. Şekil 3’te 3 girişli/çıkışlı ve dört kapılı örnek kuantum devresine ait kaynak kod (.tfc dosyası) ve kuantum devresi verilmiştir.



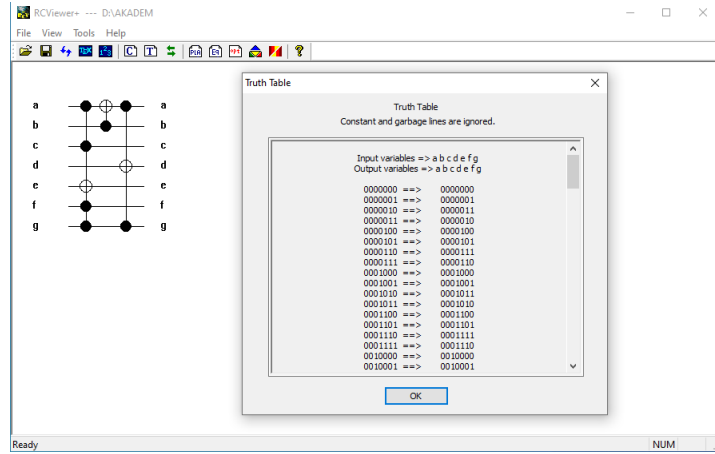
Şekil 3. Veri setinin toplanmasında kullanılacak örnek kuantum devresi; a) kaynak kod, b) kuantum devresinin devre şeması c) Kuantum devresine ait maliyet bilgileri.

Veri setinin toplanması aşamasında öncelikle Şekil 3.a’da verilen “.tfc” dosyası oluşturulmuştur. 3-7 girişli/çıkışlı ve farklı kapı sayılarına sahip 5000 “.tfc” dosyası elde edilmiştir. Bu “.tfc” dosyaları örnek kuantum devresinin kaynak kodunu oluşturmaktadır. “.tfc” dosyalarını oluşturmak için MATLAB 2020A programı kullanılarak bir paket program geliştirilmiştir. “RCViewer+” programı ile “.tfc” dosyalarının açılması Şekil 4’te görülmektedir.



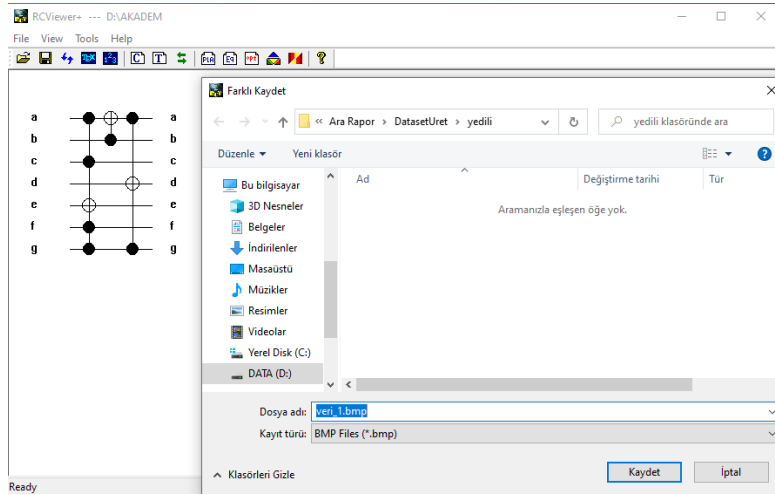
Şekil 4. “RCViewer+” programı ile “.tfc” dosyalarının açılması.

Şekil 4’te görüldüğü gibi “RCViewer” programı “.tfc” dosyalarını desteklemektedir. Girilen “.tfc” dosyalarını kullanarak kuantum devrelerini şekilleri elde edilebilmektedir. Aynı zamanda oluşturulan kuantum devrelerin doğruluk tabloları da oluşturulabilmektedir. Şekil 5’te örnek “.tfc” dosyasından elde edilen kuantum devre şeması ve doğruluk tablosu verilmiştir.



Şekil 5. Örnek “.tfc” dosyasından elde edilen kuantum devre şeması ve doğruluk tablosu.

Şekil 5’te oluşturulan kuantum devre şemaları “.bmp” formatında resim olarak kaydedilebilmektedir. “RCViewer+” programı ile örnek kuantum şemasının “.bmp” formatında kaydedilmesi Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. “RCViewer” programı ile örnek kuantum şemasının “.bmp” formatında kaydedilmesi.

Bu çalışmada verilen örnek kuantum devre oluşturma adımları ile 5000 adet kapı ve giriş devrelerine sahip “.tfc” dosyası için tekrarlanarak veri seti oluşturulmuştur. Kapı sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri Şekil 7’de verilmiştir.

Şekil 7 ve Şekil 8’de verilen örnek devrelerden oluşan veri setleri Şekil 9’daki gibi etiketlenmiştir. Etiketleme adımı için “labelImg” programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında toplanan 5000 adet örnek kuantum devresi manuel olarak etiketlenmiştir.

Önerilen yöntemde toplanan veri seti eğitim ve test olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Veri setinin %80’i eğitim ve %20’si test verisi olacak belirlenmiştir. Şekil 9’da görülebileceği gibi görüntü içerisindeki ilgili alan bir çerçeve içerisinde alınıp, “kapı” ve “giriş” olmak üzere iki farklı sınıf olarak etiketleri oluşturulmuştur.

