

FPGA-based remote accessible Laboratory Designs

Gökhan SAVAŞ¹, Zafer ALBAYRAK^{2*}

^{1,2} Department of Computer Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, Turkey
y215024012@subu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5455-156X,
zaferalbayrak@subu.edu.tr, ORCID:0000-0001-8358-3835

Abstract: Applications that can be accessed and controlled remotely are increasing due to the development of computer network technology. Thanks to the increase in connection speeds and the spread of safer networks, remote access devices are frequently used. That's why, it becomes important to manage the used devices and to intervene in them instantly. Because of the laboratories that can be accessed remotely, users can connect with the devices in the laboratory provided that internet is available. Thanks to the established connection, they can conduct experiments by sending commands and parameters and reach the results simultaneously. Users can remotely access their Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) applications from their homes or from a different environment via the internet and observe the results live. In this study, a literature search was conducted on FPGA-based laboratories that can be accessed remotely.

Keywords: E-laboratory; cloud computing; server; distance education

FPGA Tabanlı Uzaktan Erişilebilir Laboratuvar Tasarımları

Özet: Bilgisayar ağları teknolojisinin gelişmesi ile uzaktan erişilen ve kontrol edilebilen uygulamalar artmaktadır. Özellikle bağlantı hızlarının yükselmesi ve daha güvenli ağların yaygınlaşması sayesinde uzaktan erişilebilen cihazlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sayede kullanılan cihazları yönetmek ve onlara anlık müdahale etmek önemli bir hale gelmiştir. Uzaktan erişilebilen laboratuvarlar sayesinde kullanıcılar internetin olması şartıyla laboratuvardaki cihazlarla bağlantı kurabilmektedirler. Kurulan bağlantı sayesinde komut ve parametreler göndererek deneyler yapmakta ve sonuçlara eş zamanlı ulaşabilmektedirler. Kullanıcılar evlerinden veya farklı bir ortamdan internet sayesinde Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA) ile ilgili uygulamalarını uzaktan erişerek yapabilmekte ve sonuçlarını canlı bir şekilde gözlemlemektedirler. Bu çalışmada, FPGA tabanlı uzaktan anlık bir şekilde erişilebilen laboratuvarlar üzerinde bir literatür araştırması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: E-laboratuvar, bulut bilişim, sunucu, uzaktan eğitim

Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı): Gökhan Savaş, Zafer Albayrak, 'FPGA Tabanlı Uzaktan Erişilebilir Laboratuvar Tasarımları', Elec Lett Sci Eng, vol. 18(1), (2022), 21-30.

1. Giriş

Geçmiş yıllarda uzaktan eğitim, mektup ile eğitim vermek olarak tanımlanabilmekteydi. Fakat günümüzde öğrenen ve öğretmenin farklı ortamlarda olduğu, senkron veya asenkron olarak gerçekleştirilebilen eğitim şekli olarak belirtilmektedir [1]. Uzaktan eğitim öğrencilerin yetenek ve ihtiyaçlarına rahatlıkla uyarlanabilir. Maliyet ve işlevsellik açısından klasik yüz yüze eğitime göre birçok yönden artışı vardır. Ancak uzaktan eğitime insanların verdiği tepki ve önyargılı bakış açısı uzmanların beklentilerini karşılamamıştır [2]. Uzaktan eğitim; son zamanlarda bilgisayar ağlarının gelişmesi, internetin günlük yaşamda rahat bir şekilde kullanılması ve popülerlik kazanması ile geleneksel eğitimin eksik kaldığı noktaları tamamlamaya başlamıştır

* Corresponding author; zaferalbayrak@subu.edu.tr

[3]. Uzaktan eğitimin bir parçası olan, uzaktan yönetilebilen laboratuvarları öğrenciler gerçek zamanlı şekilde istedikleri zaman kullanabilmektedirler. Bu laboratuvarlar, geleneksel laboratuvarların tipik kısıtlamalarından uzak, esnek bir süreç sağlamaktadır.

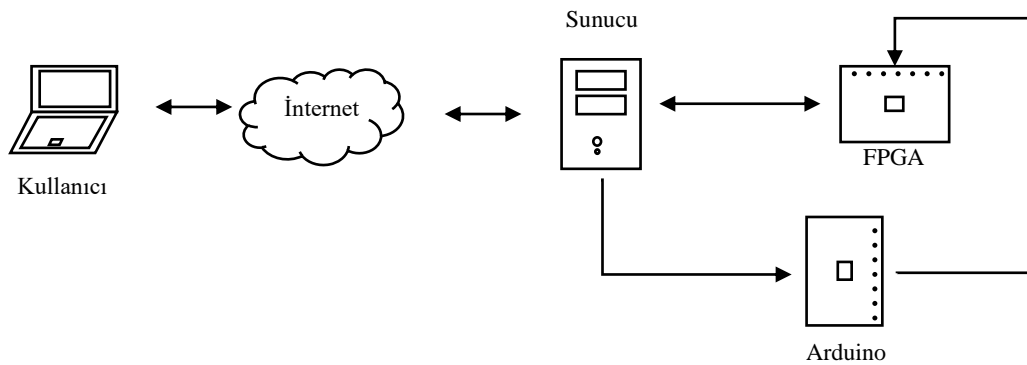
Simülasyon ile gerçek hayattaki etkilerden izole şekilde yapılan ara etkinliklerden sonra, uzaktan laboratuvar sayesinde gerçek donanımlarla bir deney yapılarak çevresel etkilerin de dahil olduğu etkinlikler yapılabilmektedir [4]. FPGA, istenilen tasarıma göre programlanabilen entegre devreleridir. Yeniden yapılandırılabilir donanım ailesinden gelen FPGA sahada istenilen şekilde değiştirilebilir [5]. Programlanabilir mantık blokları FPGA'nın temelini oluşturmaktadır.

