



Araştırma Makalesi

FPGA Tabanlı Uzaktan Programlanabilir ve Gözlemlenebilir Geliştirme Kartı Tasarımı ve Uygulaması

Buğra Dağcı^{*1}, İsmail Koyuncu²

¹Afyon Kocatepe University, Institute of Natural and Applied Sciences, Afyonkarahisar, Türkiye

²Afyon Kocatepe University, Technology Faculty, Department of Electrical Electronics Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

FPGA
Uzaktan Laboratuvar
Bulut Bilişim
Eğitim ve Uygulama
Teknolojileri

ÖZ

FPGA (Field Programmable Gate Array - Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi) tabanlı uzaktan erişimli laboratuvarlar, tasarımcıların coğrafi kısıtlamalar olmaksızın karmaşık sayısal devreleri gerçek zamanlı tasarlayıp kontrol etmelerini sağlamaktadır. Bu çalışmada, yurt dışı bağımlılığını ve maliyetleri azaltmayı hedefleyen uzaktan programlanabilir ve gözlemlenebilir yerli bir FPGA geliştirme kartı tasarlanmıştır. Xilinx XC3S50AN FPGA ve ESP32 entegrasyonu kullanılarak geliştirilen sistem, HTML/JavaScript tabanlı web arayüzüyle FPGA çipine erişim ve Python altyapısıyla hızlı bit dosyası aktarımı imkânı sunmaktadır. Canlı yayın paneli üzerinden sistem çıktıları izlenebilmektedir. Performans ölçümleri trafik yoğunluğunu da içerecek şekilde detaylı incelenmiş ve düşük trafik koşullarında yükleme süreleri 5.827-7.579 s, yüksek trafikte ise ortalama 14.146 s olarak ölçülmüştür. Çeşitli uygulamaların başarılı çalışması, sistemin kararlılık ve esnekliğini doğrulamaktadır. Farklı yetkilendirme seviyeleriyle laboratuvar güvenliği sağlanmış, eğitim ve endüstri kullanıcılarının ihtiyaçlarına etkin cevap verebilen yerli bir uzaktan programlanabilir FPGA kartı ortaya konmuştur.

Design and Application of FPGA Based Remote Programmable and Observable Development Board

Keywords:

FPGA
Remote Laboratory
Cloud Computing
Education and Application
Technologies

ABSTRACT

FPGA (Field Programmable Gate Array)-based remote-access laboratories enable designers to develop and control complex digital circuits in real-time without geographic limitations. In this study, a domestically developed FPGA development board that is remotely programmable and observable has been designed with the aim of reducing foreign dependency and overall costs. The system, developed through the integration of a Xilinx XC3S50AN FPGA and an ESP32 module, provides access to the FPGA chip via an HTML/JavaScript-based web interface and enables fast bitstream transmission through a Python backend. System outputs can be monitored through a live streaming panel. Performance evaluations were conducted in detail, including traffic intensity, with loading times measured between 5.827-7.579 seconds under low-traffic conditions and averaging 14.146 seconds under high-traffic conditions. The successful execution of various applications confirms the system's stability and flexibility. Laboratory security has been ensured through different authorization levels, resulting in a domestically produced remotely programmable FPGA board capable of effectively addressing the needs of both educational and industrial users.

*Sorumlu Yazar

*(bugra.dagci0@gmail.com) ORCID ID 0000-0002-9606-5348
(ismailkoyuncu@aku.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-4725-4879

e-ISSN: 2717-8579

Geliş Tarihi: 27/01/2025; Kabul Tarihi: 25/04/2025

Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi

1. GİRİŞ

FPGA (Field Programmable Gate Array - Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) çipleri, dijital devre tasarımında sağladığı yüksek esneklik, paralel işlem kapasitesi (Alçın vd., 2021) ve düşük güç tüketimi gibi özellikleriyle, mühendislik (Taşdemir vd., 2025), savunma sanayi, yapay zekâ, tıp elektronigi ve eğitim gibi alanlarda önemli bir yer edinmiştir. FPGA teknolojisi, karmaşık devre tasarımlarını hızlı ve maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirme imkânı sunarak, araştırma ve geliştirme projelerinin temel bir bileşeni haline gelmiştir. Ancak, mevcut donanım çözümleri genellikle yurt dışına bağımlıdır ve yüksek maliyetleri nedeniyle özellikle eğitim kurumları ve küçük ölçekli projeler için erişilebilirliği sınırlamaktadır. Bu durum, yerli (Keskin, 2023) ve özelleştirilebilir FPGA geliştirme kartlarının geliştirilmesini, daha ekonomik ve esnek çözümler sunma açısından kritik bir ihtiyaç haline getirmiştir.

Uzaktan erişimli sistemler (Çelik, 2021), eğitim ve araştırma alanlarında fiziksel sınırları ortadan kaldıran çözümler sunarak, öğrencilerin ve araştırmacıların farklı lokasyonlardan laboratuvar deneyimlerine katılmasına olanak tanımaktadır. FPGA çiplerinin uzaktan programlanabilirliği, kullanıcıların dijital devre tasarımlarını fiziksel donanıma aktarmalarını ve bu süreçte gerçek zamanlı olarak sonuçları gözlemlemelerini mümkün kılmaktadır. JTAG (Joint Test Action Group - Ortak Test Eylem Grubu), UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - Evrensel Asenkron Alıcı-Verici) ve SPI (Serial Peripheral Interface - Seri Çevrimsel Arabirim) gibi protokollerle desteklenen bağlantı altyapısı, FPGA donanımına hızlı ve güvenilir bir erişim sağlamaktadır. Ayrıca, HTML (HyperText Markup Language - Hiper Metin İşaretleme Dili) ve JavaScript tabanlı web arayüzleri, kullanıcı deneyimini geliştirmekte ve erişim kolaylığı sağlamaktadır.

FPGA tabanlı uzaktan erişim laboratuvar sistemleri, dijital elektronik eğitiminde ve araştırmalarında önemli bir atılım gerçekleştirmektedir. Özellikle, öğrencilerin ve araştırmacıların fiziksel olarak laboratuvarında bulunma zorunluluğunu ortadan kaldıran bu sistemler, internet üzerinden FPGA donanımları üzerinde deney yapma olanağı sunmaktadır. Hashemian ve Riddley tarafından geliştirilen FPGA e-Lab, Xilinx Spartan-3E Starter Kit ile National Instruments veri toplama donanımı ve LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench - Laboratuvar Sanal Araçlar Mühendislik Çalışma Ortamı) arayüzünü içeren bir yapı kullanarak, tasarımın giriş, simülasyon, sentez ve donanım yeniden yapılandırma aşamalarının tamamının uzaktan gerçekleştirilmesini sağlamaktadır (Hashemian ve Riddley, 2007). Bu yaklaşım, öğrencilere FPGA çipinin yeniden programlanabilir yapısını pratik olarak deneyimleyebilme fırsatı sunmaktadır. Indrusiak ve

arkadaşları ise dijital elektronik sistemlerin uzaktan erişimli laboratuvar ortamına entegrasyonunda çok katmanlı soyutlama modellerini ele almakta ve TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol - İletim Kontrol Protokolü / İnternet Protokolü) tabanlı yapılandırma dosyaları ile video akışı kullanarak FPGA çiplerinin uzaktan kontrol edilebileceğini göstermektedir (Indrusiak vd., 2007). Böylece, tasarım ve gözlem süreçleri farklı konumlardan gerçek zamanlı olarak yürütülebilmektedir.

Daha düşük maliyetli çözümler sunma arayışında olan Hashemian ve Pearson, RLA (Remote Laboratory Access - Uzaktan Laboratuvar Erişimi) sistemini ortaya koymakta ve istemci-sunucu mimarisi üzerinden, sunuculara bağlı FPGA kartlarına internet aracılığıyla erişilmesini sağlamaktadır (Hashemian ve Pearson, 2009). Sunucular arasında yük dengeleme ve kaynak paylaşımı yapılması, öğrencilerin projelerini uzaktan yürütübilmesine imkân vermektedir. Drutarovský ve ekibinin çalışmasında ise Altera FPGA geliştirme kitleri ve LabVIEW tabanlı bir grafik kullanıcı arayüzü kullanılarak yeniden yapılandırılabilir sistemlerin uzaktan test edilmesi gerçekleştirilmektedir (Drutarovský vd., 2009). Burada, bir iş zamanlayıcı sistemi yardımıyla FPGA tasarımlarının donanım kaynakları müsait oldukça devreye alınması sağlanmaktadır. Altera'nın geliştirdiği donanım altyapısının, LabVIEW arayüzü üzerinden uzaktan kontrol edilebilmesi; kompleks FPGA tasarımlarının internet üzerinden de erişilebilir ve yönetilebilir hale geldiğini göstermektedir.

