

RÜZGAR TÜRBİN KANADI PERFORMANS İNCELEMESİ

Onur ERKAN*, Musa ÖZKAN*

*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
11230 Merkez, Bilecik, onur.erk@bilecik.edu.tr, musa.ozkan@bilecik.edu.tr

Özet: Bu çalışmada NACA 63-415 tipi bir rüzgar türbin kanadı üzerindeki hava akışı sayısal olarak incelenmiştir. Ticari ölçekli rüzgar türbinlerinin karşılaştığı Reynolds sayısı aralığında $10^5 - 3 \times 10^6$ ve $0^\circ - 20^\circ$ aralığında çeşitli hücum açılarında kanat üzerindeki akış incelenmiştir. Rüzgar türbin kanatlarında en önemli performans göstergesi olarak kullanılan kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranına bakılarak, bu kanat profili için optimum hücum açısı $2.5^\circ - 3.5^\circ$ aralığında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: HAD, Hücum açısı, Rüzgar türbinleri, Yenilenebilir enerji.

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A TURBINE BLADE

Abstract: In this study, the air flow on a wind turbine blade of NACA 63-415 was investigated numerically. The range of Reynolds number is $10^5 - 3 \times 10^6$ and the range of the angle of attack is $0^\circ - 20^\circ$ are chosen for the simulations since these are the values encountered in commercial-scale wind turbines. The most important performance indicator for the wind turbine blades, the lift to drag ratio, is investigated and the optimum angle of attack is found to be in the range of $2.5^\circ - 3.5^\circ$.

Keywords: CFD, Angle of attack, Wind turbines, Renewable energy.

GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve endüstriyel gelişimin bir sonucu olarak artan enerji tüketimi sebebiyle geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olabilecek kaynaklar üzerinde çalışmalar son yıllarda çok hızlı şekilde artmıştır. Fosil yakıtların çevreye verdikleri zararlar ve tükenebilir olmalarından dolayı yenilenebilir enerji kaynakları, alternatif enerji arayışında ilk akla gelen seçenekler arasındadır. Pek çok farklı yenilenebilir enerji türü olmakla birlikte rüzgar enerjisi bu kaynaklar içerisinde %5.6'lık üretim payına sahip olarak önemli bir yer tutmaktadır (Sawin *vd*, 2018). Rüzgar enerjisinden faydalanmak için farklı rüzgar türbin tasarımları geliştirilmiştir ancak ticari olarak kurulu olan rüzgar santrallerinde kullanılan türbinler yatay eksenli ve 3 kanatlı olan tiplerdir. Bu tasarım şu ana kadar büyük ölçekli elektrik üretimi için dizayn edilmiş en verimli türbin modelidir (Tong, 2010). Araştırmacılar, son zamanlarda, bu bilinen mevcut türbin çeşidinin verimini

artırabilmek için modern mühendislik kabiliyetlerinin limitlerini zorlamaya devam etmektedirler.

Rüzgar türbinlerinin verimleri, Betz kanununa göre teorik olarak en fazla %59.3 olabilmektedir (Betz, 1966). Bir başka ifadeyle, bu kanuna göre hiçbir türbin, bir akıştaki kinetik enerjinin %59.3'ünden fazlasını kullanamaz. Böyle bir oranın oluşma sebebi türbin üzerinde gerçekleşen akıştaki momentum kaybıdır. Bu teorik üst limite ek olarak sürtünme kayıpları ve aerodinamik etkilerden dolayı da türbin verimlerinde ekstra azalmalar görülmektedir.

