



# Lazer tabanlı sensörler kullanılarak rüzgâr hızı ve yönü ölçüm cihazı tasarımı

## Design of wind speed and direction measurement device using laser-based sensors

İbrahim Işıklı<sup>1,\*</sup> , Bayram Köse<sup>2</sup> , Mehmet Sağbaşı<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup>Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Menemen/İzmir, Türkiye

### Öz

Rüzgâr hızı ve yönü ölçümlerinde çeşitli anemometreler ve yön belirleme cihazları kullanılmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ve tahminleri için uygun maliyetli, hassas ölçüm aletlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, lazer mesafe sensörleri, mikrodenetleyiciler ve bütünleşmiş elektronik devreler kullanarak bir anemometre tasarlanmıştır. Tasarım, ölçüm merkezinden sapan mesafeye göre rüzgâr hızı ve yönü ölçmektedir. Bu mesafe sayısal olarak hesaplanarak rüzgâr verileri elde edilmiştir. Mevcut tekniklerden farklı olarak tasarlanan bu yöntem, gerçek bir anemometre ile karşılaştırılmış ve hata analizi yapılmıştır. Hata analizi sonucu bağıl hata değeri 0.01685 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada kullanılan yöntem, düşük maliyetli ve hassas bir anemometre tasarlama açısından önemli sonuçlar vermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Rüzgâr enerjisi, Rüzgâr hızı ölçümü, Rüzgâr yönü Tespiti, Anemometre, LIDAR sensör, Optoelektronik, Optik mesafe ölçümü

### 1 Giriş

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında temel bir enerji türüdür ve son on yılda %30 oranında büyüyerek önemli bir gelişme göstermiştir [1]. Rüzgâr enerjisinin üretim verimliliği; rüzgar hızı, hava yoğunluğu, hava basıncı, ortam sıcaklığı, rüzgar hızı dağılımı ve türbülans yoğunluğu gibi parametrelerden etkilenir [2]. Rüzgâr türbininden elde edilen güç, rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır [3], bu nedenle rüzgâr çiftliklerinin kurulumunda rüzgârın hızı çok büyük önem taşımaktadır [4].

Rüzgâr çiftliği sahasının geliştirilme, işletme ve enerji analizi gibi pek çok aşamasında rüzgâr hızı ve yönünün ayrıntılı bilgisi gereklidir. Bu bilgiler genellikle anemometreler ve anemometrelere yardımcı ek ekipmanlar ile toplanır.

Anemometreler, İtalyan matematikçi Leone Battista Alberti tarafından geliştirildiği ilk günden beri rüzgâr hızını farklı şekillerde ölçmek için kullanılmaktadır [5]. Bu farklı tekniklerin kullanılması ile rüzgârdan elde edilen enerji verimliliğini artırmak, enerji maliyetlerini düşürmek ve

### Abstract

Different types of anemometers and direction determining devices are used in measuring wind speed and direction. Especially, low-cost and accurate measuring devices are required for the production and estimates of electricity generated from wind energy. Therefore, a design for an anemometer has been carried out using appropriate low-cost laser distance sensors, microcontrollers, and integrated electronic circuit equipment. The resulting anemometer from the design works based on the distance from the measurement center that changes according to wind speed and direction. The wind speed and direction data are obtained by digitally calculating this distance. By following a different approach than the existing techniques in measuring wind speed and direction, the data obtained in this method was compared with a real anemometer and an error analysis was performed. The relative error value was found to be 0.01685 as a result of the error analysis.

**Keywords:** Wind energy, Wind speed measurement, Wind direction determination, Anemometer, LIDAR sensor, Optoelectronic, Optical distance measurement

rüzgâr hızını doğru bir şekilde belirlemek hedeflenmiştir. Bundan dolayı anemometreler, kurulacak yeni rüzgâr enerjisi santrallerinin potansiyelinin belirlenmesinde önemli bir role sahiptir [6].

Son yıllarda, rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşması ve mikro üretim kapsamında akıllı şebekelere dâhil edilmesi anemometrelerin daha da önemli hale gelmesine neden olmuştur [7]. Bu nedenle, düşük maliyetli ve basit ölçüm sistemleri olan anemometrelere olan ihtiyaç da artmaktadır. Ayrıca, anemometrelerin geniş çapta benimsenmesi, küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşmasını teşvik etmektedir [8].

Anemometreler rüzgâr hızını ölçmek için, farklı prensiplere göre mekanik [9], sıcak tel [10], ultrasonik [11], LIDAR (Light Detection and Ranging) [12] veya fiber optik [13] olarak üretilebilirler. Bu anemometrelerin yanı sıra, hava akışını algılamak üzere pitot tüpü ile ölçüm çalışmaları yapılmaktadır [14].

Farklı prensiplere göre çalışan bu anemometreler kendine has dezavantajlar içerir [15]. Mekanik anemometrelerin

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: isikli.ibrahim@outlook.com (İ. Işıklı)

Geliş / Received: 03.04.2023 Kabul / Accepted: 29.05.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1276016

dezavantajı, elektriksel ortamlardan etkilenmeleridir [16-17]. Ultrasonik anemometreler, bir diğer adı ile SODAR (Sound Detection and Ranging) tabanlı anemometrelerde elektromanyetik parazitlenmelerden dolayı ölçüm hatalarına rastlanabilirken [18]; sıcak tel anemometrelerinde ise sınırlı kalibrasyon ve çalışma sıcaklığı aralığı nedeniyle kullanım alanları daralmaktadır [19].

Günümüzde artan enerji tüketimine bağlı olarak rüzgâr türbinlerinin boyutları büyüme eğilimindedir. Rüzgâr türbinlerinin büyümesiyle sektörde sık tercih edilen mekanik anemometrelerin kurulumu, maliyetli hale gelmiş ayrıca kurulumları da zorlaşmıştır [20]. Bu durum, rüzgâr çiftliklerinde uzaktan algılamalı anemometrelerin talep edilmesine yol açmıştır [21]. Uzaktan algılamalı anemometreler, LIDAR ve SODAR teknolojilerini kullanarak rüzgâr çiftliğinde planlanan yüzlerce metre yükseklikteki ölçümleri gerçekleştirebilir [22].

LIDAR ve SODAR teknolojileri, havadaki rüzgâr hızı ve yönünü ölçmek için kullanılan uzaktan algılamalı teknolojilerdir. LIDAR anemometreler, hava hareketlerini ölçmek için lazer ışınlarını kullanmaktadır. Bu ışınlar, havada bulunan aerosoller veya diğer partiküller tarafından yansıtılmakta ve anemometre tarafından alınmaktadır. Bu yansımanın frekansı ve yönü, hava hareketlerinin hızını ve yönünü belirlemektedir. Bu ölçümler, hava hareketlerinin 3 boyutlu bir şekilde ölçülmesine yardımcı olmaktadır [23].