Tasarım yapıp tüm aşamalar bittikten sonra bir bit akışı (bitstream) dosyası oluşur ve bu dosya bileşenlerin birbirine nasıl bağlanması gerektiği hakkında bilgiler içerir [6]. Bilim, mühendislik, eğitim gibi alanlarda teknolojik gelişmeler sayesinde uzaktan eğitim bir ihtiyaç haline gelmiştir. Öğrenci sayısının çokluğu ve deneysel malzemelerin maliyetleri bir araya geldiğinde uzaktan eğitimin önemi artmaktadır. Uzaktan erişilebilen laboratuvarların çok köklü bir geçmişi vardır. Son 50 yılda yalnızca geleneksel laboratuvarlarla değil, aynı zamanda teknolojik gelişme ve ekonomik senaryoların bir araya gelmesiyle uzaktan laboratuvarlar önemli bir role sahip olmuşlardır [7]. Bu doğrultuda popüler olan FPGA tabanlı uzaktan erişilebilen laboratuvarlar da yaygınlaşmaya ve gelişmeye başlamıştır.

Bu çalışmada, FPGA tabanlı uzaktan erişilebilen laboratuvarlar ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Son yıllarda yapılmış olan laboratuvarların genel mimarisi, donanım alt yapısı, kullanıcı arayüzünde kullanılan programlar, bağlantı tipleri ve kullandıkları diğer donanımsal cihazlar hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca kurulan laboratuvarların amacı, işlevi ve hangi dersle ilişkilendirildiği de tespit edilmiştir.

2. Literatür taraması

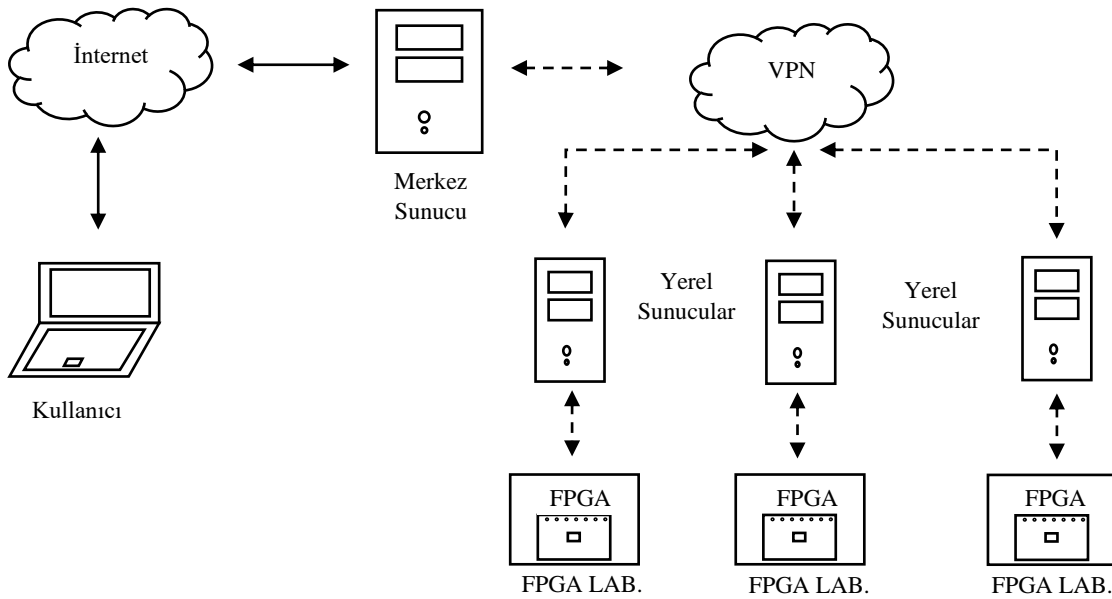
Fotopoulos ve arkadaşları; öğrencilerine, öğrenme yönetim sistemi (LMS) platformunda eğitim aldıktan sonra uygulama yapmaları için uzaktan FPGA laboratuvarı kurmuşlardır. Yapılan çalışmanın genel mimarisi Şekil 1'de gösterilmiştir. İnternet üzerinden bağlanılabilen sistemde öğrencilere bir saatlik kullanım hakkı vermişlerdir. Bu kullanım hakkını aynı internet sitesi içindeki rezervasyon sekmesinden yapabilmektedirler. Uzaktan laboratuvar için Ubuntu Linux 14.04 LTS yüklü bir sunucu bilgisayar kullanmışlardır.



Şekil 1. Fotopoulos ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilen FPGA laboratuvarı genel mimarisi

Genellikle açık kaynak yazılımlar kullanmaya özen gösteren Fotopoulos ve arkadaşları, maliyeti düşük tutmak için ALTERA DE0-nano FPGA kartını kullanmışlardır. İnternet sayfalarının bir tarafında FPGA kartının resmini, diğer tarafında ise bir web kamera ile FPGA kartının anlık görüntüsünü paylaşmaktadırlar. Öğrencilerin yaptıkları tasarımları çalıştırdıklarında kontrol etmesi için Arduino Uno rev3 kart kullanmışlardır. FPGA kartına fiziksel olarak müdahale edilmesini sağlayan 14 pin doğrudan arduino ile bağlantılıdır. IEEE/CAS Society tarafından desteklenen projenin başarılı olduğunu ve geliştirilmeye açık olduğunu belirtmişlerdir [8].

