



SPORCULARIN KALP ATIM HIZININ ESP-NOW KULLANILARAK KABLOSUZ İLETİMİ

¹Ömer Muhsin DÜNDAR , ²Ahmet AYDIN 

¹Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE
²Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Adana, TÜRKİYE
¹omdundar@firat.edu.tr, ²aaydin@cu.edu.tr

(Geliş/Received: 12.02.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.05.2021)

ÖZ: Bilimsel yaklaşımlarla antrenman programları hazırlamak ve sporcu egzersiz verilerini izlemek için geliştirilen teknolojiler günümüzün popüler konuları arasında yer almaktadır. Uygun yük izleme, bir sporcunun antrenman programına uygunluğunu belirlemeye, aşırı yüklenme ve yaralanma riskini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Bu bağlamda, sporda kalp atış hızı takibi, sporcunun durumunu izlemek için invazif olmayan, zaman açısından verimli ve düşük maliyetli en kolay yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sporcudan kalp atım hızı bilgisini almak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır, ancak en doğru sonucu doğrudan göğüs üzerine takılan EKG tabanlı kemerler vermektedir. Bu yöntem ile elde edilen veriler genellikle sporcunun kolunda bulunan saat veya benzeri aparatlar yardımı ile takip edilmekte, uzaktan takibi doğrudan yapılamamaktadır. Bu çalışma sonucunda, EKG tabanlı göğüs kemerinden alınan veriler, ESP-NOW iletişim protokolü ile uzakta bulunan antrenörlere aktarılarak sporcuların anlık kalp atım hızı değişimleri gözlenebilecektir. Bu iletişim protokolünün sunduğu bazı önemli avantajlar ise, ESP32 içinde bulunan Wi-Fi donanımını modem gibi ekstra gereksinimlere ihtiyaç duymadan kullanması, hızlı ve düşük güç tüketimine sahip olmasıdır. Dolayısıyla, harici bir RF modülünün neden olacağı ekstra maliyet ve boyuttan kaçınılarak yüksek performanslı bir sistem ucuz ve küçük bir boyutta geliştirilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalp atım hızı, Kablosuz haberleşme, ESP-NOW, Giyilebilir cihazlar

Heart Rate in Athletes and Wireless Transmission Using ESP-NOW

ABSTRACT: Technologies developed to prepare training programs with scientific approaches and monitor athlete exercise data are among today's popular topics. Appropriate load monitoring helps determine an athlete's fitness for the training program and minimize overload and injury risk. In this context, tracking HR in sports is the cheapest, time-efficient, and easiest non-invasive method to monitor the athlete's condition. Various methods are used to obtain HR from the athlete, but ECG-based belts, which are directly wearable on the chest, give the most accurate result. The data obtained by this method are usually monitored with a watch or similar apparatus on the arm of the athlete, and remote monitoring cannot be performed directly. As a result of this study, the data obtained from the ECG-based chest strap can be transferred to a remote receiver using ESP-NOW communication protocol, and instant HR changes of the athletes can be observed. Some of the important advantages of this protocol are that it uses the Wi-Fi hardware of ESP32 without the need for additional requirements such as a modem, it is fast, and low power consumption. Therefore, an external RF module's extra cost and size are avoided to have a minimal cost and size while keeping the system performance high.

Key Words: Heart rate, Wireless communication, ESP-NOW, Wearable devices

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalp atım hızı (KAH); kalbin venöz kan olarak ifade edilen oksijenlenmemiş kanı akciğerlere, oksijenli kanı ise sistemik dolaşıma pompaladığı ritmi gösterir. Kalp atım hızı izleme, son yıllarda kardiyovasküler zindeliğin ve dayanıklılığın en önemli göstergelerinden biri haline gelmiştir. KAH, dinlenme sırasında fitness/zindelik düzeyini ve herhangi bir rahatsızlığın (kardiyovasküler hastalıklar, stres vb.) varlığını gösterirken; egzersiz sırasında ise fitness/zindelik düzeyini ve egzersiz yoğunluğunu göstermektedir. Bu önemli fizyolojik parametreyi izlemenin en yaygın uygulamalarından birisi antrenman yoğunluğu (training intensity) ve sporcuların iç yük (internal load) durumunu takip etmek için kullanıldığı spor uygulamalarıdır. Yapılan çalışmalarda KAH ile oksijen tüketimi arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğu (Hopkins, 1991), KAH değişiminin aşırı yüklenmelerin saptanması ve önlenmesinde rol oynadığı (Achten ve Jeukendrup, 2003) ve maksimum KAH verisinin de antrenman yoğunluğunun bir göstergesi olduğu ifade edilmektedir (Borresen ve Lambert, 2008). Aynı zamanda antrenman yoğunluğunu takip edebilmek için kullanılabilecek diğer yöntemlere (oksijen alımı ölçümü, kan laktat konsantrasyonu, kas fonksiyon ölçümleri gibi) göre, KAH'nın izlenmesi daha kolaydır. KAH izlemenin giyilebilir tasarıma daha elverişli ve daha az maliyetli olması antrenman yoğunluğu izleme açısından bu yöntemi öne çıkarmaktadır.

Takım sporlarında bir antrenman programı oluşturulurken antrenman sıklığı ve süresi kolaylıkla kontrol edilebilirken antrenman şiddetini kontrol etmek için KAH monitörleri kullanılabilir (Bizati, 2013). Bu monitörler ile sporcular üzerindeki iç yüklenme şiddeti ve aşırı yüklenme sonucu antrenmanın yıkıcı olmaya başlamasını ifade eden sür-antrene durumu kontrol altında tutulabilmektedir. Egzersiz/antrenman seviyelerini kontrol altında tutmak ve fiziksel aktiviteyi ölçmek için çeşitli giyilebilir KAH cihazları tasarlanmıştır. Bu cihazlar temel olarak optik veya EKG sensör prensibiyle çalışmaktadır. Optik sensör kullanılan cihazlarda fotopletizmografi (PPG) metodu uygulanmaktadır. Bu metod, sensörün yerleştirildiği yerden akan kanın hacminin optik olarak izlenmesi sonucu nabızın belirlenmesi prensibine dayanır. Bunlar parmağa veya kulağa takılan cihazlar, saatler ve bilek bantları olarak tasarlanabilmektedir (Spierer ve diğ., 2015; Hettiarachchi ve diğ., 2019; Almeida ve diğ., 2019). Öte yandan EKG tabanlı KAH monitörleri ise göğüs kemeri sensörüne yerleştirilmiş kuru elektrotlardan oluşmaktadır (Sartor ve diğ., 2018). Bu iki temel yöntemle alakalı yapılan bir çalışmada EKG tabanlı KAH cihazı ile optik sensör tabanlı KAH cihazları karşılaştırılmıştır. Katılımcılara standart EKG elektrotları ve EKG tabanlı Polar H7 göğüs kemeri yerleştirilmiş; aynı zamanda her katılımcıya optik sensör tabanlı KAH bilek cihazları takılmıştır. Wang ve diğ. (2016) tarafından yapılan bu çalışma sonucunda, EKG tabanlı KAH cihazı daha doğru sonuçlar vermiş ve bu yöntemin antrenman takibi gibi profesyonel uygulamalarda daha kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Çizelge 1. EKG Tabanlı KAH Monitörleri ile Optik Tabanlı (PPG) KAH Monitörlerinin Elektrokardiyogram ile Doğruluğunun Karşılaştırılması (Wang ve diğ., 2016)

