

VHDL ile NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ Yaşamsal Sinyallerin FPGA Tabanlı Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulaması

İsmail Koyuncu¹, Fatih Karataş², Murat Alçın³, Murat Tuna^{4*}

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

³Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye

⁴Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

Geliş: 21.07.2023, Kabul: 02.12.2023, Yayınlanma: 31.12.2023

ÖZ

Son yıllarda, FPGA-tabanlı yaklaşımlar, biyomedikal mühendislik uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Sunulan bu çalışmada, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyalleri Zynq-7000 serisi XC7Z020 FPGA çipi üzerinde, gerçek zamanlı biyomedikal uygulamalarında kullanılmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri MATLAB ortamında nümerik olarak modellenmiştir. Sinyallerin sayısal modelleri, MIT-BIH aritmi veri bankası Physiobank ATM kısmında bulunan yaşamsal belirti sinyallerinin zaman ve genlik değerleri için uyumlu ve özgün olarak çıkartılmıştır. Ardından, bu sinyallerin bulunduğu FPGA-tabanlı sistem, VHDL ile Xilinx Vivado yazılımında tasarlanmıştır. Tasarımın matematiksel modelleri baz alınarak, FPGA-tabanlı sistemin ürettiği sonuçlar ve hata analizleri verilmiştir. Sonrasında, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerini içeren tasarım Xilinx-Vivado ile Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipi için sentezlenmiş ve Place&Route işleminin sonucunda kaynak tüketim istatistikleri sunulmuştur. FPGA-tabanlı tasarımların maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz olarak elde edilmiştir. FPGA-tabanlı tasarımı yapılan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyalleri, geliştirme kitiyle çalışan 2 adet 14-bit AN9767 DA kartıyla 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinden gerçek zamanlı gözlemlenmiştir. Çalışma ile FPGA-tabanlı tasarımı yapılarak doğrulanan NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin biyomedikal uygulamalarda ve tıbbi cihazların kalibrasyon testleri için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalibrasyon; FPGA; ETCO₂; SPO₂; NIBP; VHDL

FPGA-based Design and Real-time Implementation of NIBP, SpO₂ and ETCO₂ Vital Signals with VHDL

ABSTRACT

In recent years, FPGA-based approaches have been used extensively in biomedical engineering applications. In this study, NIBP, ETCO₂ and SpO₂ vital signals have been performed on the Zynq-7000 series XC7Z020 FPGA chip for use in real-time biomedical applications. First of all, NIBP, ETCO₂ and SpO₂ signals have been numerically modeled in MATLAB environment. The numerical models of the signals have been obtained in accordance with the time and amplitude values of the vital signals in the MIT-BIH arrhythmia database Physiobank ATM. Then, the FPGA-based system including these signals has been designed using VHDL in Xilinx Vivado software. Based on the mathematical models of the design, the results and error

analyze produced by the FPGA-based system are given. Afterwards, the design including NIBP, ETCO₂ and SpO₂ signals has been synthesized for the Xilinx-Vivado and Zynq-7000 XC7Z020 FPGA chip, and because of the Place&Route process, resource consumption statistics of the system have been presented. The maximum operating frequencies of FPGA-based designs are 651,827 MHz. FPGA-based designed NIBP, ETCO₂ and SpO₂ vital signals have been observed in real time from a 4-channel oscilloscope by means of 2 14-bit AN9767 DA modules working in harmony with the development board. In this study, it has been shown that NIBP, SpO₂ and ETCO₂ vital signals, which have been verified by FPGA-based design, can be used in biomedical applications and for calibration tests of medical devices.

Keywords: Calibration; FPGA; ETCO₂; SPO₂; NIBP; VHDL

1. GİRİŞ

Günümüzde küresel FPGA (Field Programmable Gate Arrays-Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) pazarı 9 milyar \$ seviyesinde olmakla birlikte bu değer 2027 yılına kadar 16 milyar \$ seviyesine ulaşması beklenmektedir. FPGA çipleri, hızlı ilk üretim, tekrar tekrar programlanabilme, paralel sinyal işleme ve düşük güç tüketimi gibi üstünlüklere sahip olduğundan diğer sayısal sinyal işleme platformlarına göre daha fazla tercih edilmektedir. Her geçen gün kullanım alanı artan FPGA çipleri gömülü sistem [1], haberleşme [2], kriptoloji [3], rasgele sayı üreteçleri [4], kontrol [5], görüntü işleme[6], otomotiv [7], yapay zekâ ve uygulamaları [8], [9], nonlinear osilatörler [10], tüketici elektroniği [11], enerji [12], savunma sanayi [13], endüstriyel uygulamalar [14], tersine mühendislik [15], biyomedikal [16], [17] olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışma alanlarından biri olan biyomedikal alanında da son yıllarda yoğun bir şekilde FPGA tabanlı çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların bir bölümü biyomedikal mühendislik uygulamalarında kullanılan sinyallerin FPGA çipleri üzerinde modellenmesidir [18]. Literatürde biyomedikal sinyallerin FPGA-tabanlı modellenmesi alanındaki çalışmalardan birisi olan Madiraju ve arkadaşları, Virtex-6 FPGA ile Pan-Tompkins yöntemi ile EKG (Elektrokardiyografi) sinyalleri üzerinde QRS genişliği (Ventriküller Arası İleti Gecikmesi) tespiti yapılmıştır [19]. EKG sinyalleri üzerinde yapılan diğer bir çalışmada, Meddah ve arkadaşları tarafından Xilinx Nexys-4 ile QRS tespiti ve kalp hızı hesaplaması yapılmıştır [20]. Literatürde sunulan bir diğer çalışmada, Zairi ve arkadaşları Artix7 serisi Xilinx FPGA çipi ile yapay sinir ağları-tabanlı EKG sinyali sınıflandırılması işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir [21]. Karataş ve arkadaşları, Normal Sinüs Ritmi sinyalini VHDL ile modellemişlerdir. Modellenen sinyal Zynq-7000 XC7Z020 FPGA bordu üzerinde Xilinx-Vivado programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [22]. Bir diğer çalışmada, Giorgio ve arkadaşları Altera Cyclone-V FPGA kiti ile Ventriküler geç potansiyellerinin saptanması işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirmişler ve çalışmadan elde ettikleri sonuçları sunmuşlardır [23]. 2020 yılında Jain tarafından yapılan bir çalışmada, ZedBoard (Zynq-7000) FPGA kartı ile EKG sinyallerinin R-R aralığı ile kalp atış hızı hesaplanmıştır [24]. Zhu ve arkadaşlarının 2021 yılında literatüre sundukları çalışmada, FPGA üzerinde, veri toplama, analog-sayısal çevrim, ön-uç ve elektrotlardan oluşan 8 kanallı EKG sinyal sistemi yapısı tasarlanmıştır [25]. Diğer bir çalışmada Karataş ve arkadaşları 8 tane yaşamsal aritmik EKG sinyallerini FPGA üzerinde VHDL ile tasarlayarak Matlab tabanlı EKG sinyallerini referans alarak elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sundukları çalışma ile FPGA tabanlı EKG sinyal üretim sisteminin FPGA çipleri üzerinde uygulanabileceği ve tasarlanan sistemin EKG simülatörlerinde güvenle kullanılabileceğini gösterilmişlerdir [26].

