





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Rüzgâr Temelli Piezoelektrik Jeneratör Tasarımı

 Okan Gökhan Usta ^a,  Sibel Akkaya Oy ^{b,*}

^aCanik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Canik, TÜRKİYE

^bFatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi, Ordu, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: sibelakkaya@odu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1253621

ÖZ

Bu çalışmada da rüzgâr temelli bir piezoelektrik jeneratör tasarımı yapılmıştır. Sunulan bu sistem piezoelektrik enerji dönüşümünü temel almaktadır. Bilindiği üzere piezoelektrik materyaller titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen materyallerdir. Bu çalışma, helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim enerji kartları ile rüzgâr hızından faydalanarak bir titreşim oluşturulup elektrik enerjisi üretimi esasına dayanmaktadır. Piezoelektrik enerji alternatif gerilim olarak üretilmektedir ve yapmış olduğumuz tasarımda kullanılan hasat kartında enerji üretim aşamasında minimum kayıp hedeflenerek doğru gerilim elde edilmiştir. Rezonans değerini yükseltmek amacıyla sensörlerin üstüne trapez yayları ve neodyum mıknatıs monte edilmiştir. Önerilen sistemde toplam 30 adet film tip piezoelektrik dönüştürücü kullanılmıştır. Tanıtılan deneysel jeneratörün 36 m/s rüzgâr hız aralığı için maksimum çıkış gücü 408,79 μ W civarındadır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr hızı; Piezoelektrik sensör; Enerji hasatı; Jeneratör

Wind Based Piezoelectric Generator Design

ABSTRACT

In this study, a wind-based piezoelectric generator was designed. This presented system is based on piezoelectric energy conversion. As it is known, piezoelectric materials are materials that can convert vibration energy into electrical energy. As it is known, piezoelectric materials are materials that can convert vibration energy into electrical energy. In this study, basically; Piezoelectric vibration energy cards placed on a helical vertical axis wind blades are based on the principle of generating electrical energy by utilizing the wind speed to create a vibration. Piezo electric energy is produced as alternating voltage; In the harvest card used in the design we have made, the correct voltage has been obtained by targeting the minimum loss in the energy production phase. In order to increase there sonance value, trapez oidal springs and neodymium magnets are mounted on the sensors. A total of 30 film type piezoelektrik transducers are used in the proposed system. The maximum output power of the introduced experimental generator is around 408,79 μ W for 36 m/sec wind speed range.

Keywords: Wind speed; Piezoelectric Sensor; Energy harvester; Generator

I. GİRİŞ

Geleneksel yakıtlardaki fiyat artışları, kaynakların sınırlı olması ve doğaya verdiği zararlar yüzünden yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine olan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Rüzgâr, ışık, ısı ve titreşim gibi ortamda dağılan enerjiyi geri dönüştürerek kullanan enerji hasatçısı teknolojileri son yıllarda gittikçe popüler olmaktadır [4]. Yüksek verimliliği, basit yapısı, yüksek gerilim üretme kapasitesi ve düşük maliyeti nedeni ile piezoelektrik enerji hasatçıları bu teknolojiler içinde önemli rol oynar [5,6]. Piezoelektrik malzeme kullanılarak ortamdaki piezoelektrik titreşim enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilir [7]. Bu titreşimin de belirli bir frekans değerinin üstünde olması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde küçük hareket, yük ve titreşim hareketlerini elektrik enerjisine dönüştürülmesi planlanmış ve yapılan tasarım ve testler ile gerçekleştirilmiştir [1, 2, 3]. Yapmış olduğumuz çalışmamızda piezoelektrik materyalin hali hazırda kullanılmakta olan bir rüzgâr enerji türbinine entegre edilmesi ve mevcut üretimin üzerine bir katkı sağlanabilirliği test edilmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında yaya ve araç yollarının altlarına, insan bedeninde bulunan basınç noktalarına, ayakkabı tabanlarına ve bazı bina ve köprülerde bulunan basınç noktalarına piezoelektrik materyal yerleştirilerek enerji hasatı test edilmiştir. Çalışmamızda ise hâlihazırda enerji üretimi için tasarlanmış savonius türbine entegre edilerek mevcut verimine etki etmeden nasıl katkı sağlanabileceği test edilmiştir [15,28].

Literatürde piezoelektrik enerji hasatçısı ile ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Cao ve ark. yol uygulamaları için piezoelektrik enerji hasatçısı tasarlamışlardır [8]. Bu piezo elektrik hasatçısı (PEH) 0,7 MPa–20 Hz'lik bir uyarım altında $0,0926 \text{ mW/cm}^3$ 'e güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Roshani ve ark. 1 kN–10 Hz'de uyarım altında 0,3–0,5 mW çıkış gücüne sahip sandviç tipi bir hasatçı tasarlamışlardır [6]. Weiland Taghavifar [9] araç süspansiyon harmonik hareketlerini kullanarak bir enerji hasatçısı geliştirmişlerdir. Bu hasatçı çakıllı ve düz yolda test edilmiştir ve 13 km / sa hızda 57,87 W çıkış gücü elde edilmiştir. Ortalama gücünde yol genliği ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Moure ve ark. 29 mm çapında ki zil tipi PEH ile 0,9 MPa basınca sahip ağır araç yükü altında 16 μW maksimum çıkış gücü elde etmişlerdir [10]. Abbas ve ark. PEH hasatçının çıkış gücünü iyileştirmek için hasatçı geometrisini optimize ettiler ve katmanlı bir polarizasyon yöntemi önerdiler. Bu yeni hasatçı 0,7 MPa'lık bir yük altında 2,1 mW'lık bir çıkış gücü üretmiştir. [11, 12, 13]. Khoshnoud ve ark. [14] süspansiyon sistemini kullanarak bir enerji hasatçısı geliştirmişlerdir. Titreşim enerjisini kullanmak içinde bir rejeneratif kuvvet aktuatörü (RFA) kullanmışlardır. Maksimum çıkış gücü 20 Hz frekansta 984.4W olarak kaydedilmiştir.