Ravanasa ve Hashemian tarafından geliştirilen vLab sistemi ise yüksek hızlı paralel işlem yeteneği sunmakta ve EPP (Enhanced Parallel Port - Gelişmiş Paralel Port) protokolü ile Microsoft Windows Uzak Masaüstü teknolojilerini birleştirerek, birden fazla kullanıcının aynı anda FPGA donanımına erişmesine imkân tanımaktadır (Ravanasa ve Hashemian, 2014). Bu yaklaşım, aynı platformda çoklu görevlerin ve karmaşık endüstriyel projelerin eşzamanlı yürütülmesini mümkün kılmaktadır. Benzer bir uzaktan laboratuvar çözümü olarak Morgan ve Cawley, RemoteFPGA Lab adıyla kullanıcıların HDL (Hardware Description Language - Donanım Tanımlama Dili) tabanlı tasarımlarını sentezleyerek gerçek donanım üzerinde test edebildiği bir ortam geliştirmektedir (Morgan ve Cawley, 2011). Bu sistem, FPGA üzerinde giriş-çıkış denetimi ve sinyal izleme gibi özellikleri sunarak, etkileşimli bir eğitim süreci oluşturmaktadır. Rodriguez-Gil ve arkadaşlarının WebLab-FPGA-Watertank hibrit laboratuvarı da HTML5 ve WebGL (Web Graphics Library - Web Tabanlı Grafik Kütüphanesi) teknolojilerini kullanarak, FPGA donanımları ile sanal ortamı birleştirmekte ve herhangi bir tarayıcı eklentisi gerektirmeden uzaktan kontrol imkânı vermektedir (Rodriguez-Gil vd., 2014). Kullanıcılar, FPGA çipinde çalışmakta

olan bir su tankı modelini, web tarayıcısı aracılığıyla görüntüleyip denetleyebilmekte ve geri bildirimleri sanal göstergeler üzerinden alabilmektedir. Buna benzer şekilde, Mateos-Gil ve arkadaşları da FPGA tabanlı SoC (System on Chip - Çip Üzerinde Sistem) uzaktan laboratuvarı geliştirerek, öğrencilerin Linux tabanlı bir sunucu mimarisi yardımıyla JTAG ve seri port bağlantılarını kullanarak doğrudan FPGA donanımı üzerinde çalışmalarına olanak sunmaktadır (Mateos-Gil vd., 2022).

Monzo ve ekibi, RLAB-UOC-FPGA isimli sistemde, uzaktan mühendislik eğitimi için tasarlanmış bir yapıya vurgu yaparak, öğrencilerin internet üzerinden FPGA projelerini yürütmelerini mümkün kılmaktadır (Monzo vd., 2021). Bu sistemde, gerçek FPGA kartlarına uzaktan erişen kullanıcılar, giriş/çıkış çevre birimlerini dahi internet üzerinden kontrol edebilmektedir. Schwandt ve Winzker ise FPGA Vision Remote Lab adını verdikleri laboratuvar altyapısında, gerçek zamanlı izleme ve görsel geri bildirim özellikleri sunarak, öğrencilerin gerçekleştirdikleri tasarım değişikliklerini canlı olarak gözlemlemesine imkân tanımaktadır (Schwandt ve Winzker, 2019). Oballe-Peinado ve arkadaşlarının uzaktan laboratuvar sistemi de dijital elektronik eğitimini hedef alarak, FPGA üzerinde bulunan giriş-çıkış çevre birimleriyle internet üzerinden etkileşimi sağlamaktadır (Oballe-Peinado vd., 2020). Benzer doğrultuda, Al Qassem ve ekibi Docker konteynerleriyle ölçeklenebilen bir bulut platformu geliştirerek, FPGA tasarımlarının hem uzaktan hem de güvenli bir ortamda yürütülebileceğini göstermektedir (Al Qassem vd., 2020). Öge ve arkadaşları ise FPGA kontrollü arabirim kartlarının testine odaklanmakta ve farklı test yöntemlerinin karşılaştırıldığı bir çalışma yürütmektedir (Öge vd., 2019). Navas-González ve ekibinin yaklaşımında ise öğrencilerin kampüs içerisinde veya çevrimiçi biçimde FPGA deneylerini gerçekleştirebilecekleri bir uzaktan laboratuvar platformu sunulmakta, bu çözümün web tabanlı yapısı sayesinde kullanıcıların kendi cihazları üzerinden projelerini sürdürmesi sağlanmaktadır (De Jesús Navas-González vd., 2022).

FPGA tabanlı tasarımların endüstri ve güvenlik uygulamalarında da geniş bir yer tuttuğu gözlemlenmektedir. Wang ve Zhang'ın JTAG boundary-scan (Sınır Taraması) teknolojisi üzerine yaptıkları çalışma, IEEE 1149.1 standardına dayalı olarak bağlantı hatalarının tespitinde ve bunların uzaktan tanınmasında önemli bir fayda sağlamaktadır (Wang ve Zhang, 2010). Böylece, fiziksel müdahaleye gerek kalmadan devre testleri hızlandırılmakta ve özellikle büyük ölçekli entegre devrelerde hata tespit süreçleri etkinleşmektedir. Gao ve arkadaşlarının kablosuz FPGA yapılandırma devresi ise tehlikeli veya erişilmesi güç alanlardaki FPGA donanımlarının konfigürasyonunu kablosuz olarak gerçekleştirmekte ve ZigBee benzeri iletişim protokolleri kullanarak düşük güç tüketimiyle yüksek doğruluğa ulaşmaktadır (Gao vd., 2015). Bu

yaklaşım, endüstriyel ortamlarda kablolama maliyetlerini azaltmakta ve FPGA yeniden programlanabilirliğini daha erişilebilir hale getirmektedir. Fernandes ve ekibinin nükleer ortamlarda FPGA güncellemelerini güvenli biçimde yapmaya yönelik çalışmaları da kritik altyapılar için kesintisiz ve hataya dayanıklı bir sistem sağlamaktadır (Fernandes vd., 2015). FPGA önceki sürümüne geri dönebilme özelliği, nükleer gibi insan müdahalesinin sınırlı olduğu zorlu ortamlarda güvenilirliği artırmaktadır.

Kablosuz veri aktarımı ve gömülü kontrol sistemleri, ev otomasyonundan güvenlik uygulamalarına kadar farklı senaryoları da desteklemektedir. Singh ve Kumar'ın FPGA-Bluetooth tabanlı ev otomasyon sistemi, kullanıcıların akıllı telefonlarından FPGA çipine komut gönderebilmesine ve ev cihazlarını düşük maliyetli, enerji verimli bir biçimde yönetebilmesine olanak tanımaktadır (Devachandra vd., 2021). Oh ve arkadaşlarının MeetGo platformu ise FPGA tabanlı güvenilir yürütme ortamı (TEE - Trusted Execution Environment) sağlayarak, kripto para cüzdanları ve GPGPU (General-Purpose Graphics Processing Unit - Genel Amaçlı Grafik İşleme Birimi) gibi yüksek güvenlik gerektiren alanlarda veri gizliliği ve bütünlüğünü korumaktadır (Oh vd., 2021). Bu sistem, özel anahtarların FPGA içinde saklanması mümkün kılmakta ve hesaplama yoğun işlemlerin güvenli yürütülmesini sağlamaktadır. Seetharaman ve arkadaşları tarafından geliştirilen FPGA tabanlı kalabalık yönetim sistemi ise ultrasonik sensörlerden gelen verileri kullanarak oda kapasitesini gerçek zamanlı izlemekte ve kapasite aşıldığında alarm vererek güvenlik önlemleri sunmaktadır (Seetharaman vd., 2022). Basys-3 FPGA kartı üzerinde yürütülen bu proje, özellikle kalabalık mekânlarda etkin bir çözüm ortaya koymaktadır.