Sunulan bu çalışmada, literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak, yaşamsal işaretlerden ETCO₂ (End Tidal Carbon dioxide-Soluk sonu Karbondioksit), SPO₂ (Peripheral Oxygen Saturation- Periferik Oksijen Satürasyonu) ve NIBP (Noninvaziv Blood Pressure- Noninvaziv Kan Basıncı) sinyaller önce nümerik olarak

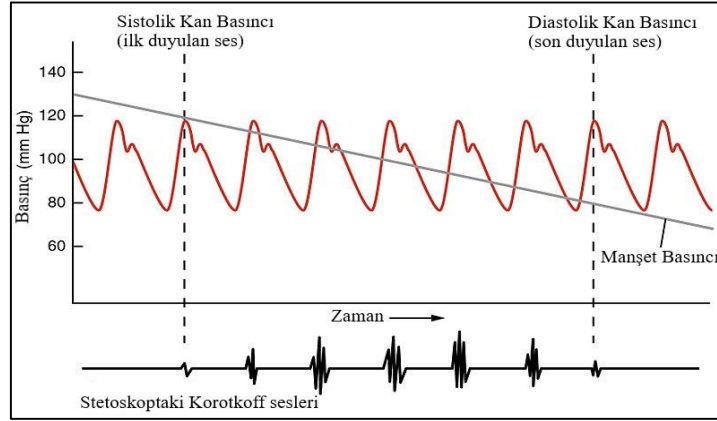
Matlab ortamında tasarlanmış ve sonra VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language-Yüksek Hızlı Tümlleşik Devreler için Donanım Tanımlama Dili) ile Xilinx-Vivado ortamında FPGA tabanlı modellenmesi yapılmıştır. Çalışmanın İkinci Bölümünde, FPGA çipleri, tasarımı yapılan yaşamsal ETCO₂, SPO₂ ve NIBP ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Makalenin Üçüncü Bölümünde, nümerik-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerinin matematiksel modeli ve bu model kullanılarak elde edilen sinyallere ait grafikler sunulmuştur. Dördüncü Bölümde, yaşamsal belirti sinyallerinin tasarımı VHDL dili ile kodlanmıştır. Xilinx Vivado programı üzerinde bu sinyallerin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ardından ilgili tasarım Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipinde kullanılmak üzere sentezlenmiştir, 14-bit AD9767-DAC (Digital-Analog Converter- Dijital Analog Dönüştürücü) kitiyle 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinde gerçek zamanlı gözlemlenmiştir. Matlab-tabanlı yaşamsal belirti sinyalleri referans olarak alınarak FPGA tabanlı yaşamsal belirti sinyalleri tasarımından alınan çıkış değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise tasarımdan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Tıbbi cihazların fonksiyonel testi ve kalibrasyonu, periyodik olarak yapılması gereken rutin bir işlemdir. Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar göstermiş ki, donanımsal olarak tasarlanan FPGA-tabanlı yaşamsal sinyal üretim sisteminin, FPGA çipleri kullanılarak tasarlanabileceği ve biyomedikal kalibrasyon uygulamalarında önemli rol oynayan EKG simülatörlerinde güvenli bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

2. MATERYOL VE METOT

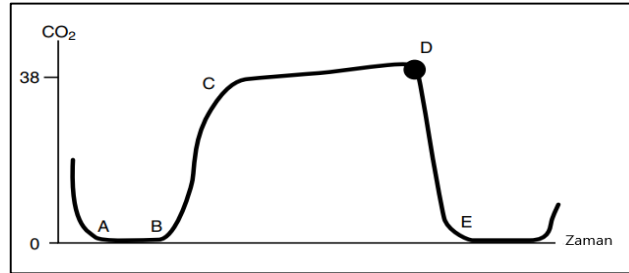
2.1. Yaşamsal Belirti Sinyalleri

Sunulan çalışmada, FPGA-tabanlı biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri kullanılmıştır. NIBP, dolaşım sisteminde bulunan atardamarlar içindeki en yaygın fizyolojik ölçümlerden biri olan ve kardiyovasküler sistem ile ilgili büyük öneme sahip bilgi sunan kan basıncıdır [27]. Bu sinyalin zamana göre basınç değişimini gösteren grafik Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: NIBP sinyali.

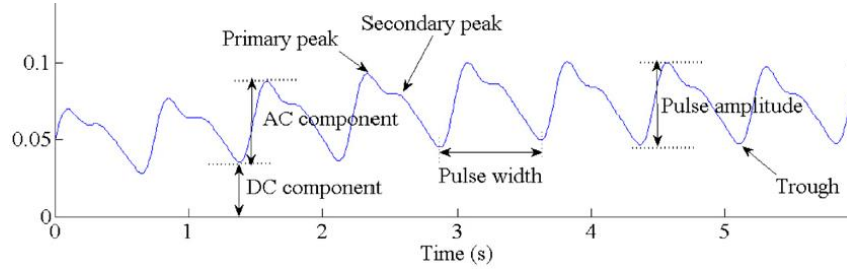
FPGA-tabanlı tasarımı yapılan sinyallerden birisi olan ETCO₂ sinyali örneği Şekil 2’de verilmiştir. Bu sinyal dört adet segmentten oluşmaktadır. Birinci segment olan A-B segmenti, sıfır taban çizgisini ifade etmektedir. İkinci segment olan B-C segmenti, ara hava yollarından gelen gaz ile ilgili hızlı, keskin yükselişi belirtmektedir. Üçüncü segment olan C-D segmenti, alveolar gaz tespitiyle ilgili düz alveolar platoyu ifade etmektedir. D noktası, alveoldeki soluk sonu karbondioksit konsantrasyonudur. Dördüncü segment olan D-E segmenti, karbondioksit içermeyen taze gazın inspirasyonunu (dışarıdan havanın akciğerlere alınması) ifade eder. İnsan anestezisi ve yoğun bakımda, standart bir işlem olarak değerlendirilen solunum gazı analizi, klinisyene pulmoner sistemin küresel fizyolojisi ve sağlığı hakkında önemli bilgiler vermektedir [27].