SODAR anemometreler ise, hava hareketlerini ölçmek için ses dalgalarını kullanmaktadır. Bu cihazlar, ses dalgalarının yansımasını kullanarak hava hareketlerinin yönünü ve hızını ölçmektedir [24]. Ancak, SODAR anemometrelerin ölçümleri daha az hassas olabilmekte ve daha küçük bir ölçüm aralığına sahip olabilmektedir [24].

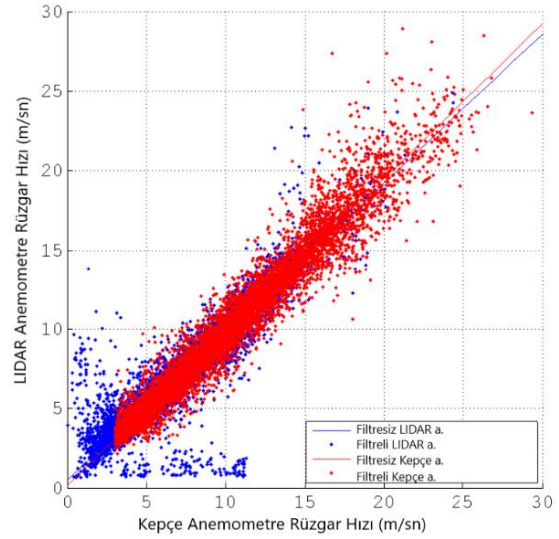
LIDAR anemometreler, SODAR anemometrelerden daha hassas ve daha doğru ölçümler yapabilmektedirler [25]. Bunun nedeni, LIDAR teknolojisinin daha yüksek çözünürlük sağlamasıdır. Ayrıca, LIDAR anemometreler, SODAR anemometrelerden daha uzun mesafelerde ölçüm yapabilmekte ve hava koşullarının etkisini azaltarak daha güvenilir ölçümler yapabilmektedir [25].

LIDAR ve SODAR teknolojilerinin avantajı, ölçüm direklerinin ve kepece anemometrelerinin kullanımının zor veya imkânsız olduğu engebeli sahalarda bile yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilmeleridir. Ayrıca, mekanik anemometreler gibi hareket eden parçalara sahip olmaması nedeniyle daha az bakım gerektirir ve daha uzun ömürlüdür [25].

LIDAR ve SODAR cihazları aynı anda bir alanın tümünde rüzgâr hızını ölçebilir, bu özellik rüzgâr çiftliklerinin tasarımı ve optimizasyonu sürecinde çok yararlı olabilir. Ancak, LIDAR ve SODAR teknolojilerinin dezavantajı maliyetlerinin yüksek olmasıdır [26].

Yapılan araştırmalarda uzaktan algılamalı anemometrelerin, piyasada yaygın olarak kullanılan kepece anemometresinden daha doğru bir sonuç elde ettiği gözlemlenmiştir [24]. Lang ve McKeogh tarafından 2008 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, Doppler rüzgâr LIDAR'ı kullanılarak 80 m yükseklikte rüzgâr hızı ölçümleri yapılmış ve veriler kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır [24]. Daha sonra bu araştırmada aynı yükseklikte kepece

anemometresi kullanılmış, elde edilen sonuçlarla iki ölçüm cihazı ve yönteminin regresyon analizleri Şekil 1'de görüldüğü üzere karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Kepece anemometresi ve Doppler rüzgâr LIDAR'ı verilerinin karşılaştırılması

Yapılan bu çalışmada LIDAR yönteminin kepece anemometresi ile iyi uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. LIDAR anemometrelerde oldukça yaygın olarak kullanılan Doppler prensibi, kepece anemometresi ile uyumlu sonuç vermesine karşın oldukça maliyetli kurulum ve bakım hizmetine sahiptir. Bunun yanında LIDAR teknolojisi kullanarak farklı tekniklerle de rüzgâr hızını hesaplamak mümkündür.

Rüzgâr hızı ölçümlerinde kullanılan LIDAR anemometreler, Doppler etkisine dayanarak ışınım sırasında meydana gelen frekans kaymalarına göre veri elde edebilirler [27]. Bu şekilde çalışan LIDAR anemometrelere, Doppler rüzgâr LIDAR'ı denir. Bu LIDAR'lar, hava molekülleri ve aerosoller tarafından saçılan ışığın; lazer ile karşılaştıklarında meydana gelen Doppler frekans kaymasını saptayarak rüzgâr hızını ölçer [27]. Şekil 2'de bir Doppler rüzgâr LIDAR'ının ölçüm yöntemi gösterilmiştir.

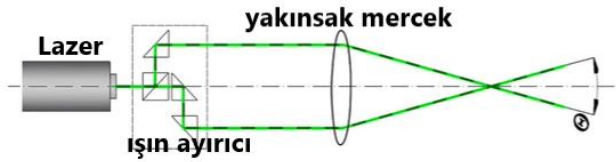


Şekil 2. Doppler rüzgâr LIDAR'ı çalışma prensibi

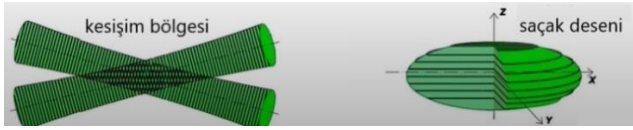
Doppler rüzgâr LIDAR'ı, havada bulunan  $N_2$  ve  $O_2$  moleküllerinin veya havada asılı kalan aerosollerin hareketini; geri saçılan ışın demetlerinin, Doppler frekans

kayması değerinin bulunması ile ölçer. Doppler prensibine göre, bu frekans kayması, saçılım hattı yönündeki rüzgâr hızı ile doğrudan ilişkilidir [27]. Doppler rüzgâr LIDAR'ında kullanılan yöntem, yüksek hassasiyet ve gelişmiş alıcı duyarlılığına sahiptir ancak çalışabileceği aralık moleküler dönüşün zayıf olduğu kızılötesi bölgeyle limitlidir. Sonuç olarak kullanım alanı, gezegenimizin sınır tabakası kapsamında yüksek aerosol içeriğine sahip bölgelerle sınırlıdır [27].