Görüntü işleme ve grafik uygulamalarında da FPGA teknolojisinin esnek yapısından yararlanıldığı görülmektedir. Ursutiu ve ekibi, LabVIEW FPGA modülünün uzaktan programlamaya uygun yapısını kullanarak, karmaşık devrelerin internet üzerinden kontrolünü ve izlenmesini sağlamaktadır (Ursutiu vd., 2009). Effendi ve arkadaşları, OV7670 kamera modülü ile FPGA çipini birleştirerek DE0-Nano-SoC kartında gerçek zamanlı video aktarımı gerçekleştirmekte ve VGA (Video Graphics Array - Video Grafik Dizisi) monitöre düşük maliyetli, verimli bir görüntü işleme örneği sunmaktadır (Dodi vd., 2022). Benzer şekilde, Hong ve Chen'in FPGA tabanlı video parlaklık çıkarım sistemi, HDMI (High-Definition Multimedia Interface - Yüksek Çözünürlüklü Multimedya Arayüzü)-RGB (Red, Green, Blue - Kırmızı, Yeşil, Mavi) çevirici modülü ve DDR3 bellek entegrasyonu ile parlaklık bilgilerini işleyerek aydınlatma kontrolü yapabilmektedir (Hong ve Chen, 2023). Bu durum, düşük maliyetli aydınlatma çözümlerinde ve gerçek zamanlı video işleme projelerinde FPGA çipinin yüksek performans ve özelleştirme kapasitesinin öne çıktığını

göstermektedir.

Uzaktan deney ve prototipleme sistemlerinin yaygınlaşması, eğitim ve endüstri alanlarında maliyetlerin düşürülmesine ve erişilebilirliğin artmasına katkıda bulunmaktadır. Toyoda ve arkadaşları, hibrit bulut platformunda yarı otomatik FPGA deneylerini destekleyerek, kullanıcıların Verilog HDL dosyalarını yükledikten sonra FPGA çalıştırma ve simülasyon süreçlerini otomatik hale getirmektedir (Toyoda vd., 2016). Syed Abbas Ali ve ekibinin CLP (Cloud Laboratory Platform - Bulut Laboratuvarı Platformu) ise bulut bilişim ve IoT (Internet of Things - Nesnelerin İnterneti) teknolojilerini bütünleştirerek uzaktan FPGA deneylerini mümkün kılmaktadır (Ali vd., 2018). Villar-Martínez ve arkadaşlarının LabsLand FPGA uzaktan laboratuvarı, dünya çapında çoklu kopyaya sahip bir sistem olarak ölçeklenebilirlik ve yüksek hizmet kalitesine yönelik çeşitli mekanizmalar sunmaktadır (Aitor vd., 2022). Buna karşılık, García-Orellana ve arkadaşları düşük maliyetli bir uzaktan mikrodenetleyici laboratuvarı önererek, eski bilgisayar donanımları ve Raspberry Pi gibi unsurlarla yerel ve ekonomik bir çözüm geliştirmektedir (García-Orellana vd., 2022). Böylece, farklı ölçeklerde ve farklı gereksinimlere uygun laboratuvar platformları oluşturulmaktadır.

Özel uygulama alanlarında FPGA tabanlı tasarımlar, mühendislere ve araştırmacılara özgün çözümler sunarak inovatif yaklaşımları desteklemektedir. Rigo ve arkadaşlarının, uzay uygulamalarına uygun PCB (Printed Circuit Board - Baskılı Devre Kartı) tasarımına ilişkin çalışması, yüksek hızlı sinyaller ve empedans kontrolü gibi zorlu teknik gereksinimleri karşılayarak ESA (European Space Agency - Avrupa Uzay Ajansı) standartlarına uyum sağlamaktadır (Rigo vd., 2020). Blochwitz ve ekibinin RemEduLa sistemi, çeşitli FPGA geliştirme kartlarıyla (Basys3, ZedBoard, PYNQ) modüler raf tabanlı bir yapı kurgulayarak, VMware Horizon 8 gibi sanallaştırma çözümleri üzerinden 7/24 erişilebilir bir uzaktan laboratuvar sunmaktadır (Blochwitz vd., 2022). Abanto ve arkadaşlarının Altera FPGA ve Raspberry Pi tabanlı uzaktan laboratuvar çalışması ise, düşük maliyetli bir yaklaşım ile Python-Flask web ara yüzünü birleştirmekte, kullanıcıların DE2-115 FPGA kartına internet üzerinden erişmesini sağlamaktadır (Abanto vd., 2022). Bu tarz maliyet etkin çözümler, eğitim kurumlarında FPGA teknolojisine daha geniş kitlelere ulaşmasına ve yenilikçi uygulamaların yaygınlaşmasına olanak vermektedir.

Literatürdeki bu çalışmaların ortak noktası, FPGA teknolojisine uzaktan erişimle bütünleştirilmesinin hem eğitim hem de endüstri açısından oldukça verimli ve yenilikçi fırsatlar sunduğunu göstermesidir. Farklı protokoller, bulut altyapıları (Juncheng vd., 2021) ve kullanıcı ara yüzleri ile zenginleştirilmiş bu yöntemler, FPGA çipinin yeniden programlanabilir ve yüksek performanslı yapısını, coğrafi kısıtları aşarak daha

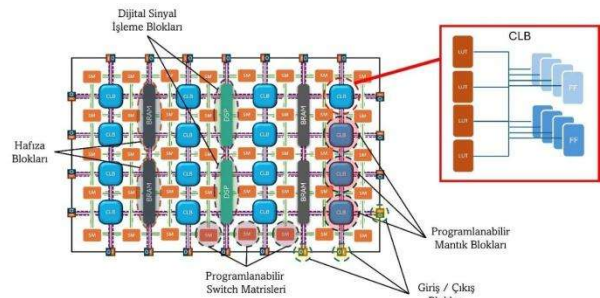
geniş bir kullanıcı kitlesiyle buluşturmaktadır. Bu sayede, dijital elektronik tasarım süreçleri, uzaktan yönetilebilir, ölçeklenebilir ve güvenli sistemler aracılığıyla daha ulaşılabilir hale gelmektedir.

Dijital platformlar, özellikle kaotik sistemlerin gerçek zamanlı işlenmesi ve izlenmesi için güçlü çözümler sunmaktadır. Nvidia Jetson AGX Orin gibi gömülü sistemler, yüksek işlem gücü ve doğruluk avantajları ile bu tür uygulamalar için tercih edilmektedir (Emin ve Yaz, 2024).

Bu çalışmada, yerli ve uzaktan erişimle programlanabilir bir FPGA geliştirme kartı tasarlanmıştır. Sistemde Xilinx XC3S50AN FPGA çipi ve ESP32 (Karagedik vd., 2023) mikrodenetleyici kullanılarak, kullanıcıların uzaktan FPGA programlama (Hauck, 1998) ve gözlemleme işlemlerini gerçekleştirebileceği bir platform geliştirilmiştir. Kullanıcılar, Python tabanlı bir altyapı ile yükledikleri bit dosyalarını FPGA çipine düşük trafikli ortamda ortalama 5.827 s ile 7.579 s arasında aktarabilmekte ve canlı yayın paneli üzerinden sistemin işleyişini gözlemleyebilmektedir. Sistem, LED (Light Emitting Diode - Işık Yayan Diyot) yakma, tam toplayıcı, mod4 sayıcı ve 7 parçalı göstergeler ile aşağı-yukarı sayıcı gibi uygulamalarla test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, yüksek maliyetli ithal FPGA geliştirme kartlarına alternatif olarak yerli bir çözüm sunmakta ve uzaktan erişimli laboratuvarlar için güçlü bir altyapı oluşturmaktadır.

2. FPGA ÇİPLERİ VE UZAKTAN LABORATUAR UYGULAMALARI

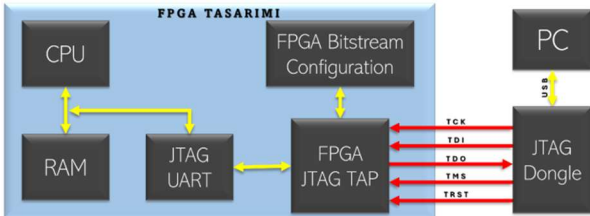
FPGA çipleri, 1980'lerin sonlarından beri esnek ve yeniden programlanabilir yapılarıyla dijital elektronik tasarımında önemli bir teknolojidir. Programlanabilir mantık blokları, yeniden yapılandırılabilir bağlantı matrisleri, dahili RAM (Random Access Memory - Rastgele Erişimli Bellek) ve DSP (Digital Signal Processor - Dijital Sinyal İşleyici) blokları gibi bileşenler içeren FPGA çipleri; gömülü sistemlerden otomotiv, telekomünikasyon ve askeri uygulamalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil 1'deki bağlantı yapısı, bu teknolojinin çok yönlü ve uyarlanabilir karakterini göstermektedir.