Xie ve ark. [15] su partiküllerinin enine dalga hareketlerinin etkilerini bir piezoelektrik levha üzerinde toplayarak elektrik elde eden bir okyanus dalga enerji hasatçısı simülasyon ortamında geliştirmişlerdir. Simülasyon sonucuna göre bu hasatçı 30 W'a kadar enerji üretebilecektir. Shan ve ark. [16] makro fiber composite (MFC), piezoelektrik enerji hasatçısı (PEH) geliştirmişlerdir. Bu enerji hasatçısının maksimum çıkış gücü, 0.5m/sa su hızında ve 1,1 mW/m² güç yoğunluğunda 1,32 μW 'tır. Cai ve ark. [17] 5 mW çıkış gücüne sahip küçük ölçekli bir piezoelektrik dalga enerjisi toplayıcı önermişlerdir.

Viet ve ark. [18] okyanus dalgalarından gelen enerjiyi kullanmak için piezoelektrik bağlantılı bir şamandıra geliştirmiştir. Xie ve ark. [19] boyuna dalga enerjisi hareketini kullanan bir okyanus dalgası enerjisi toplayıcısı geliştirmiştir. Yeong-min ve ark. [20] ortalama akım 71,4 μA ve 2,42V çıkış gerilimine sahip sabit dalga hareketine dayalı bir piezoelektrik enerji hasadı geliştirmiştir. Bu toplayıcının maksimum çıkış gücünde 0,173 mW'dir. Gianluca ve ark. [21] yağış enerjisinin piezoelektrik dönüştürücü üzerindeki titreşim etkisini kullanarak bir enerji hasatçısı sunmuşlardır. Bu harvester ile $2,916 \times 10^{-8} \text{ W}$ çıkış gücü elde etmişlerdir.

Wang ve ark. [22], gerçek insan hareketi ile doğrusal olmayan enerji hasadının optimum yük direncini araştırmıştır. Bu çalışma sonucunda 7 km/hkoşu hızı için maksimum çıkış gücü 30.55mW olarak elde edilmiştir. Türkmen ve Çelik [23] ayakkabıya entegre edilmiş piezoelektrik materyal ile enerji

hasatçısı sunmuşlardır. Yaptıkları analiz sonucunda 90 kg ağırlığı olan bir insanın yürüyüşü boyunca 1.43mW güç üretebileceği ortaya çıkmıştır.

Johar ve ark. [24] çıkış gerilimi 30V ve akımı 1,43 μ A olan hava akışı ve titreşim temelli bir piezoelektrik nano generator geliştirmişlerdir.

Akkaya ve Özdemir [25] rüzgâr temelli bir jeneratör geliştirmişlerdir. Piezoelektrik jeneratörün ihtiyaç duyduğu titreşim dengesiz sistemin dönmesi ile elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki 4,5–5 m/sa rüzgâr hızında, 150 K Ω 'luk yük direncinde, en yüksek çıkış gücü 519 μ W'tır. Oy [26] arabanın dışındaki rüzgâr akışının sağladığı mekanik titreşimi kullanan bir piezoelektrik enerji hasatçısı tasarlamıştır. Bu hasatçının maksimum çıkış gücü, 0° lokasyon açısında ve 110 km/sa hızında 1,125 mJ olarak ölçülmüştür.

Tasarımını geliştirmiş olduğumuz test düzeneği, geleneksel rüzgâr türbinlerinin geliştirilebileceği gerçeğini vurgulayan bir yapıya sahiptir. Helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik enerji hasat kartlarından oluşmaktadır. Bu sayede rüzgârın etkisiyle kartlar titreşerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rezonans değerini artırmak amacıyla türbin platformunun montaj kısmına trapez yayları ve neodyum mıknatıslar monte edilerek verimlilik önemli ölçüde artırılmıştır. Trapez yayları ve neodyum mıknatısın verime etkisi göz ardı edilerek tamamen piezoelektrik enerji hasatçı kartlarından elde edilebilecek enerjiye odaklanılmıştır. Diğer çalışmaların aksine özgün olarak piezoelektrik materyalden elde edilen enerji hasatçı kartları sayesinde doğru gerilim (DC) olarak elde edilmektedir. Elde edilen gerilim diğer çalışmalardaki yapılan toplam gerilim dönüşümüne göre büyük ölçüde performans göstermektedir. İşte bu performans da gelecek çalışmalardaki enerji hasatında yaşanan kayıpların önüne geçeceği vurgulamaktadır.

Özellikle, yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar çalışmanın özgünlüğünü ve potansiyelini gözler önüne sermektedir. Yapılan testlerde uygulanan farklı rüzgâr hızlarında elde edilen güç verileri ışığında düşük güçlü uygulamalarda etkili ve verimli bir enerji üretimi sağlayabilecek potansiyelin olduğunu göstermektedir. Piezoelektrik enerji hasatçıların rüzgâr enerjisiyle birlikte kullanılması ve hibrit enerji üretimine yönelik potansiyeli, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılama açısından umut vadetmektedir.

II.DEVRE TASARIMI

A. PİEZOELEKTRİK ETKİ VE KULLANILAN SENSÖR

Piezoelektrik etki pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş katı maddelerden oluşur. Bu negatif ve pozitif yüklü parçacıklar element içerisinde denge durumundadırlar. Denge durumunda piezoelektrik kristallerde elektriksel yükü bulunmamaktadır. Fakat mekanik metotlarla piezoelektrik kristal üzerine bir mekanik kuvvet uygulandığında ve ya katı madde titreşime maruz kaldığında piezoelektrik kristaller pozitif yüklerin merkezi ile negatif yüklerin merkezi birbirlerini iterek uzaklaşmaya başlarlar ve piezoelektrik kristalin yüzeylerinde pozitif ve negatif zıt yüklerin oluşmasına neden olur. Yüklerin bu şekilde oluşması bir elektrik enerjisi alanının oluşmasına ve maddenin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir elektrik enerjisi farkını oluşturur. Piezoelektrik etki için bu oluşan işlemlerin tersi içinde geçerlidir. Ters piezoelektrik etki ise birbiri ile karşı karşıya duran iki yüzey arasına elektrik gerilim uygulanan bir kristalde fiziksel olarak boyut ve ölçü olarak şekil değişimi gerçekleşmektedir [27, 28].