Şekil 2: ETCO₂ sinyali.

Oksijen doygunluğu olarak da tanımlanan SpO₂, bireyin kan dolaşımındaki oksijen miktarını tanımlamaktadır. SpO₂ sinyali örneği Şekil 3’te verilmiştir. Oksijen satürasyonu, birey muayenesinde gerçekleştirilen ölçümlerden biridir. Kalp normal şartlarda bir yetişkin için dokulara yaklaşık 5000 ml/dk kan pompalamakta ve bu şekilde dokulara 1000 ml/dk oksijen vermektedir. Kandaki oksijen miktarının

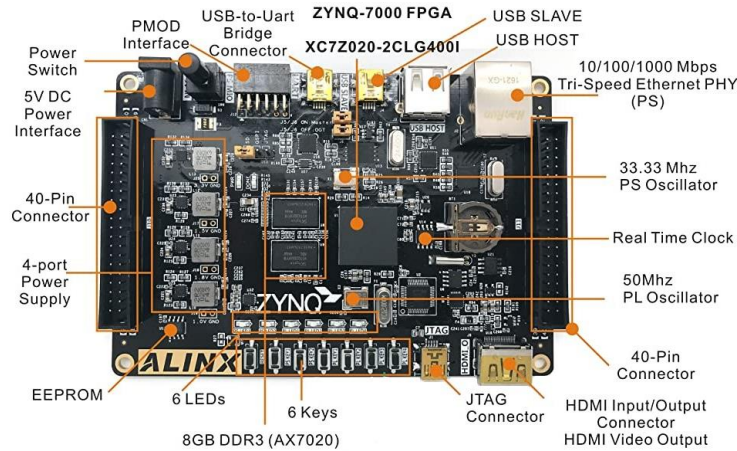
oldukça düşük olması nedeniyle insan vücudunun stabil çalışmama haline hipoksemi adı verilmektedir. Bu durumun sonucu olarak, birey ciddi sağlık sorunları yaşayabilmektedir [27].



Şekil 3: SpO₂ sinyali.

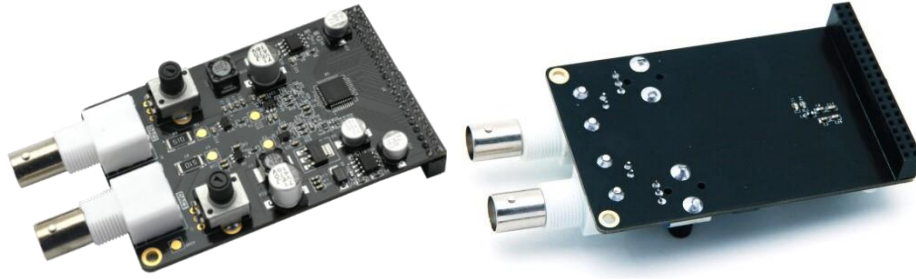
2.2. FPGA Kartı ve Sistem Komponentleri

Günümüzde sayısal sistemlerin tasarlanması amacı ile kullanılan Programlanabilir Lojik Araçların (Programmable Logic Devices (PLD)) en önemli uygulaması olan FPGA çipleri, paralel çalışma, düşük güç tüketimi, hızlı ilk prototipleme, yüksek performans ve yüksek çalışma frekansı gibi avantajlarından dolayı birçok uygulamada oldukça yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda FPGA çip üretimi konusunda önde firmalardan olan Xilinx (AMD) ve Altera (Intel) firmaları, saf FPGA mimarisi ile ARM mimarilerinin birlikte çalıştığı hibrit FPGA platformları geliştirmektedirler. Xilinx firmasının bu kapsamda geliştirdiği mimarilerden birisi olan Zynq-7000, aynı cihazın içerisinde bulunan yeniden programlanabilir mantığa sahip çift çekirdekli Cortex-A9 işlemci ile uyumlu çalışmaktadır. Bu platform tek/çift çekirdekli ARM Cortex-A9 işlem sistemini (Processing System (PS)) ve programlanabilir lojik (PL)) yapılarını birleştirmektedir. Bu yapı kullanılarak Alinx firması tarafından geliştirilen ALINX AX7020 FPGA geliştirme kartına ait görsel Şekil 4'te verilmiştir [28].



Şekil 4: ALINX-AX7020-Zynq-7000-SoC-XC7Z020 FPGA geliştirme kiti.

FPGA çiplerinden elde edilen sinyallerin osiloskop üzerinde gözlenebilmesi ve sayısal sinyallerin analog sinyale dönüştürülebilmesi amacı ile projede 14-bit AD9767/AN9767 Dijital Analog Dönüştürücü (Digital Analog Converter (DAC)) kullanılmıştır. Bu DAC modülü, 125 MPS DA'yı destekleyen ve 14-bit çift bağlantı noktalı olup ve bağımsız çift bağlantı noktaları içermektedir. Modül üzerinde, FPGA çipi tarafından üretilen sayısal sinyalin osiloskop üzerine aktarılabilmesi için 40 pimli bir dişi başlık bulunmaktadır. Bu modüle ait görsel Şekil 5'te sunulmuştur [29].



Şekil 5: 14-bit Çift Bağlantı Noktalı DAC Çıkış Modülü.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yaşamsal Belirti Sinyallerinin sayısal tabanlı tasarımı