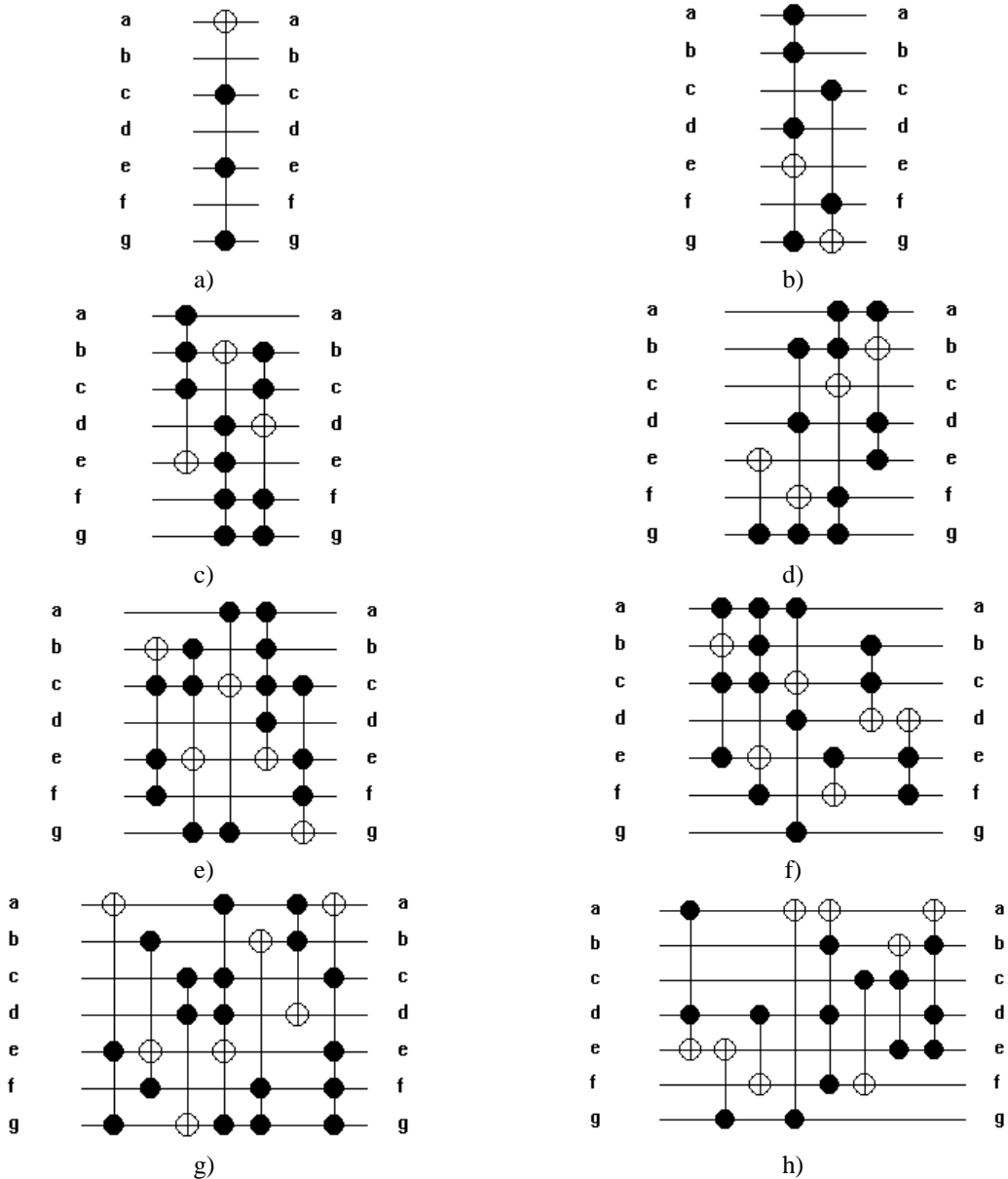
Her kuantum devresi için bir “.txt” dosyası oluşturulmaktadır. Bu dosyalarda kapı ve girişlerin x ve y koordinatlarının yükseklik ve genişliğini içeren veriler bulunmaktadır. Bu işlem veri setindeki tüm kuantum devreler için tekrarlanmış ve etiketli bir veri seti oluşturulmuştur. Etiketlenen görüntülerin eğitilmesi için Yolo algoritması kullanılmıştır. Yolo (You Only Look Once) algoritması modeli yüksek işleme hızından dolayı daha net sonuçlar vermektedir [35–37].

Yolo algoritmasının yaygın kullanılmasının sebebi, bu algoritmanın nesne tespitini oldukça hızlı bir şekilde ve tek seferde yapabiliyor olmasıdır. Yolo algoritmasının diğer algoritmalarından daha hızlı olmasının sebebi resmin

tamamını tek seferde nöral bir ağdan geçiriyor olmasıdır. Yolo algoritması görüntüler üzerinde tespit ettiği nesnelerin çevresini "bounding box" ile çerçevelemektedir.