Piezoelektrik malzeme mekanik baskı altında deforme olur, polarize olur. Bu polarizasyon (P) denklem 1'deki gibi yazılabilir [24].

$$P = d \times T \quad \text{Denklem 1}$$

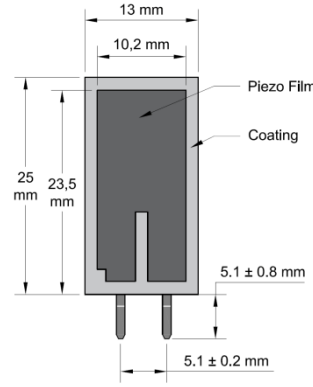
Burada “P” üretilen polarizasyon, “d” piezoelektrik stres katsayısı, “T” ise mekanik streştir. Şekil 1’de.

Bu polarizasyon dâhili bir elektrik alanı “E” yaratır ve bu da denklem 2’deki gibi yazılabilir [22].

$$P = \frac{E}{\epsilon} \quad \text{Denklem 2}$$

Burada ϵ , piezoelektrik malzemenin dielektrik sabitidir.

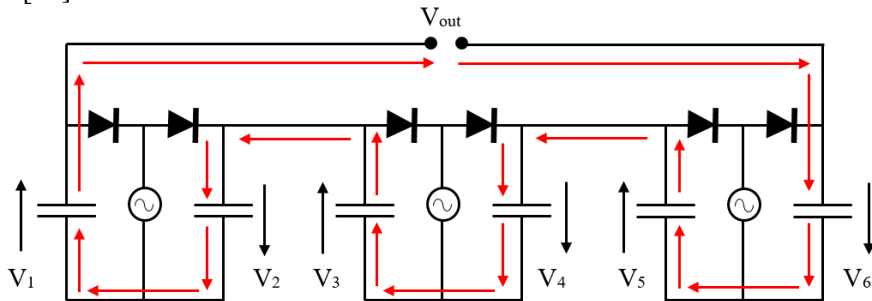
Diyafıramlı ve ince filmlü piezoelektrik dönüştürücüler birçok ülkede en çok kullanılan dönüştürücü türleridir. Jeneratör tasarımıımızda ince film piezoelektrik hasatçısı kullanmayı tercih ettik. Bu çalışmada mekanik titreşimden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan piezoelektrik dönüştürücünün boyutu da Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Piezosensörün Boyutu

B. DOĞRU GERİLİM HASAT KARTI TASARIMI

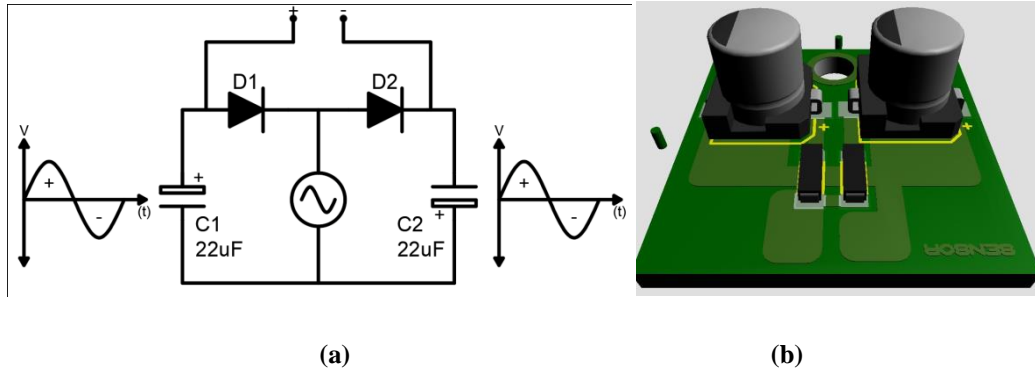
Ohm kanuna göre, elde edilen gerilim değeri sabit direnç altında düşürüldüğünde akım değerinin yükselmesi beklenmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için depolanmış bir gerilim değerine ihtiyaç vardır. Alternatif gerilimi depolanamadığı için piezoelektrik sensörden elde edilen AC gerilimi bir AC-DC dönüşüm kartı tasarlanarak depolama ünitesine DC gerilim olarak yönlendirilmektedir. Böylelikle hem verim yüksek olacak hem de üretilen gerilimin yönlendirilmesi ve kullanımı daha kolay olacaktır [23].



Şekil 2. Piezo Kart ile Oluşturulmuş Seri Gruplama

Bu nedenle bu çalışmada hem birden fazla PEH' i minimum gerilim kaybı ile doğrultan hem de uygun şekilde bir bağlantı ile birbirine bağlayan yeni bir devre topolojisi kullanılmaktadır [30]. Kullanılan devre topolojisi şekil 2'de gösterildiği gibidir. Şekil 2'de verilen devreye Kirchhoff gerilim yasası uygulandığında çıkış geriliminin kondansatör gerilimlerinin toplamı ($V_{OUT} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$) olduğu görülmektedir. Şekil 2 incelendiğinde PEH' ler tarafından üretilen gerilimin hem en az gerilim kaybı ile doğrultulduğu hem de dönüştürücüler arasındaki elektriksel bağlantının etkin bir biçimde yapıldığı görülmektedir. Ayrıca dönüştürücülerin birbiri üzerinden akım akıtamaması da diğer önemli bir husustur. Ek olarak kullanılan devre topolojisinde bir veya daha fazla dönüştürücünün arızalanması diğer dönüştürücülerden enerji hasadına engel olmamaktadır [31].