Şekil 1. FPGA mimarisinin genel yapısı

FPGA mimarisi, programlanabilir mantık blokları (CLB - Configurable Logic Block) ile bu bloklar arasındaki bağlantıları düzenleyen programlanabilir anahtarlama matrislerinden (SM - Switch Matrix) oluşmaktadır (Karataş vd., 2022). Mantık blokları, LUT (Look Up Table - Arama Tablosu) ve Flip-Flop gibi elemanlar sayesinde giriş-çıkış sinyallerini esnek ve hızlı biçimde işleyebilmektedir. Yüksek hızlı matematiksel işlemler için optimize edilen DSP blokları (Choi ve Yoo, 2020) ve dâhili blok RAM (BRAM - Block Random Access Memory) birimleri, sinyal işleme ve veri depolamada ek avantajlar sağlamaktadır. Programlanabilir anahtarlama matrisleri ise verilerin farklı bloklar arasında yönlendirilmesini sağlayarak, mimarinin esnekliğini ve performansını artırmaktadır.

Uzaktan erişimli FPGA laboratuvarları, JTAG protokolü sayesinde internet üzerinden FPGA donanımına erişim ve dijital tasarım yükleme imkânı sunmaktadır. Şekil 2'deki JTAG TAP (Test Access Point - Test Erişim Noktası) ve JTAG Dongle bileşenleri, CPU (Central Processing Unit - Merkezi İşlem Birimi), RAM ve UART gibi donanım elemanlarıyla etkileşim kurarak programlama ve hata ayıklama süreçlerini güvenli ve verimli hale getirmektedir. USB (Universal Serial Bus - Evrensel Seri Veriyolu) ve I2C (Inter-Integrated Circuit - Birleştirilmiş Devreler Arası) protokollerinin kullanımı ise FPGA çipine daha hızlı ve güvenli bağlantı sağlayarak, uzaktan programlama sürecini hızlandırmaktadır (Gruwell vd., 2016).



Şekil 2. FPGA tabanlı tasarımların JTAG ile programlanması genel blok şeması

Uzaktan erişimli FPGA laboratuvarları (Óballe-Peinado vd., 2024), fiziksel sınırları ortadan kaldırarak dünya genelinde daha geniş bir kullanıcı kitlesine gerçek zamanlı (Hanafi ve Karim, 2015) dijital devre tasarımı ve test deneyimi sunmaktadır. Bu bağlamda, FPGA tabanlı uzaktan erişimli laboratuvarlar (Dağcı ve Koyuncu, 2024), mühendislik eğitiminin (Kosan vd., 2024) dijital dönüşüm sürecinde önemli bir katkı sağlamaktadır. Web tabanlı ara yüzler ve bulut tabanlı çözümler, FPGA donanımına internet üzerinden bağlanmayı verimli ve esnek kılarken, çoklu kullanıcı desteği laboratuvar yoğunluğunu yönetmeyi kolaylaştırmaktadır.

Xilinx ISE (Integrated Software Environment - Entegre Yazılım Ortamı) Design Suite, Vivado Design Suite ve Altera Quartus II gibi yazılım araçları, FPGA çiplerinin programlanması, simülasyonu ve

doğrulanması süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Vivado Design Suite, özellikle daha karmaşık tasarımlar için gelişmiş bir geliştirme ortamı sağlayarak modern projelerde önemli bir rol oynamaktadır.

Farklı FPGA platformları ise kullanılacak projenin gereksinimlerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, Xilinx Spartan-3E düşük maliyet ve kolay kullanım sayesinde eğitimde öne çıkarken, Artix-7 ve Kintex-7 gibi platformlar yüksek performans ve veri işleme kapasitesi gerektiren uygulamalara uygundur. Altera Cyclone II ve Cyclone V gibi platformlar ise düşük güç tüketimi ve entegre ARM (Advanced RISC Machines - Gelişmiş RISC Makineleri) Cortex-A9 işlemci gibi özelliklerle gömülü sistemlerde tercih edilmektedir.

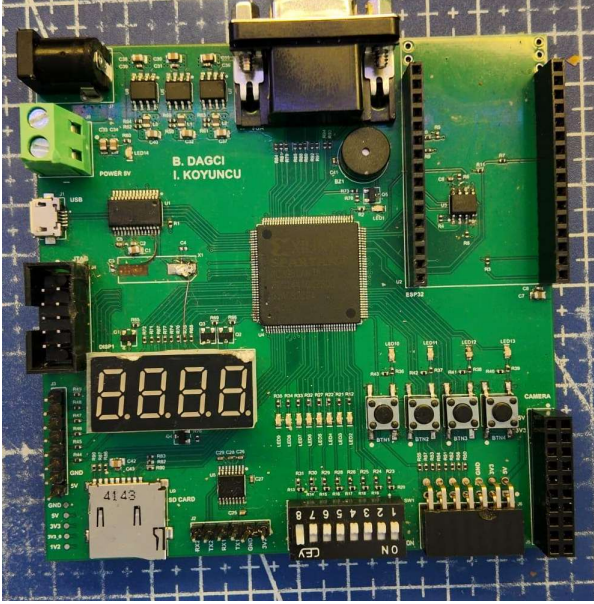
Web tabanlı arayüzler ve bulut tabanlı FPGA araçları, kullanıcıların tasarımlarını kolayca yükleyip test etmelerine imkân tanıırken, herhangi bir ek donanım gerektirmemesi sayesinde maliyetleri düşürmektedir (Skhiri vd., 2019). Bulut entegrasyonu, tasarımların FPGA çipine bit akışı olarak indirilmesini sağlayarak uzaktan tasarım ve test süreçlerini hızlandırmakta; çoklu kullanıcı desteği ise aynı anda birden fazla kişinin laboratuvar erişimini mümkün kılmaktadır.

3. FPGA TABANLI GELİŞTİRME KARTI TASARIMI VE UZAKTAN KONTROLÜ

Bu çalışmada, eğitim ve laboratuvar ortamlarında gerçek zamanlı FPGA deneyleri yapmayı amaçlayan bir uzaktan erişim sistemi geliştirilmiştir. Sistemde, ana işlem birimi olarak Xilinx XC3S50AN-4TQG144C FPGA çipi tercih edilmektedir. Bu FPGA çipinin düşük maliyetli ve pratik yapısı, öğrenme ve küçük ölçekli Ar-Ge (Araştırma ve Geliştirme) projelerine yönelik uygulamalarda önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Şekil 3'te görülen devre kartının üstten görünümünde, FPGA çipinin merkezi konumda yer aldığı ve çevresinde güç regülatörleri ile dijital giriş-çıkış bileşenlerinin düzenli biçimde konumlandığı görülmektedir. LED'ler, 7 parçalı göstergeler, butonlar ve kaydırmalı anahtarlar gibi temel birimlere kolay erişim sunan bu tasarım, uzaktan veya yerel kullanıcıların dijital tasarım çıktıları ve girdi sinyalleri üzerinde hızlı ve net gözlemler yapmasına imkân tanımaktadır.