Yolo kendisine girdi olarak verilen görüntüyü  $N \times N$  ızgaralara bölmektedir. Bu ızgaralar  $5 \times 5$ ,  $9 \times 9$ ,  $17 \times 17$  olabilir. Her ızgara kendi içerisinde nesne olup olmadığını ve nesne var olduğunu düşünüyorsa merkez noktasının kendi alanında olup olmadığını düşünür. Nesnenin Merkez noktasına sahip olduğuna karar veren ızgara o nesnenin sınıfını, yüksekliğini ve genişliğini bulup o nesnenin çevresine bounding box çizmektedir.

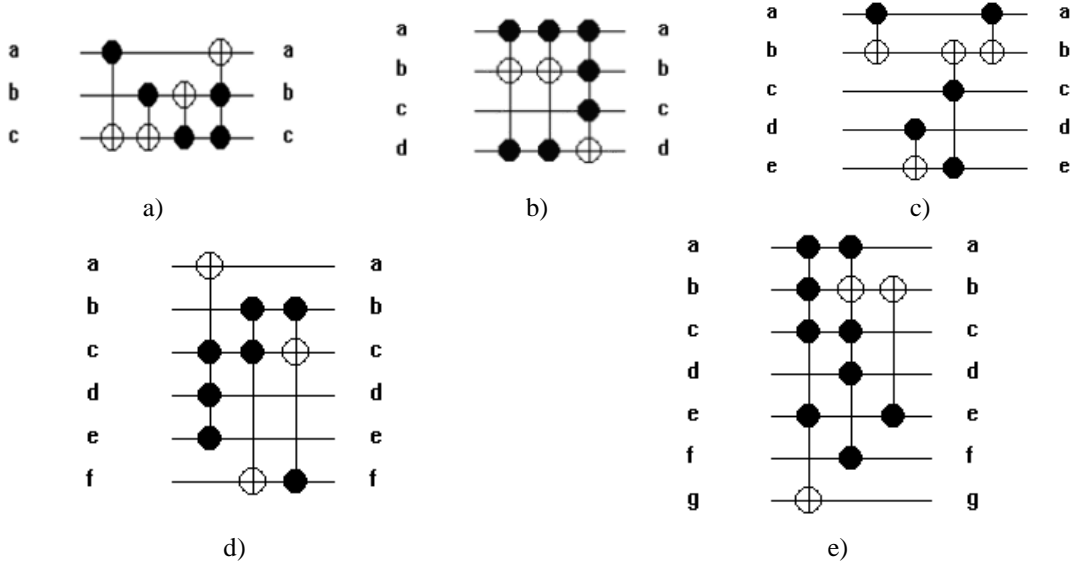
Birden fazla ızgara, nesnenin kendi içerisinde olduğunu düşünebilir. Bu durumda ekranda gereksiz bounding boxlar oluşur. Bütün bounding boxların güven skoru vardır. Non-max Suppression algoritması görüntü üzerinde tespit edilen nesneler için çizilen bounding boxlardan güven değeri en yüksek olanı ekrana çizer. YOLO algoritmasının tercih edilme sebebi gerçek zamanlı nesne takibi yapabilen mAP(ortalama hassasiyet) değeri en ideal algoritma olmasıdır.



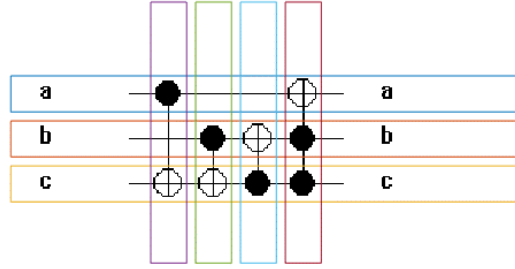
**Şekil 7.** Kapı sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri; a) 1 Kapılı kuantum devresi, b) 2 Kapılı kuantum devresi, c) 3 Kapılı kuantum devresi, d) 4 Kapılı kuantum devresi, e) 5 Kapılı kuantum devresi, f) 6 Kapılı kuantum devresi, g) 7 Kapılı kuantum devresi, h) 8 Kapılı kuantum devresi.



Giriş sayılarına göre oluşturulan veri setine ait kuantum örnek devre görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir.



**Şekil 8.** Farklı giriş sayısına sahip örnek kuantum devreleri a) 3 giriş sayısına sahip kuantum devresi, b) 4 giriş sayısına sahip kuantum devresi, c) 5 giriş sayısına sahip kuantum devresi, d) 6 giriş sayısına sahip kuantum devresi, e) 7 giriş sayısına sahip kuantum devresi.