Bu devre topolojisi kullanılarak bir Piezoelektrik Titreşim Sensörü DC Hasat Kartı Tasarımı yapılmıştır [23]. Şekil 3a'da görüldüğü gibi kart tasarımında temel olarak gerilim ikileyici devre mantığı ile AC gerilimi DC gerilime dönüştürme işlemi yapılmaktadır. AC gerilim pozitif çevrimde iken Şekil 3'te bulunan D2 diyotu üzerinden geçerek C2 kondansatörünü şarj etmektedir. AC gerilim negatif çevrimde iken D1 diyotun iletimde olacaktır ve C1 kondansatörü şarja geçecektir ve şarj esnasında C7 kondansatörü deşarja geçecek ve çıkışlarda devamlı pozitif gerilim görülecektir. Tekrar çevrim pozitif pozisyona geçtiğinde C1 kondansatörü deşarja geçecek ve üretilen AC gerilim DC gerilime dönüştürülmüş olacaktır. Oluşturulan piezoelektrik sensör kartı tasarımının seri gruplar halinde bağlanarak üretilen gerilimin DC (Doğru akım) olarak toplanması esasına dayanarak bir elektrik üretimi gerçekleştirilir [22]. Yapılan tasarım ve test aşamasından sonra devrenin ne kadar küçültülebileceği hesaplanarak bütünsel sensör ve küçük devrelerde kullanılan yüzey dokunmalı (SMD) elektronik devre elemanları kullanılmıştır. Şekil 3b'de bu DC hasat kartın baskı devresi ve üç boyutlu şekli verilmiştir. Boyut olarak Şekil 3b'de görüleceği gibi 20mm ye 20mm gibi bir devre oluşturularak inilebilecek minimum devre boyutuna inilmiştir.



Şekil 3.(a) Piezoelektrik Hasat Kartı Çalışma Prensipleri (b) Üç Boyutlu Hasat Kart

C. DEVRE TASARIMINDA KULLANILAN ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARI

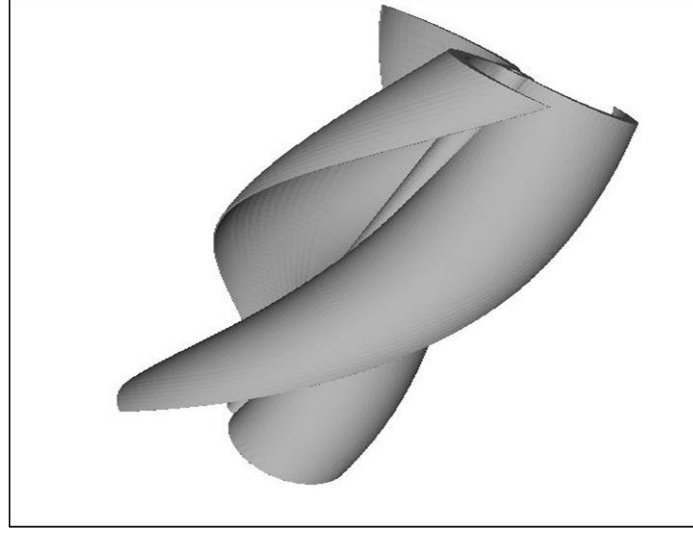
MBR0560 0,5A 60V Schottky Diyot: SOD123 yüzey dokunmalı kılıf yapısına sahip olan şotki diyot seçilmesinin başlıca sebebi 0,45 Volttan itibaren iletme geçiyor olmasıdır. Çünkü seçilen diyot ne kadar küçük gerilim değerlerinde iletme geçerse gerilim kaybı minimum düzeyde olacaktır. Gerilim maksimum gerilim değerinin 60v olması ise piezoelektrik sensörden gelecek olan gerilim değerini kayıpsız taşıyabileceği için seçilmiştir [23,31].

22uF 16V SMD Elektrolitik Kondansatör: ELEC-6.3 kılıf yapısına sahip olan elektrolitik kondansatör 16v değerine kadar şarj olabilmektedir. Kapasite olarak 22uF (mikrofarad) seçilmesinin sebebi piezoelektrik malzemeden gelen enerji titreşimle doğru olarak frekansın oldukça fazla oluşu yani pozitif alternanstan negatif alternansa geçişin hızlı olması sebebi ile kapasite düşük tutulmaktadır.

Böylece alternatif gerilimden doğru gerilime geçişin eksiksiz ve birbirini tamamlar seviyede olması sağlanmaktadır [23, 31].

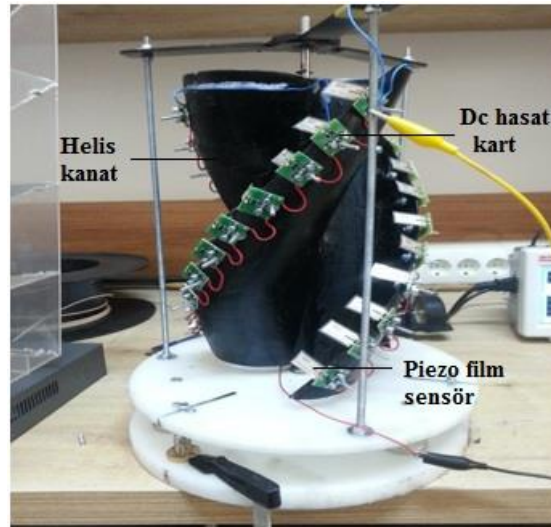
III. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmadan piezoelektrik maddelerin elektrik üretici olarak kullanımı için bir 3 boyutlu dikey eksen helis yapılı üç kanatlı bir yapı modellenmiştir. Bu modelleme işleminin ardından Şekil 4'te görüleceği gibi helis kanatlı dikey eksen rüzgâr terminali oluşturulmuştur [28].