Table 1. Comparison of ECG-Based HR Monitors and Optic-Based (PPG) HR Monitors with Electrocardiogram Accuracy

| Cihaz | Elektrokardiyogram (EKG) ile uyum korelasyonu |
|------------------|---|
| Polar H7 | 0.99 (0.987-0.991) |
| Apple Watch | 0.91 (0.884-0.929) |
| Mio Fuse | 0.91 (0.882-0.929) |
| Fitbit Charge HR | 0.84 (0.791-0.872) |
| Basis Peak | 0.83 (0.779-0.865) |

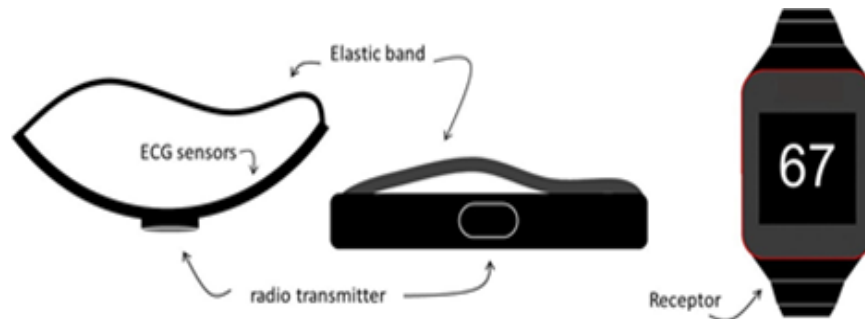
Piyasada bulunan EKG tabanlı KAH göğüs kemerleri (Polar H7-H10, Wahoo Tickr X, Garmin, Kalenji gibi) kişiden topladıkları verileri bluetooth veya ANT+ ile saat, bisiklet monitörleri, telefon, tablet gibi cihazlara kısa mesafeler (10-20 metre) içerisinde aktarabilmekte ve bu cihazlar yardımıyla okunabilmektedir. Ancak bireysel veya takım sporlarında, antrenörün iç yük ve antrenman şiddetini kontrol altında tutabilmesi için antrenman ve egzersiz sırasında sporcunun kalp atım hızını takip

edebilmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli kablosuz haberleşme yöntemleri kullanılabilir. Kablosuz haberleşme yöntemlerine örnek olarak Wi-Fi, Bluetooth, RF, Zigbee, GSM/GPS verilebilir. Bu araç ve yöntemlerin bazı dezavantajları mevcuttur. Örneğin; Wi-Fi bir yönlendirici (roter ya da modem) diğer bir deyişle erişim noktasına ihtiyaç duyar. Diğer standartlara göre yüksek güç tüketimine sahiptir. Ayrıca Wi-Fi cihazların çalıştığı frekans düzeyleri lisans gerektirmeden, diğer kablosuz cihazlarla çakışabilmekte, bu da iletişimi etkileyebilmekte hatta engelleyebilmektedir. Başka bir kablosuz araç olan Bluetooth daha kısa mesafelerde kullanışlı iken, RF modüller genellikle bir mikrodenetleyiciyle birlikte kullanılmaktadır. ZigBee ise kullanılan sisteme kıyasla yüksek maliyeti ile ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak EKG tabanlı göğüs kemerinden veriler çekilebilir ve aktarılabilir. Ancak bu çalışmada kullanılan yöntem ve araçlarla yukarıda bahsedilen dezavantajlar ortadan kaldırılmıştır. Oluşturulan sistem ile sporcunun KAH bilgisi ESP-NOW haberleşme protokolü ile kablosuz, hızlı, güvenilir, düşük maliyetli ve ekstra donanım kullanılmadan antrenör ekranında yansıtılacak şekilde aktarılmıştır. Bu sayede sporcunun KAH verileri uzak mesafede bulunan antrenörlerine iletilebilmiş ve gerçek zamanlı olarak takibi sağlanmıştır.

Bazı rahatsızlıkların (taşikardi, aritmi gibi) takibi, spor biliminde antrenman yoğunluğu seviyesinin ölçülmesi ve performansın takibi gibi birçok alanda kullanılan KAH verisi önemli bir parametre olarak literatürde (Laukkanen ve Virtanen, 2011; Gıllınoğlu ve diğ., 2017) yer almaktadır. EKG tabanlı göğüs kemeri sistemlerinde KAH verilerinin Bluetooth, ANT+ ile çok kısa mesafelerde veri iletimi veya ekstra donanım kullanılarak uzak mesafede bir iletişim kurulabilmektedir. Bu çalışmada EKG tabanlı göğüs kemerinden yine sporcunun üzerinde bulunan küçük boyuttaki ESP32 modülü yardımıyla alınıp (BLE teknolojisi) aynı modül üzerinden ESP-NOW protokolü kullanılarak uzak mesafedeki antrenör veya sağlık personellerine ekstra bir donanım gerektirmeden KAH aktarılabilmektedir. Aynı zamanda bu çalışmada oluşturulan sistemin donanım ve boyut olarak giyilebilir teknolojiye uygun olması, ESP32 üzerindeki diğer özellikler (bluetooth, Wi-Fi, sıcaklık, dokunma, IR sensörü vb.) bakımından kolaylıkla geliştirilebilir olması ve uygun maliyeti bu tasarımı ön plana çıkarmaktadır.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Günümüzde KAH tespiti, son yıllarda giyilebilir olarak iki tür teknoloji ile gerçekleşmektedir: optik sensör (fotoplektizmografi) ve EKG (elektrokardiyogram). EKG tabanlı KAH monitörleri göğüs kemeriyle çalışırken (Şekil 1); optik sensörler genellikle bilek cihazları olarak kullanılmaktadır (Hettiarachchi ve diğ.,2019; Almeida ve diğ., 2019).