**Şekil 9.** Etiketlenmiş veri seti

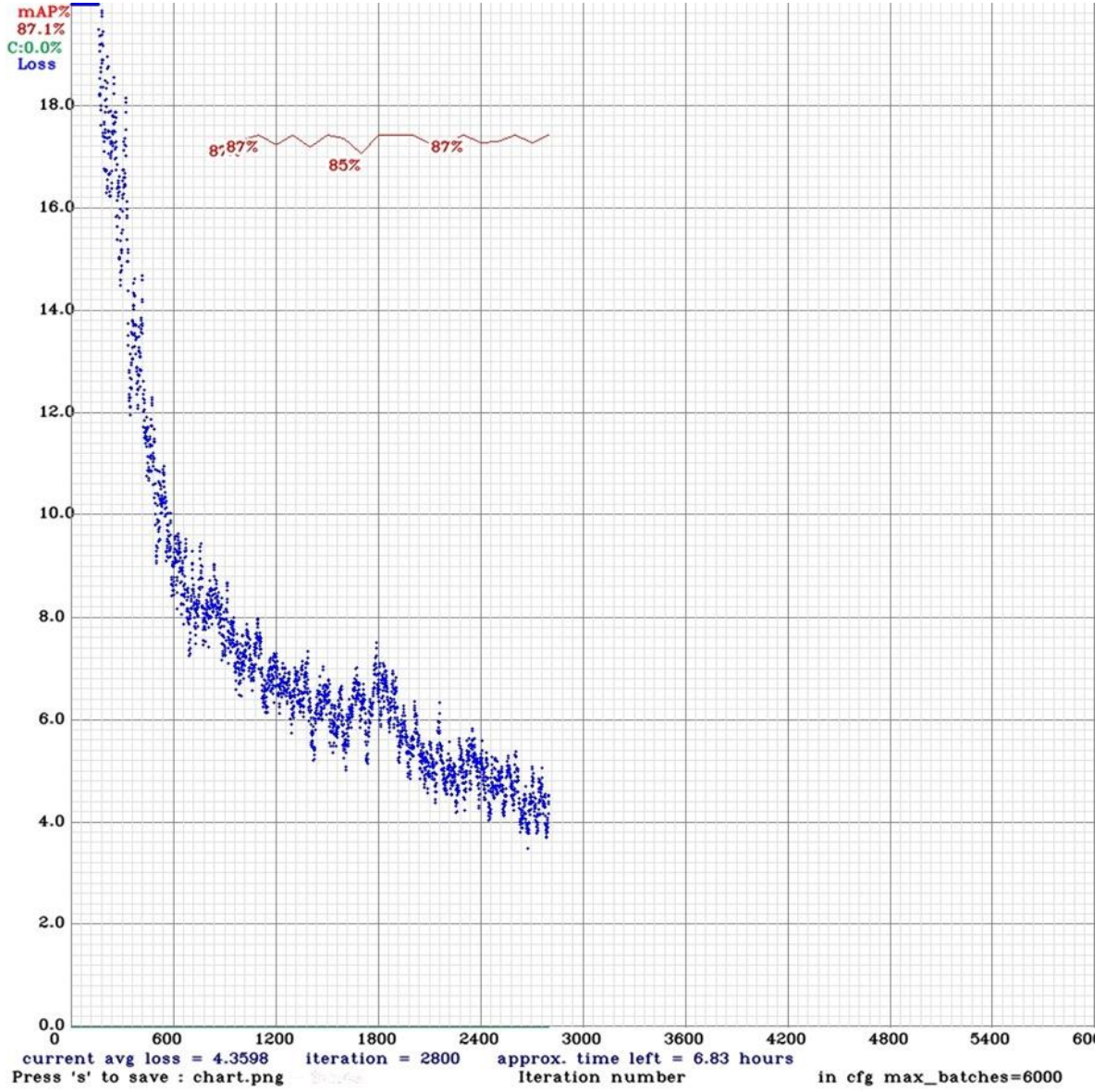
### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada veri setinin toplanması için üretilen “.tfc” dosyaları MATLAB programında geliştirilmiştir. Üretilen “.tfc” dosyaları “RCViewer+” programında açılmış ve ortaya çıkan kuantum devre “.bmp” olarak kaydedilmiştir. Bu işlem 5000 adet örnek kuantum devre için tekrarlanmıştır. Veri seti etiketleme adımından sonra Python ile Yolo uygulama sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada, uygulamalar geliştirmek için Pycharm ve Visual Studio kullanılmıştır. Python için Pycharm ve Visual Studio arayüzü kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kütüphaneler, paketler ve donanım özellikleri Tablo 2’de listelenmiştir.