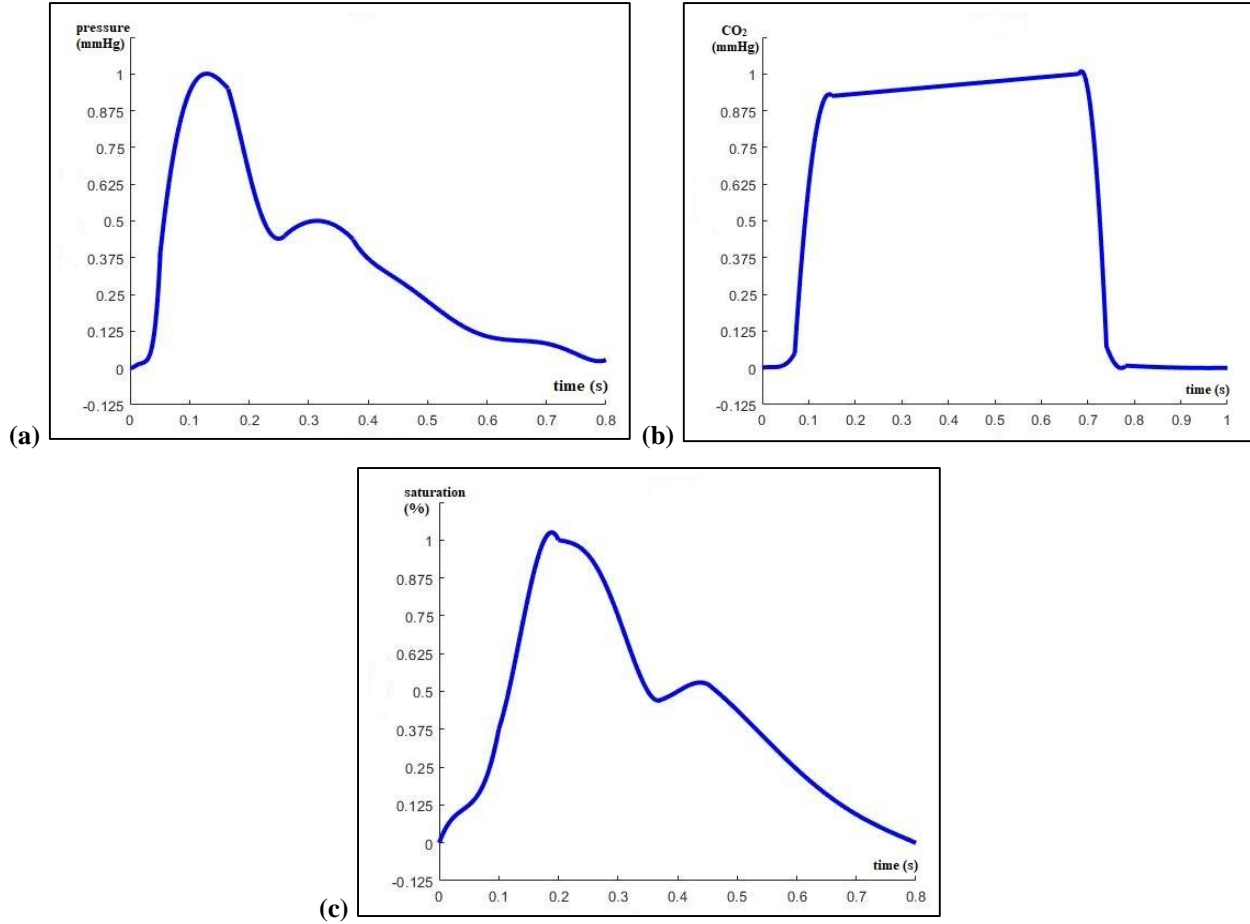
75 vuru/dk. kalp hızında parametresi olan bireyin tansiyonunu ifade eden ve numerik olarak modellenen NIBP sinyaline ilişkin matematiksel eşitlik parçalı fonksiyon halinde Çizelge 1'de bulunan denklem 1-5'te verilmiştir.

Çizelge 1: Matlab'da tasarlanan NIBP sinyali için matematiksel denklemler.

$x = 0.000:0.001:0.050 ;$	
$y_1 = 83333.3333*x^4 - 4583.3333*x^3 + 79.1667*x^2 - 0.0833*x ;$	(1)
$x = 0.050:0.001:0.165 ;$	
$y_2 = 212.29*x^3 - 105.45*x^2 + 16.608*x - 0.443 ;$	(2)
$x = 0.165:0.001:0.260 ;$	
$y_3 = -2329.6*x^4 + 2240.5*x^3 - 769.18*x^2 + 110.11*x - 5.1856 ;$	(3)
$x = 0.260:0.001:0.375 ;$	
$y_4 = -6.8227*x^2 + 4.289*x - 0.4739 ;$	(4)
$x = 0.375:0.001:0.800 ;$	
$y_5 = 1428.4*x^6 - 5027.1*x^5 + 7264*x^4 - 5514.4*x^3 + 2320.2*x^2 - 513.88*x + 47.059 ;$	(5)

Matematiksel çıkarımı elde edilip basınç-genlik değerlerine ilişkin olarak tasarımı yapılan NIBP sinyaline ait Matlab model sonucu Şekil 6.(a)'da sunulmuştur. Aynı şekilde 60 vuru/dk. kalp hızına sahip bir kişinin soluk sonu CO₂ değerini gösteren parçalı fonksiyonlar kullanılarak Matlab'da matematiksel olarak zaman ve genlik değerine göre modellenen ETCO₂ sinyaline ait görsel Şekil 6.(b)'de sunulmuştur. 75 vuru/dk. kalp

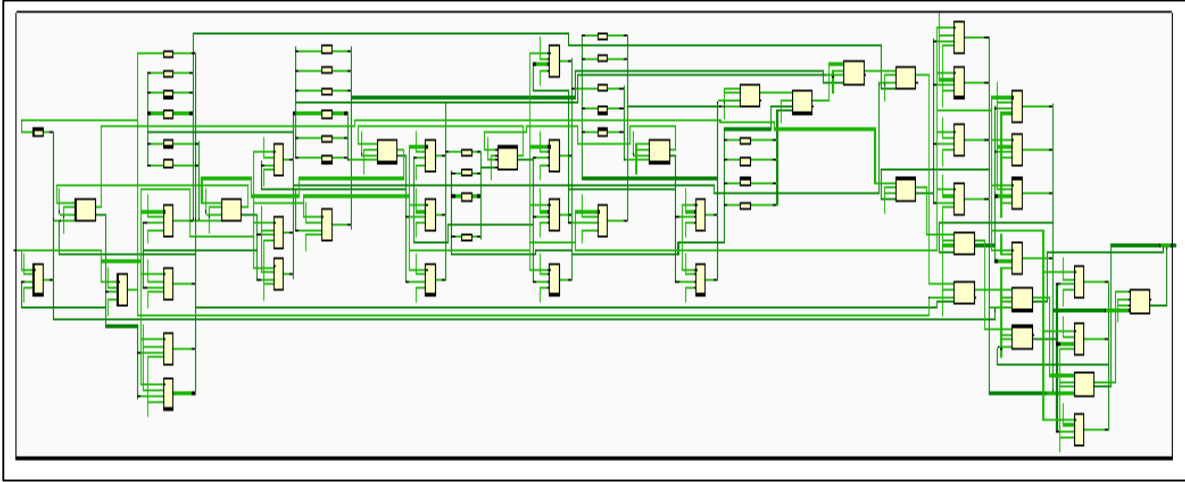
hızında parametresi olan bireyin Periferik Oksijen Satürasyonunu ifade eden matematiksel denklemler kullanılarak elde edilen zaman-genlik değerlerine göre tasarımı yapılan SPO₂ sinyaliyle ilişkili sinyal Şekil 6.(c)'de verilmiştir.