Türbin kanatları üzerindeki aerodinamik akışa etki eden faktörlerden bazıları şu şekildedir: kullanılan kanatların sayısı, kanat uzunluğu, burulma açısı, hücum açısı, yüzey pürüzlülüğü (Kamiński *vd*, 2014). Bu değişkenlerin çoğu tasarım parametresi olmakla birlikte yüzey pürüzlülüğü gibi bazı etkiler de türbinin çalışması süresince toz, kanada çarpan böcekler, buzlanma gibi etkenlerden dolayı meydana gelmektedir ve türbin

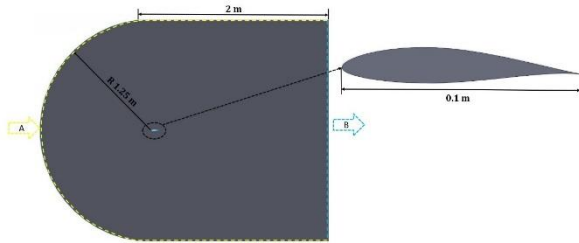
performansını olumsuz yönde etkiledikleri raporlanmıştır (Sagol *vd.*, 2013).

Bu çalışmada, tasarım parametrelerinden birisi olan hücum açısının türbin performansı üzerindeki etkisi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ticari ölçekli rüzgar santrallerindeki türbin kanat profillerinden birisi olarak yaygın şekilde kullanılan NACA 63-415 kanat profili incelenmek üzere seçilmiştir (Hochart *vd.*, 2008).

MATERYAL VE METOT

Nümerik Model

Bu çalışmada incelenen rüzgar türbin kanadı NACA serisinin 63-415 numaralı modelidir. Bu kanat üzerindeki akış iki boyutlu olarak sürekli ve sıkıştırılmaz kabulleri altında incelenmiştir. Analizlerde kullanılan hesaplama bölgesi Şekil 1'de gösterilmektedir.



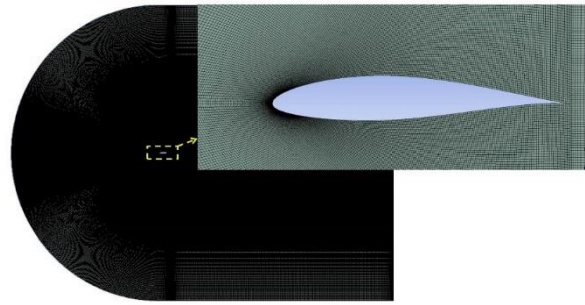
Şekil 1. Nümerik model hesaplama bölgesi

Şekil 1'de de görüldüğü üzere kanat veter uzunluğu 0.1 m olarak alınmış ve incelenen akış alanının model boyutuna göre yeterli olması adına yukarı yöndeki akış bölgesini temsil eden yarı dairenin yarıçapı veter uzunluğunun 12.5 katı ve kanat arkasındaki aşağı akış bölgesini temsil eden dikdörtgenin uzunluğu ise veter uzunluğunun 20 katı olacak şekilde seçilerek hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Bu şekil üzerindeki A harfi, HAD modeli için giriş sınır koşulunun, B harfi ise çıkış sınır koşulunun tanımlandığı kenarları göstermektedir.

Bu çalışmada çıkış sınır koşulu olarak atmosferik basınç değeri tanımlanmışken, giriş sınır koşulu olarak da $Re = 10^5, 5 \times 10^5, 7 \times 10^5, 10^6$ ve 3×10^6 olacak şekilde beş farklı hava giriş hızı seçilmiştir. Bu Reynolds sayıları ticari boyutlardaki rüzgar santrallerinde karşılaşılan aralıklardadır (Villalpando *vd.*, 2012). Giriş hızı x ve y yönlerindeki bileşenleri verilerek hız vektörü olarak tanımlanmıştır. Bu sayede farklı hücum açıları için çözümler yapılırken her defasında geometriyi

değiştirmek yerine giriş hızı vektörü uygun şekilde seçilerek istenilen hücum açısı değeri bu sayede elde edilmiştir. İncelenen hücum açısı aralığı olarak da $0^\circ - 20^\circ$ seçilmiştir. Bu aralık değerleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Sayed *vd.*, 2012).

HAD modeli için kullanılan ve dörtgen elemanlardan oluşan ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir. Gerekli ağ bağımsızlık testleri yapıldıktan sonra toplam 322,806 elemana sahip ağ yapısının uygun olduğu bulunmuş ve tüm analizler için bu ağ yapısı kullanılmıştır.