Şekil 4.3 Kanatlı, Dikey Eksen Rüzgâr Hasat Kanatları Modeli

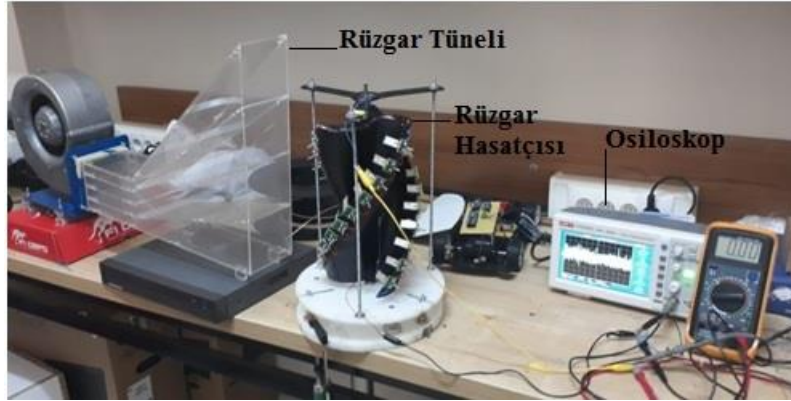
Bu kanat yapısındaki amaç 120 derecelik açılar ile yerleştirilen kanatlar rüzgâr yönü fark etmeksizin en güçlü yönden gelen rüzgârı elips yapılı kanatlarının içinde toplayarak ortasındaki dikey eksen yönünde yukarıya taşımaktadır. Kanatların üzerine yerleştirilen piezoelektrik sensör ile bu rüzgârın girişi ve çıkışı sırasındaki titreşimden ve basınçtan faydalanarak elektrik enerjisi dönüşüm işlemi gerçekleştirmektedir [23]. Şekil 5'te dikey eksen üzerine yerleştirilmiş helis yapılı kanatlar üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim hasat kartları görülmektedir.



Şekil 5. Piezoelektrik Titreşim Hasat Kartlarının Seri Gruplar Halinde Kanatlar Üzerine Yerleşimi

Rüzgâr tüneli ile test işlemlerine başlamadan önce 3 boyutlu yazıcı ile oluşturulan kanat üzerine 30 adet piezoelektrik titreşim ile enerji hasat kartlarını her kanadın üzerine 10 adet düşecek şekilde yerleştirilerek birbirleri ile seri bağlantı oluşturulmuştur. Piezoelektrik titreşim hasat kartlarının yerleşim işlemi bittikten sonra tüm mekanizma 120 derecelik açı ile yerleştirilmiş yaylı trapezler üzerine oturtulmuştur. Kullanılan trapez yaylar sistemin rüzgâr karşısında salınımını kolaylaştırırken rüzgârın akışının kesildiği anlarda başlangıç durumuna dönmesini sağlayacaktır. Trapez yaylar kullanılarak piezoelektrik titreşim üreticinin en verimli çalışma şekli rüzgâr basıncı, yay titreşimi ve salınım olayları sağlanmıştır [23]. Yaylar üzerine oturtulan sistem rezonans değerini desteklemek amaçlı N-N veya S-S kutupları birbirini görecektir şekilde yine 120 derecelik açı ile taban ve mekanizma arasına hava delikli neodyum mıknatıslar yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslar yaylardan doğacak olan salınımın sıklığını artırmak amaçlı birbirini iten bir yapı oluşturularak salınımın devamlılığını sağlamıştır. Sistem üzerinde bulunan dikey eksen hem alttan hem de üstten yerleştirilen transmisyon mili üzerinden üretilen enerji kablolar vasıtası ile sistemin dışına aktarılmıştır [23].

Ölçüm ve test aşamalarında bütün test kademelerinde kullanılma üzere paralel ölçüm alacak şekilde 1 adet osiloskop ve 3 adet multimetre kullanılmıştır. Ölçülmesi hedeflenen akım değeri seviyeleri mikroamper (μA) seviyelerinde olduğu için ölçüme en uygun hassasiyete sahip ölçüm cihazları tercih edilmiştir. Kablolama işlemi ise piezoelektrik titreşim üreticilerinin verimini olumsuz yönde etki etmeyecek şekilde rüzgâr tünelinin arka planında kablolama işlemi yapılmıştır. Rüzgâr hızını (m/s) tespit etmek için kullanılan analog anemometre için ise bir adet multimetre ile çıkışındaki gerilim değerine göre rüzgâr hızının tespiti gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da rüzgâr test esnasında kullanılan ölçüm düzeneği ve yapılan ölçüm işlemleri görülmektedir [23].