**Tablo 2.** Bu çalışmada kullanılan kütüphaneler ve donanımların özellikleri

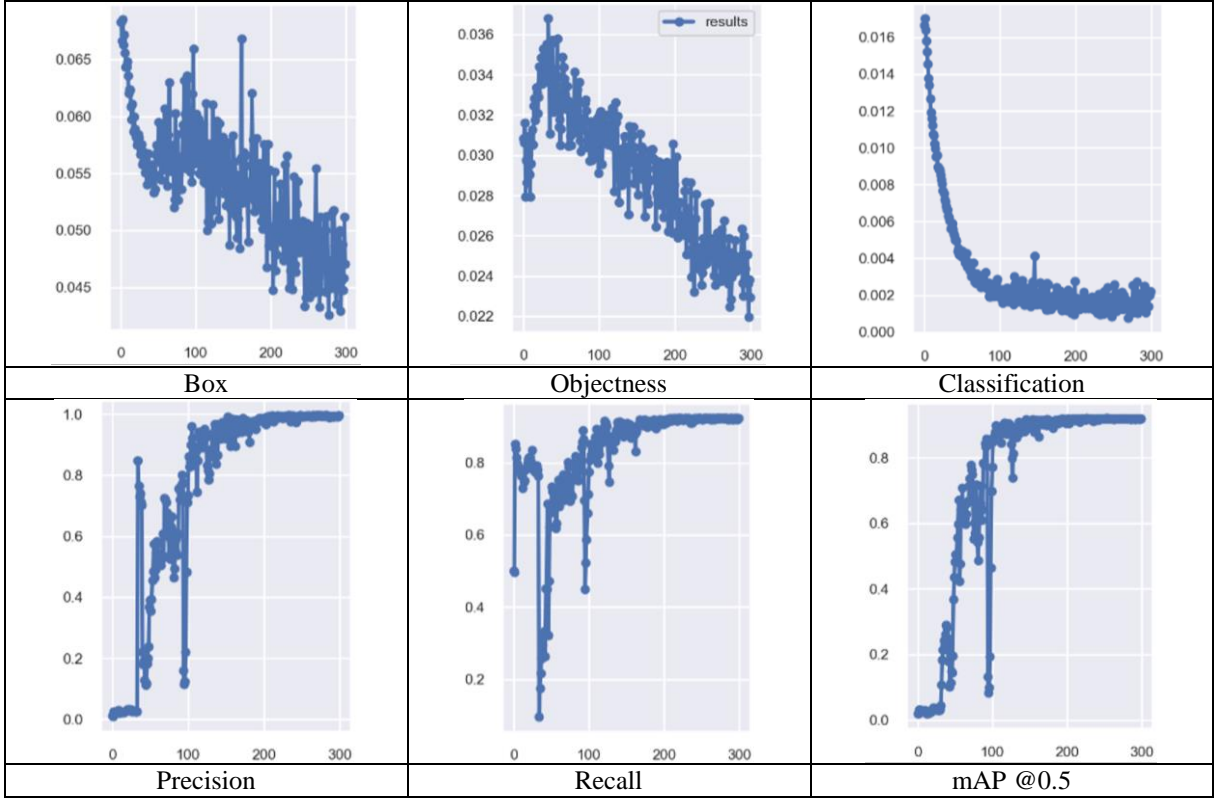
Yazılım ve Kütüphaneler	Değerler
Python	3.11.2
OpenCv	4.7.0
Numpy	1.24.2
PyCharm	2022.3.2
Visual Studio	1.76.0
System	AMD Ryzen 7
CPU	4.3 GHz

Bu çalışmada toplanan veri seti için YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x uygulanmış ve performans sonuçları hesaplanmıştır. YoloV4 algoritmasının performans sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir.