Şekil 2. Nümerik model ağ yapısı

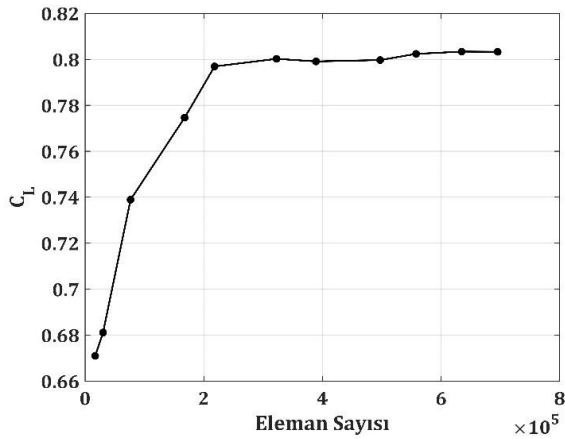
Bu çalışmada incelenen Reynolds sayısı aralıkları türbülanslı bölgede olduğu için türbülans modelleri olarak Spalart-Allmaras ve k- ω SST tercih edilmiştir. Bu modellerden Spalart-Allmaras aerodinamik akışların çözümü için oldukça güçlüdür ve dolayısıyla havacılık uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Wilcox, 2006). Benzer şekilde k- ω SST türbülans modeli de sınır tabakalardaki ters basınç gradyanlarını, dolayısıyla da akış ayrılmalarını saptamada elverişli olduğu için kanat profilleri üzerindeki akış incelemelerine uygundur (Özkan *vd.*, 2017). Ayrıca, k- ω SST türbülans modeli sınır tabaka akışlarının çözülmesinde elverişli olmasının yanı sıra serbest akış bölgelerinde de k- ϵ türbülans modelini kullanarak bu modelin viskoz olmayan akış bölgelerindeki üstünlüğünden de faydalanmaktadır (Menter, 1993).

HAD modelinde yönetici denklemler olarak çözülen süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra kullanılan türbülans modeline göre değişen fazladan taşınım denklemleri sadelik adına burada verilmemiştir. Bu yönetici denklemlere ve kullanılan türbülans modellerinin detaylarına ilgili kaynaklardan ulaşılabilmektedir (Wilcox, 2006).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Ağ Bağımsızlık Testi

HAD analizlerinde sonuçlar kullanılan ağ yapısına oldukça bağlıdır. Dolayısıyla elde edilen sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğunun gösterilmesi elde edilen sonuçların doğruluğunu ikna etmek adına büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada da büyük boyutlardaki kaba ağ yapıları ile analizlere başlanmış ve çözümün eleman yapısından bağımsız olduğu durum elde edilinceye kadar eleman boyutları küçültülerek ağ yapısı inceltilmiştir.



Şekil 3. Eleman sayısı ile kaldırma kuvvetinin değişimi

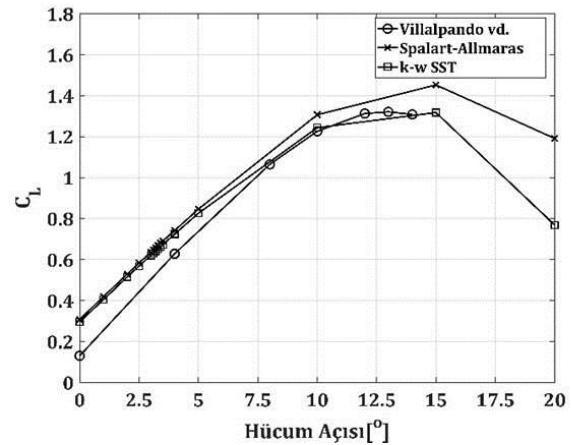
Şekil 3'te yürütülmüş olan ağ bağımsızlık testinin grafiği görülmektedir. Eleman sayısı yaklaşık olarak 0.2×10^5 mertebelerinden başlamış ve 7×10^5 değerlerine kadar artırılmıştır. Her yeni eleman sayısı değeri için bir başka ifadeyle her yeni ağ yapısı için kanat profili üzerine etki eden C_L kaldırma kuvveti katsayısı dolayısıyla F_L kaldırma kuvveti hesaplanmıştır. Şekilde de görüleceği üzere kaldırma kuvveti eleman sayısına bağlı olarak artış göstermiş ancak eleman sayısının yaklaşık olarak 2.2×10^5 değerine ulaşmasından sonra sonuçlarda herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Dolayısıyla bu çalışmadaki tüm analizler için kullanılan ağ yapısının yani toplam 322,806 adet dörtgensel eleman için sonuçların ağ yapısından etkilenmediği ispatlanmıştır.