Şekil 6. Rüzgâr Testlerinde Kullanılan Deney Düzeneği

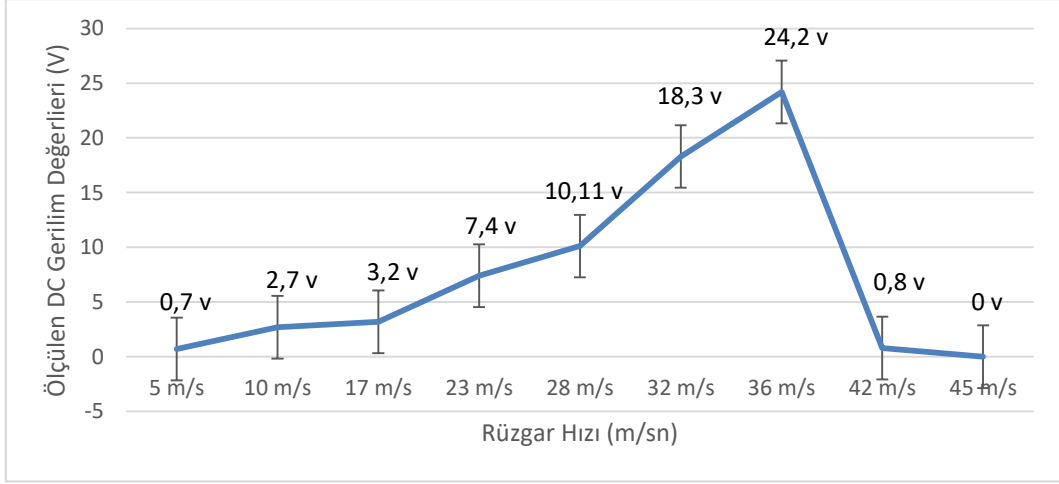
A. DENEY SONUÇLARI

Gerilim ölçümleri deney düzeneği kurulumunun ardından rüzgâr tüneli ile sabitlenerek düşük rüzgâr hızından yüksek rüzgâr hızlarına doğru gidilerek test işlemi ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerin sağlıklı olması amacı ile 3 adet voltmetre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ile rüzgâr tüneli arasına anemometre yerleştirilerek deney düzeneği üzerinde bulunan kanatlara çarpan rüzgâr hızı metre/saniye cinsinden hesaplanmıştır.

Şekil 5'te oluşturulan grafikte rüzgâr değerlerine göre üretilen maksimum gerilim değerleri görülmektedir.

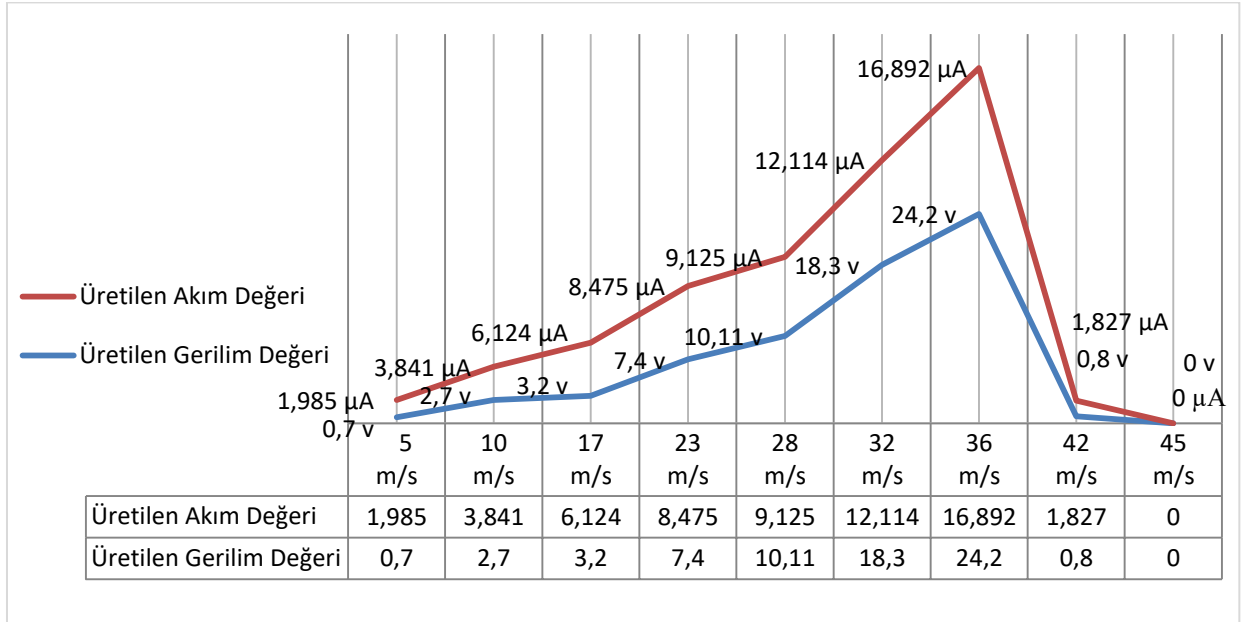
Düşük rüzgâr hızlarından oluşan rezonans düşük olduğu için erişilen gerilim değerleri oldukça düşük değerdedir. Piezoelektrik titreşim üreticileri üzerine düşen rüzgâr miktarının artması sonucu rezonans değerinin de artması ile yüksek gerilim değerlerine ulaşılmıştır. Piezoelektrik titreşim yaprakları üzerine giren ve çıkan rüzgâr miktarı ne kadar hızlıysa üretilen enerji miktarı da o kadar yüksektir. 36

m/s'deki gerilim değeri 24,2v'tur ve bu değer ulaşabildiğimiz maksimum değerdir. Bundan sonraki hızlarda dikey eksen türbinin gövde ve kanatlarda yaşanan hava akımı rezonansının sifıra yaklaşması PEH'lerde üretimin durmasına neden olduğu görülmüştür. Şekil 7'de görüldüğü gibi 36 m/s hızda maksimuma ulaşan üretim daha yüksek hızlarda düşmekte ve rüzgâr akımı 45 m/s hıza geldiğinde rezonans sıfırlanarak üretimin durduğu tespit edilmiştir. Artık PEH'ler rezonansın sıfır olması sebebi ile üretim yapmayı kesmiştir.