Şekil 1. EKG tabanlı KAH monitörünün temel yapısal bileşenleri (Almeida ve diğ., 2019)

Figure 1. Basic structural components of an ECG-based HR monitör

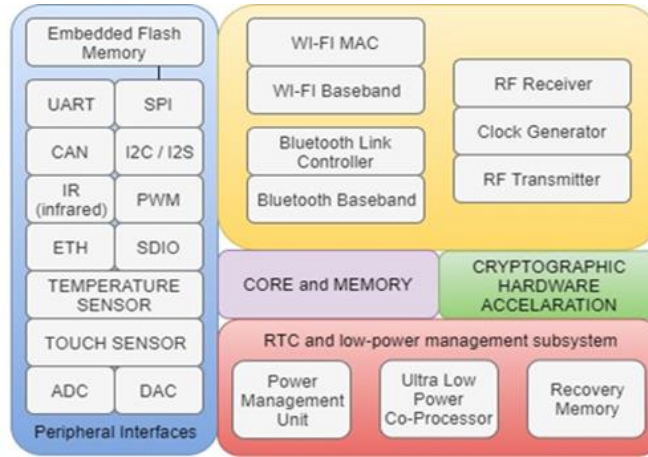
Şekildeki örnek sistemde sporcunun bileğindeki saat ile kontrol sağlanmakta, antrenör veya diğer profesyoneller ise o saat üzerinden aralıklı zamanlarla bakabilmekte veya daha sonra kayıt üzerinden KAH verisini inceleyebilmektedir. Bu makalenin amacı ise; şekilde görülen EKG tabanlı KAH monitörlerinde kullanılan saat ve benzeri cihaz ihtiyacı duyulmadan, verileri uzak mesafedeki kişilere (antrenör, sağlık ekibi gibi) düşük güç tüketimi ile kablosuz olarak gönderileceği, antrenör veya diğer profesyonellerin anlık olarak takip edebileceği gerçek zamanlı bir sistemi tasarlamaktır. Kendi üzerinde

hem kemer ile haberleşmeye olanak sağlayacak BLE, hem de uzun mesafe RF haberleşmeye olanak sağlayan modülleri bulunan ESP32 tercih edilmiştir. Böylelikle önerilen sistem, BLE ve RF modüllerini ayrı alıp mikrodenetleyici ile kontrol edildikleri çalışmalara göre maliyet ve boyut açısından ciddi avantajlar sunmuş olacaktır. Bu sistemde kullanılacak iletişim ise kablosuz haberleşmede yeni bir ufuk açan ESP-NOW protokolüdür. Literatürde spor uygulamaları açısından bir örneği bulunmayan ESP-NOW iletişimi az sayıda çalışmada (Hoang ve diğ., 2019; Khanchuea ve Siripokarpirom, 2019; Yukhimets ve diğ., 2020) yer bulmuştur. Bu çalışmanın bir diğer amacı da spor alanında uygulamalar için bu sistemin çok avantajlı olduğunu belirtmektir.

Bu sistemde ESP-NOW ile uyumlu çalışabilen iki adet ESP32 modülü, BLE teknolojisi ve KAH verisini algılayan göğüs kemeri kullanılmaktadır.

ESP32

ESP32, ESP8266'nın yerine geçen düşük maliyetli bir mikrodenetleyicidir. Şangay'da bulunan bir şirket olan Espressif System tarafından 2016 yılında tasarlanan ve üretilen ESP32, IoT (Internet of Things), mobil ve giyilebilir uygulamalar için önemli özellikler ve işlevler sunmaktadır.



Şekil 2. ESP32 Donanım Blok Diyagramı

Figure 2. ESP32 Hardware Block Diagram

Şekil 2’de gösterildiği üzere teknik özellik bakımından; işlemcisinin 240 MHz ve çift çekirdekli olması, 520KB RAM ve ADC, DAC, I2C, I2S, UART, SPI, GPIO, RF, Wi-Fi ve Bluetooth gibi çok çeşitli opsiyonlarına sahip olması ve uygun maliyeti nedeniyle oldukça kullanışlıdır. Ek olarak bu kart üzerinde, ESP32'nin uyku modunda 1 mA'dan daha düşük bir enerjiyle çalışmasını sağlayan Güç Yönetim Birimi (PMU) ve Ultra Düşük Güçlü Yardımcı İşlemci bulunmaktadır. Bu özellik ESP32'yi düşük güçlü uygulamalar için en uygun seçim haline getirmektedir. Uygun maliyeti (yaklaşık 50 TL), düşük güç tüketimi, üzerinde bulunan farklı opsiyonlar (Wi-Fi, Bluetooth vd.), az gecikme süresi ve kolay programlanabilir (Arduino, JavaScript, Python, IDF) olması bu modülün ön plana çıkan önemli özellikleridir. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı, üzerinde hem kemer ile haberleşmeyi gerçekleştirecek BLE, hem de uzun mesafe haberleşmeye olanak sağlayacak yeni bir protokol olan ESP-NOW'ı desteklediği için ESP32 modülü tercih edilmiştir. Bu modülün boyutunun küçük olması, az enerji tüketimine olanak sağlaması ve maliyetinin düşük olması da önerilen sistem için oldukça önemlidir.

Düşük Enerji Bluetooth (BLE) (Bluetooth Low Energy (BLE))

Düşük Enerji Bluetooth (BLE); sağlıkta, sporda, güvenlikte ve ev otomasyon sistemlerinde geliştirme yapan Bluetooth Special Interest Group (SIG) tarafından piyasaya sunulan kablosuz bireysel alan ağı

teknolojisidir. BLE, Klasik Bluetooth'un bir alt grubu olmakla birlikte Bluetooth 4.0 sürümünün özelliklerinin önemli bir parçasıdır.

Klasik Bluetooth kesikli olmayan yani devamlı veri akışı için tasarlanmışken; BLE ise uzun aralıklarla ani yani kesikli veri akışı için tasarlanmıştır. Örneğin, kulaklıktan müzik dinlerken sürekli bir veri akışı olurken; TV kanallarını değiştirirken veya bir robotu komutlarla yönlendirirken kesikli bir veri akışı olur (Dündar, 2020). Bu da enerjinin daha verimli kullanılması gereken uygulamalarda BLE'nin avantajını göstermektedir. BLE ile IoT uygulamalarında (akıllı ev, sağlık uygulamaları, giyilebilir uygulamalar gibi) enerji tüketimi önemli derecede azalmaktadır. Bu yüzden IOT cihazlarda BLE tercih edilmektedir.

Çizelge 2. BLE ile Klasik Bluetooth karşılaştırması

Table 2. BLE vs Classic Bluetooth

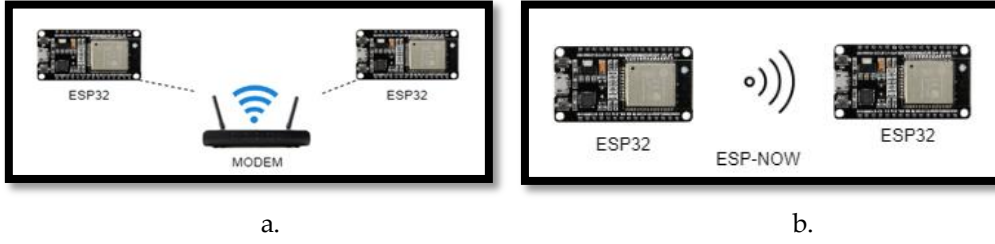
| Özellik | BLE | Klasik Bluetooth |
|------------------------|---|---------------------|
| Enerji Tüketimi | 15mA'den daha düşük | 30mA'den daha düşük |
| Veri Hızı | 1 Mbps | 700 Kbps |
| Menzil | Kapalı alanda 50 m Açık alanda 150 m | 30 m'den kısa |
| RF Frekansı | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| Gecikme süresi | 3 ms | 100 ms |

ESP32 modülü üzerinde bulunan Bluetooth özelliği sayesinde, göğüs kemerinden alınan veriler BLE aracılığıyla sporcunun üzerinde bulunan ESP32'ye aktarılmıştır. BLE'nin önerilen sistem için avantajı Çizelge 2'de gösterildiği gibi enerji tüketiminin çok düşük olması ve KAH göğüs kemeri ile uyumlu çalışabilmesidir.