Analiz Sonuçlarının Doğruluk Kontrolü

Bu çalışmada yürütülen sayısal analizler neticesinde elde edilen sonuçların doğruluğu literatürdeki mevcut benzeri verilerle kıyaslanarak doğruluk incelemesi yapılmıştır.

Bu bağlamda, 0° - 20° hücum açısı aralığında NACA 63-415 kanat profiline etki eden kaldırma kuvveti hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar literatürde yürütülmüş benzer bir çalışma ile kıyaslanmıştır (Villalpando vd, 2012). Aynı Reynolds sayılarında yapılmış bu kıyaslama Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu görselde de görüleceği üzere hem Spalart-Allmaras hem

de k- ω SST türbülans modelleri ile elde edilen kaldırma kuvvetleri birbirleriyle 10° hücum açısına kadar neredeyse tam uyumlu, bu açı değerinden sonra da nicel olarak bir miktar farklı olmalarının yanında yönelim olarak tamamen aynıdır. Bu iki farklı türbülans modelinin de bu tip kanat üzeri akışları incelemede birlikte veya birbirlerinin yerine kullanılabilmesinin ispatıdır. Ayrıca, her iki modelle de elde edilen sonuçların Villalpando vd. (2012) tarafından elde edilen kaldırma kuvveti değerleri ile de oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.



Şekil 4. Sayısal çözümlerin doğruluk kontrolü

Şekil 4'te sunulan kıyaslamaya göre bu çalışmadaki sayısal analizlerden elde edilen sonuçların doğruluk kontrolleri yapılmıştır ve böylece iddia edilen bulguların hassasiyeti tasdik edilmektedir.

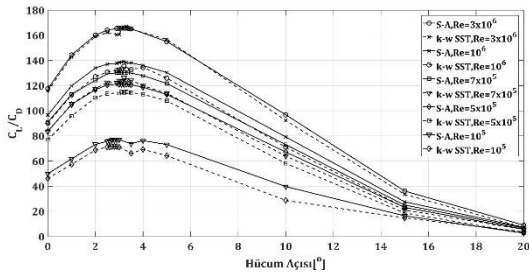
En Uygun Hücum Açısı

Kanat profiline etki eden kaldırma kuvveti ne kadar yüksek olursa rüzgar türbininin dönüş hızı da o kadar yüksek olacaktır. Ancak kaldırma kuvveti tek başına bir gösterge değildir. Kanat profiline etki eden bir de sürüklenme kuvveti F_D ve dolayısıyla C_D sürüklenme katsayısı vardır. Bu kuvvet kanat cidarı üzerindeki kaymama koşulundan dolayı oluşan sürtünme kuvveti ve de kanat arkasında oluşan girdaplardan kaynaklanan sürüklenme kuvvetinin toplamıdır. Sürtünmeden kaynaklanan sürüklenme kuvveti genellikle girdaplardan dolayı oluşan sürüklenme kuvvetinin yanında ihmal edilebilir seviyelerdedir. Kanat profili arkasında oluşan girdap yapıları ise hücum açısı ile doğrudan orantılıdır.

Şekil 4'te hücum açısı ile kaldırma kuvvetinin arttığı ancak 15° 'den sonra kaldırma kuvvetinde ani bir düşüş yaşandığı gözlenmektedir. Bu ani düşüşün sebebi yüksek hücum açılarında akışın kanat veter uzunluğu boyunca

çidar üzerinde tutunacak enerjii bulamaması sonucu sınır tabaka ayrılmasının gerçekleşmesi ve bu sebeple de kaldırma kuvvetinin ani olarak düşmesinden dolayıdır. Bu akış ayrılması kaldırma kuvvetinde düşmeye neden olduğu gibi kanat profili arkasında oluşan girdapların da daha büyük olmasına sebep olmakta bu nedenle de kanat üzerine etki eden sürüklenme kuvveti artış göstermektedir.