Şekil 6: (a) Nümerik tabanlı NIBP sinyali, (b) ETCO₂ sinyali, (c) SpO₂ sinyali.

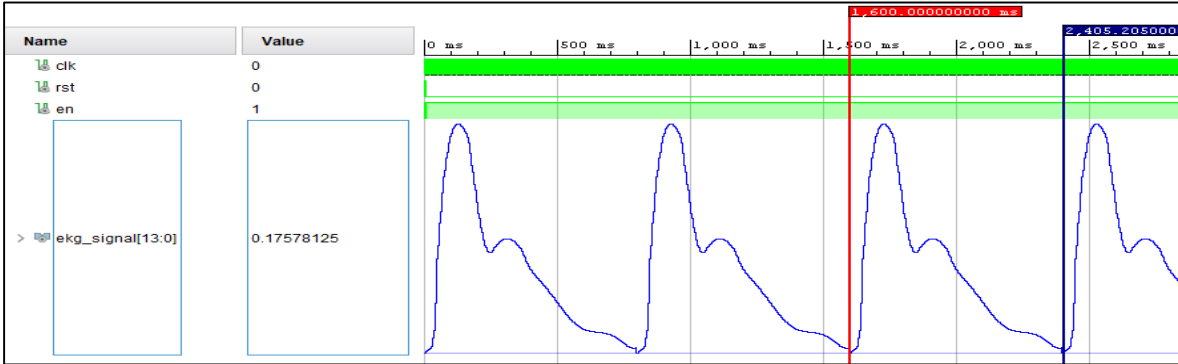
3.2. Yaşamsal Belirti Sinyallerinin FPGA tabanlı tasarımı

Bu bölümde, VHDL dili kullanılarak Xilinx-Vivado programında 3 adet yaşamsal belirti sinyalinin tasarımı yapılmıştır. Tasarımın en üst seviye tasarımında sistemin senkron bir şekilde çalışmasını sağlamak amacı ile 1-bit clk sinyali kullanılmıştır. Sinyallerin üretiminin kontrollü bir şekilde elde edilmesi için kullanıcı butonları giriş olarak verilmiştir. Sistemin çıkışında üretilen sinyallerin osiloskop üzerinde görüntülenebilmesi amacı ile 14-bitlik çıkış sinyalleri ve DAC için kontrol sinyalleri çıkışları bulunmaktadır. FPGA-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerine ait tasarımın blok RTL şeması Şekil 7'de sunulmuştur.

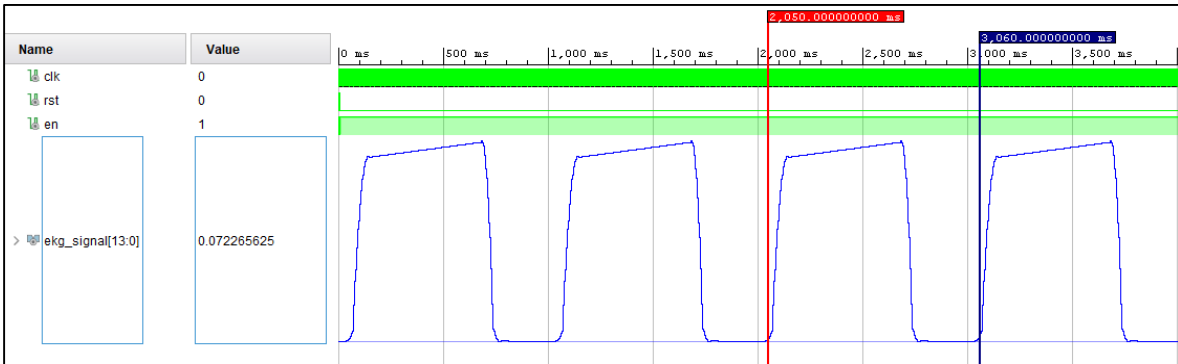


Şekil 7: Parametrelere göre yaşamsal belirti sinyallerini üreten bloğun RTL şeması.

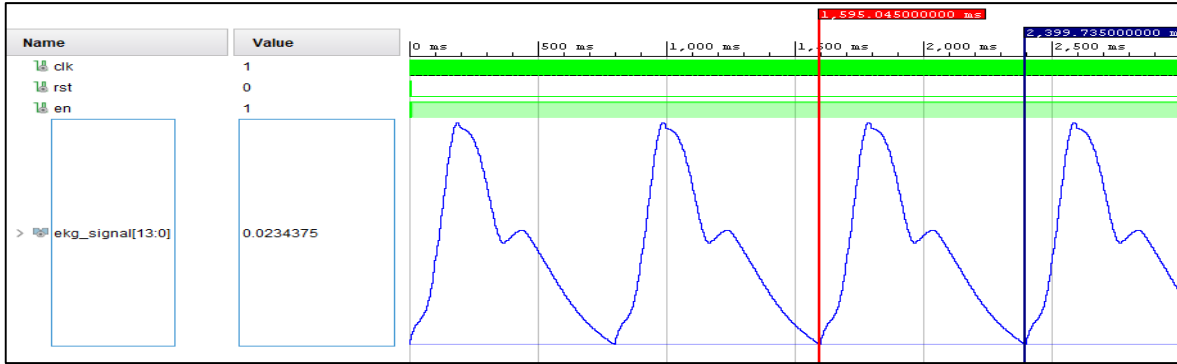
Tasarımın doğrulanabilmesi amacı ile VHDL dilinde bir testbench oluşturulmuştur. Oluşturulan testbench Xilinx Vivado Design Suite programı üzerinde çalıştırılarak Şekil 8’da NIBP sinyali, Şekil 9’da ETCO₂ sinyali ve Şekil 10’de SpO₂ sinyali için simülasyon sonuçları sunulmuştur.



Şekil 8: NIBP Sinyalinin Vivado Simülasyonu.



Şekil 9: ETCO₂ Sinyalinin Vivado Simülasyonu.

Şekil 10: SpO₂ Sinyalinin Vivado Simülasyonu.