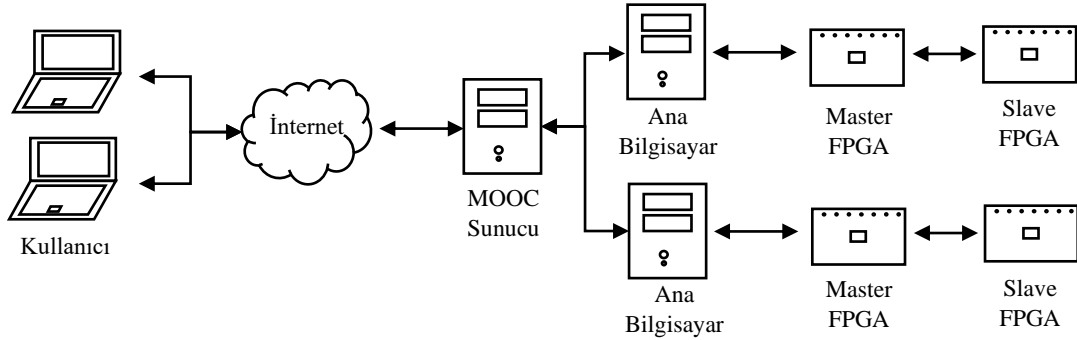
Petrvalsky ve arkadaşları EDIVIDE projesi kapsamında Catholic University Leuven, University of Oslo, Technical University of Kosice and University College Bonn-Rhein-Sieg üniversiteleri ile bir araya gelerek uzaktan erişimli laboratuvarlar kurmuşlardır. Amaçları imkânı olmayan öğrencilere tasarımlarını test etme imkânı vermektir. Her üniversite iki tane anlaşılması kolay, basit prensipli ve iki tane de ileri seviyede, daha karmaşık çözümlere sahip egzersizler oluşturmuşlardır. Her kurulumda basitten karmaşığa 4-5 alıştırma vardır. Basit alıştırma, basit kurulumlarla doğrusal, geri beslemeli, kaydırma yazmacı (LFSR) ve sonlu durum makineleri (FSM) hakkındadır. İleri seviye konuları ise gerçek rassal sayı üretme (TRNG), yardımcı işlemci(coprocessor) gibi konular hakkındadır. Kodlama dili olarak VHDL kullanmışlardır. Şekil 2'deki şematik gösterimi gibi her üniversite kendine ait farklı FPGA'lar kullanmaktadır. Technical University of Kosice üniversitesi Altera Nios II Cyclone III geliştirme kitini kullanırken diğer üniversite Xilinx FPGA'sı kullanmaktadır [9].



Şekil 2. Petrvalsky ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilir FPGA laboratuvarı genel mimarisi

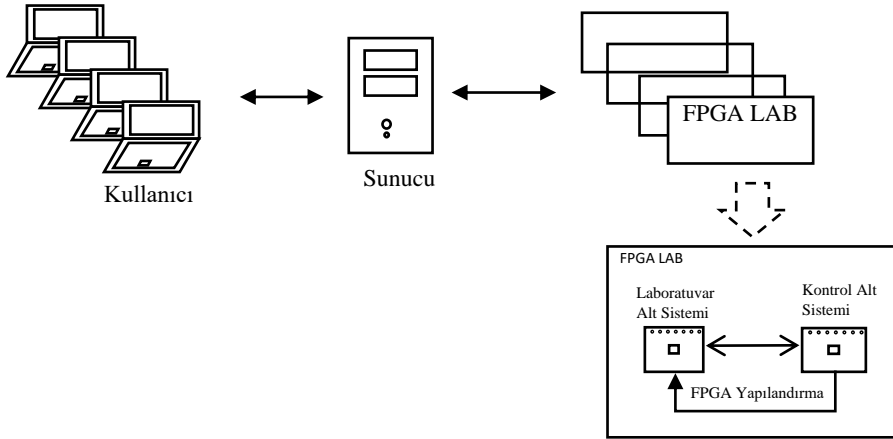
Wan ve arkadaşları, Laboratuvar Tabanlı Bilgisayar Yapısı dersinde MIPS işlemcisinin oluşturulması için uzaktan FPGA laboratuvarı kurmuşlardır. Öğrencilerin Verilog-HDL dili ile kodlama yapıp bunu gerçek bir FPGA kartında çalıştırmalarını amaçlamışlardır. İnternet sayfası arayüzünden randevu alan öğrenciler randevu zamanı geldiğinde sisteme giriş yapacaklar ve sunucu bilgisayara bit akışı dosyasını yükleyeceklerdir. Şekil 3'te görüldüğü gibi donanım tarafında sunucu bilgisayar, yönetici (master) FPGA ve bağımlı (slave) FPGA bulunmaktadır.

Bit akışı dosyası bağımlı (slave) FPGA'ya yüklenmesi bittiğinde yönetici (master) FPGA, bağımlı (slave) FPGA'nın durumunu izlemekte ve sunucu bilgisayara geri bildirimlerde bulunmaktadır. Sunucu bilgisayar uzaktan, kullanıcıya aldığı verileri aktarmaktadır [10].