Rüzgar türbinlerinde en güvenilir performans göstergelerinden birisi kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranıdır. Bu oranının yüksek olması kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetine oranla daha fazla olduğunu yani türbin dönüş hızının artacağını, düşük olması da sürüklenme kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranla yüksek olduğunu yani türbin dönüş hızının azalacağını göstermektedir.



Şekil 5. En uygun hücum açısı

Bu araştırma sonucunda farklı Reynolds sayıları için ve iki farklı türbülans modeli ile elde edilen kaldırma/sürüklenme oranları C_L/C_D Şekil 5'te gösterilmektedir. İlk olarak gözlemlenebilecek sonuçlardan birisi, daha önceki şekillerde de belirtildiği gibi, aynı Reynolds sayılarında iki farklı türbülans modeli ile de neredeyse aynı sonuçların elde edildiğidir. Bunun yanı sıra Reynolds sayısı arttıkça C_L/C_D oranının da arttığı görülmektedir.

Bu çalışmanın en önemli sonucu, incelenen tüm Reynolds sayılarında maksimum C_L/C_D oranının, hücum açısının $2.5^\circ - 3.5^\circ$ olduğu aralıkta elde edilmiş olmasıdır. Literatürdeki benzer araştırmalarda bu açı aralığı $2^\circ - 5.25^\circ$ olarak verilmiştir (Chaudhary vd, 2015; Vandan vd, 2010). Mevcut incelemede bulunmuş olan hücum açısı aralığı daha önce raporlanmış olanlara göre daha belirli bir çalışma aralığı sağlamaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada NACA 63-415 tipi bir rüzgar türbin kanadı üzerindeki akış, iki boyutlu, sürekli ve sıkıştırılmaz kabulleri altında HAD ile sayısal olarak incelenmiş ve

türbin performansı değerlendirilmiştir. Bu kanat profili ticari boyutlardaki rüzgar türbinlerinde kullanıldığı için üzerindeki aerodinamik akışın incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Türbin tasarım parametrelerinden birisi olan ve performans üzerine önemli etkisi bulunan hücum açısı parametresi muhtelif hava akışı hızları altında ve farklı türbülans modelleri kullanılarak incelenmiş ve maksimum performansın elde edilebileceği bir hücum açısı aralığını tespit etmek amaçlanmıştır.

Bu kapsamda hava akış hızı, Reynolds sayısı 10^5 ile 3×10^6 arasında olacak şekilde seçilmiş böylece gerçek boyutlu rüzgar türbinlerinde karşılaşılan akış koşulları sağlanmıştır. Hücum açısı aralığı olarak da literatürdeki benzer araştırmalarda sıklıkla tercih edilen $0^\circ - 20^\circ$ aralığı seçilmiştir.

Belirtilen Reynolds sayılarında kanat üzerindeki akış türbülanslı olduğundan türbülans modelleri olarak Spalart-Allmaras ve k- ω SST kullanılmıştır.

Sayısal analizler neticesinde, çözümlerin kullanılan iki farklı türbülans modelinden bağımsız olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra kaldırma kuvveti katsayısı C_L 'nin hücum açısındaki artış ile belirli bir sınıra kadar arttığı ancak bu sınır, yaklaşık olarak 15° , aşıldıktan sonra sınır tabakada gerçekleşen akış ayrılması neticesinde kaldırma kuvveti katsayısında ani düşüş yaşandığı gözlenmektedir.

Ayrıca, Reynolds sayısının artması ile rüzgar türbinlerinde en önemli performans göstergelerinden birisi olarak kullanılan kaldırma/sürüklenme oranı C_L/C_D 'nin de arttığı tespit edilmiştir. Bu oranın, hücum açısının $2.5^\circ - 3.5^\circ$ olduğu aralıkta en yüksek değerine ulaştığı bulunmuştur. Dolayısıyla da böyle tip bir kanat profili kullanan rüzgar türbinlerinde, hücum açısının bu aralığa uyacak şekilde tasarlanması türbinden maksimum performansın elde edilmesini sağlayacaktır.