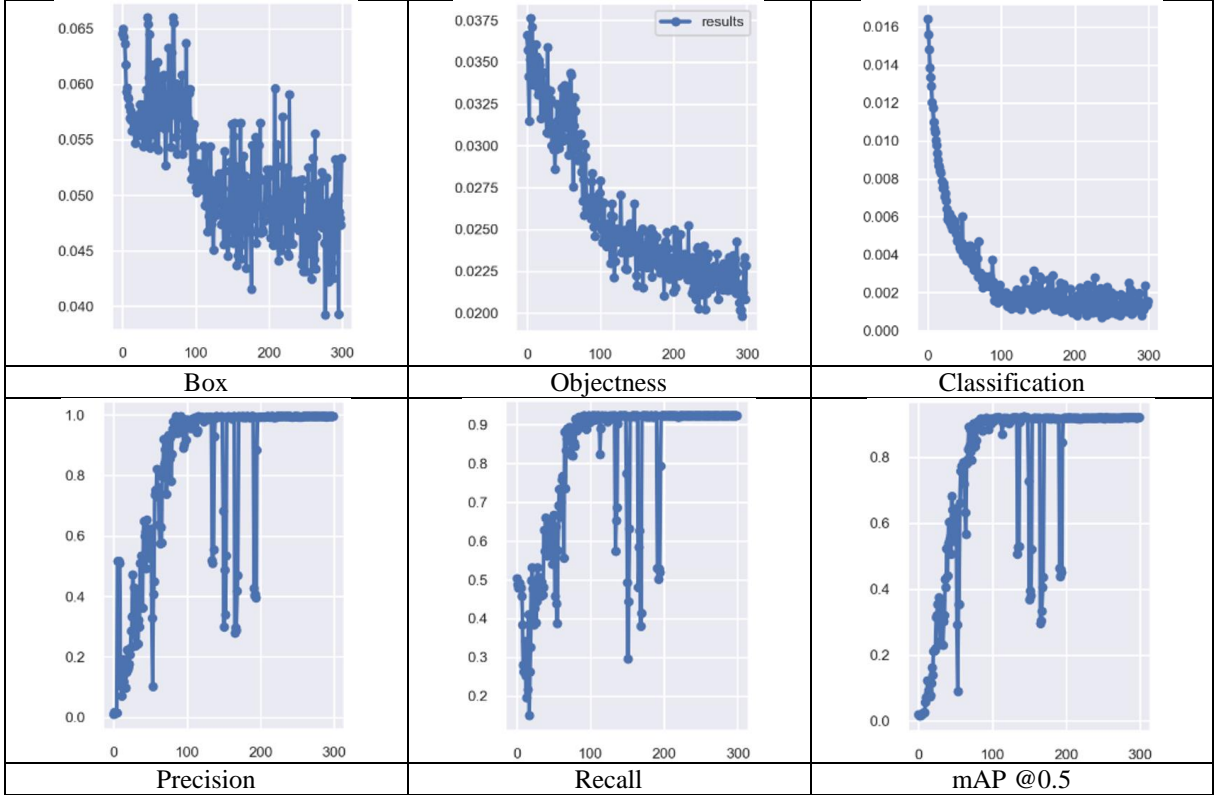


Şekil 10. YoloV4 yöntemin 80:20 mAP ve Loss grafikleri

Şekil 10'da görülebildiği gibi YoloV4 algoritması 2800 iterasyon çalıştırılmıştır. 5000 kuantum devre görüntüsü için YoloV4 algoritmasının çalıştırılması yaklaşık 6.83 saat hesaplanmıştır. Ayrıca avg loss değeri 4.3598 ve mAP değeri %87.1 olarak elde edilmiştir. Önerilen yöntemin sonuçlarını karşılaştırmak için YoloV7 ve YoloV7x sonuçları hesaplanmıştır. YoloV4 algoritması YoloV3 algoritmasının gelişmiş bir versiyonudur. Bu algoritma YoloV3 algoritmasına göre performans ve doğruluğu arttırmak için yenilik içermektedir. YoloV7 algoritması ise, Yolo mimarisine kıyasla daha hafif bir versiyondur. Özellikle model eğitiminin hızlı olması için daha basit bir optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. YoloV7 algoritması daha küçük boyuttaki görüntülerde ve daha az parametre ile çalışan hafif bir modeldir. Önerilen yöntemde YoloV4'ün yanı sıra YoloV7 ve YoloV7x uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. 300 iterasyon boyunca YoloV7 ve YoloV7x için elde edilen grafikler Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur.

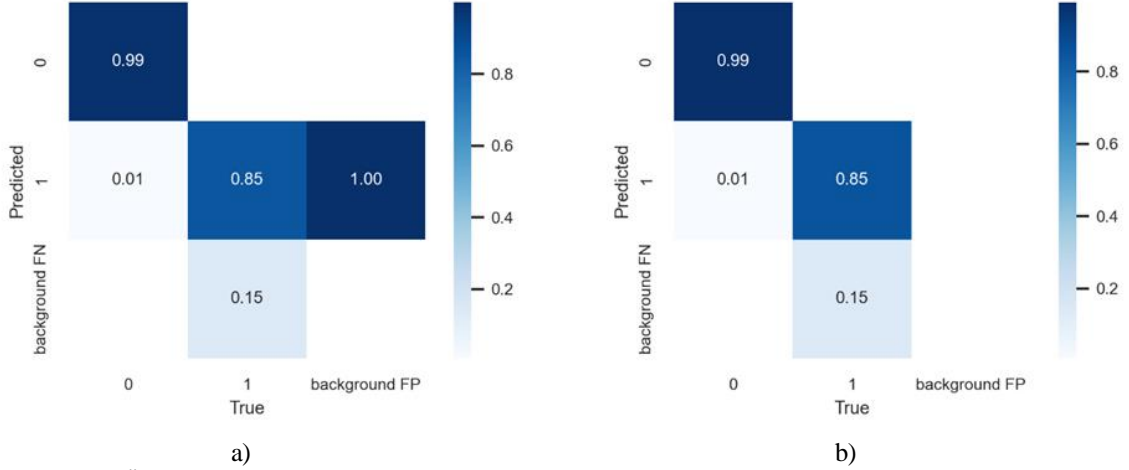


Şekil 11. YoloV7 yöntemin performans grafikleri



Şekil 12. YoloV7x yöntemin 80:20 performans grafikleri

Şekil 11 ve Şekil 12’de sırasıyla YoloV7 ve YoloV7x algoritmalarının Box, Objectness, Classification, Precision, Recall, ve mAP sonuçları hesaplanmıştır. Önerilen yönteme ait Confusion Matrix (Hata Matrisi) değerleri Şekil 13’te sunulmuştur. Önerilen yöntemin performans sonuçları Tablo 3’ te gösterilmiştir.

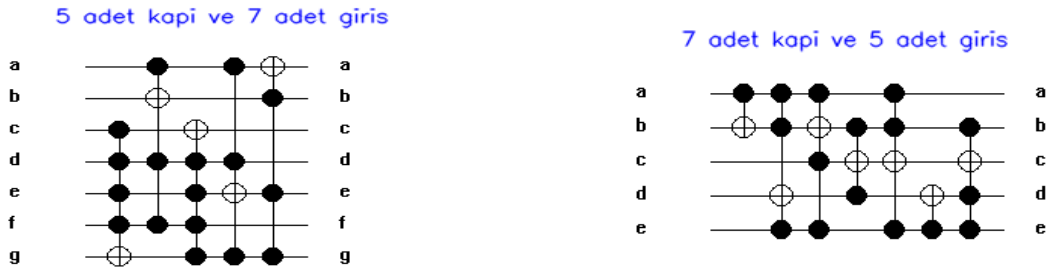


Şekil 13. Önerilen yönteme ait Confusion Matrix (80:20) sonuçları a) YoloV7 sonuçları b) YoloV7x sonuçları

Tablo 3. Uygulanan Yolo algoritmalarının performans sonuçları

Yolo Modelleri	Parametreler	Sonuçlar (80:20)
YoloV4	mAP	%87.1
	Ortalama loss	4.3588
	İterasyon	2800
	Zaman	6.83 saat
YoloV7	mAP	%89.7
	Ortalama loss	0.04706
	İterasyon	300
	Zaman	1.30
YoloV7x	mAP	%89.3
	Ortalama loss	0.05334
	İterasyon	300
	Zaman	1.30

Tablo 3’te görülebileceği gibi 80:20 eğitim test verisi sonuçlarında YoloV4 için %87.1 mAP , YoloV7 için %89.7, YoloV7x için %89.3 olarak hesaplanmıştır. Şekil 14’te örnek test sonuçlarına ait görüntüler verilmiştir.