Şekil 3. Wan ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilen FPGA laboratuvarı genel mimarisi

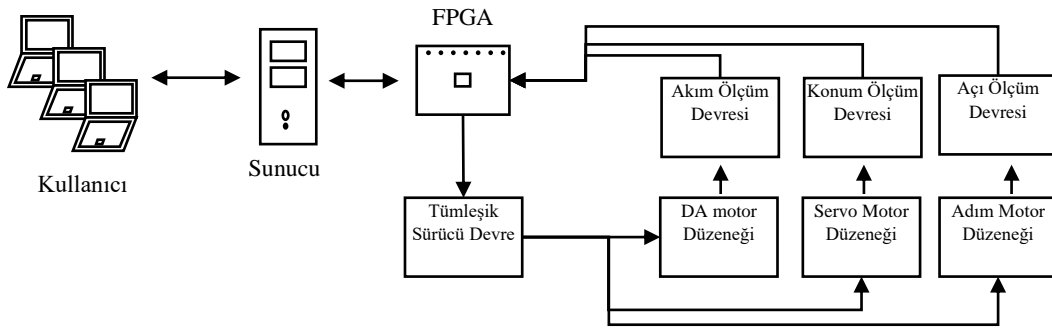
Zhang ve arkadaşları bilgisayar sistemi müfredatı için uzak FPGA laboratuvarı kurmuşlardır. Xilinx Artix-7 Serisi FPGA kartı ile kurulan sistemde 2 tane 7 segmentli ekran, butonlar ve 16 tane LED bağlamışlardır. Kullanıcı internet sayfasından sisteme girdiğinde uygun olan laboratuvar kartına atanmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi her laboratuvar panosu laboratuvar alt sistemi ve kontrol alt sistemi olarak alt sistemlere bölünmüştür. Laboratuvar alt sistemi kullanıcıya tamamen açıktır ve kısıtlamasız programlanabilir. Kontrol alt sistemi ise laboratuvar alt sistemini izler ve sunucu ile laboratuvar alt sistemi arasında veri aktarımı yapar. Böylelikle yapılan işlemler internet sayfası aracılığı ile kullanıcıya gösterilir. Sunucu tarafında node.js, javascript, c++ kullanmışlardır. Kullanıcı bit akışı dosyasını sisteme yüklediğinde süreç başlatılmaktadır [11].



Şekil 4. Zhang ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilen FPGA laboratuvarı genel mimarisi

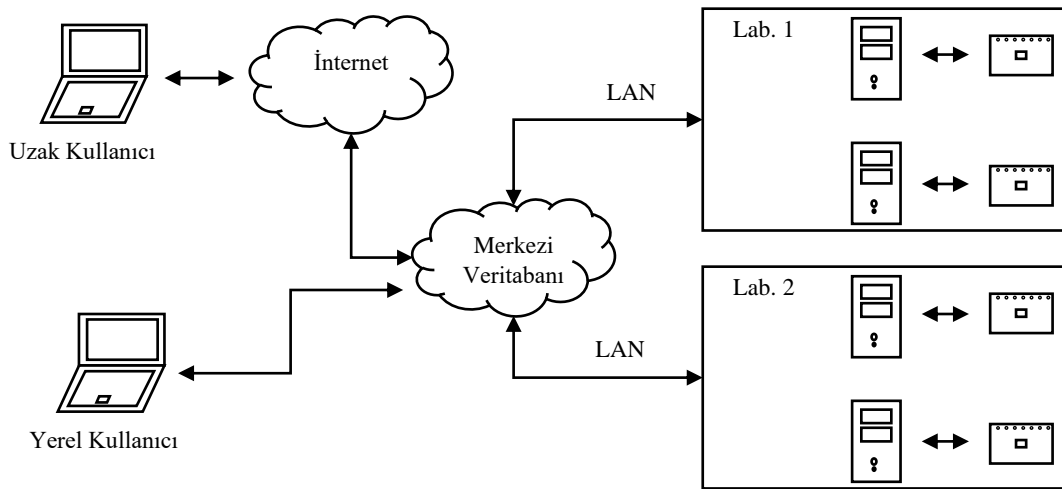
Irmak ve Calpbınici Uzaktan erişimli laboratuvarların eş zamanlı kullanılmamasını eleştirerek birden fazla kişinin aynı anda tek bir FPGA cihazı üzerinde önceden hazırlanmış olan deney setlerini çalıştırabilmelerini hedeflemişlerdir. Bunun için FPGA cihazının paralel işlem yapma yeteneğini kullanmışlar ve Şekil 5'te gösterilen genel mimari gibi üç ayrı deney düzeneğini bir FPGA denetleyicisine bağlamışlardır. Bu sayede üç kullanıcı uzaktan FPGA laboratuvarına aynı

zamanda erişilebilmektedir. İnternet sayfası üzerinden erişilebilen sette doğru akım motoru, servo motor, adım motoru ölçüm ve sürücü devreleri bulundurmaktadır. Analog sinyalleri FPGA'nın anlayabileceği sayısal sinyallere dönüştürmek için analog/sayısal dönüştürücü kullanarak deney sırasında ölçülen bilgileri sunucu bilgisayara aktarmışlardır. Böylelikle deney setini uzaktan kullananlar yaptıkları deneyleri hem bir kamera sayesinde görmüş hem de ölçümleri canlı olarak göstermişlerdir. Ölçümler için sunucu bilgisayar ile FPGA arasında veri alışverişi yapmışlardır. Sunucu bilgisayarda kullandıkları ASP.Net'in verileri işlemekte yavaş kalacağını düşündükleri için C# dilini kullanarak bir Windows Form hazırlamışlar ve seri port ile bu program sayesinde haberleşmişlerdir. ASP.Net'in verileri alabilmesi için oluşturulan Access veri tabanına seri porttan gelen veriler kaydedilmiştir. Böylelikle üç parametre değerlerini yaklaşık 400 veri/saniye olarak alabilmektedir. Alınan veriyi internet sayfası üzerinde grafiksel olarak kullanıcıya göstermektedirler [12].