SEMBOLLER

A	Giriş sınır bölgesi
B	Çıkış sınır bölgesi
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürüklenme katsayısı
F_L	Kaldırma kuvveti [N]
F_D	Sürüklenme kuvveti [N]
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
k	Türbülans kinetik enerjisi [m^2/s^2]

ULIBTK'19 22. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi
11-14 Eylül 2019, KOCAELİ

NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
Re	Reynolds sayısı [$=V\rho D/\mu$]
SST	Shear Stress Transport
x	Kartezyen koordinat sistemi, x-yönü
y	Kartezyen koordinat sistemi, y-yönü
ϵ	Türbülans yayılımı [m^2/s^3]
ω	Özel türbülans yayılma oranı [1/s]

KAYNAKLAR

Betz, A., 1966, *Introduction to the Theory of Flow Machines*, Pergamon Press, Oxford, UK.

Chaudhary U., Nayak S.K., 2015, Micro and small-scale HAWT blades airfoils study through CFD for low wind applications, *Annual IEEE India Conference*, New Delhi, India, 17-20 December.

Hochart, C., Fortin, G., Perron, J. and Ilinca, A., 2008, Wind turbine performance under icing conditions. *Wind Energ.*, 11(4), 319-333.

Kamiński, Z., Czyż, Z. and Wendeker, M., 2014, Wind Turbine Operation Parameter Characteristics at a Given Wind Speed, *STRJ*, 8, 22, 75-82.

Menter, F.R., 1993, Zonal Two Equation k- ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906, Orlando, USA.

Özkan M., Thomas P.J., Cooper A.J., Garrett S.J., 2017, Comparison of the effects of surface roughness and confinement on rotor-stator cavity flow, *Eng. Appl. Comp. Fluid*, 11(1), 142-158.

Sagol, E., Reggio, M. and Ilinca, A., 2013, Issues Concerning Roughness on Wind Turbine Blades, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 23, 514-525.

Sayed M.A., Kandil H.A., Morgan E.S.I., 2012, Computational fluid dynamics study of wind turbine blade profiles at low Reynolds numbers for various angles of attack, *In AIP Conference Proceedings*, 1440(1), 467-479.

Sawin, J. L., Rutovitz, J., Sverrisson, F., 2018, Renewables 2018 Global Status Report, Paris.

Tong, W., 2010, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, Southampton, UK.

Vendan S.P., Aravind Lovelin S., Manibharathi M., Rajkumar C., 2010, Analysis of a wind turbine blade profile for tapping wind power at the regions of low wind speed, *Int. J. Mech. Eng.*, 2, 1-10.

Villalpando F., Reggio M., Ilinca A., 2012, Numerical study of flow around iced wind turbine airfoil, *Eng. Appl. Comp. Fluid*, 6(1), 39-45.

Wilcox D.C., 2006, *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd ed., DCW Industries, California, USA.

Onur ERKAN



Lisans eğitimini 2017 yılında Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2018 yılında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı bölümde halen Yüksek Lisans'a devam etmektedir. Yenilenebilir Enerji, Rüzgar Enerjisi, Akışkanlar Mekaniđi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Aerodinamik alanları üzerine araştırma yapmaktadır.

Musa ÖZKAN



Lisans eğitimini 2008 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Yüksek Lisans derecesini Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği anabilim dalında aldı ve aynı Enstitünün Makine Mühendisliği Bölümü'nde 2009-2011 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev aldı. Doktora eğitimini 2016 yılında, İngiltere'de University of Warwick, Makine Mühendisliği programında tamamladı. 2017 yılından beri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Dr. Öğr. Üyesi olarak görev yapmaktadır. Akışkanlar Mekaniđi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Türbülans, Sınır Tabaka Akışları ve Aerodinamik alanlarındaki araştırmalarına devam etmektedir.