ESP-NOW

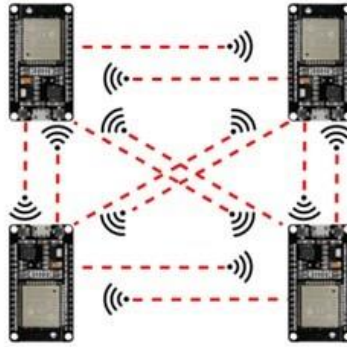
ESP-NOW, 2018 yılında Espressif tarafından tanıtılan bir tür bağlantısız Wi-Fi iletişim protokolüdür. ESP-NOW, P2P (Peer to Peer) protokolü özelliğine sahip olup ilk olarak ESP32 için yayınlanmıştır (Hoang ve diğ., 2019). Bu yöntemle P2P'nin yanı sıra çok sayıda cihaz arasında düşük güçlü bir iletişim sağlanabilmektedir. ESP-NOW'da, veriler cihaza özgü bir eylem çerçevesinde kapsüllenir ve bir Wi-Fi cihazından (ESP32, ESP8266) diğerine bağlantı olmadan iletilir. ESP-NOW'ın Wi-Fi'den farkı erişim noktasına ve yönlendiriciye (modem, roter) ihtiyaç duymadan, daha hızlı ve daha az güç tüketimiyle iletişimi gerçekleştirebilmesidir.

Bir denetleyiciyi modem üzerinden diğerine bağlayarak iletişimin gerçekleştiği Wi-Fi'nin aksine (Şekil 3.a), ESP-NOW iki veya daha fazla mikro denetleyiciyi (ESP32, ESP8266) modem veya farklı bir donanım doğrudan bağlamadan iletişimi sağlayan özel bir protokol (Şekil 3.b) kullanır. Wi-Fi aracının gereksinimlerin çok olması, lisans gerektirmeyen frekans seviyelerinde çalıştığından diğer kablosuz araçlarla çakışabilmesi, iletişim kalitesi ve hızının diğer radyo sinyallerinden etkilenmesi, yüksek güç tüketimi gibi olumsuzluklarından dolayı; ESP-NOW protokolünde gereksinimlerin çok daha az, güç tüketiminin çok daha düşük ve alıcının kimliği olarak adlandırılan MAC (Media Access Control) adresini tanımlanarak daha güvenilir olması belirli uygulamalarda bu yöntemi daha avantajlı kılmaktadır.



Şekil 3. a. Wi-Fi ile iletişim, b. ESPNOW protokolü ile (P2P) iletişim

Figure 3. a. Communication with Wi-Fi, b. Communication with ESPNOW protocol

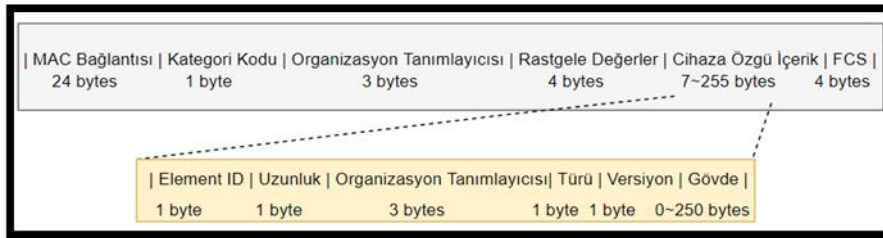


Şekil 4. ESP-NOW ile ağ yapısı iletişimi

Figure 4. Network structure communication with ESP-NOW

Bu protokol, genellikle kablosuz farelerde kullanılan düşük güçlü, 2.4 GHz kablosuz bağlantıya benzer şekilde çalışmaktadır. Bu nedenle, iletişimden önce cihazlar eşleşmekte ve eşleşme sonrasında bağlantı güvenli ve kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Bir defa eşleştirme yapıldıktan sonra bağlantı kalıcı hale gelmektedir. Yani, cihazlardan biri güç kaybettiğinde veya sıfırlandığında, cihaz yeniden başlatıldığı anda otomatik olarak eşine bağlanmaktadır. ESP-NOW çok yönlü kullanılabilen olup, farklı kurulumlarda tek yönlü, çift yönlü veya ağ yapısı (Şekil 4) şeklinde iletişim kurabilmektedir.

ESP-NOW ile 250 bayta kadar şifreli veya şifresiz iletişim gerçekleştirilebilmektedir. ESP-NOW, verileri iletmek amacıyla cihaza (vendor) özgü bir eylem çerçevesi kullanmaktadır. Tanımlı ESP-NOW bit hızı 1 Mbps olarak belirlenmiştir. Cihaza (ESP32) özgü eylem çerçevesinin biçimi Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Cihaza özgü eylem çerçevesinin biçimi (ESP-IDF Programming Guide, 2019)

Figure 5. Format of the vendor-specific action frame

ESP-NOW herhangi bir yönlendirici gerektirmediğinden (Wi-Fi modemi) gereksinimleri son derece azdır. Şekil 5'te görülebileceği gibi, tüm uygulama paketlenir ve daha sonra bir cihazdan diğerine/diğerlerine iletilir. Bu cihaza özgü paketleme, diğer cihazlar tarafından anlaşılma riskini azaltarak daha güvenli bir iletişime olanak tanır. Cihaza özgü içerik altında yer alan bölüm ise iletim için gereken bilgileri tutan paketin en önemli parçasıdır. Bu kısımda yer alan gövde ise ESP-NOW verilerini içermektedir.

EKG Tabanlı KAH Monitörü (ECG Based HR Monitor)

Antrenman ve egzersiz sırasında KAH'yi takip edebilmek için en güvenilir yol EKG tabanlı KAH göğüs kemerleridir. Bu çalışmada Şekil 6'da görülen uygun maliyetli bir cihaz olan Kalenji marka göğüs kemerini tercih edilmiştir. Bu cihaz yakın çevrede bulunan uyumlu cihazlarla (saat, tablet, telefon, bisiklet monitörü) iletişim kurmak için Bluetooth ve ANT+ protokollerini kullanır. Genellikle telefon, tablet veya saatler ile kullanılan bu kemer, çalışmamızda ESP32 ile BLE üzerinden kolaylıkla haberleşmiştir.