Şekil 7. Ölçülen Maksimum Gerilim Değerleri

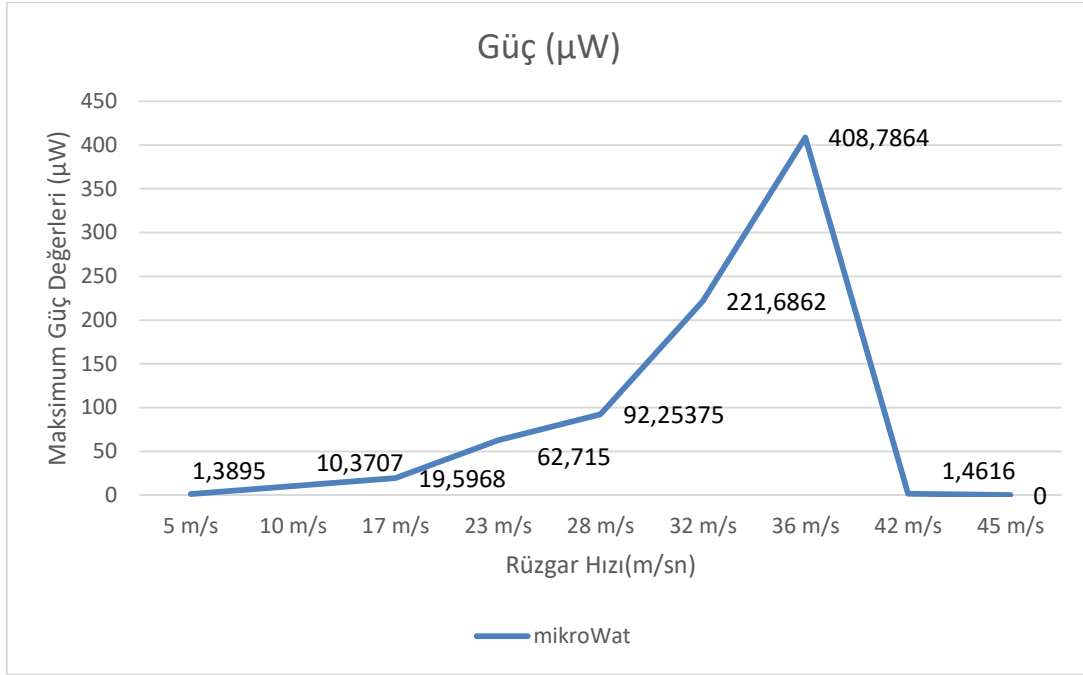
Şekil 8'de ise rüzgâr hızına göre Gerilim/Akım Artış Eğrileri görülmektedir. 36 m/s rüzgâr hızındaki akım değeri 16,892 μ A'dır. Bu değer yükselen rüzgâr hızlarında üretimin durmasına bağlı olarak sifıra doğru kırılma eğrisi gösterdiği incelenmektedir. Buradan devamlı ve yüksek hızlı rüzgârların üzerine etki ettiği rezonans gücünün yitirdiği sonucuna varabiliriz. Şekil 8 de bu söylevi destekler niteliktedir.



Şekil 8. Rüzgâr Hızına Göre Gerilim Akım Artış Eğrileri

Burada rüzgâr hızına göre elde edilen güç verilerini grafiksel olarak Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen güç de belli bir rüzgâr hızına kadar doğru orantılıdır. Rüzgâr hızı arttıkça yaşanan rezonans artmaktadır. Fakat rüzgâr hızı arttıkça hem türbin gövdesinde hem de PEH'lerde rezonans sifıra indiği

için üretim durmaktadır. Maksimum çıkış gücü 36 m/s (metre/saniye) hızda 408,79 μ W olarak tespit edilmiştir. Bu tasarımda maksimum üretim 36 m/s sabit rüzgâr altında elde edildiği görülmektedir.



Şekil9. Rüzgâr Hızlarına Göre Maksimum Çıkış Gücü Değerleri

IV. SONUC

Bu çalışmada düşük güçlü uygulamalar için deneysel bir rüzgâr jeneratörü tanıtılmıştır. Bu jeneratör, helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim enerji kartlarından meydana gelmiştir. Rezonans değerini yükseltmek amacıyla sensörlerin üstüne trapez yayları ve neodyum mıknatıs monte edilmiştir. Titreşim temelli olan bu çalışma rüzgâr ile birlikte kullanılan yay ve mıknatıslar ile birlikte diğer mekanik enerji kaynakları ile hibrit bir üretimin gerçekleşeceğini göstermiştir.

- Yedi farklı rüzgâr hız aralığı için yapılan deneylerde elde edilen maksimum çıkış gücü değerleri sırası ile 1,3895 μ W, 10,3707 μ W, 19,5968 μ W, 62,715 μ W, 92,25375 μ W, 221,6862 μ W ve 408,7864 μ W'tır.
- Kullanılan arayüzdevresinin yapısından dolayı PEH sayısı ve çıkış gücü arasında doğrusal bir oran vardır. Bu sebeple PEH sayısı artırılarak tanıtılan jeneratör yapısı mW ölçekli çıkış gücüne sahip aygıtlar için bataryasız güç kaynağı olarak kullanılabilir.
- Tasarlanan bu jeneratörün önemli bir avantajı ise küçük çaplı uygulamalar ve dik kanat yapısı ile çok küçük bir türbülans alanı ile hem görüntü hem de kompakt tasarımı sayesinde çevreyi rahatsız etmeyen bir yapıda olmasıdır.
- Bir de dikey eksen olması ile birlikte türbülans değerini artırmak amaçlı eksen boyunu uzatarak verimi artırılabilir.
- Yapılan karşılaştırma testlerinde dikey eksen rüzgâr türbinlerinde kanat yapısına göre hava çıkışı ya aşağı yönlü ya da yukarı yönlü olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda piezoelektrik hasatçıların hibrit üretimde kullanılması sonucunda türbin hızı üzerinde elle tutulur bir olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür.

Piezoelektrik hasatçıların değişken yönlü rüzgârlarda enerji üretimi konusunda daha verimli olabileceği öngörülmektedir. Fakat enerji üretiminin stabil olmayacağına inanılmaktadır. Yüksek

hızlarda maksimum üretim yapıldığı fark edildiği için fabrika bacaları, yüksek basınç tankları tahliyeleri gibi yapay hava akımının olduğu yerlerde kullanımı daha uygundur.