Şekil 14. Test edilmiş devreler

Deneysel sonuçlarda görülebildiği gibi YoloV7 algoritması için %89.7 mAP ve 0.04706 ortalama loss değeri hesaplanmıştır. Tablo 3’de ki sonuçlar incelendiğinde önerilen YoloV7 modelinin kuantum kapı ve giriş tespiti için başarılı olduğu görülmektedir. Tespit edilen kapı ve giriş tespitleri sayesinde kuantum devrelerin analizi, durum tablolarının elde edilmesi, kuantum devrelerinde optimizasyon ve arıza tespiti işlemlerine öncülük edecektir. Bu çalışmanın ana katkısı “MATLAB” ve “RCViewer+” programları kullanılarak CNOT, Feynman ve Toffoli kapılarından oluşan büyük bir veri seti elde edilmesidir. Aynı zamanda kuantum alanında yapılabilecek birçok çalışma için ön çalışma niteliğindedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada kuantum devrelerin kapı ve giriş sayılarının tespiti için Yolo algoritması uygulanmıştır. Çalışma kapsamında 5000 adet farklı giriş ve kapı sayılarına sahip kuantum devreleri üretilmiştir. Üretilen kuantum devrelerindeki kapı ve girişler etiketlenerek veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti üzerinde YoloV4, YoloV7 ve YoloV7x algoritmaları uygulanarak sırasıyla %87.1, %89.7 ve %89.3 mAP sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile bir kuantum devresindeki kapı ve girişler tespit edilebilmektedir. Böylece kuantum devresindeki durum tablosu elde edilebilecektir. Gelecek çalışmalarda mevcut veri seti üzerinde her kuantum devresinin durum tabloları elde edilecektir. Kuantum devreleri üzerinde yapay arızalar oluşturularak durum tabloları mevcut durum tabloları ile karşılaştırılacak ve arıza tespiti için yeni yöntemler geliştirilecektir. Literatürde yapılan çalışmalar genellikle kuantum devreler kullanılarak algoritma tasarımı yapılabilmektedir. Bu çalışmada ise yeni bir veri seti toplanarak literatüre katkı sağlanmıştır. Ayrıca kuantum devrelerindeki devre elemanlarının analizi için kapı ve giriş sayıları elde edilmiştir. Önerilen yöntemin kuantum alanında yapılan özgün bir çalışma olduğu ve bu çalışmanın gelecek çalışmalara katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma TUBİTAK tarafından desteklenmiştir. Proje No: 121E439. M.K. fikir sahibi, O.Y. ve M.K. veri setini oluşturdu, R.Y. uygulamayı gerçekleştirdi, M.K. sonuçları yorumladı, R.Y. ve O.Y. makaleyi yazdı.

#### Kaynaklar

- [1] Zeilinger A. Experiment and the foundations of quantum physics. *Rev Mod Phys* 1999;71.
- [2] Yetis H, Karakose M. Optimization of Mass Customization Process using. *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 2020.
- [3] Kubodera M, Awai H. Automatic Quantum Circuit Generator by Genetic Programming and Three-qubit Superdense Coding to Transmit Three Classical Bit Codes n.d.
- [4] Khalfaoi K, Boudjedaa T, Kerkouche EH. Automatic design of quantum circuits: Generation of quantum teleportation protocols. *Quantum Inf Process* 2021;20:283. <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03208-8>.
- [5] Yetiş H, Karaköse M. A New Framework Containing Convolution and Pooling Circuits for Image Processing and Deep Learning Applications with Quantum Computing Implementation. *TS* 2022;39:501–12. <https://doi.org/10.18280/ts.390212>.
- [6] Yuan S, Venegas-Andraca SE, Wang Y, Luo Y, Mao X. Quantum Image Edge Detection Algorithm. *Int J Theor Phys* 2019;58:2823–33. <https://doi.org/10.1007/s10773-019-04166-9>.
- [7] Nagamani AN, Prasad HV, Hathwar RS, Agrawal VK. Design of optimized reversible multiplier for high speed DSP application. 2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), Singapore: IEEE; 2015, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICICS.2015.7459869>.
- [8] Steane A. Quantum Computing. *Rep Prog Phys* 1998;61:117–73. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/61/2/002>.
- [9] Shor PW. Fault-Tolerant Quantum Computation n.d.
- [10] Short PW. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer 2023.
- [11] Shor PW. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring 2002:124–34. <https://doi.org/10.1109/sfcs.1994.365700>.
- [12] Kheirandish D, Haghparast M, Reshadi M, Hosseinzadeh M. Efficient techniques for fault detection and location of multiple controlled Toffoli-based reversible circuit. *Quantum Information Processing* 2021;20:1–31. <https://doi.org/10.1007/s11128-021-03292-w>.
- [13] Kuantum bilgisayar nedir, nasıl çalışır ve nasıl yapılır? 2019.
- [14] Mohammed FMA. Yüksek Performanslı Kuantum Hesaplama Simülasyonları. Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019.
- [15] Kheirandish D, Haghparast M, Reshadi M, Hosseinzadeh M. Efficient designs of reversible sequential circuits. *J Supercomput* 2021;77:13828–62. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03735-2>.