Şekil 6. Uygulamada kullanılan KAH monitörü

Figure 6. KAH monitor used in practice

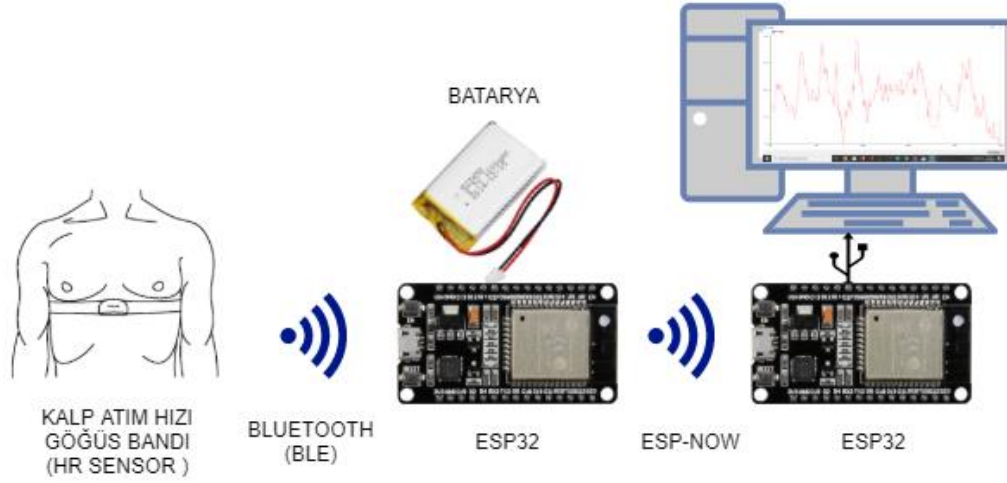
UYGULAMA (APPLICATION)

Spor biliminde performansa ve sağlığa dayalı pek çok veri ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Tüm bireysel ve takım sporlarında ortak, birçok durumla doğrudan veya dolaylı ilişkili parametre olan Kalp Atım Hızı bilgisi çeşitli yöntemlerle ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Bu çalışmada bu önemli bilgiyi ESP-NOW aracılığıyla iletecek bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sistemi donanım ve yazılım tasarımı olarak ikiye ayırabiliriz.

Donanım Tasarımı (Hardware Design)

ESP-NOW'ın gereksinimlerinin az olması sayesinde donanım tasarımı; iki adet ESP32 modülü, KAH göğüs bandı ve bir adet Li-Po batarya ile gerçekleştirilmiştir.

- Kişi üzerindeki giyilebilir şekilde tasarlanan sistemde, göğüs bandı tarafından algılanan KAH bilgisi, BLE aracılığıyla sporcunun üzerinde bulunan ESP32 modülüne aktarılır.
- Kişi üzerindeki ESP32 modülüne aktarılan KAH bilgisi, ESP-NOW protokolü ile kablosuz olarak uzak mesafedeki diğer ESP32 modülüne iletilir.
- Alınan veriler seri port aracılığıyla ekrana yansıtılır ve uzaktan KAH bilgisi kontrol edilebilir.

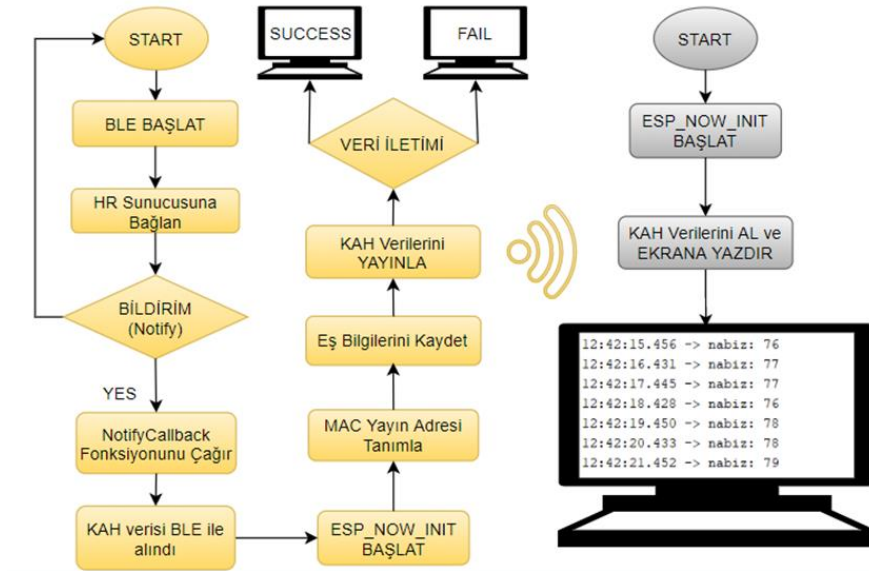


Şekil 7. Donanım tasarımı

Figure 7. Hardware design

Yazılım Tasarımı (Software Design)

ESP32 mikro denetleyicisi genel yazılımı, Arduino IDE üzerinden oluşturulan ve geliştirilen kodlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Birinci ESP32 modülü (verici) KAH verisini alacak ve diğer uzak mesafedeki modüle bunu iletacaktır. İkinci ESP32 modülü (alıcı) ise bu veriyi alıp monitöre yansıtacaktır.