Sistemin önemli özelliklerinden biri, DJI Osmo Pocket 3 kamera ile yapılan YouTube canlı yayını aracılığıyla, FPGA kartının çalışma durumunun gerçek zamanlı olarak izlenebilmesidir. Kullanıcılar, internet sitesine bağlandıklarında bu yayına erişebilmekte ve FPGA üzerinde çalışan devrenin LED veya 7 parçalı gösterge gibi çıkışlarını anlık olarak görebilmektedir. Eğitim kurumları veya araştırma laboratuvarlarında sınırlı donanımla çok sayıda kullanıcının eşzamanlı deney yapabilmesi için bu yaklaşım oldukça verimli olmaktadır. Herhangi bir konumda bulunan bir katılımcı, yalnızca tarayıcı

üzerinden devrenin güncel durumunu izleyebilmekte ve sunulan arayüzdeki seçeneklerle sistemle etkileşime geçebilmektedir. Bu altyapı, laboratuvarın mekânsal sınırlarını aşmayı ve öğrenme deneyimini çevrimiçi ortama taşımayı kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3. Tasarlanan FPGA devre kartının üstten görünümü

Şekil 4'te, geliştirilen sistemin genel işleyiş süreci akış diyagramı ile gösterilmektedir. Kullanıcı, web tabanlı arayüz üzerinden sisteme giriş yaptıktan sonra iki farklı yöntemle FPGA programlama işlemini gerçekleştirebilmektedir. Sistem yetkilendirmeleri, kullanıcıların giriş yaptığı şifreye bağlı olarak değişmekte ve farklı erişim seviyeleri sunulmaktadır. Akış diyagramında bulunan ilk yöntemde, sistemde tanımlı hazır programlar doğrudan seçilerek çalıştırılmakta ve ESP32 mikrodeneleyicisi aracılığıyla FPGA bilgi pinlerine aktarılmaktadır. Bu yöntemde, FPGA çipine önceden yüklenmiş olan tasarım sayesinde kullanıcılar, web arayüzü üzerinden herhangi bir ek yükleme yapmadan farklı uygulamaları aktif hale getirebilmektedir. Hazır programlar, sistemin kullanım kolaylığını artırmakta ve laboratuvar ortamında hızlı test imkânı sunmaktadır. Kullanıcılar, web arayüzü üzerinden ilgili programı seçtikten sonra, sistem bu değişikliği algılamakta ve FPGA üzerinde belirlenen işlemi gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda, canlı yayın paneli aracılığıyla uygulamaların anlık izlenmesi de sağlanmaktadır.

İkinci yöntemde, kullanıcılar geliştirdikleri bit dosyalarını Google Drive'a yükleyip, bilgisayar senkronizasyonu ile dosyanın JTAG üzerinden doğrudan FPGA çipine aktarılmasını sağlamaktadır. Web arayüzü üzerinden yükleme başlatıldığında, sistem en güncel dosyayı otomatik olarak algılayarak programlama işlemini gerçekleştirmektedir. Programlama tamamlandıktan sonra, sistemin

çalışma durumu DJI Osmo Pocket 3 kamera aracılığıyla gerçek zamanlı olarak izlenip YouTube canlı yayını ile kullanıcılara sunulmaktadır. Bu yöntem, kullanıcıların kendi FPGA tasarımlarını test etmelerine olanak tanıırken, farklı lokasyonlardan uzaktan erişim ile sistemin esnek kullanımını da artırmaktadır.

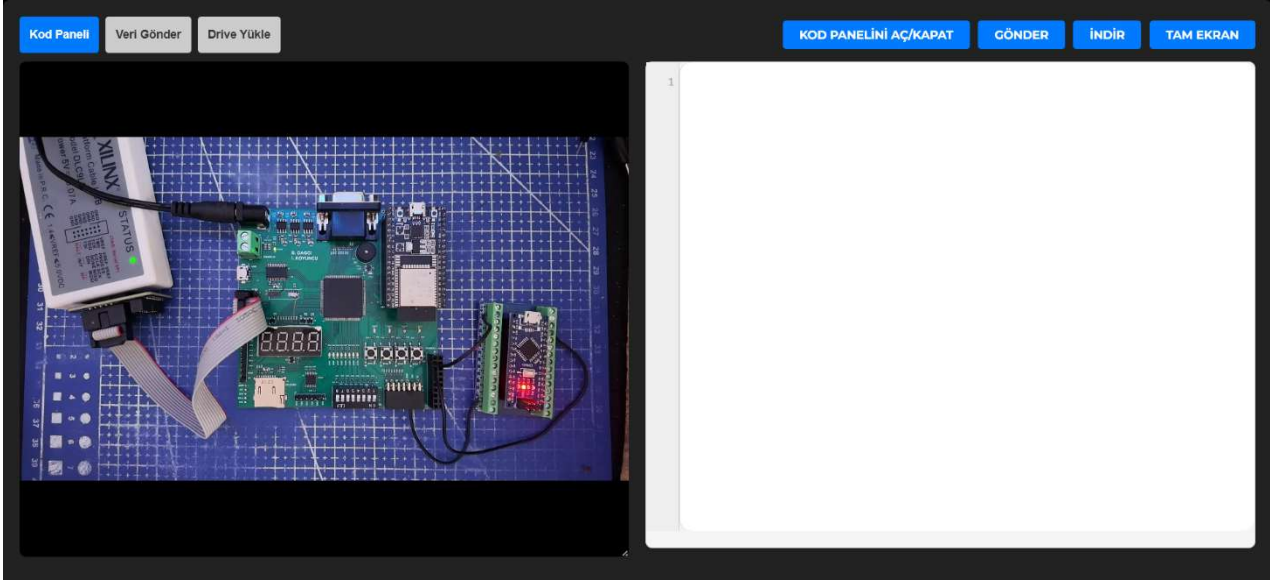


Şekil 4. FPGA tabanlı uzaktan programlanabilir ve gözlemlenebilir sistem akış şeması

Sitede sunulan arayüz, farklı kullanıcıların ihtiyaçlarına göre uyarlanmış çeşitli bölümler içermektedir. Yönetici girişi yapıldıktan sonra beliren ekran, Şekil 5'te gösterilmektedir. Bu ekranda, yöneticilerin ve diğer kullanıcı rollerinin yararlanabileceği "Kod Paneli", "Hazır Programlar" ve "Drive Yükleme" gibi alt bölümler bulunmaktadır. Kod paneli, kullanıcıların eğitim amaçlı örnek kodlara erişmesini ve FPGA çipini programlama süreçlerini daha iyi anlamasını sağlamaktadır. Hazır programlar bölümü, önceden tanımlı uygulamaların doğrudan FPGA çipine yüklenmesini mümkün kılarak sistemin kullanımını kolaylaştırmaktadır. Bu ekranın kullanıcı dostu bir yapıya sahip olması, özellikle eğitim ortamlarında sistemin daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır. Her bir alt bölüm, kullanıcıların ihtiyaç duyduğu işlevlere hızlı ve doğrudan erişim sağlaması açısından özel olarak tasarlanmıştır. Arayüzdeki menülerin sade ve anlaşılır yapısı, hem ilk defa sistemi kullanan öğrencilerin hem de deneyimli kullanıcıların rahatlıkla işlem yapabilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, sistemdeki buton yerleşimleri ve ikonlar sezgisel olarak düzenlenmiş olup, kullanıcıların yönlendirme ihtiyacı duymadan işlemleri tamamlayabilmeleri hedeflenmiştir. Eğitimciler açısından ise, öğrencilerin sistem üzerindeki faaliyetlerini kolayca takip edebilmek ve gerektiğinde müdahale edebilmek gibi avantajlar

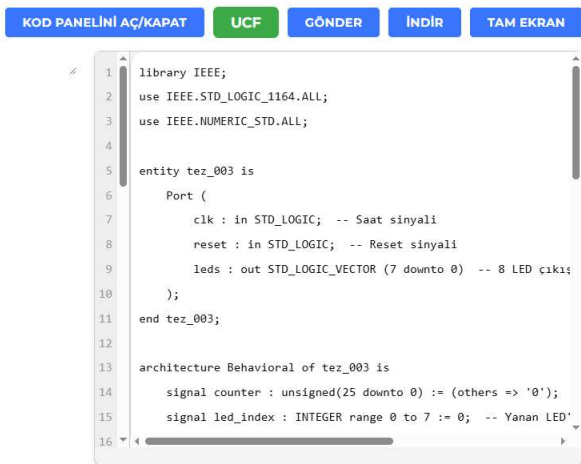
sunulmaktadır. Drive Yükleme bölümü ise kullanıcıların kendi geliştirdikleri bit uzantılı dosyaların Google Drive aracılığıyla sisteme

yükleyerek FPGA çipi üzerinde testler gerçekleştirmelerine imkân sağlamaktadır.