Doppler rüzgâr LIDAR'ının frekans kaymasını ölçebilmek için kurulan düzenek Şekil 3'te en basit haliyle gösterilmiştir. Ana kaynak olarak kullanılan lazer, bir ışın gönderir. Gönderilen ışın, bir ışın ayırıcıya girerek iki ışın demeti elde edilir ve elde edilen bu iki ışın demeti, yakınsak mercek kullanılarak kesleştirilir [28]. Bu kesişim sonunda oluşan iki ışın demetinin ortak bölgesi 'saçak deseni' olarak adlandırılır. Şekil 4'te saçak deseni bölgesi gösterilmiştir.

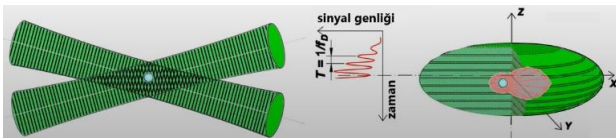


Şekil 3. Doppler rüzgâr LIDAR'ı çalışma prensibi



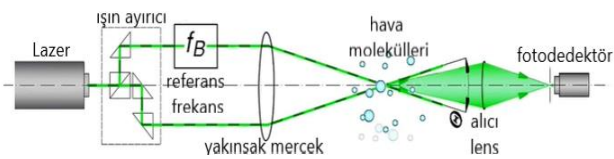
Şekil 4. Kesişim bölgesi ve saçak deseni

Hava molekülleri ve aerosoller oluşan bu saçak deseni deseninin içinden geçer, bu geçiş esnasında saçak deseninde ışınımına maruz kalan bu parçacıklar Şekil 5'te görüldüğü üzere Doppler frekansına sahip bir Doppler patlama sinyali üretir. Üretilen bu sinyal alıcı lens yardımıyla fotodedektöre iletilir. Ana kaynaktan çıkan ışın demetinin frekansı belirlenerek elde edilen bu iki frekans verisinden Doppler frekansına ulaşılır [28].



Şekil 5. Doppler patlama sinyali

Şekil 6'daki kurulu düzenek sonucu elde edilen doppler frekansı ( $f_D$ ) ve referans frekansı ( $f_B$ ) arasındaki bağıntı;  $\lambda$ , lazer ışının bilinen dalga boyu; S, saçak aralığı;  $\theta$ , kesişim açısı olmak üzere Denklem (1)'de verilmiştir [29].



Şekil 6. Doppler patlama sinyali

$$f_D = f_B + \frac{u_n}{s} = \frac{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda} u_n \quad (1)$$

Denklem (1)'de Doppler frekans ( $f_D$ ) formülü yer almaktadır. Doppler lazer anemometresinin, lazer kaynağı tarafından yayılan ışının dalga boyundaki frekansı  $f_B$ 'dir ve bu frekans Doppler lazer anemometresi sisteminde önceden belirlenen sabit değerdir. Hızı  $u$  olan bir akışın, lazer ışınına dik bir yönde hareket etmesiyle algılanan Doppler kayması  $u_n$  ile gösterilir. Denklem (1)'den yola çıkarak saçak deseni kalınlığı ( $d_f$ ), ışın yayılım açısı ( $s$ ), lazer ışınının akışa olan açısı ( $\theta$ ) ve lazer ışınının dalga boyu ( $\lambda$ ) bilindiği takdirde, Saçaklara dik olan hız bileşeni Denklem (2) ile bulunabilir [29].

$$V = d_f f_D = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} f_D \quad (2)$$

## 2 Materyal ve metot

Günümüzde LIDAR tabanlı anemometreler kullanılarak ölçülen rüzgâr hızı, genelde tek yön prensibiyle çalışır ve yüksek aerosol içeriğine sahip bölgelerde kullanımı sınırlıdır. Ayrıca, mevcut kepece anemometreler sadece rüzgâr hızını ölçebilir ve rüzgâr yönü için harici sensörlerle birlikte kullanılması gerekir, bu da maliyeti artırır. Bu nedenlerden dolayı, mevcut anemometrelerin bu dezavantajlarını ortadan kaldıracak yenilikçi bir tasarım üzerinde çalışılmıştır.

### 2.1 Anemometre tasarımı

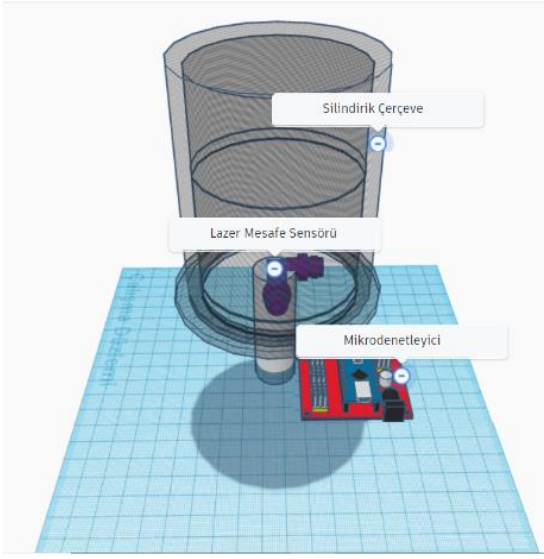
LIDAR teknolojisinin mesafe ölçme metotları ile kurulan bu tasarım Şekil 7'de yer almaktadır. Şekil 7'de gösterilen sistemde, rüzgâr hızına göre değişen geometriye sahip bir silindirik çerçeve, merkezinde iki adet lazer mesafe sensörü ve bir mikrodnetleyici bulunur. Bu sistemde, rüzgâr hızını belirlemek için lazer mesafe sensörlerinin ölçtüğü mesafe ile silindirik çerçevenin geometrisi arasındaki ilişki kullanılır. Bu ölçümler kullanılarak yapılan matematiksel hesaplamalar sonucu rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü verileri elde edilmiştir.

### 2.1 Teorik hesaplamalar

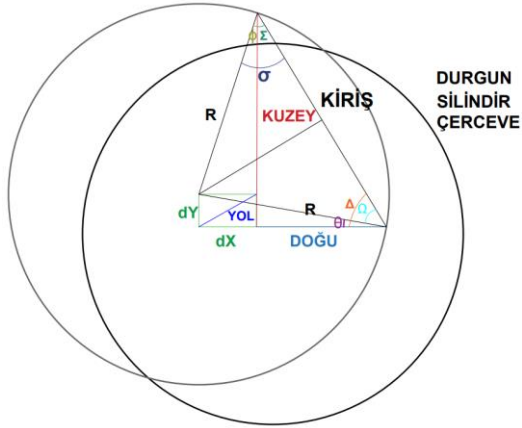
Rüzgâr hızıyla değişen silindir geometrisinin mevcut konumundan sapma miktarı, merkezine konumlandırılmış lazer mesafe sensörlerinin mikrodnetleyici yardımıyla uçuş süresini hesaplamasıyla bulunur. Silindirik çerçevenin rüzgâra bağlı değiştirdiği dört temel konumu içeren hesaplamalar yapılmıştır. Bu dört pozisyon; rüzgârın, anemometrenin bulunduğu konumuna göre kuzeybatı, kuzeydoğu, güneybatı ve güneydoğu yönlerinden estiği durumlarda yapılan geometrik modellemelerdir.