V. KAYNAKLAR

- [1] Kayıkçı, Z., Akarsu, C., Sönmez, V.Z., & Sivri, N. (2023). Atık su Arıtma Tesislerinde Sürdürülebilir Enerji Üretimi için Mikro Hidroelektrik Teknolojisi Kullanımı: İstanbul Örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*.
- [2] Li, T., & Lee, P. S. (2022). Piezoelectric energy harvesting technology: from materials, structures, to applications. *Small Structures*, 3(3), 2100128.
- [3] Liu, Y., Khanbareh, H., Halim, M. A., Feeney, A., Zhang, X., Heidari, H., & Ghannam, R. (2021). Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications. *Nano Select*, 2(8), 1459-1479.
- [4] C.L. Yang, K.W. Chen, and C.D. Chen, "Model and Characterization of a Press-Button-Type Piezoelectric Energy Harvester", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 1, pp. 132-143, 2019.
- [5] J. Schoeftner and G. Buchberger, "A contribution on the optimal design of a vibrating cantilever in a power harvesting application—Optimization of piezoelectric layer distributions in combination with advanced harvesting circuits," *EngStruct*, vol. 53, no. 92, pp. 101, 2013.
- [6] Q. Luo and V. Tong, "Design and testing for shape control of piezoelectric structures using topology optimization." *EngStruct*, vol. 97, pp. 90–104, 2015.
- [7] H. Lee, H. Jang, J. Park, S. Jeong, T. Park and S. Choi, "Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 141, pp. 32–44, 2013.
- [8] Y. Cao, J. Li, A. Sha, Z. Liu, F. Zhang and X. Li, "A power-intensive piezoelectric energy harvester with efficient load utilization for road energy collection: Design, testing, and application", *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, pp. 133287, 2022.
- [9] C. Wei and H. Taghavifar, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: half-vehicle model", *Energy*, vol. 134, pp. 279-288, 2017.
- [10] A. Moure, M.A. Izquierdo Rodríguez, S. Hernández Rueda, A. Gonzalo, F. Rubio-Marcos, D. Urquiza Cuadros, A. Pérez-Lepe, J.F. Fernández, "Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 246–253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.030>
- [11] A. Jasim, H. Wang, G. Yesner, A. Safari and A. Maher, "Optimized design of layered bridge harvester for piezoelectric energy harvesting from roadway." *Energy*, vol. 141, pp. 1133–1145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.005>.
- [12] A. Jasim, G. Yesner, H. Wang, A. Safari, A. Maher and B. Basily, "Laboratory testing and numerical simulation of PEH for roadway applications", *Appl. Energy*, vol. 224, pp. 438–447, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.040>.

- [13] A.F. Jasim, H. Wang, G. Yesner, A. Safari and P. Szary, "Performance analysis of piezoelectric energy harvesting in pavement: laboratory testing and field simulation." *Transport. Res. Rec.* vol. 2673, pp. 115–124, 2019.
- [14] F. Khoshnoud, D.B. Sundar, M.N.M. Badi, Y.K. Chen, R.K. Calay and C.W. De Silva. "Energy harvesting from suspension systems using regenerative force actuators", *Int J Veh Noise Vib*, vol. 9, no. 3-4, pp. 294-311, 2013.
- [15] X.D. Xie, Q. Wang and N. Wu, "Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate", *International Journal of Engineering Science*, vol. 81, pp. 41–48, 2014.
- [16] Shan, X., Shan, R., Song, B., Liu, B., & Xie, T., "Novel energy harvesting: A macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex", *Ceramics International*, vol. 41, pp. 763–767, 2015.
- [17] W. Cai, V. Roussinova and V. Stoilov, "Piezoelectric wave energy harvester", *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 973-982, 2022.
- [18] N.V. Viet, X.D. Xie, K.M. Liew, N. Banthia and Q. Wang, "Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester", *Energy*, vol. 112, no. 1, p. 1219e1226, 2016.
- [19] X.D. Xie, Q. Wang and N. Wu, "Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves", *J. Sound Vib.* vol. 333, no. 5, p. 1421e1429, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.11.008>.
- [20] N. Yeong-min, L. Hyun-seok and P. Jong-kyu, "A study on piezoelectric energy harvester using kinetic energy of ocean", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 10, 4747-4755, 2018.
- [21] G. Acciari, M. Caruso, R. Miceli, L. Riggi, P. Romano, G. Schettino and F. Viola, "Piezoelectric Rainfall Energy Harvester Performance by an Advanced Arduino-Based Measuring System" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1 (January/February), pp. 458-468, 2018.
- [22] W. Wang, J. Cao, C.R. Bowen, S. Zhou and J. Lin, "Optimum resistance analysis and experimental verification of nonlinear piezoelectric energy harvesting from human motions", *Energy*, vol. 118, pp. 221-230, 2017.
- [23] A.C. Turkmen and C. Celik, "Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe", *Energy*, vol. 150, pp. 556-564, 2018.
- [24] M.A. Johar, J.H. Kang, M. A. Hassan and S.W. Ryu, "A scalable, flexible and transparent GaN-based heterojunction piezoelectric nanogenerator for bending, air-flow and vibration energy harvesting", *Applied Energy*, vol. 222, pp. 781–789, 2018.
- [25] S. Akkaya Oy, A. E. Özdemir, "Piezoelectric based low power wind generator design and testing", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, no. 6, pp. 2759–2767, 2018.
- [26] S. Akkaya Oy, "A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle". *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* vol. 30, p. e12655, 2020.
- [27] A. Ballato, "Piezoelectricity: History and new thrusts". *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings.* San Antonio, USA, 1996.
- [28] O.G. Usta, "Rüzgâr temelli piezoelektrik jeneratör tasarımı ve MPPT ile kontrolü", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye, 2019.

[29] R.S. Dahiya and M. Valle, *Robotic Tactile Sensing*. Springer, New York, 2013.

[30] A. Ozdemir, “A novel circuit topology for piezoelectric transducers in a piezoelectric energy harvester”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, pp. 2105-2110, 2019.

[31] S. Akkaya Oy, “A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting”, *Scientia Iranica*, vol. 28, no. 6, pp. 3504-3511, 2021.