Şekil 5. Site tasarımında yönetici girişi sonrası ekran görüntüsü

Şekil 6'da bulunan kod paneli, temel olarak eğitici amaçlarla oluşturulan örnek kodları inceleme, düzenleme ve farklı formatlarda indirme işlevlerini barındırmaktadır. Böylelikle, FPGA veya dijital tasarımla yeni tanışan öğrenciler, burada listelenen kodları analiz ederek mantığını kavramakta ve kendi çalışmalarına referans edinebilmektedir. Sistemin geliştirilmesiyle, bu panele ek eğitim materyalleri veya rehberler de entegre edilebilmektedir. Ancak, Kod Paneli ile FPGA çipinin anlık kontrolü veya otomatik programlaması yapılmamaktadır; panel, daha çok öğretim amaçlı dokümanları paylaşmak için kullanılmaktadır.

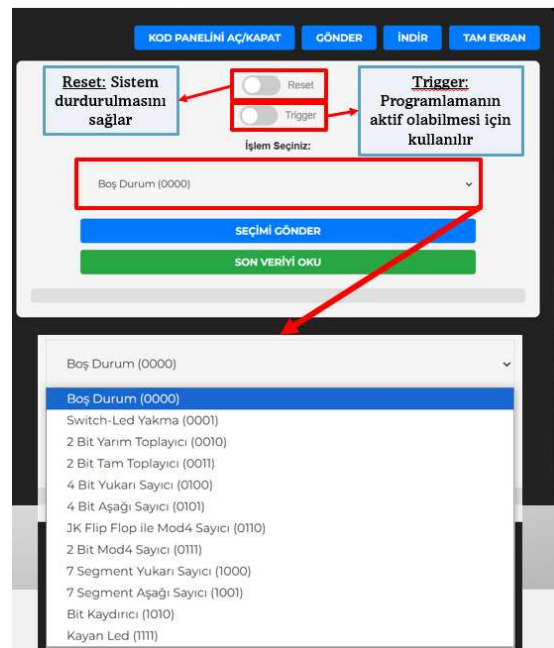


Şekil 6. Kod paneli tasarımı

Şekil 7'de bulunan hazır programlar menüsü, LED yakma, yarım toplayıcı, tam toplayıcı, flip floplarla mod4 sayıcı, basit mod4 sayıcı, 7 parçalı gösterge ile aşağı-yukarı sayıcı ve bit kaydırıcı gibi uygulamaları tek bir FPGA projesi içerisinde

birleştirerek sunmaktadır. Bu uygulamalar, FPGA çipine önceden yüklenmiş durumda bulunmakta ve 4 bitlik veri hatları ile reset (Sıfırlama) ve trigger (Tetikleyici) sinyalleri yardımıyla seçilebilmektedir.

Kullanıcı, hazır programlar menüsünden istediği uygulamayı seçtiğinde, FPGA üzerindeki 4 bit veri değerleri güncellenerek hangi tasarımın aktif olacağı belirlenmektedir. Böylece, uzaktan veya yerel konumda bulunan öğrenciler ve araştırmacılar, farklı deneyleri hızlıca devreye alarak LED'ler veya 7 parçalı göstergeler üzerinden sonuca ulaşabilmektedir. Bu yöntem, tek seferde çok sayıda örneğin teste hazır hale getirilmesine ve laboratuvar ortamlarında pratik uygulamaların daha rahat yürütülmesine katkı sunmaktadır.



Şekil 7. Hazır programlar menü tasarımı

Şekil 8'de bulunan Google Drive yükleme ekranı, kullanıcıların kendi tasarladıkları bit dosyalarını sisteme iletmesini sağlamaktadır. Varsayılan durumda bu özellik, yalnızca yönetici veya laboratuvar rolündeki kullanıcılara açık tutulmaktadır. Drive yükle butonuna tıklayan kullanıcı, sistemde tanımlı Google Drive kimlik bilgileri (Client ID - İstemci Kimliği, Client Secret - İstemci Gizli Anahtarı, Refresh Token - Yenileme Jetonu, Token URL - Jeton URL'si, Folder ID - Klasör Kimliği vb.) aracılığıyla senkronize bir şekilde dosyasını belirli bir klasöre aktarabilmektedir. Her dosya türü kabul edilebilmekte, ancak sistemin arka planındaki Python betiği, yalnızca en son gönderilen bit dosyasını JTAG bağlantısı yoluyla FPGA çipine yüklemektedir. Bu yükleme süreci düşük trafik koşullarında en hızlı senaryoda ortalama 5.827 s ile 7.579 s arasında gerçekleşmektedir ve ardından yeni tasarım canlı yayın esnasında izlenebilmektedir. İleride sistemin geliştirilmesi durumunda, dosya türünün kontrol edilerek bit dosyası dışında yüklemelere engel olunması veya uyarı mesajları verilmesi gibi ek kontroller eklenmesi düşünülmektedir. Hazır programların ve buluta yükleme işlemlerinin kontrolü, rollere göre değişen şifrelerle yönetilmektedir. Kullanıcı sisteme giriş yaptığında, arka planda tanımlı giriş biçimleri hangi butonların görünür veya etkin olacağını belirlemektedir. Örneğin, öğrenci rolündeki kullanıcılar buluta yükleme butonunu görememekte, sadece hazır programları seçerek FPGA üzerinde deneyler yapabilmektedir. Yönetici ise bu ayarları değiştirme yetkisine sahip olup, istenirse öğrencilere buluta yükleme imkânı verebilmekte veya yeni hazır program ekleyebilmektedir. Bu esnek yetkilendirme modeli, ders veya proje bazında farklı kısıtlamalar getirilmesine, laboratuvar yoğunluğunun düzenlenmesine ve güvenlik önlemlerinin sıkı tutulmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 8. Buluta dosya yükleme tasarımı

Sistemin veri aktarım ve kayıt süreçlerinde Google Sheet ve Google Apps Script altyapısı aktif olarak kullanılmaktadır. Kullanıcı, FPGA çipindeki hazır programlar arasında geçiş yapmak için 4 bitlik veri pinlerini değiştirdiğinde, bu değişiklik Google Apps Script tarafından algılanarak yaklaşık 1 saniye içinde Google Sheet'e işlenmektedir. Bu işlem sırasında, geçiş yapılan programın adı, ilgili kullanıcının veya rolün kimliği ve tarih-saat bilgisi kayıt altına alınmaktadır. Böylece sistemin kullanım geçmişi sürekli olarak saklanarak kimin, hangi zaman diliminde hangi programı çalıştırdığı net bir

şekilde takip edilebilmektedir. Bu yapı, çok kullanıcı senaryolar için önemli bir avantaj sağlamakta, herhangi bir hata tespiti, performans analizi veya geriye dönük inceleme gerektiğinde detaylı bir veri kaynağı sunmaktadır. Şekil 9, sistemin Google Sheet üzerinde nasıl veri kaydettiğini göstermektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	TÜM GİRİŞLER								
2	TARİH	SAAT	RESET	TRIGGER	DATA3	DATA2	DATA1	DATA0	
3	09/01/2025	19:35:36	1	0	1	0	1	0	
4	09/01/2025	19:35:59	0	1	1	0	1	1	
5	09/01/2025	19:39:05	0	1	0	0	1	1	
6	09/01/2025	19:44:01	0	1	0	1	1	0	
7	09/01/2025	19:44:11	0	0	0	1	0	0	
8	09/01/2025	19:49:15	0	0	0	0	0	0	
9	09/01/2025	19:49:20	0	1	0	0	1	0	
10	09/01/2025	19:49:25	0	1	1	1	1	1	
11	09/01/2025	19:49:29	0	1	1	0	0	0	
12	09/01/2025	19:49:33	1	1	0	0	1	1	
13	09/01/2025	19:49:37	1	1	0	0	1	1	
J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
SON GİRİŞ									
TARİH		SAAT	RESET	TRIGGER	DATA3	DATA2	DATA1	DATA0	
16/02/2025		18:11:16	0	1	1	1	1	1	

```

1 function doGet(e) {
2   Logger.log(JSON.stringify(e));
3   var result = 'Ok';
4   if (!e.parameter) { ...
5   }
6
7   var sheet_id = [redacted];
8   var sheet_name = 'Reset_Trigger_Data';
9
10  var sheet_open = SpreadsheetApp.openById(sheet_id);
11  var sheet_target = sheet_open.getSheetByName(sheet_name);
12
13  var sts_val = '';
14  var rowDataLog = [];
15
16  // Tarih ve Saat bilgisi (A ve B sütunları için)
17  var Curr_Date = Utilities.formatDate(new Date(), "Europe/Istanbul", 'dd/MM/yyyy');
18  rowDataLog[0] = Curr_Date; // A sütunu
19  var Data_for_L3 = Curr_Date; // L3 hücresi için tarih
20
21  var Curr_Time = Utilities.formatDate(new Date(), "Europe/Istanbul", 'HH:mm:ss');
22  rowDataLog[1] = Curr_Time; // B sütunu
23  var Data_for_M3 = Curr_Time; // M3 hücresi için saat
24
25  // 3. satırdaki diğer hücreler için değişkenler
26  var Data_for_N3, Data_for_O3, Data_for_P3, Data_for_Q3, Data_for_R3, Data_for_S3;
27
28  // Parametreleri işleme
29  for (var param in e.parameter) {
30    var value = stripQuotes(e.parameter[param]);
31    switch (param) {
32      case 'sts': ...
33      case 'reset': ...
34      case 'trigger': ...
35      case 'data3': ...
36      case 'data2': ...
37      case 'data1': ...
38      case 'data0': ...
39      default:
40        result += 'Desteklenmeyen parametre';
41    }
42  }
43
44  if (sts_val == 'write') { ...
45  }
46
47  if (sts_val == 'read') { ...
48  }
49
50  return ContentService.createTextOutput(result);
51 }
52
53 function stripQuotes(value) { ...
54 }
55 }