Aşağıda bulunan Şekil 8'de, rüzgârın kuzeydoğu yönünden estiği model bulunmaktadır. Şekil 8'de bulunan geometrik model, incelendiğinde silindirik çerçeveye ait uzunluklar ve açı değişkenleri, Şekil 9, 10 ve 11'de bulunan diğer geometrik modellemeler için de aynı şekilde tanımlanmıştır.





Şekil 7. Cihazın 3 boyutlu tasarımı



Şekil 8. Durum 1

Şekil 8’de bulunan KUZEY ve DOĞU değişkenleri, silindir çerçevenin merkezinde bulunan optik mesafe sensörlerinin anlık olarak ölçtüğü mesafelerdir. KUZEY ve DOĞU değişkenleri rüzgâr hızına bağlı olarak sürekli değişir ve bu durumda rüzgâr hızının hesaplanabilmesi için diğer bir değişken olan KİRİŞ mesafesine ihtiyaç duyulmaktadır. Denklem (3)’de KUZEY, DOĞU ve KİRİŞ üçgenine Pisagor Teoremi uygulanarak KİRİŞ mesafesi hesaplanmıştır.

$$KİRİŞ = \sqrt{DOĞU^2 + KUZEY^2} \quad (3)$$

Silindir merkezinin rüzgâr hızına bağlı sapma miktarını hesaplanabilmesi için dY ve dX değişkenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. dY ve dX mesafeleri için de geometrik modellerde bulunan  $\Omega^0$ ,  $\phi^0$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Delta^0$  ve  $\theta^0$  açılarının hesaplanması gerekmektedir. Şekil 8’de gösterilen bu açılar Denklem (4), (5), (6) ve (7) aracılığıyla bulunur.

$$\Omega^0 = \arccos\left(\frac{KİRİŞ}{2R}\right) \quad (4)$$

$$\Sigma^0 = \arccos\left(\frac{KUZEY}{R}\right) \quad (5)$$

$$\Delta^0 = 90^0 - \Sigma^0 \quad (6)$$

$$\phi^0 = \Omega^0 - \Sigma^0 \quad (7)$$

$$\theta^0 = \Delta^0 - \Omega^0 \quad (8)$$

Açılar elde edildikten sonra dY ve dX mesafeleri Denklem (9) ve (10) kullanılarak bulunur. Şekil 8’de bulunan YOL değişkeni silindir merkezinin rüzgâr hızına bağlı olarak yer değiştirdiği mesafedir. Şekil 8’deki dY, dX ve YOL üçgenine Denklem (11)’deki Pisagor Teoremi uygulanarak YOL mesafesi bulunur.

$$dY = KUZEY - R\cos\phi \quad (9)$$

$$dX = R\cos\theta - DOĞU \quad (10)$$

$$YOL = \sqrt{dY^2 + dX^2} \quad (11)$$

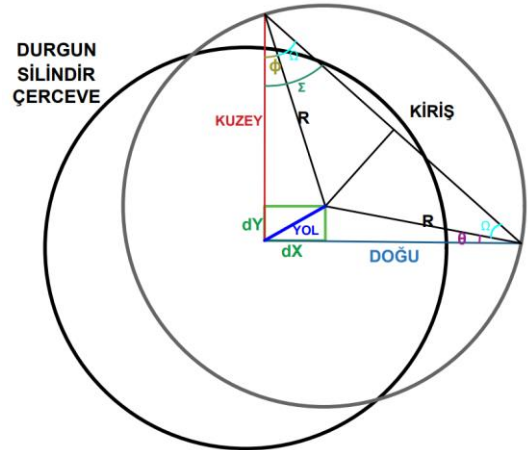
Rüzgâr hızı, elde edilen YOL mesafesinin ölçek faktörü ile çarpılmasıyla bulunur. Bu, Denklem (12)’de gösterilmiştir.

$$\text{Rüzgar Hızı} \left(\frac{m}{sn}\right) = YOL * \text{Ölçek Faktörü} \quad (12)$$

Denklem (12)’deki ölçek faktörü, elde edilen YOL değişkeninin ölçeklenerek rüzgâr hızına çevrilmesini sağlayan bir katsayıdır. Bu katsayı, gerçek bir anemometre ile tasarımda oluşturulan anemometrenin ölçümleri karşılaştırarak elde edilir. Bu çalışmada karşılaştırma için GM186 anemometresi kullanılmıştır.

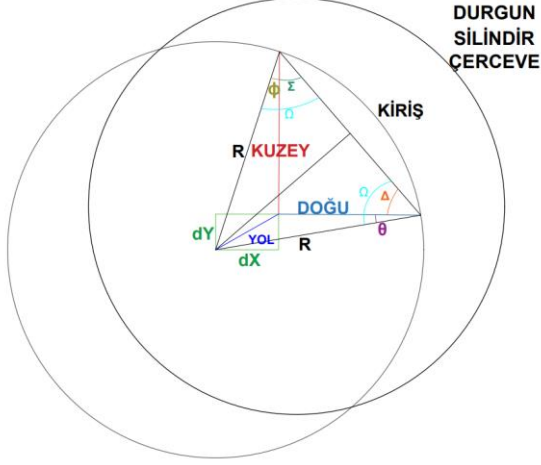
GM186 anemometresinden elde edilen rüzgâr hızı değerlerine göre ölçek faktörü kalibre edilmiştir.

Şekil 8’deki rüzgârın kuzeydoğu yönünden estiği modelde yapılan hesaplamalar, Denklem (3) ve (12) arası denklemlerdeki açıklamalar, Şekil 9, 10 ve 11’deki diğer durumlar için de eşdeğerdir.



Şekil 9. Durum 2

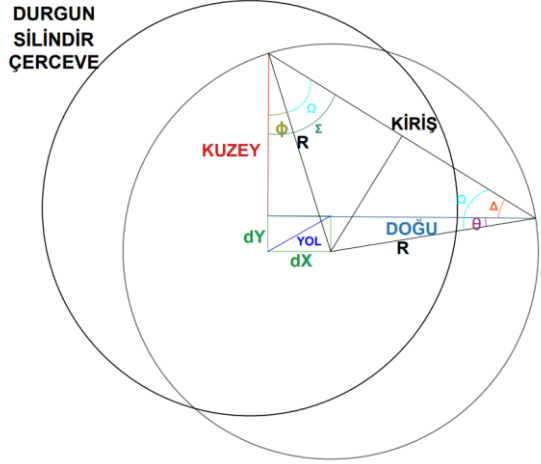
Şekil 9'da rüzgârın kuzeybatı yönünden estiği model bulunmaktadır. Şekil 9'daki durum için rüzgâr hızı hesaplamaları Denklem (3) ve (12) arası denklemlerde verilmiştir.