Şekil 8. Yazılım tasarımı

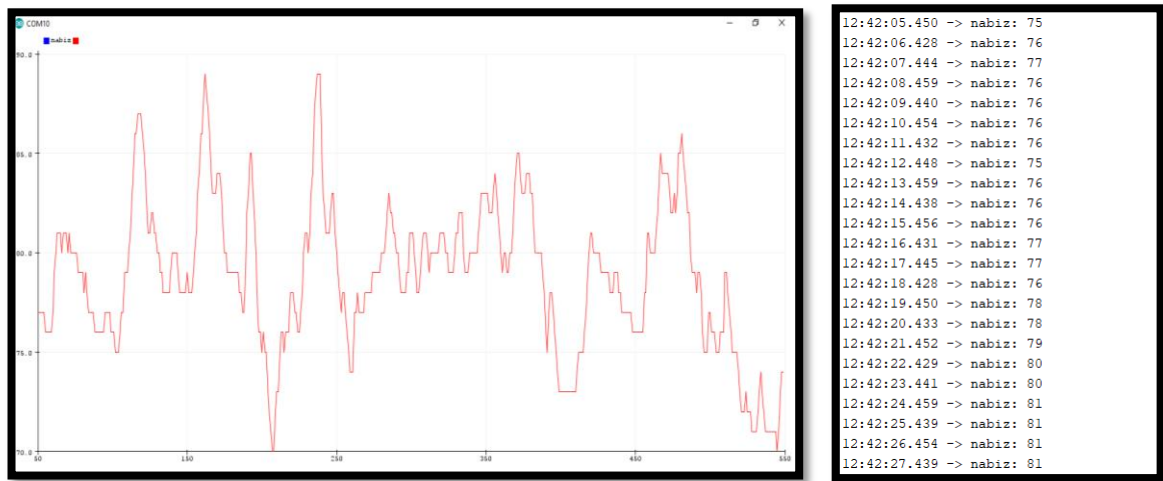
Figure 8. Software design

Şekil 8'de gösterilen akış diyagramının sol bölümü sporcunun üzerinde giyilebilir olan ESP32 (verici) için geliştirilen kodu, sağ bölümü ise kullanıcı takibi için verileri alan ESP32 (alıcı) için geliştirilen kodu temsil etmektedir. Sistem kapsamında geliştirilen çeşitli kontrol mekanizmaları ile iletişim sürekli kontrol edilir. Birinci kontrol mekanizması, BLE için göğüs kemerinden bir veri akış bildiriminin olup olmadığını kontrol eder. Bu da bize bildirim geldiği sürece KAH bilgisinin sporcu üzerindeki ESP32 modülüne aktarımını sağlar. Kodlar yardımıyla geliştirilen bu mekanizma enerji tasarrufu açısından önemlidir. Daha sonra ESP-NOW iletişim protokolü başlatılır. Uzak mesafede antrenör kontrolünde bulunan ESP32 (alıcı) modülüne özgü bir MAC adresi tanımlanır ve KAH verileri bildirim geldiği sürece iletir. İkinci kontrol

mekanizması ise iletimin veya bir başka deyişle yayının başarılı olup olmadığı konusunda kullanıcıyı bilgilendirmek üzere ayarlanır. Alıcı ESP32 modülü bu KAH verilerini alır ve bir monitöre yansıtır. Arduino IDE üzerinden geliştirilen kodlar yardımıyla BLE ve ESP-NOW iletişimi saniyede bir veri alacak şekilde tasarlanmıştır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çalışma sonucunda ESP-NOW ile hızlı, ek gereksinimlere (modem, harici anten, ESP32 harici ek mikrodenetleyici gibi) ihtiyaç duyulmadan ve güvenli bir şekilde kişinin KAH verisi uzak mesafedeki alıcıya aktarılmıştır. Saniyede bir veri alışverişi olacak şekilde, yaklaşık olarak 155 metre mesafede sağlıklı bir iletişim gerçekleştirilmiştir. Şekil 9’da KAH verilerinin ESP-NOW ile aktarımı sonucu oluşan grafik ve numerik değerler gösterilmiştir. Bu sistem ile sporcudan alınan veriler belli bir mesafede bulunan antrenör monitörüne aktarılabilir ve arayüz yardımıyla gerçek zamanlı takibi yapılabilecektir.



Şekil 9. Örnek uygulama için KAH monitörü görünümü

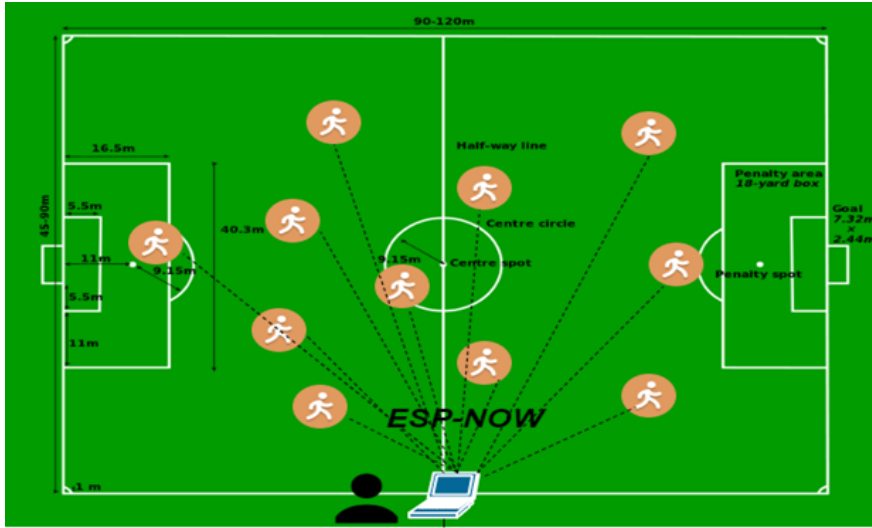
Figure 9. View of the KAH monitor for sample application

Bu uygulama bize ESP-NOW protokolü ile herhangi bir sensör verisinin (bu çalışma için KAH verisi), 250 baytı geçmediği sürece 20 cihaza kadar her türlü iletişiminin (tek yönlü, çift yönlü ve ağ yapısı) kolayca gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bir kişi için yapılan bu çalışma takım sporlarına da uyarlanabilir ve geliştirilebilir. Örneğin bir hentbol, basketbol ya da futbol takımının fiziksel performans (hız, mesafe, sıçrama, sprint gibi) verileri veya KAH, maksimum oksijen miktarı gibi iç yüklenme verileri tek bir ESP kullanılarak ESP-NOW ile anlık toplanabilir ve takip edilebilir. Bir futbol takımı için bu sistem kullanılarak futbolcuların üzerinde bulunan ve sensör bilgilerini (KAH gibi) içeren ESP modülü (verici) ile, ESP-NOW aracılığıyla kenarda bulunan antrenörünün anlık takip edebileceği bir ESP modülüne (alıcı) veri gönderilebilir. Bir futbol sahasının boyutları Şekil 11’de gösterilmektedir. ESP-NOW sayesinde tüm futbolculardan alınan veriler bu mesafeler içerisinde, maliyet ve boyut olarak ciddi avantajlar sunmuş olacaktır. Sadece bir ESP32 ile tüm sporcuların aynı anda gerçek zamanlı kontrolü bu sistem ile gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca ESP-NOW ile cihaza özgü veri aktarımı yapılabilmektedir. Bu sayede bu verileri alan ve monitöre aktaran ESP32 (alıcı), verilerin hangi cihazdan (verici ESP32) yani hangi sporcudan geldiğini tanıyabilecek ve sınıflandırabilecektir. Bu da ESP-NOW protokolünün bu tür uygulamalar için bir başka avantajını ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Mesafe testi sonucu

Figure 10. Distance test result



Şekil 11. ESP-NOW iletişim protokolünün futbol antrenmanlarına uygulanması

Figure 11. Application of ESP-NOW communication protocol to football training

Bu çalışmada oluşturulan sistem ile KAH monitörlerinin kısa mesafede (Bluetooth/ANT+), saat benzeri aparatlarla takip edilmesinden kaynaklı oluşan sorunlar giderilmiştir. Bunlardan birisi, egzersiz sırasındaki anlık KAH bilgisini takip edebilmektir. Bunun için antrenörün, sporcunun bileğindeki saate bakıp not etmesi gerekir, bu da antrenmanların sık sık bölünmesi anlamına gelmektedir. Bunu yapmak istemeyen antrenörler ise gerçek zamanlı takip yerine antrenman sonrası kaydedilmiş verileri kontrol edebilmektedir. Bu da gerçek zamanlı takipte fark edilebilecek ayrıntıları kaçırmayı ve anlık önlemler almayı engelleyecektir. Bu çalışmada kullanılan ESP-NOW protokolü ile sporcu üzerindeki kemerden alınan KAH verileri uzak mesafede bulunan antrenör ekranına aktarılabilmiştir. Bu sayede kesintisiz, gerçek zamanlı takip yapılabilmiştir.