```

Şekil 10. Google Apps Script yazılımı

Sistemin kullanım senaryoları, özellikle eğitim ve araştırma alanlarında geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Kullanım verileri, bilgisayarda geliştirilen Python yazılımı ile performans ölçümleri gerçekleştirilerek elde edilmiş, trafik verilerine ise Google Cloud Console üzerinden erişilmiştir. Bu ölçümler, dosya yükleme ve FPGA programlama sürelerinin düşük trafik koşullarında en hızlı senaryoda ortalama 5.827 s ile 7.579 s arasında gerçekleştiğini, yüksek trafik koşullarında ise sürenin 14.146 s civarında uzayabildiğini göstermektedir.

Öğrenciler, sistem üzerinden mod4 sayıcı, yarım toplayıcı veya LED yakma devreleri gibi temel FPGA uygulamalarını deneyimleyebilmekte ve hazır programlar menüsünden ilgili devreyi seçerek anında çalıştırabilmektedir. Bunun yanı sıra, sistem YouTube canlı yayın akışı ile bütünleşmiş çalıştığından, kullanıcılar FPGA çipinin gerçek zamanlı davranışını gözlemleyebilmektedir. Daha ileri seviye çalışmalarda, kullanıcıların kendi geliştirdikleri bit dosyalarını Google Drive'a yükleyerek sistem üzerinden FPGA üzerinde çalıştırması mümkün hale gelmekte; bu özellik, farklı lokasyonlardaki araştırma ekipleri veya lisansüstü öğrenciler için coğrafi kısıtlar olmaksızın büyük boyutlu HDL tasarımlarını test etme imkânı sunmaktadır. Böylece, prototipleme süreçleri hızlanmakta ve merkezi bir donanım altyapısı kullanılarak uzaktan FPGA programlama gerçekleştirilebilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Xilinx XC3S50AN-4TQG144C FPGA çipi temel alınarak eğitim ve laboratuvar ortamlarında kullanılabilecek bir uzaktan erişim sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, Google Drive ve Google Sheet gibi bulut tabanlı servislerle bütünleşik bir yapı sunarak, farklı konumlardan FPGA çipinin programlanmasını ve deney süreçlerinin yönetilmesini kolaylaştırmaktadır. Tasarlanan devre kartı, düşük maliyetli ve öğrenmeye uygun bir yaklaşım sergilemekte; LED'ler, 7 parçalı göstergeler, butonlar ve kaydırmalı anahtarlar gibi temel bileşenlerle sağladığı etkileşim imkânı sayesinde dijital devre tasarımının temel ilkelerinin hem teorik hem de uygulamalı olarak kavranabilmesine destek sağlamaktadır. DJI Osmo Pocket 3 kamera aracılığıyla sağlanan canlı yayın, kullanıcıların FPGA çipinin gerçek zamanlı davranışını izlemesine olanak tanımakta ve laboratuvar deneylerinin çevrimiçi ortama taşınmasını mümkün kılmaktadır. Sistemin uzaktan erişimi, güvenlik ve yetkilendirme katmanlarıyla birlikte ele alınmaktadır; rollere göre değişen giriş şifreleri sayesinde, öğrenciler, yöneticiler veya laboratuvar pozisyonundaki araştırmacılar sistem üzerinde farklı yetkilere sahip olmakta, hazır programlar ve bulut yükleme ekranları gibi işlevler bu rollere göre sınırlandırılabilir. Google Apps Script altyapısı, FPGA uygulamaları arasında geçiş yapan kullanıcıların işlem bilgilerini hızlıca kaydederek Google Sheet üzerinde kayıt altına almaktadır. Bit dosyası yükleme süreci ise Python betiği aracılığıyla JTAG bağlantısı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Böylece, laboratuvar imkânlarına fiziksel erişimin kısıtlı olduğu senaryolarda dahi kullanıcılar FPGA üzerinde gerçek zamanlı deneyler yürütebilmekte ve hata ayıklama süreçlerini çevrimiçi olarak kolayca sürdürebilmektedir. Performans ölçümleri, dosya yükleme ve FPGA programlama sürelerinin düşük trafik koşullarında en hızlı senaryoda ortalama 5.827 s ile 7.579 s arasında gerçekleştiğini, yüksek trafik koşullarında ise bu sürenin 14.146 s civarında uzayabildiğini ortaya koymaktadır. Bu yöntem, özellikle dijital elektronik ve FPGA tasarımı alanlarında öğrenci ve araştırmacılara mekân bağımsız bir eğitim-öğretim deneyimi sunmaktadır. Çalışmada sunulan hazır programlar menüsü sayesinde, temel devre örneklerinden daha karmaşık uygulamalara kadar pek çok deneye hızla erişilebilmekte ve Google Drive entegrasyonu sayesinde kişisel projeler üzerinde prototipleme çalışmaları herhangi bir konumdan sürdürülebilmektedir. İleriki çalışmalarda, bu çalışmada sunulan sistemin daha da zenginleştirilmesi ve farklı FPGA ailesi veya bileşenleriyle uyumlu olacak şekilde genişletilmesi gerçekleştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Abanto, D., Carazas, V., Solis-Lastra, J., & Aramburu, C. (2022). Implementation of a Web-based Interface for Remote Access to a FPGA Board. *Proceedings of the 2022 IEEE Engineering International Research Conference, EIRCON 2022*, 1-4.
- Aitor, V. M., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., & Rodriguez-Gil, L. (2022). Toward Widespread Remote Laboratories: Evaluating the Effectiveness of a Replication-Based Architecture for Real-World Multiinstitutional Usage. *IEEE Access*, 10, 86298-86317.
- Al Qassem, L. M., Stouraitis, T., Damiani, E., & Elfadel, I. M. (2020). A remote FPGA laboratory as a cloud microservice. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2020-October*.
- Ali, S. A., Asif, R., Hina, S., & Fatima, Z. (2018). Cloud Based Remote FPGA Lab Platform: An Application of Internet of Things. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 37(4), 535-544.
- Alçın, M., Tuna, M., Erdoğan, P., & Koyuncu, İ. (2021). FPGA-based dual core TRNG design using ring and Runge-Kutta-Butcher based on chaotic oscillator. *Chaos Theory and Applications*, 3(1), 20-28.
- Blochitz, C., Grothe, P., Dreier, S., Aljnabi, W., Buchty, R., & Berekovic, M. (2022). RemEduLa-Remote Education Laboratory for FPGA Design Technology. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2022-May*, 1773-1777.
- Choi, S., & Yoo, H. (2020). Fast Logic Function Extraction of LUT from Bitstream in Xilinx FPGA. *Electronics 2020*, Vol. 9, Page 1132, 9(7), 1132.
- Çelik, K. (2021). Bulut Bilişim Teknolojileri. *Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(24), 436-450.
- Dağcı, B., & Koyuncu, İ. (2024). FPGA Tabanlı Uzaktan Laboratuvar Uygulamaları. İçinde 5. *Bilsel International Sumela Scientific Researches Congress* (609-622). Trabzon: Bilsel Yayınları.
- De Jesús Navas-González, R., Oballe-Peinado, Ó., Castellanos-Ramos, J., Rosas-Cervantes, D., & Sánchez-Durán, J. A. (2022). Digital Electronics Practice Projects for an FPGA-based Remote Laboratory. *15th International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics, TAE 2022 - Proceedings*.
- Devachandra, T., Singh, & Kumar, Dr. M. S. (2021). Design and Development of Bluetooth Based Home Automation System Using FPGA.
- Dodi, A. E., Wahyudi, A. H., Kurdianto, Jatmiko, N. W., Lailiyul, M. F., & Widada, W. (2022). FPGA Displays Real-Time Video Camera on VGA Monitor. *Proceedings - 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Control, and Informatics Seminar, EECCIS 2022*, 129-132.
- Drutarovský, M., Šaliga, J., & Hroncová, I. (2009). Hardware Infrastructure Of Remote Laboratory For Experimental Testing Of Fpga Based Complex Reconfigurable Systems. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 9(1), 44-50.
- Emin, B., & Yaz, M. (2024). Digital implementation of chaotic systems using Nvidia Jetson AGX Orin and custom DAC converter. *Chaos and Fractals*, 1(1), 38-41.
- Fernandes, A., Pereira, R. C., Sousa, J., Carvalho, P. F., Correia, M., Rodrigues, A. P., ... Gonçalves, B. (2015). FPGA remote update for nuclear environments. *2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2015*.
- Gao, T., Xu, X., Zhang, H., & Yang, H. (2015). A highly-integrated wireless configuration circuit for FPGA chip. *Proceedings of the 14th International Symposium on Integrated Circuits, ISIC 2014*, 260-263.
- García-Orellana, C. J., Macías-Macías, M., Abengózar-García, E., González-Velasco, H., Gallardo-Caballero, R., & García-Manso, A. (2022). Remote Laboratory Platform for Microcontroller Practices. *15th International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics, TAE 2022 - Proceedings*.
- Gruwell, A., Zabriskie, P., & Wirthlin, M. (2016). High-speed FPGA configuration and testing through JTAG, 1-8.
- Hanafi, A., & Karim, M. (2015). Embedded web server for real-time remote control and monitoring of an FPGA-based on-board computer system. *2015 Intelligent Systems and Computer Vision, ISCV 2015*.
- Hashemian, R., & Pearson, T. R. (2009). A low-cost server-client methodology for remote laboratory access for hardware design.