Şekil 5. Irmak ve Calpbincici'nin oluşturduğu uzaktan erişilebilen FPGA laboratuvarı genel mimarisi

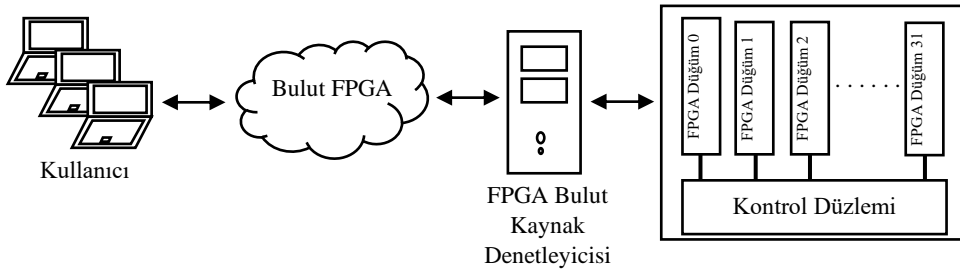
Syed ve arkadaşları ise buldukları bölgenin kalabalık olması ve laboratuvar maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle Şekil 6'daki donanım alt yapısına sahip, bulut tabanlı, uzaktan FPGA laboratuvarı kurmuşlardır. Bu laboratuvar internet sayesinde uzaktan ve yerel ağdan cihaza erişilip bit akışı dosyası yüklenerek çalıştırılmaktadır.



Şekil 6. Syed ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilen FPGA laboratuvarı genel mimarisi

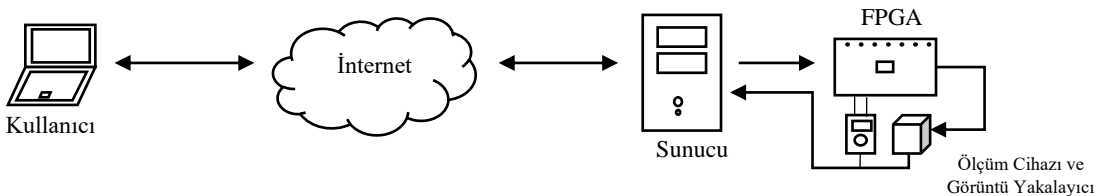
Kullanıcılar için iki tane mod seçimi vardır. Bir tanesi etkileşimli mod, diğeri ise çevrimdışı moddur. Etkileşimli modda kullanıcıya bir FPGA kartı rezerve edilmektedir ve internet sayfasından gerçek zamanlı uygulamalar yapılmaktadır. Çevrimdışı modda ise kullanıcının direkt FPGA ile bağlantı kurmasına gerek kalmadan deneyin sonucu otomatik gerçekleşir ve kullanıcıya iletilir. Böylelikle beklemede kalacak öğrenci sayısı azaltılmıştır. Süresi dolan kullanıcının ara sonuçları veri tabanına kaydedilip sonuçlara istenildiğinde ulaşılmaktadır. Veri tabanı için MySQL, sunucu tarafında PHP, video akışı için VLC (Video LAN Client), deneylerin canlı izlenebilmesi için web kamera ve FPGA kartları Xilinx Spartan-II, Spartan-III kullanılmıştır [13].

Zhang ve arkadaşları, bilgisayar organizasyonu ve tasarım dersi için uzaktan laboratuvar oluşturmuşlardır. Sanal platformların kısıtlayıcı olduklarını düşünmektedirler. Oluşturdukları uzaktan laboratuvarında Xilinx'in Zynq UltraScale+ MPSoC FPGA'larını kullanan Zhang ve arkadaşları Şekil 7'de gösterildiği gibi bir kontrol düzlemi kullanarak 32 düğüm oluşturmuşlardır. Eş zamanlı birçok öğrencinin kullanılmasına olanak sağlayan bu laboratuvarında sunucu tarafında açık kaynak kodlu OpenStack kullanmışlardır. Minimum maliyet ile kullanımı kolay arabirim ve basit bir komut dosyası tabanlı tasarım yaptıklarını söylemektedirler [14].