Şekil 10. Durum 3

Şekil 10'da rüzgârın güneybatı yönünden estiği model bulunmaktadır. Bu durum için rüzgâr hızı hesaplamaları Denklem (3) ve (12) arası denklemlerde verilmiştir.

Şekil 11'de ise rüzgârın güneydoğu yönünden estiği model bulunmaktadır. Bu durum için rüzgâr hızı hesaplamaları Denklem (3) ve (12) arası denklemlerde verilmiştir.



Şekil 11. Durum 4

Dört durum için genel bir denklem oluşturulur:

$$dY = |KUZEY - R \cos\phi| \quad (13)$$

$$dX = |DOĞU - R \cos\theta| \quad (14)$$

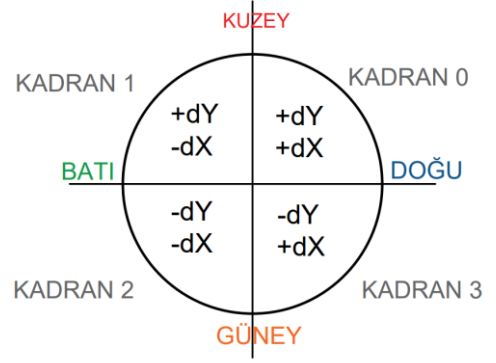
Denklem (13) ve Denklem (14) yeniden düzenlenirse:

$$KUZEY - R \cos\phi - dY = 0 \quad (15)$$

$$DOĞU - R \cos\theta - dX = 0 \quad (16)$$

Denklem (15) ve (16) elde edilir, eğer denklemlerde sıfır sonucuna ulaşılmazsa dY ve dX'in işareti negatiftir. Bu denklemlerden dX ve dY'nin işareti belirlenebilir. Rüzgâr hızı ise Denklem (17)'den bulunabilir.

$$\text{Rüzgar Hızı} = \sqrt{dX^2 + dY^2} * \text{Ölçek Faktörü} \quad (17)$$



Şekil 12. Yönler

Şekil 12'de rüzgâr yönlerine karşılık gelen kadrantlar gösterilmiştir. Kadran 0 rüzgârın kuzeydoğu yönünden estiğini belirtmektedir ve Şekil 8'deki modelle ilişkilidir. Şekil 8'deki modelde anlık rüzgâr yönü verilerinin derece cinsinden hesaplanması için Denklem (18) uygulanmıştır.

$$\text{Kadran 0 için yön} \rightarrow 270 - \left| \arctan \frac{dY}{dX} \right| \quad (18)$$

Kadran 1, rüzgârın kuzeybatı yönünden estiğini belirtmektedir ve Şekil 9'daki modelle ilişkilidir. Şekil 9'daki modelde anlık rüzgâr yönü verilerinin derece cinsinden hesaplanması için Denklem (19) uygulanmıştır.

$$\text{Kadran 1 için yön} \rightarrow 90 + \left| \arctan \frac{dY}{dX} \right| \quad (19)$$

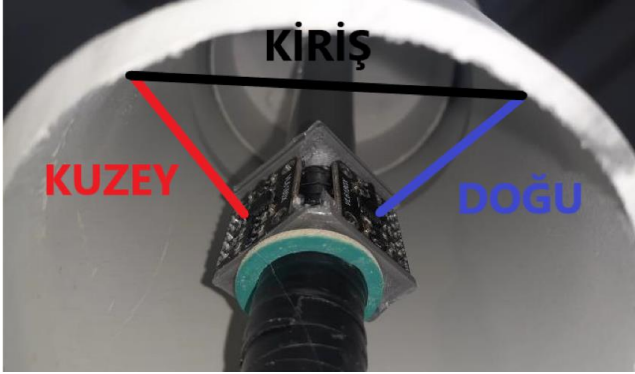
Kadran 2, rüzgârın güneybatı yönünden estiğini gösterir ve bu durum Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'daki modele göre anlık rüzgâr yönü verileri derece cinsinden Denklem (20) yardımıyla hesaplanır.

$$\text{Kadran 2 için yön} \rightarrow 90 - \left| \arctan \frac{dY}{dX} \right| \quad (20)$$

Kadran 3 ise rüzgârın güneydoğu yönünden estiğini belirtmektedir ve Şekil 11'deki modelle ilişkilidir. Şekil 11'deki modelde anlık rüzgâr yönü verilerinin derece cinsinden hesaplanması için Denklem (21) uygulanmıştır.

$$\text{Kadran 3 için yön} \rightarrow 270 + \left| \arctan \frac{dY}{dX} \right| \quad (21)$$

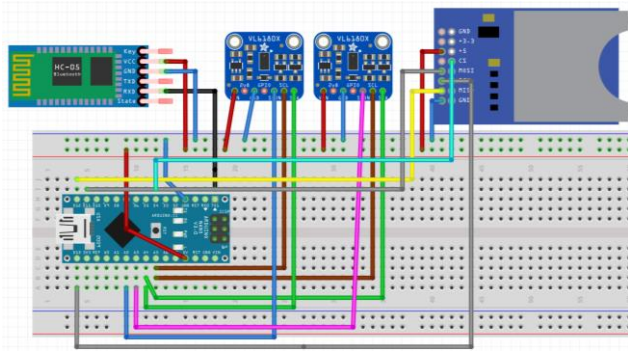
Denklemlerde bahsi geçen *DOĞU*, *KUZEY* ve *KİRİŞ* isimli mesafe ölçümlerinin, gerçekleştirilen cihaz üzerindeki karşılıkları **Şekil 13**'de gösterilmiştir.