FPGA-tabanlı NIBP sinyali tasarımının doğrulanabilmesi amacıyla nümerik tabanlı NIBP sinyali referans alınmıştır. VHDL ile tasarlanan ve Vivado programı ile simüle edilen NIBP sinyaline ait değerler bir dosyaya kaydedilmiştir. Çizelge 2’de NIBP sinyalinin nümerik modeli ve Vivado programında elde edilen zaman ve genlik değerlerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Karşılaştırma sonuçlarına göre, FPGA-tabanlı NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerinin maksimum MSE hata değerleri sırasıyla 1,6671E-06, 4,9464E-06 ve 1,0472E-06 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2: NIBP sinyalinin Matlab ve Vivado ortamında zaman-genlik değerlerine göre karşılaştırılması.

NIBP	Zaman (s)	Basınç (mmHg)	
	Matlab ve Vivado	Matlab	Vivado
Denklem 1	0,00000	0,000000	0,000000
	0,02000	0,016668	0,016479
	0,04000	0,108337	0,106812
Denklem 2	0,06000	0,533501	0,527954
	0,08000	0,788964	0,788879
	0,10000	0,934153	0,935669
	0,12000	0,994542	0,994263
	0,14000	0,995607	0,994568
	0,16000	0,962821	0,963440
Denklem 3	0,18000	0,851290	0,848694
	0,20000	0,680999	0,682373
	0,22000	0,536242	0,535278
	0,24000	0,453292	0,453796
Denklem 4	0,26000	0,446059	0,446167
	0,28000	0,476635	0,476379
	0,30000	0,495274	0,495300
	0,32000	0,500267	0,500488

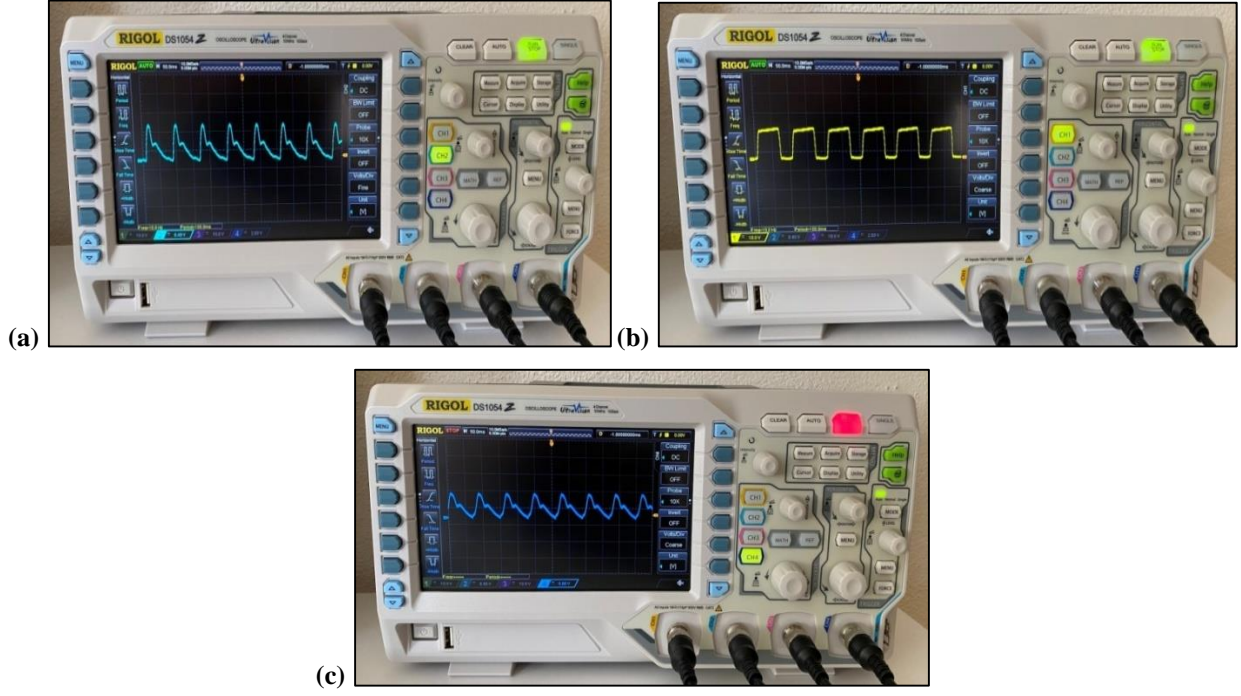
	0,34000	0,469317	0,468750
	0,36000	0,433001	0,432434
	0,38000	0,380433	0,381165
	0,42000	0,318858	0,318298
	0,46000	0,263873	0,263367
	0,50000	0,202321	0,202026
	0,54000	0,146470	0,146484
Denklem 5	0,58000	0,110174	0,110168
	0,62000	0,095556	0,095520
	0,66000	0,090231	0,090027
	0,70000	0,075048	0,074768
	0,74000	0,042378	0,042114
	0,80000	0,027404	0,027466

VHDL dili ile FPGA çipi üzerinde çalışmak için tasarlanan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri Zynq-7000 XC7Z020 FPGA çipinde kullanmak amacıyla sentezlenmiştir. Sonrasında Place&Route sürecinden sonra elde edilen FPGA kaynak tüketimi parametreleri Çizelge 3'te sunulmuştur. NIBP sinyalinin maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz değerinde elde edilmiştir. 14-bit AN9767-DAC kiti üzerinden Şekil 11'de gösterildiği şekliyle osiloskop ile incelenmiştir.