Şekil 7. Zhang ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilir FPGA laboratuvarı genel mimarisi

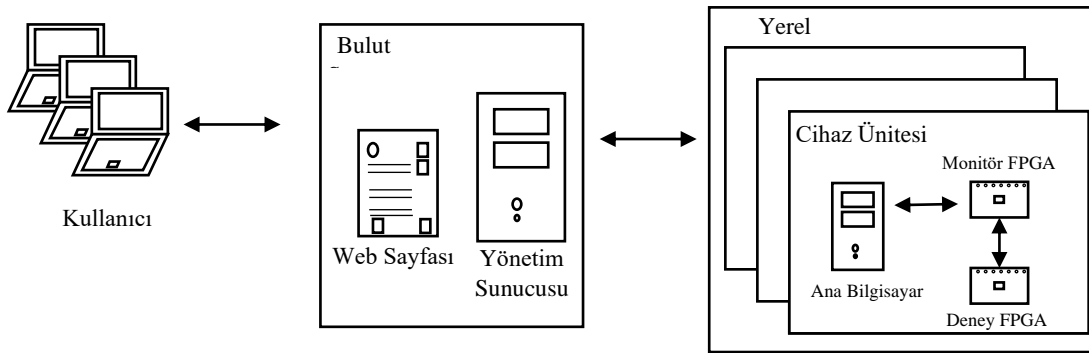
Winzker ve Schwandt az güç tüketen tasarım ve FPGA ile görüntü işlemek üzerine uzaktan laboratuvar kurmuşlardır. Amaçları öğrencilerin uygulama yapmadan önce konu ile ilgili kısa videolar izlemeleri ve sonrasında yerel bilgisayarlarında oluşturdukları tasarımları internet tarayıcı sayesinde uzaktaki FPGA cihazına yüklemelerini sağlamaktır. FPGA kartı olarak Cyclone IV kullanılmaktadır. Kullanıcılar görüntüyü seçtiklerinde görüntü 720p formatında FPGA'ya aktarılıp işlenmektedir. Sunucu olarak Linux işletim sisteminde WebLab-Deusto çalıştırmışlardır. Donanımsal olarak Şekil 8'de gösterildiği gibi FPGA'nın güç tüketimini ölçmek için ampermetre, video kaynağı olarak Raspberry Pi, FPGA kartı olarak Altera Cyclone IV ve Altera V kullanmışlardır.



Şekil 8. Winzker ve Schwandt'in oluşturduğu uzaktan erişilebilir FPGA laboratuvarı genel mimarisi

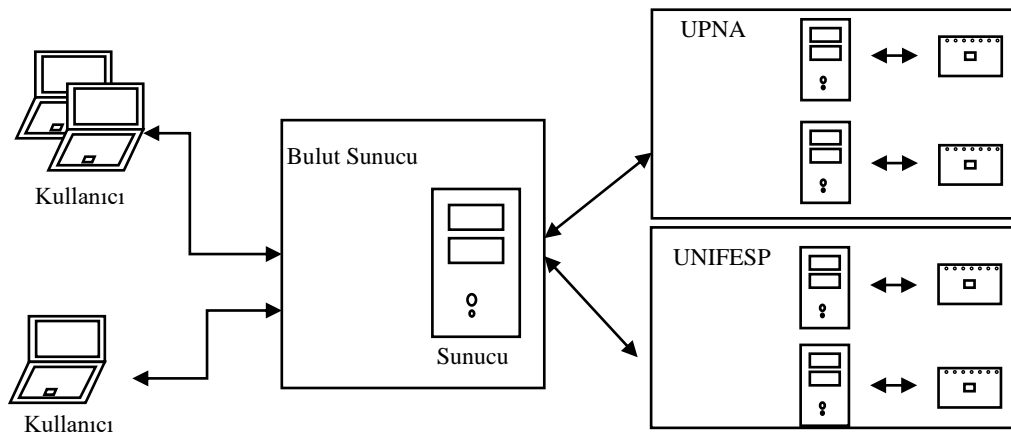
Kullanıcıların sistemde çok uzun kalmaması için buldukları yöntem; tasarım, simülasyon, sentezleme işlemlerini kendi bilgisayarında yaptıktan sonra uzak laboratuvara bağlanıp FPGA cihazına yükleme ve çalıştırma işlemlerini yaptırmak şeklindedir. Bir aksilik çıkarsa sonrasında bu işlem döngüsel olarak devam etmektedir. Kullanıcılar sisteme girdiklerinde kuyrukta beklemektedirler ve sırası geldiğinde 5 dakikalık kullanım hakları vardır [15].

Wan ve arkadaşları bilgisayar organizasyonu dersi için uzaktan eğitim müfredatı oluşturmuşlardır. Adım adım ilerleyen müfredatta belirli bir seviyeden sonra uzaktan laboratuvarında uygulama yapmaktadırlar. Laboratuvarı kurarken iki yongalı FPGA kartı seçmişlerdir. Öğrencilerin tasarımlarını keşfetmeleri için Şekil 9'da gösterildiği gibi deney FPGA'sı, deney FPGA'sının girişlerini simüle etmekten ve çevresel sinyalleri örneklemekten sorumlu olan monitör FPGA'sı bulunmaktadır. Yapılan deneyleri server bilgisayar aracılığı ile internet sayfasına yüklemişlerdir. Bulut tabanlı yönetim sistemi ile oluşturulan sistemde internet üzerinden VPN'e gerek kalmadan kullanıcı bilgileri ile bağlanıp deneyler yapmaktadırlar [16].



Şekil 9. Wan ve arkadaşlarının oluşturduğu uzaktan erişilebilir FPGA laboratuvarı genel mimarisi

Universidad Pública de Navarra (UPNA) ve Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) üniversitelerindeki uzaktan erişimli laboratuvarlarını tek bir laboratuvarmış gibi kullanmaktadırlar. Şekil 10'da genel mimarisi gösterilen FPGA kartlarına ulaşan öğrenciler Raspberry Pi kartına bağlı web kamera ile gerçek zamanlı deneyi izlemektedir.