Kesintisiz gerçek zamanlı takip, kablosuz haberleşme protokolü olan ESP-NOW ile gerçekleştirilmiştir. ESP32 modülünün sahip olduğu özellikler ve barındırdığı ESP-NOW protokolü bu çalışma için çok önemli avantajlar sunmuştur. Oluşturulan sistemde ilk aşama, EKG tabanlı göğüs kemerinden KAH verilerinin alınmasıdır. Kemer daha önce de belirtildiği gibi Bluetooth ve ANT+ iletişimini desteklemektedir. Daha sonraki aşama ise alınan verilerin anlık olarak uzak mesafedeki

antrenöre aktarılmasıdır. Sporcunun üzerinde bulunan kemerden bu verileri almak ve uzak mesafede yer alan antrenöre anlık veri aktarımını sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılabilir.

Bunlardan birisi Bluetooth modülü, Arduino denetleyici ve uzak mesafe iletimi için RF, ZigBee, Wi-Fi haberleşme modüllerinden birini kullanmak olabilir. Böylelikle KAH verileri kemerden sporcunun üzerinde bulunacak Bluetooth modülü yardımıyla alınabilir ve yine sporcunun üzerinde bulunacak denetleyiciye aktarılabilir. İkinci aşamada ise denetleyici üzerinden RF, ZigBee veya Wi-Fi ile antrenöre bu veriler aktarılabilir. Böyle oluşturulacak bir sistemde sporcu üzerinde hem Bluetooth modülü hem denetleyici hem de uzak mesafe haberleşme modülü bulunacaktır. Bu da giyilebilir tasarım açısından ve maliyet anlamında kötü bir seçim demektir. Ayrıca uzaktan haberleşmek için Wi-Fi modülü kullandığımızı düşünelim. Daha önce bahsettiğimiz dezavantajlarından ve gereksinimlerinin (modem gibi) fazla olmasından dolayı Wi-Fi'yi tercih etmek, bu sistem özelinde doğru olmayacaktır. Zigbee, belirli cihazların birbirleriyle iletişim kurmasına izin vermek için düşük enerjili radyo dalgalarını kullanan bir kablosuz iletişim protokolüdür. ZigBee kullandığımızda ise gereksinimlerin daha az olduğu ve düşük güç tüketiminin olduğu bir gerçektir. Ancak maliyet açısından ZigBee modüller de bu sistem için oldukça pahalıdır (~300 TL) (<https://www.robishop.com/urun/xbee-wifi-modul-2-4-ghz-802-11b>). Ayrıca RF kablosuz haberleşme modülü kullandığımızda ise belki ZigBee'ye göre daha ucuz bir sistem oluşturabilir ancak hem gereksinimler (denetleyici gibi) hem de güç tüketimi artar.

Bir başka yöntem olarak bu çalışmada olduğu gibi ESP32 denetleyici kullanılabilir. Böylelikle KAH verileri kemerden sporcunun üzerinde bulunacak ESP32 ile dahili Bluetooth/BLE üzerinden aktarılabilir. İkinci aşamada ise yine aynı ESP32 modülü üzerinden ESP-NOW ile antrenöre bu veriler aktarılabilir. Böyle oluşturulacak bir sistemde, sporcu üzerinde sadece tek bir ESP32 modülü bulunacak demektir. Çalışmada kullandığımız bu yöntemle, yukarda bahsedilenlere göre hem donanımsal anlamda gereksinimler azaltılmış hem de maliyet (tek bir ESP32 maliyeti ~50 TL) düşürülmüştür. (<https://urun.n11.com/arduino-urunleri-ve-setleri/arduino-esp-32s-wifi-ve-bluetooth-modul-P463912428>). Sadece sporcunun üzerinde bulunacak tek bir ESP32 ile yukardaki yöntemde kullanılabilecek modüllerin ve denetleyicilerin yaptığı işlerin tamamı yapılabilmektedir. Sonuç olarak KAH göğüs kemerinden tek bir ESP32 ile BLE üzerinden alınıp, aynı ESP32 üzerinden antrenöre ESP-NOW aracılığı ile gönderilebilmiştir. Böylelikle antrenör bilgisayar ekranından oyuncu verilerini gerçek zamanlı takip edebilmektedir.

Çizelge 3. Uygulamada kullanılan ESP32 (ESP-NOW) modülü ile bazı haberleşme araçlarının karşılaştırması

Table 3. Comparison of ESP32 (ESP-NOW) module used in the application and other communication tools

| Özellik | ESP32 | ZigBee | HC12 |
|---------------------------------|--|--|---|
| Frekans aralığı | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 433 MHz |
| Çevresel arayüzler | GPIO, ADC, DAC, SPI, I2C, I2S, UART, SDIO, CAN, Kızılötesi, Ethernet, PWM, Dokunma (touch) sensörü, sıcaklık sensörü, manyetik alan (hall) sensörü | I ² C, SPI, UART | UART |
| Kablosuz Haberleşme Opsiyonları | RF Bluetooth V4.2 - BLE Wi-Fi ESP-NOW | RF | RF |
| Veri Hızı | 150 Mbps BLE = 1 Mbps ESP-NOW = 1 Mbps | 250 kbps | Varsayılan baud hızı 9600 bps |
| Güç Tüketimi | Ultra Düşük | Ultra Düşük | Yüksek |
| Menzil | Bluetooth/ BLE = Kısa ESP-NOW = Orta / Uzun | Uzun | Orta - Uzun |
| Maliyet | Düşük (~50 TL) | Yüksek (~300 TL) | Orta (~80 TL) |
| Ek Gereksinim | Yok | KAH verilerini alabilmek için Bluetooth Modülü ve/veya denetleyici gerektirir. | İletişim için Mikrokontrolcü gerektirir. KAH verilerini alabilmek için de Bluetooth Modülü ve/veya denetleyici gerektirir. |