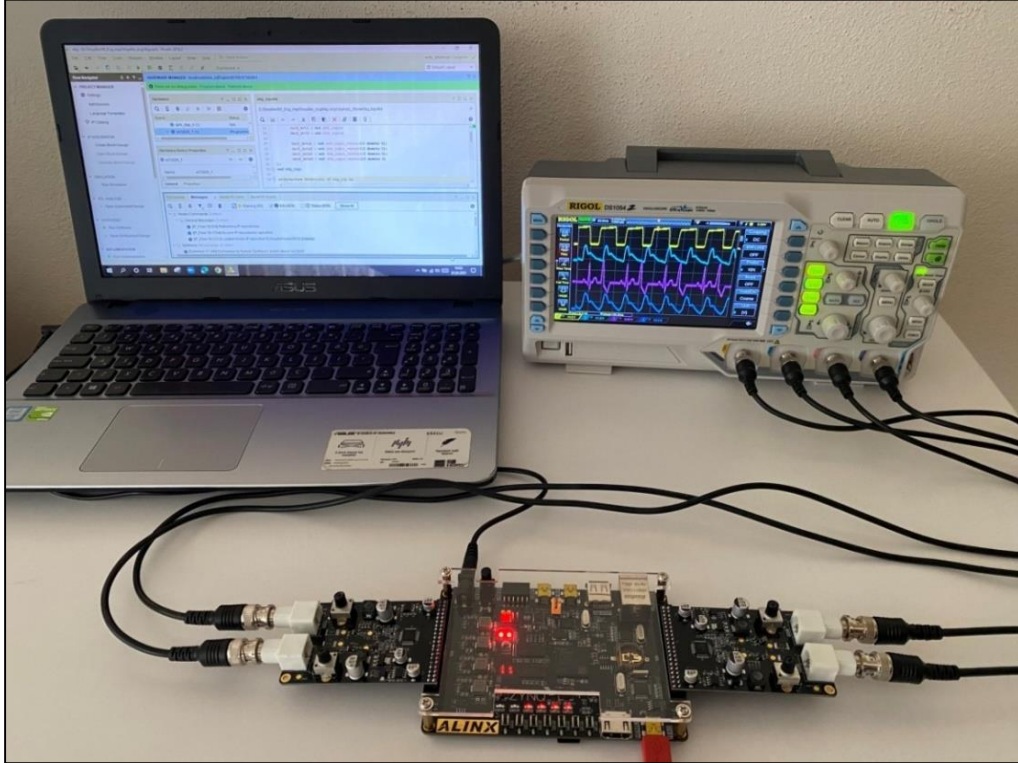
Çizelge 3: FPGA-tabanlı yaşamsal belirti sinyallerinin çip kullanım istatistikleri.

Logic Utilization / Usage rate	NIBP	ETCO ₂	SpO ₂
Number of BUFGCTLs	2 / %6,25	2 / %6,25	2 / %6,25
Number of Slice LUTs	40 / %0,075	40 / %0,075	40 / %0,075
Maximum Operating Frequency (MHz)	651,827	651,827	651,827

Zynq-7000-XC7Z020 FPGA kiti ile çalışan 2 adet 14-bit AN9767-DAC kartı ile 4 kanala sahip bir osiloskoptan elde edilen NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyal çıkışları sırasıyla, Şekil 11 (a), (b), (c)'de verilmiştir. Ayrıca, bu sinyallerle ilgili tasarımı yapılan sistemin osiloskop çıkışları ve sistem bileşenleri (Bilgisayar, Zynq-7000-XC7Z020 FPGA kiti ve 2 tane 14-bit-AN9767 DAC, 4 kanal osiloskop) Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 11: (a) NIBP sinyaline ait osiloskop sonucu, (b) ETCO₂ sinyaline ait osiloskop sonucu, (c) SpO₂ sinyaline ait osiloskop sonucu.



Şekil 12: Tasarıma ait sistem komponentleri ve ETCO₂, NIBP ile SPO₂ sinyalleri osiloskop sonuçları.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, biyomedikal uygulamalarda kullanılmak amacı ile 3 adet NIBP, SpO₂ ve ETCO₂ yaşamsal belirti sinyalleri Zynq-7000 serisi XC7Z020 FPGA çipi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, 3 adet NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyalleri sayısal olarak modellenmiştir. Sonrasında bu sinyalleri içeren sistem tasarımı VHDL dilinde Xilinx Vivado Design Suite programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımın matematiksel modelleri referans alınarak tasarımdan elde edilen sonuçlar ve hata analizleri sunulmuştur. Tasarım işleminin ardından, NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ sinyallerini içeren tasarım Xilinx-Vivado ile Zynq-7000-XC7Z020 FPGA çipinde kullanılması amacıyla sentezlenmiştir. Place-Route işleminden sonrasında Zynq-7000-XC7Z020 FPGA çipi için kaynak tüketim istatistikleri ve FPGA-tabanlı sistemin maksimum çalışma frekansı sunulmuştur. FPGA-tabanlı tasarımların maksimum çalışma frekansı 651,827 MHz olarak elde edilmiştir. Gerçek zamanlı tasarımı yapılan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin tasarımı, geliştirme kartıyla uyumlu olan 2 adet 14-bit-AN9767-DA modülü ile 4 kanala sahip bir osiloskop üzerinden gerçek zamanlı gözlemlenmiştir.

Sunulan çalışma ile FPGA-tabanlı tasarımı yapılarak doğrulanan NIBP, ETCO₂ ve SpO₂ yaşamsal belirti sinyallerinin FPGA çipleri kullanılarak tasarlanabileceği, biyomedikal kalibrasyon uygulamalarda ve tıbbi cihazların kalibrasyon testleri için kullanılmakta olan EKG simülatörlerinde uygulanabileceği gösterilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 119E659 numaralı proje ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

YAZARLARIN KATKILARI

B.Y.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım formel analiz, araştırma, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

İ.Y.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar ve düzenleme.

Ü.Y.: Analiz, doğrulama, araştırma, düzenleme, gözden geçirme.

D.Y.: Kaynaklar, düzenleme, yazı yazma- orijinal taslak hazırlama.