Şekil 10. UPNA ve UNIFESP üniversitelerinde oluşturulan uzaktan erişilebilir FPGA laboratuvarı genel mimarisi

Öğrenciler uzaktan laboratuvara bağlanmak istediklerinde hangi ülkedeki laboratuvarında bulunan FPGA kart o an uygunsa ona bağlanmaktadır. Hangi ülkeden bağlanıldığına önemi olmayan bu ortak sistemde eğer iki ülkenin laboratuvarlarındaki FPGA kartları kullanılıyorsa ortak bir kuyrukta bekletilmektedirler. Sırası gelen öğrenci hangi ülkeden bağlandığına bakılmadan uygun FPGA kartını kullanabilmektedir. Ayrıca Raspberry Pi'yi FPGA kartına yapılacak fiziksel müdahaleleri simüle etmek için kullanmışlardır [17].

3. Sonuç ve Değerlendirme

Literatür incelemesi bölümünde incelenmiş olan uzaktan FPGA laboratuvarı çalışmaları aşağıdaki tabloda kısaca sunulmuştur. Tablo 1'de çalışmayı yapanlar ve yaptıkları yıl, bu çalışmada kullandıkları FPGA kartlarının modelleri, bağlantı arayüzünde ve arka planda kullanılan programlar, bağlantı tipi ve FPGA haricinde kullanılan diğer cihazlar hakkında bilgiler bulunmaktadır.

Tablo 1. Uzaktan Erişilebilen FPGA Laboratuvar Çalışmaları

Çalışmayı Yapanlar ve Yapım Yılı	Kullanılan FPGA Kart/Kartları	Bağlantı Arayüzünde Kullanılan Programlar	Bağlantı Tipi	Kullanılan Diğer Cihazlar
Fotopoulos ve arkadaşları 2015	ALTERA DE0-nano	Apache HTTP Server, C++ RTMP Server, Avconv Video Converter, PHP 5.5	Client/Server	Arduino Uno rev3, Web Kamera
Petrvalsky ve arkadaşları 2015	Altera Cyclone III	PHP script, CSS ve JavaScript	Merkezi Sunucu/VPN	800×480 LCD ekran, Web kamera, Mikrofon
Wan ve arkadaşları 2016	Belirtilmemiş	MOOC Server	Client/Server	-
Zhang ve arkadaşları 2017	Xilinx Artix-7	HTML, CSS ve JavaScript, MOOC Server	Client/Server	7 segment ekran, ledler
Irmak ve Calpbiniçi 2017	ALTERA DE0	ISS Sunucu, ASP.Net	Client/Server	Kamera, ölçüm kartları, deney kartları,
Syed ve arkadaşları 2018	Xilinx Spartan-II	Php, MySql, HTML, CSS, Ubuntu	Bulut Sunucu	Web kamera
Zhang ve arkadaşları 2019	Xilinx Zynq UltraScale+	Linux	Bulut Sunucu	-
Winzker ve Schwandt 2019	Altera Cyclone IV ve V	Linux, WebLab-Deusto	Client/Server	Raspberry pi (video kaynağı), amper metre
Wan ve arkadaşları 2019	Xilinx Spartan-6	Open edx, JavaScript	Bulut Sunucu	-
Mayoz ve arkadaşları 2021	Altera Cyclone V	WebLabLib	Bulut Sunucu	Raspberry Pi 3B, web kamera

Literatür araştırmasının sonucunda FPGA tabanlı uzaktan laboratuvar ile ilgili yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında Fotopoulos ve arkadaşları (2015), Wan ve arkadaşları (2016), Zhang ve arkadaşları (2017), Irmak ve Calpbiniçi (2017), Winzker ve Schwandt (2019) Server/Client tabanlı basit bir web site arayüzlü erişim sağlarlarken; Syed ve arkadaşları (2018) Zhang ve arkadaşları (2019) Wan ve arkadaşları (2019) Mayoz ve arkadaşları (2021) bulut FPGA terimini

öne çıkarmışlardır. Fotopoulos ve arkadaşları (2015) FPGA haricinde fiziksel müdahale için Arduino kullanırken, Winzker ve Schwandt (2019) Raspberry pi'yi video kaynağı için kullanmış, Mayoz ve arkadaşları (2021) ise Rasperry pi'yi FPGA'ya fiziksel müdahale için kullanmışlardır. Çoğu uzaktan laboratuvarında anlık görüntüye ulaşılması için web kamera bulunmaktadır. Fotopoulos ve arkadaşları (2015), Petrvalsky ve arkadaşları (2015), Winzker ve Schwandt (2019), Irmak ve Calpbiniçi (2017) çalışmalarında VHDL dilini kullanmayı tercih etmişlerdir. Zhang ve arkadaşları (2019) ve Wan ve arkadaşları (2019) çalışmalarında ise Verilog dilini kullanmayı tercih etmişlerdir. Mayoz ve arkadaşları (2021) üniversitelerde VHDL ve Verilog'u birlikte kullanmışlardır. Bu bağlamda FPGA tabanlı uzaktan laboratuvarın temel amaçlarından olan maliyet ve erişilebilirlik Server/Client tabanlı laboratuvarlarda bulut teknolojisinin kullanıldığı laboratuvarlara kıyasla amacından uzak kalmaktadır.