Proceedings-Frontiers in Education Conference, FIE.

- Hashemian, R., & Riddley, J. (2007). FPGA e-Lab, a technique to remote access a laboratory to design and test. *Proceedings - MSE 2007: 2007 IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education: Educating Systems Designers for the Global Economy and a Secure World*, 139-140.
- Hauck, S. (1998). The roles of FPGA's in reprogrammable systems. *Proceedings of the IEEE*, 86(4), 615-638.
- Hong, Z., & Chen, T. (2023). Research and design of video brightness extraction system based on FPGA embedded platform. *2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information, ICETCI 2023*, 349-353.
- Indrusiak, L. S., Glesner, M., & Reis, R. (2007). On the evolution of remote laboratories for prototyping digital electronic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(6), 3069-3077.
- Juncheng, M., Juan, G., Hong, Z., Zheng, W., & Shuang, X. (2021). Develop on real-time image processing system based on FPGA and RAM combined with PC or Cloud system.
- Karagedik, N., Bal, S., & Yayla, A. (2023). Design and Testing of a Wireless Communication Enabled FPGA Development Board: A Comprehensive Education and Application Platform from IoT to Circuit Design. *European Journal of Technique (EJT)*, 13(2), 123-129.
- Karataş, F., Koyuncu, İ., Alçın, M., Tuna, M., Kocatepe Üniversitesi, A., Bilimleri Enstitüsü, F., ... ve Enerji Bölümü, E. (2022). II. Derece AV Blok Aritmik EKG Sinyallerinin VHDL ile FPGA-Tabanlı Tasarımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 1334-1345.
- Keskin, A., & Koyuncu, İ. (2023). Yeni Bir Fpga Geliştirme Kartı Tasarımı ve Uygulaması. *Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 3(2), 46-55.
- Kosan, T., Talla, J., & Janous, S. (2024). Online Education of Microcontroller Control of Electric Drives with FPGA Based HIL. *2024 IEEE 21st International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2024*.
- Mateos-Gil, R., De Toro, P. A. R., & Madarova, S. (2022). Remote Laboratory for System on Chip Design based on FPGAs. *15th International Conference of Technology, Learning and Teaching of Electronics, TAE 2022 - Proceedings*.
- Monzo, C., Cobo, G., Morán, J. A., Santamaría, E., & García-Solórzano, D. (2021). Remote Laboratory for Online Engineering Education: The RLAB-UOC-FPGA Case Study. *Electronics 2021, Vol. 10, Page 1072, 10(9)*, 1072.
- Morgan, F., & Cawley, S. (2011). Enhancing learning of digital systems using a remote FPGA lab. *6th International Workshop on Reconfigurable Communication-Centric Systems-on-Chip, ReCoSoC 2011 - Proceedings*.
- Óballe-Peinado, O., Castellanos-Ramos, J., Sánchez-Durán, J. A., & Trujillo-León, A. (2024). Remote Laboratory for Multiple FPGA-Based Development Platforms. *16th Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica, TAE 2024*.
- Oballe-Peinado, O., Castellanos-Ramos, J., Sanchez-Durqan, J. A., Navas-Gonzalez, R., Daza-Marquez, A., & Botin-Cordoba, J. A. (2020). FPGA-Based remote laboratory for digital electronics. *Proceedings - 2020 14th Technologies Applied to Electronics Teaching Conference, TAE 2020*.
- Oh, H., Nam, K., Jeon, S., Cho, Y., & Paek, Y. (2021). MeetGo: A trusted execution environment for remote applications on FPGA. *IEEE Access*, 9, 51313-51324.
- Öge, O. C., Aydoğan, A., & Durusu, D. (2019). A Comparison of Two Methods for FPGA Controlled Interface Board Tests. *AUTOTESTCON (Proceedings), 2019-January*.
- Ravanasa, K., & Hashemian, R. (2014). VLab, a high speed multi-accesses parallel processing remote laboratory access for FPGA design technology. *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, 377-381.
- Rigo, C. A., Seman, L. O., Berejuck, M. D., & Bezerra, E. A. (2020). Printed Circuit Board Design Methodology for Embedded Systems Targeting Space Applications. *IEEE Latin America Transactions*, 18(2), 257-264.
- Rodriguez-Gil, L., Orduna, P., Garcia-Zubia, J., Angulo, I., & Lopez-De-Ipina, D. (2014). Graphic technologies for virtual, remote and hybrid laboratories: WebLab-FPGA hybrid lab. *Proceedings of 2014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV 2014*, 163-166.

- Schwandt, A., & Winzker, M. (2019). Make it open - Improving usability and availability of an FPGA remote lab. *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON, April-2019*, 232-236.
- Seetharaman, R., Shivananth, I., Ganeshakumar, M., Anitha, D., Anandan, K., & Gayathri, S. (2022). Development of Crowd Management System using FPGA Circuits. *Proceedings - International Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems, ICAISS 2022*.
- Skhiri, R., Fresse, V., Jamont, J. P., Suffran, B., & Malek, J. (2019). From FPGA to Support Cloud to Cloud of FPGA: State of the Art. *International Journal of Reconfigurable Computing*, 2019(1), 8085461.
- Taşdemir, M. F., Tuna, M., & Koyuncu, İ. (2025). FPGA-based chaotic oscillator designs and performance analysis. *Chaos and Fractals*, 2(1), 8-13.
- Toyoda, Y., Koike, N., & Li, Y. (2016). An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud. *Proceedings of 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV 2016*, 24-29.
- Ursutiu, D., Ghercioiu, M., Samoila1, C., & Cotfas, P. (2009). FPGA LabVIEW Programming, Monitoring and Remote Control. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (ijOE)*, 5(2), 34-41.
- Wang, D., & Zhang, P. (2010). The technology research of remote automatic detection and fault diagnosis based on JTAG boundary scan. *Procedia Engineering*, 7, 270-274.