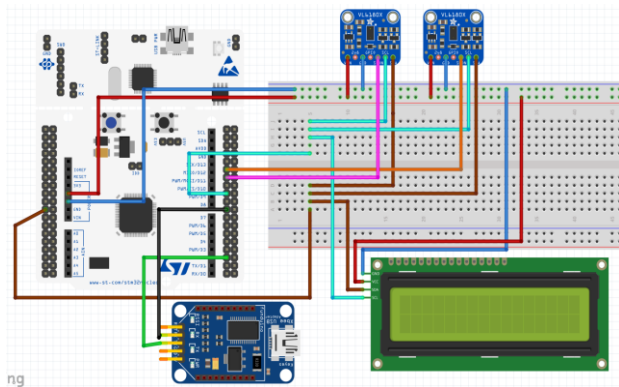
**Şekil 13.** Teorik mesafelerin anemometre üzerinde gösterilmesi

## 2.2 Devre ve akış şeması

Gerçekleştirilen anemometre tasarımının devre şemaları **Şekil 14** ve **15**'te verilmiştir.



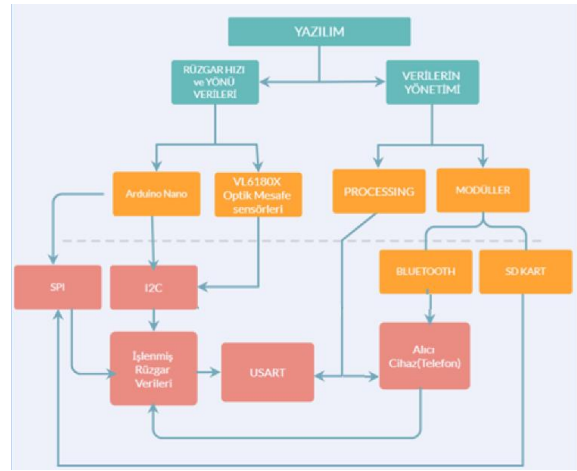
**Şekil 14.** Arduino Nano ile geliştirilen anemometrenin devre şeması



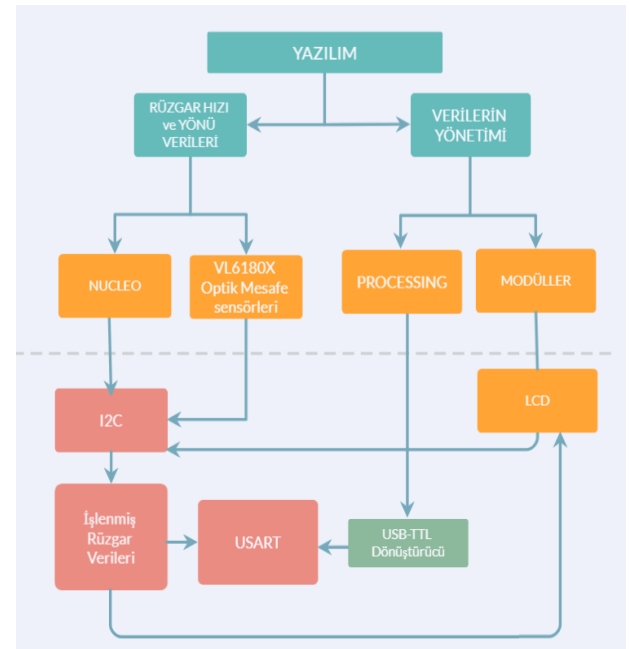
**Şekil 15.** STM32 Nucleo ile geliştirilen anemometrenin devre şeması

LIDAR teknolojisinin mesafe ölçme yöntemiyle çalışan VL6180X Time of Flight sensörler, rüzgâr hızı ve yönüne bağlı değişken mesafeyi ölçmektedir. **Şekil 14**'te görüldüğü

üzere sensörlerden alınan verileri işlemek Arduino Nano geliştirme kartında bulunan ATmega328 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Alınan verilerin saklanması ve iletilmesi için SD kart ve Bluetooth modülleri kullanılmıştır. Ayrıca verilerin bilgisayarda kullanıcı tarafından görünebilmesi için arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek işlem gücü ve hafızaya sahip olmasından dolayı ikinci bir prototip olarak STM32F103RB mikrodenetleyicisine sahip STM32 Nucleo geliştirme kartı kullanılmıştır. **Şekil 15**'te bu kart ile LCD ekran, USB-TTL dönüştürücü ve VL6180X Time of Flight sensörler kullanılmıştır. Bu iki prototip arasındaki temel fark, Nucleo ile gerçekleştirilen anemometrenin anlık olarak daha fazla veriyi işleyebilmesidir. Oluşturulan devre ve bu bağlamda gerçekleştirilen haberleşme detaylarına **Şekil 16** ve **17**'den ulaşılabilir.



**Şekil 16.** Arduino Nano ile kurulan anemometrenin haberleşme akışı

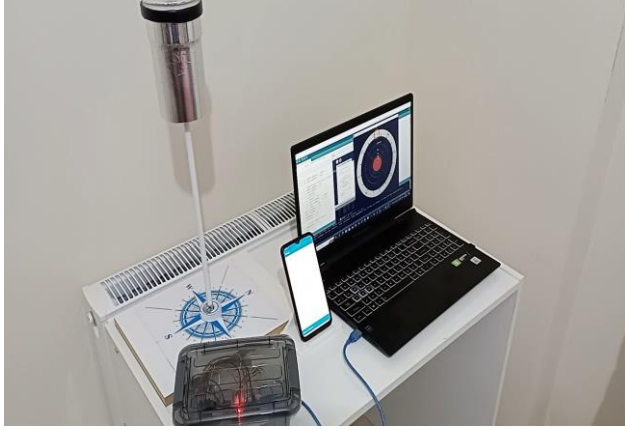


**Şekil 17.** STM32 Nucleo ile kurulan anemometrenin haberleşme akışı

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Deneysel sonuçlar

Şekil 18’de gerçekleştirilen anemometre yer almaktadır. Rüzgâr hızı kalibrasyonu düzeneği ile eş değer olarak gerçekleştirilen lazer tabanlı anemometre ile GM186 anemometresine eşit uzaklıkta vantilatör konumlanmıştır. Anemometreler ile vantilatör arasındaki mesafe yaklaşık olarak 50 cm’dir.



Şekil 18. Gerçekleştirilen anemometre

İki anemometrenin anlık rüzgâr hızı verilerini karşılaştırmak için ise Şekil 19’da görüldüğü üzere bluetooth yardımıyla alınan veriler GM186 anemometresinin hemen yanına hizalanmıştır.