Yukardaki tabloda bu uygulamada kullanılan ESP32 modülü (ESP-NOW) ile düşük güç tüketimi gerektiren, büyük veri aktarım hızları gerektirmeyen uygulamalar için tasarlanan ZigBee ve seri RF haberleşme modüllerinden biri olan HC12 modülleri karşılaştırılmıştır. Bu tür uygulamalar için, tümleşik yapısıyla ESP32'nin avantajları açıkça görülmektedir. Bunlardan birisi, üzerinde çeşitli kablosuz haberleşme opsiyonlarını üzerinde barındırmasıdır. Bu sayede başka bir modüle gerek duymadan verileri sensörlerden alıp kolayca aktarabilmektedir. Ek gereksinimlere ihtiyaç duymaması ESP32 ve ESP-NOW protokolünü diğer modüllerden ve protokollerden ayıran en önemli özelliktir. ZigBee de veri gönderimi için ekstra gereksinime ihtiyaç duymaz ancak bu uygulamada olduğu gibi sensörden verileri almak için diğer haberleşme yöntemlerini (BLE gibi) de kullanmayı gerektirebilir. Bu uygulama için oluşturulan sistem ve ZigBee ile oluşturulabilecek sistemin maliyeti arasında çok büyük farklar vardır. Oluşturulan

sistemde alıcı ve verici olacak şekilde iki adet ESP32 kullanılmıştır. Bunların toplam maliyeti yaklaşık 100 TL'dir. Oluşturulan sistemde bütün işi bu iki ESP32 modülü yapabilmektedir. ZigBee ile oluşturulacak sistemde yine iki adet ZigBee modülü kullanılacaktır. Bunun dışında göğüs kemerinden veri alınması ve sporcunun üzerindeki modüle aktarılması için de Bluetooth modülü ve denetleyici kullanılacaktır. ZigBee ile oluşturulacak sistemin toplam maliyeti de yaklaşık olarak 700 TL'yi bulmaktadır. Bu da oluşturulan sistemin maliyet açısından avantajlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Gerçekleştirilen uygulama sonucunda sporcudan alınan KAH verileri ortalama 155 metre uzaklıktaki monitör tarafından kontrol edilebilmekte, anlık olarak takibi sağlanabilmektedir. Bu mesafeden sonra da KAH verileri alınabilmiş (250 metreye kadar) ancak veri iletiminde rastlanan küçük kesintilerden ötürü hesaba katılmamıştır. İletim hızı ve frekansı daha düşük bir veri iletiminde bu mesafe daha da arttırılabilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan geliştirme kartı olan ESP32, nesnelerin interneti olarak adlandırılan IoT uygulamalar için oldukça elverişlidir. ESP-NOW protokolünü destekleyen bu kart sayesinde herhangi ekstra mikrodenetleyici, anten, yönlendirici kullanılmadan doğrudan diğer kartlarla haberleşebilmektedir. Bu da literatür açısından giyilebilir, taşınabilir teknoloji geliştirme çalışmalarında bu yöntemin kullanışlı olduğunu bize göstermektedir. Kibrit kutusundan daha küçük boyutlarda giyilebilir olarak tasarlanan sistem özellikle spor uygulamalarında ve IoT cihazlarla kullanılmaya oldukça elverişlidir. Benzer şekilde ESP-NOW protokolü ile IoT uygulamalarında giyilebilir cihazların iletişimi, sensör ve kısa paket iletim uygulamaları, ev otomasyon sistemleri, sağlık ve spor uygulamaları tasarlanabilir ve geliştirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2019- 12274 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Achten, J., Jeukendrup, A.E., 2003, "Heart rate monitoring: applications and limitations", *Sports Medicine*, 33(7), 517-538. Doi: 10.2165/00007256-200333070-00004.
- Almeida, M., Bottino, A., Ramos, P., Araujo C.G., 2019, "Measuring heart rate during exercise: from artery palpation to monitors and apps" *International Journal of Cardiovascular Sciences*, 32(4), 396-407. Doi: 10.5935/2359-4802.2019006.
- Bizati, Ö., 2013, *Profesyonel futbolcuların fiziksel ve fizyolojik değerlendirmelerinde kullanılan farklı yöntemlerin karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Borresen, J., Lambert, M.I., 2008, "Quantifying training load: a comparison of subjective and objective methods" *International journal sports physiology performance*, 3, 16-30. Doi: 10.1123/ijspp.3.1.16.
- Dündar, Ö.M., 2020, *Sporcunun Kalp Atım Hızının Ölçülmesi ve Küresel Konum Belirleme (GPS) Sistemi ile Hız Performansının Gerçek Zamanlı Tespiti*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- ESP-NOW, ESP-IDF Programming Guide v4.0-dev-1191, pp. 2-4, 2019.
- Gillinov, S., Etiwy, M., Wang, R., Blackburn, G., Phelan, D., Gillinov, M., Houghtaling, P., Javadikasgarı, H., Desai, MY, 2017, "Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise" *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 49, No. 8, pp. 1697-1703.
- Hettiarachchi, I.T., Hanoun, S., Nahavandi, D., Nahavandi, S., 2019, "Validation of Polar OH1 optical heart rate sensor for moderate and high intensity physical activities" *Plos one*, 14(5), 1-13. Doi: 10.1371/journal.pone.0217288.
- Hoang, T.N., Van, S.T., Nguyen, B.D., 2019, "ESP-NOW based decentralized low cost voice communication systems for buildings" *International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, Vietnam, 108-112. Doi: 10.1109/ISEE2.2019.8921062.

- Hopkins, W.G., 1991, "Quantification of training in competitive sports, Methods and applications" *Sports Medicine*, 12, 161–183, Doi: 10.2165/00007256-199112030-00003.
- Khanchuea, K., Siripokarpirom, R., 2019, "A Multi-Protocol IoT Gateway and WiFi/BLE Sensor Nodes for Smart Home and Building Automation: Design and Implementation", *10th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, 1–6.
- Laukkanen, R., Virtanen, P.K., 2011, "Heart rate monitors: State of the art", *Journal of Sports Sciences*, Doi: 10.1080/026404198366920.
- Sartor, F., Gelissen, J., Dinther, R.V., Roovers, D., Papini, G.B., Coppola, G., 2018, "Wristworn optical and chest strap heart rate comparison in a heterogeneous sample of healthy individuals and in coronary artery disease patients", *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 10, 10.
- Spierer, D.K., Rosen, Z., Litman, L.L., Fujii, K., 2015, "Validation of photoplethysmography as a method to detect heart rate during rest and exercise", *Journal of Medical Engineering & Technology*, 39(5), 264-271. Doi: 10.3109/03091902.2015.1047536.
- Wang, R., Blackburn, G., Desai, M., Phelan, D., Gillinov, L., Houghtaling, P., Gillinov, M., 2017, "Accuracy of Wrist-Worn Heart Rate Monitors", *JAMA Cardiology*, 2(1), 104. Doi:10.1001/jamacardio.2016.3340.
- Yukhimets, D., Sych, A., Sakhnenko, A., 2020, "Designing a Method for Constructing Distributed Open ACS Based on the ESP-NOW Wireless Protocol", 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, pp. 642-647, Doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208135.