4. Çalışmanın Sonuçları

Bu çalışmada FPGA tabanlı uzaktan erişimli laboratuvarlar üzerinde bir literatür çalışması yapılmıştır. Literatürde kullanılan FPGA kartları, bağlantı arayüzündeki yazılımlar, bağlantı türü ve kullanılan ilave cihazlarla ilgili kısa bilgiler verilmiştir. Bulut tabanlı birden fazla uzaktan laboratuvarın ortak erişime açıldığı, FPGA kartlarına veya çevresindeki elemanlara fiziksel müdahaleyi simüle edebilecek, çok fonksiyonlu ve farklı amaçları olan ortak uzaktan FPGA tabanlı laboratuvarlar açılacağı görülmüştür. Akıllı cep telefonları kullanımının yaygınlaşması sebebiyle bu laboratuvarlara erişim için cep telefonlarına özel uygulama oluşturulabileceği görülmüştür.

Referanslar

- [1] A. Kaçan and İ. Gelen, "Türkiye'deki Uzaktan Eğitim Programlarına Bir Bakış," *Int. J. Educ. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–21, Apr. 2020, Accessed: Dec. 03, 2021. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/uebt/issue/53891/713456>.
- [2] E. Sibirskaya, E. Popkova, L. Oveshnikova, and I. Tarasova, "Remote education vs traditional education based on effectiveness at the micro level and its connection to the level of development of macro-economic systems," *Int. J. Educ. Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 533–543, Apr. 2019, doi: 10.1108/IJEM-08-2018-0248.
- [3] A. Sarıkış and A. Yayla, "Uzaktan Erişimli Mikrodenetleyici Laboratuvarı," *J. Res. Educ. Teach.*, vol. 6, no. 4, pp. 283–296, 2017, Accessed: Dec. 02, 2021. [Online]. Available: www.jret.org@Herhakkısaklıdır.Dergideyayımlananyazılarınıtümsorumluluğuyazarlarınaa ittir.
- [4] S. W. Tho and Y. Y. Yeung, "An implementation of remote laboratory for secondary science education," *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 34, no. 5, pp. 629–640, Oct. 2018, doi: 10.1111/jcal.12273.
- [5] A. Rupani and G. Sujediya, "A Review of FPGA implementation of Internet of Things FPGA Implementation of Image proessing Filters View project A Review of FPGA implementation of Internet of Things," *Artic. Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 3297, no. 9, 2016, doi: 10.15680/IJIRCCE.2016.0409098.
- [6] G. Sharma, K., Raju, G., & Varma, "A Review of FPGA Implementation of Internet of Things," *Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 2257–2263, 2016, Accessed: Dec. 04, 2021. [Online]. Available: <http://www.ijser.org>.
- [7] C. Viegas et al., "Impact of a remote lab on teaching practices and student learning," *Comput. Educ.*, vol. 126, pp. 201–216, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2018.07.012.
- [8] V. Fotopoulos, A. Fanariotis, and A. N. Skodras, "Remote FPGA Laboratory Course

- Development based on an Open Multimodal Laboratory Facility,” 2015, doi: 10.1145/2801948.2801950.
- [9] M. P. Petrvalsky, O. Petura, and M. D. Drutarovsky, “Remote Fpga Laboratory For Testing Vhdl Implementations Of Digital Fir Filters,” *Acta Electrotech. Inform.*, vol. 15, no. 2, pp. 3–8, 2015, doi: 10.15546/aei-2015-0009.
- [10] H. Wan, X. Gao, and Q. Liu, “Hybrid teaching mode for laboratory-based remote education of computer structure course,” in 2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Oct. 2016, vol. 2016-Novem, pp. 1–8, doi: 10.1109/FIE.2016.7757582.
- [11] Y. Zhang et al., “Remote FPGA lab platform for computer system curriculum,” in Proceedings of the ACM Turing 50th Celebration Conference - China on - ACM TUR-C '17, 2017, vol. Part F1277, pp. 1–6, doi: 10.1145/3063955.3063958.
- [12] E. Irmak and A. Calpbiniçi, “E-Laboratuvarlar İçin Yeni Bir Tasarım: Eş Zamanlı Erişilebilen Deneysel Uygulama Platformu,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 32, no. 2, pp. 363–375, Jun. 2017, doi: 10.17341/gazimmfd.322159.
- [13] A. A. Syed, R. Asif, S. Hina, and Z. Fatima, “Cloud Based Remote FPGA Lab Platform: An Application of Internet of Things,” *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 37, no. 4, pp. 535–544, Oct. 2018, doi: 10.22581/muet1982.1804.08.
- [14] K. Zhang, Y. Chang, M. Chen, Y. Bao, and Z. Xu, “Computer Organization and Design Course with FPGA Cloud,” in Proceedings of the 50th ACM Technical Symposium on Computer Science Education, Feb. 2019, pp. 927–933, doi: 10.1145/3287324.3287475.
- [15] M. Winzker and A. Schwandt, “Open Education Teaching Unit for Low-Power Design and FPGA Image Processing,” in 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Oct. 2019, vol. 2019-October, pp. 1–9, doi: 10.1109/FIE43999.2019.9028694.
- [16] H. Wan, K. Liu, J. Lin, and X. Gao, “A Web-based Remote FPGA Laboratory for Computer Organization Course,” in Proceedings of the 2019 on Great Lakes Symposium on VLSI, May 2019, pp. 243–248, doi: 10.1145/3299874.3317999.
- [17] C. Aramburu Mayoz et al., “FPGA Remote Laboratory: Experience in UPNA and UNIFESP,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1231 AISC, 2021, pp. 112–127.