Şekil 19. Ölçüm düzeneği

Deneysel anemometreden elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 2’de ve buna ait özet istatistik bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçümlerin tanımlayıcı istatistikleri

Deneysel Anemometre			
Ortalama	2.6545	Basıklık	-0.733795065
Standart Hata	0.01192901	Çarpıklık	-0.04830122
Ortanca	2.66	Aralık	0.28
Kip	2.66	En Büyük	2.51
Standart Sapma	0.075445684	En Küçük	2.79
Örnek Varyans	0.005692051	Toplam	106.18

Tablo 2. Ölçüm sonuçları

Veri	Deneysel Anemometre (m/s)	GM186 Anemometre (m/s)	Veri	Deneysel Anemometre (m/s)	GM186 Anemometre (m/s)
1	2.51	2.7	21	2.77	2.7
2	2.52	2.7	22	2.69	2.7
3	2.55	2.7	23	2.71	2.7
4	2.58	2.7	24	2.73	2.7
5	2.62	2.7	25	2.69	2.7
6	2.64	2.7	26	2.66	2.7
7	2.66	2.7	27	2.62	2.7
8	2.61	2.7	28	2.64	2.7
9	2.58	2.7	29	2.67	2.7
10	2.53	2.7	30	2.65	2.7
11	2.58	2.7	31	2.66	2.7
12	2.54	2.7	32	2.68	2.7
13	2.61	2.7	33	2.64	2.7
14	2.67	2.7	34	2.71	2.7
15	2.77	2.7	35	2.72	2.7
16	2.79	2.7	36	2.73	2.7
17	2.79	2.7	37	2.66	2.7
18	2.73	2.7	38	2.61	2.7
19	2.73	2.7	39	2.59	2.7
20	2.75	2.7	40	2.59	2.7



### 3.2 Hata analizi


GM186 anemometresi, hava hızını lazer tabanlı anemometrelerden daha yavaş ölçmektedir. Bu nedenle, Şekil 18'de gösterilen GM186 anemometresinin ölçtüğü 2.7 m/s hava hızı değeri ortalama değer olarak kabul edilerek gerçek değer olarak alınmıştır. Bu gerçek değer 2.7 m/s iken, ölçülen değer 2.6545 m/s olarak hesaplanmıştır. Tablo 3'te bulunan hata analizlerinde bu değerler kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Hata analizleri

Bağıl Hata	Mutlak Hata
0.01685185185	0.0455

Analiz ve hata değerlendirmeleri göz önüne alındığında geliştirilen anemometrenin teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Teknik özellikler

Lazer Tabanlı Rüzgâr Hızı ve Yönü Ölçen Cihaz		
	Yükseklik	60 cm
	Ağırlık	108.2 gr
	Çerçeve Yarıçapı	36 mm
	Besleme Voltajı	7-12 V
	Test Aralığı	0-7.5 m/s
	Min Rüzgâr Hızı	0 m/s
	Max Rüzgâr Hızı	20 m/s
	Rüzgâr Hızı Doğruluğu	$\pm 0.016$
	Rüzgâr Yönü Doğruluğu	$\pm 3^\circ$

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, piyasadaki anemometrelerden farklı olarak, lazer tabanlı mesafe sensörleri kullanılarak üretilen bir anemometre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu anemometrenin hata analizi yapıldığında, bağıl hata sonucu 0,01685 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, anemometrenin gerçek değere olan uyumunu gösterir ve ayrıca, ölçümlerde kullanılan standart tolerans aralıkları içinde yer almaktadır. Bu nedenle, anemometrenin doğruluk derecesi kabul edilebilir düzeydedir.

Bu anemometre tasarımı, piyasadaki anemometrelere göre çok daha uygun maliyetli olmasının yanında kabul edilebilir doğruluk derecesine de sahip olmuştur. Bu nedenle, özellikle farklı amaçlar için anemometre kullanan müşterilere önerilebilir. Ölçümlerde doğruluk derecesi önemlidir ve bu nedenle anemometre tasarımı seçiminde maliyetin yanı sıra doğruluk derecesi de dikkate alınmalıdır. Bu çalışma, lazer tabanlı mesafe sensörlerinin anemometre tasarımında uygun bir seçenek olduğunu göstermiştir.

Gerçekleştirilen anemometrede, ölçüm doğruluğunu arttırmak için aşağıdaki iyileştirmeler dikkate alınabilir:

- Sensörlerin doğruluk derecesini artırmak: Anemometre tasarımında kullanılan lazer tabanlı mesafe

sensörlerinin doğruluk derecesini artırmak, ölçüm doğruluğunu da artırabilir. Bu iyileştirme, sensörlerin kalibrasyonu veya daha hassas sensörlerin kullanılması gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir.

- Ölçümlerin daha sık yapılması: Ölçümlerin daha sık yapılması, ölçümlerin daha doğru bir ortalama değer elde edilmesine yardımcı olabilir. Bu iyileştirme, anemometrenin ölçümleri daha sık yapabildiği bir tasarıma sahip olmasıyla gerçekleştirilebilir.
- Ölçümlerin ortam koşullarına göre düzenlenmesi: Ölçümlerin ortam koşullarına göre düzenlenmesi, ölçümlerin doğruluğunu artırabilir. Örneğin, sıcaklık ve nem gibi ortam koşullarının ölçümleri etkileyebileceği düşünülürse, anemometre tasarımında bu koşulların dikkate alınması ölçümlerin doğruluğunu artırabilir. Örneğin, sıcaklık ve nem sensörleri ekleyerek, ölçümler sırasında ortam koşullarının değişimlerini takip edebilir ve bu değişimlerin ölçümler üzerindeki etkisini azaltabilir.
- Silindirik çerçevenin bağlı olduğu yay platformun iyileştirilmesi: Rüzgâr hızı ve yönü verileri, silindirik çerçevenin rüzgâr hızına bağlı olarak değiştirdiği konuma bağlıdır. Bu değişken konum, yay platform ile sağlanır. Bu tasarımda kullanılacak yayın çeşidi ve esnekliği ölçüm kalitesini etkiler. Daha doğru ölçümlere ulaşmak için yay platform değiştirebilir veya bu platforma alternatif bir tasarım oluşturulabilir.
- Yazılımsal iyileştirmeler: Elde edilen veriler bir dizi içinde toplanır ve bu dizinin ortalaması alınır. Dizi uzunluğunu arttırarak ölçüm sonuçlarında iyileşme sağlanabilir fakat bu noktada mikroişlemcinin hafızası yetersiz kalabilir.
- Silindirik çerçevenin değiştirilmesi: Bu ölçümlerde kullanılan silindirik çerçevenin çapı, ağırlığı ve kalınlığı ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Kullanılacak ölçüm aralığına göre bu çerçeve değiştirilebilir.

Bu iyileştirmeler, anemometre tasarımının ölçüm doğruluğunu artırmayı hedefler. Bu iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi, anemometrenin ölçüm doğruluğunu artırmakla birlikte, anemometrenin maliyetini de artırabilir. Bu nedenle, iyileştirme seçeneklerinin maliyeti ve beklenen doğruluk artışı dikkate alınarak en uygun seçeneklerin seçilmesi önerilebilir.