KAYNAKLAR

- [1] E. Coşgun, H. Korkmaz, and K. Toker, “An Embedded System Design to Build Real-Time 2D Maps for Unknown Indoor Environments,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 23, no. 4, pp. 617–632, Aug. 2019, doi: 10.16984/SAUFENBILDER.453926.
- [2] R. F. Molanes, L. Costas, J. J. Rodríguez-Andina, and J. Fariña, “Comparative Analysis of Processor-FPGA Communication Performance in Low-Cost FPSoCs,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 17, no. 6, pp. 3826–3835, Jun. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3015833.
- [3] H. Li, Y. Tang, Z. Que, and J. Zhang, “FPGA Accelerated Post-Quantum Cryptography,” *IEEE Trans Nanotechnol*, vol. 21, pp. 685–691, 2022, doi: 10.1109/TNANO.2022.3217802.
- [4] İ. Koyuncu, M. Tuna, İ. Pehlivan, C. B. Fidan, and M. Alçın, “Design, FPGA implementation and statistical analysis of chaos-ring based dual entropy core true random number generator,” *Analog Integr Circuits Signal Process*, vol. 102, no. 2, pp. 445–456, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10470-019-01568-x.
- [5] J. ; Wang *et al.*, “A Design of FPGA-Based Neural Network PID Controller for Motion Control System,” *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 889, vol. 22, no. 3, p. 889, Jan. 2022, doi: 10.3390/S22030889.
- [6] İ. Koyuncu, M. Furkan Taşdemir, M. Alçın, M. Tuna, E. Coşgun, and G. Tarihi, “FPGA üzerinde görüntü işleme algoritmalarının gerçek zamanlı gerçekleştirilmesi,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 24, no. 1, pp. 125–137, Jan. 2022, doi: 10.25092/BAUNFBED.892032.
- [7] J. M. Blanes, R. Gutiérrez, A. Garrigós, J. L. Lizán, and J. M. Cuadrado, “Electric vehicle battery life extension using ultracapacitors and an FPGA controlled interleaved buck-boost converter,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 12, pp. 5940–5948, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2255316.
- [8] C. Yilmaz, I. Koyuncu, M. Alcin, and M. Tuna, “Artificial Neural Networks based thermodynamic and economic analysis of a hydrogen production system assisted by geothermal energy on Field Programmable Gate Array,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 33, pp. 17443–17459, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2019.05.049.
- [9] M. Ş. AKÇAY, İ. KOYUNCU, M. ALÇIN, and M. TUNA, “FPGA Tabanlı LogSig ve TanSig Transfer Fonksiyonlarının IQ-Math Sayı Standardında Tasarımı ve Gerçeklenmesi,” *Journal of Materials and Mechatronics: A*, vol. 3, no. 2, pp. 225–239, Dec. 2022, doi: 10.55546/JMM.1094815.
- [10] M. Tuna, M. Alçın, İ. Koyuncu, C. B. Fidan, and İ. Pehlivan, “High speed FPGA-based chaotic oscillator design,” *Microprocess Microsyst*, vol. 66, no. 2019, pp. 72–80, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.MICPRO.2019.02.012.
- [11] B. H. Tietche, O. Romain, B. Denby, and F. De Dieuleveult, “FPGA-based simultaneous multichannel fm broadcast receiver for audio indexing applications in consumer electronics scenarios,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1153–1161, 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6414980.
- [12] I. Koyuncu, C. Yilmaz, M. Alcin, and M. Tuna, “Design and implementation of hydrogen economy using artificial neural network on field programmable gate array,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 41, pp. 20709–20720, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.181.
- [13] M. Ozev, Z. Ortatepe, and A. Karaarslan, “An FPGA-Based Comparative Analysis of Control Techniques for Gimbals and Fins of Missiles,” *Electrica*, vol. 22, no. 2, pp. 160–172, May 2022, doi: 10.54614/ELECTRICA.2022.21175.
- [14] E. Monmasson, L. Idkhajine, M. N. Cirstea, I. Bahri, A. Tisan, and M. W. Naouar, “FPGAs in industrial control applications,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 7, no. 2, pp. 224–243, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2123908.
- [15] H. Yu, H. Lee, S. Lee, Y. Kim, and H. M. Lee, “Recent Advances in FPGA Reverse Engineering,” *Electronics* 2018, Vol. 7, Page 246, vol. 7, no. 10, p. 246, Oct. 2018, doi: 10.3390/ELECTRONICS7100246.
- [16] F. Karataş, İ. Koyuncu, M. Alçın, and M. Tuna, “Design and implementation of FPGA-based arrhythmic ECG signals using VHDL for biomedical calibration applications,” *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 362–371, 2021, doi: 10.35860/iaej.918874.

- [17] E. Coşgun and A. Çelebi, “FPGA based real-time epileptic seizure prediction system,” *Biocybern Biomed Eng*, vol. 41, no. 1, pp. 278–292, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.BBE.2021.01.006.
- [18] F. Karataş *et al.*, “II. Derece AV Blok Aritmik EKG Sinyallerinin VHDL ile FPGA-Tabanlı Tasarımı,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 6, pp. 1334–1345, Dec. 2022, doi: 10.35414/AKUFEMUBID.1141837.
- [19] N. S. Madiraju, N. Kurella, and R. Valapudasu, “FPGA Implementation of ECG feature extraction using Time domain analysis,” *ArXiv*, vol. abs/1802.03310, Feb. 2018, Accessed: Jul. 11, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1802.03310v1>
- [20] K. Meddah, M. K. Talha, M. Bahoura, and H. Zairi, “FPGA-based system for heart rate monitoring,” *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 771–782, Sep. 2019, doi: 10.1049/IET-CDS.2018.5204.
- [21] H. Zairi, M. Kedir Talha, K. Meddah, and S. Ould Slimane, “FPGA-based system for artificial neural network arrhythmia classification,” *Neural Comput Appl*, vol. 32, no. 8, pp. 4105–4120, Apr. 2020, doi: 10.1007/S00521-019-04081-4/FIGURES/12.
- [22] F. Karatas, I. Koyuncu, M. Alçın, and M. Tuna, “Design of FPGA-based ECG Signal Using VHDL,” in *1st International Hazar Scientific Research Congress*, Baku, Azerbaijan: IKSAD Publishing, 2020, pp. 114–127. Accessed: Apr. 01, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344719133>
- [23] A. Giorgio, C. Guaragnella, and D. A. Giliberti, “Improving ECG signal denoising using wavelet transform for the prediction of malignant arrhythmias,” *Int J Med Eng Inform*, vol. 12, no. 2, pp. 135–150, 2020, doi: 10.1504/IJMEI.2020.106898.
- [24] S. Jain, “FPGA-Assisted Framework for Heart Rate Evaluation using ECG Signal Processing,” in *2020 IEEE 17th India Council International Conference, INDICON 2020*, New Delhi, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342125.
- [25] Y. Zhu *et al.*, “A Multi-channel ECG Acquisition System Based on FPGA,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1924, no. 1, p. 012023, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1924/1/012023.
- [26] F. Karataş, I. Koyuncu, M. Tuna, M. Alçın, E. Avcioglu, and A. Akgul, “Design and implementation of arrhythmic ECG signals for biomedical engineering applications on FPGA,” *The European Physical Journal Special Topics* 2021 231:5, vol. 231, no. 5, pp. 869–884, Nov. 2021, doi: 10.1140/EPJS/S11734-021-00334-3.
- [27] F. Karataş, “VHDL ile FPGA-tabanlı EKG simülatorü tasarımı,” Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye, 2021.
- [28] “XILINX Zynq-7000 SoC FPGA Development Board XC7Z020-ALINX.” Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: <https://alinx.com/en/detail/273>
- [29] “ALINX Dual Channel 14 bit 125MSPS DA BNC Analog Output Module AD9767-ALINX.” Accessed: Jul. 15, 2023. [Online]. Available: <https://alinx.com/en/detail/480>