- [16] Handique M, Biswas S, Deka JK. Test Generation for Bridging Faults in Reversible Circuits Using Path-Level Expressions. *J Electron Test* 2019;35:441–57. <https://doi.org/10.1007/s10836-019-05811-1>.
- [17] Pathak N, Misra NK, Bhoi BK, Kumar S. Concept and Algorithm of Quantum Computing During Pandemic Situation of COVID-19. In: Somani AK, Mundra A, Doss R, Bhattacharya S, editors. *Smart Systems: Innovations in Computing*, vol. 235, Singapore: Springer Singapore; 2022, p. 523–35. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2877-1\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2877-1_48).
- [18] Thakral S, Bansal D. A Quick Guide to Implement Reversible Logic. 2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India: IEEE; 2018, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2018.8777469>.
- [19] Gaur HM, Singh AK, Ghanekar U. Offline Testing of Reversible Logic Circuits: An Analysis. *Integration* 2018;62:50–67. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2018.01.004>.
- [20] Hüseyin Ulucan. Süperiletken kubitli kuantum bilgisayarlar ve kuantum hesaplama. İstanbul Gelişim Üniversitesi, 2017.
- [21] Yetiş H, Karaköse M. The Usage of Quantum Computer and Computing for High Performance in Machine Learning Methods. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği Dergisi* 2021;47–56.
- [22] Soeken M, Frehse S, Wille R, Drechsler R. Revkit: A toolkit for reversible circuit design. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing* 2012;18:55–65.
- [23] Yetis H, Karakose M. Binary Pooling Circuits for Quantum Computing. 2021 International Conference on Decision Aid Sciences and Application, DASA 2021 2021:161–4. <https://doi.org/10.1109/DASA53625.2021.9682243>.
- [24] Susam Ö, Altun M. An efficient algorithm to synthesize quantum circuits and optimization. 2014 21st IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS 2014 2014:570–3. <https://doi.org/10.1109/ICECS.2014.7050049>.
- [25] Lukac M, Kameyama M, Perkowski M, Kerntopf P, Moraga C. Fault Models in Reversible and Quantum Circuits 2017:475–93. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33924-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33924-5_19).
- [26] Perkowski M, Biamonte J, Lukac M. Test generation and fault localization for quantum circuits. *Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic* 2005:62–8. <https://doi.org/10.1109/ismvl.2005.46>.
- [27] Haydar Kızıllırmak. Kuantum Hata Düzeltme. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [28] Thakral S, Manhas P, Verma J. Quantum Implementation of Reversible Logic Gates Using RCViewer+ Tool. In: Dutta P, Chakrabarti S, Bhattacharya A, Dutta S, Piuri V, editors. *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security*, vol. 491, Singapore: Springer Nature Singapore; 2023, p. 409–18. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-4193-1\\_39](https://doi.org/10.1007/978-981-19-4193-1_39).
- [29] Thakral S, Bansal D. Optimized Quantum Implementation Approach. 2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA), Pune, India: IEEE; 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128728>.
- [30] Thakral S, Bansal D. A Novel Reversible DSG Gate and Its Quantum Implementation. In: Singh Tomar G, Chaudhari NS, Barbosa JLV, Aghwariya MK, editors. *International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication* 2019, Singapore: Springer Singapore; 2020, p. 1443–50. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0633-8\\_142](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0633-8_142).
- [31] Thabab SD, Saha P. Low Quantum Cost Realization of Reversible Binary-Coded-Decimal Adder. *Procedia Computer Science* 2020;167:1437–43. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.354>.
- [32] Kamaraj A, Marichamy P, Kaviyashri KP. Realization and Optimization of Quantum Equivalent Circuits of Reversible Combinational Circuits. *J Comput Theor Nanosci* 2020;17:2080–4. <https://doi.org/10.1166/jctn.2020.8852>.
- [33] Sultana M, Prasad M, Roy P, Sarkar S, Das S, Chaudhuri A. Comprehensive quantum analysis of existing four variable reversible gates. 2017 Devices for Integrated Circuit (DevIC), Kalyani, India: IEEE; 2017, p. 116–20. <https://doi.org/10.1109/DEVIC.2017.8073918>.
- [34] Kalantari Z, Eshghi M, Mohammadi M, Jassbi S. Low-cost and compact design method for reversible sequential circuits. *J Supercomput* 2019;75:7497–519. <https://doi.org/10.1007/s11227-019-02912-8>.
- [35] Du Y, Pan N, Xu Z, Deng F, Shen Y, Kang H. Pavement distress detection and classification based on YOLO network. *International Journal of Pavement Engineering* 2020;0:1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1714047>.
- [36] Chen J, Liu H, Zhang Y, Zhang D, Ouyang H, Chen X. A Multiscale Lightweight and Efficient Model Based on YOLOv7: Applied to Citrus Orchard. *Plants* 2022;11:3260. <https://doi.org/10.3390/plants11233260>.
- [37] Demir K, Yaman O. Su Altı Çöp Tespiti İçin YOLOv4 Tabanlı Bir Yöntem. *International Informatics Congress (IIC2022)*, Batman, Türkiye: 2022.