Ayrıca, anemometrenin kullanım alanına göre ihtiyaç duyulabilecek ölçüm doğruluğu da dikkate alınmalıdır. Örneğin, hava akım hızının hassas bir şekilde ölçülmesi gereken bir uygulamada, anemometrenin daha yüksek doğruluk derecesine sahip olması gerekebilir. Bu durumda, maliyetleri daha yüksek olsa dahi, daha hassas sensörlerin kullanılması veya daha sık ölçüm yapılması gibi iyileştirmeler yapılabilir.

Sonuç olarak, anemometre tasarımında ölçüm doğruluğunu artırmak için farklı iyileştirme seçenekleri mevcuttur. Bu seçeneklerin seçimi, anemometrenin kullanım amacı ve maliyeti gibi faktörler dikkate alınarak yapılmalıdır.



## Teşekkür

Bu projeyi 2209-A programı kapsamında destekleyen TUBİTAK kurumuna teşekkür ederiz.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %10

## Kaynaklar

- [1] D.Y. Leung, Y. Yang, "Wind energy development and its environmental impact: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1031–1039, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024>
- [2] C. Emeksiz, T. Cetin, "In case study: Investigation of tower shadow disturbance and wind shear variations effects on energy production, wind speed and power characteristics," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 148–159, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.07.004>
- [3] J. Li, X. Yu, "Model and procedures for reliable near term wind energy production forecast," *Wind Engineering*, 39(6), 595–607, 2015. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.39.6.595>
- [4] P. Tavner, C. Edwards, A. Brinkman, F. Spinato, "Influence of wind speed on wind turbine reliability," *Wind Engineering*, 30(1), 55–72, 2006. <https://doi.org/10.1260/03095240677641441>
- [5] M.Z. Jacobson, "Fundamentals of Atmospheric Modeling," Cambridge University Press, 2005.
- [6] S. Rehman, M.A. Mohandes, L.M. Alhems, "Wind speed and power characteristics using LiDAR anemometer-based measurements," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 27, 46–62, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.03.009>
- [7] M.A. Mohamed, A.M. Eltamaly, A.I. Alolah, "PSO-based smart grid application for sizing and optimization of hybrid renewable energy systems," *PLoS One*, 11(8), e0159702, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159702>
- [8] T.A. Burdett, K.W. Van Treuren, "Small-Scale Wind Turbines Optimized for Class 2 Wind: A Wind Siting Survey and Annual Energy Production Analysis," in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 45660, American Society of Mechanical Engineers, 2014. <https://doi.org/10.1115/GT2014-26243>
- [9] J.S. Gutarra, J.A. Gastelo-Roque, J. Sulluchuco, "A cup anemometer using 3D additive manufacturing," in 2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 1–4, IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/INTERCON50315.2020.9220193>
- [10] F. Daniel, J. Peyrefitte, A.D. Radadia, "Towards a completely 3D printed hot wire anemometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, 309, 111963, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111963>
- [11] M.P. del Valle, J.A. Castelan, Y. Matsumoto, R.C. Mateos, "Low-cost ultrasonic anemometer," in 2007 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 213–216, IEEE, 2007. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2007.4345008>
- [12] R.M. Hardesty, J.M. Intrieri, "Doppler lidar measurements of wind and turbulence in the marine boundary layer," in *Conference Proceedings Second Topical Symposium on Combined Optical-Microwave Earth and Atmosphere Sensing*, 148–150, IEEE, 1995. <https://doi.org/10.1109/COMEAS.1995.472381>
- [13] C.Y. Huang, P.W. Chan, H.Y. Chang, W.F. Liu, "A fiber Bragg grating-based anemometer," *Sensors*, 18(7), 2213, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18072213>
- [14] C. Cui, W. Cai, H. Chen, "Airflow measurements using averaging Pitot tube under restricted conditions," *Building and Environment*, 139, 17–26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.014>
- [15] M. Güçyetmez, S. Keser, Ş.E. Hayber, "Wind speed measurement with a low-cost polymer optical fiber anemometer based on Fresnel reflection," *Sensors and Actuators A: Physical*, 339, 113509, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113509>
- [16] M. Ogueta-Gutiérrez, S. Pindado, "Performance analysis of present cup anemometers," *Journal of Energy Systems*, 3(4), 129–138. <https://doi.org/10.30521/jes.614212>
- [17] A. Ramos-Cenzano, M. Ogueta-Gutiérrez, S. Pindado, "Cup anemometer measurement errors due to problems in the output signal generator system," *Flow Measurement and Instrumentation*, 69, 101621, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101621>
- [18] M. Parrilla, J.J. Anaya, C. Fritsch, "Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 40(4), 759–763, 1991. <https://doi.org/10.1109/19.85348>
- [19] S.F. Benjamin, C.A. Roberts, "Measuring flow velocity at elevated temperature with a hot wire anemometer calibrated in cold flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(4), 703–706, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00194-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00194-6)
- [20] U. Karakaya, "Rüzgar hız ve yön algılayıcılarının tasarımı ve geliştirilmesi" (Rüzgâr's thesis, Enerji Enstitüsü).
- [21] L. Zhang, Q. Yang, "A method for yaw error alignment of wind turbine based on LiDAR," *IEEE Access*, 8, 25052–25059, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2969477>
- [22] M. Lang, E.J. McKeogh, "Anemometry: A review of current practice," *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(2), 215–237, 2011.
- [23] D. Vickers, E. Hilder, "LIDAR anemometry for wind turbine wake measurements," *Measurement Science and Technology*, 24(8), 084007, 2013.
- [24] M. Lang, E.J. McKeogh, "Anemometry: A review of current practice," *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(2), 215–237, 2011.
- [25] G. Schwemmer, R.J. Barthelmie, "LIDAR and SODAR Comparison for Wind Speed Measurement in the Atmospheric Boundary Layer," *Journal of*

- Atmospheric and Oceanic Technology, 30(3), 463–474, 2013.
- [26] J. Li, X.B. Yu, "LiDAR technology for wind energy potential assessment: Demonstration and validation at a site around Lake Erie," *Energy Conversion and Management*, 144, 252–261, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.061>
- [27] H.-E. Albrecht, "Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques," Springer, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(03\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(03)00094-8)
- [28] F. Durst, A. Melling, J. Whitelaw, "Principles and Practices of Laser Doppler Anemometry," Academic Press, 1981. <https://doi.org/10.1007/BF02325705>
- [29] Z. Zhang, "LDA Application Methods: Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics, Experimental Fluid Mechanics," Springer, 2010.

