

## RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT KESİTİ AERODİNAMİĞİNİN OPTİMİZE EDİLMİŞ SINIR TABAKA EMME SİSTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ali Ata ADAM\* ve Nilay SEZER-UZOL†  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

*Rüzgar türbinlerine eklenen aktif akış kontrol sistemleri elde edilen enerjinin farklı akış koşulları boyunca en yüksek seviyede tutulabilmesi için kullanılabilir. Bu çalışmada kontrol sistemleri içerisinde yer alan sınır tabaka emme sistemi eniyileştirilmiştir. Eniyileştirme deney tasarımı yöntemini baz alarak bir tasarım uzayı ile yapılmıştır. Elde edilen bulgular kullanılan akış çözücünün ve modellerin yeterli doğruluk seviyesinde sonuçlar verdiğini ve aerodinamik verimliliğin bu tarz bir akış kontrol yöntemi ile üst düzeyde artırılabilirliğini göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen kanat kesiti sonuçları gelecekte yapılacak üç boyutlu HAD simülasyonlarında kullanılacak ve emme sisteminin türbin üzerindeki aerodinamik kuvvet katsayılarına olan sonuçları ve izbölgesindeki etkileri incelenecektir.*

### GİRİŞ

Bir rüzgar türbini palasında laminer-türbülanslı sınır tabakası geçişi radyal yönde değişkenlik göstermektedir. Kanadın üst yüzeyi yani emme yüzeyinde bu geçiş genellikle kök istasyonunda hücum kenarına ve uç istasyonunda orta veter bölgesinde yer almaktadır [Özçakmak v.d., 2019, 2020]. Aerodinamik bir yüzey üzerindeki laminer akışı uzatmak ve türbülanslı akışın olumsuz etkilerini azaltmak hem yüzey sürtünmesini hem de akıştan kaynaklanan ses emisyonunu düşürebilir fakat bir rotor palası üzerinde laminer akışı sabit bir aerodinamik tasarım ile genişletmek zordur. Buna sebep olarak operasyon sırasında -özellikle kara türbinlerinde- artan yüzey pürüzü, rüzgar enerjisi santrali içerisindeki etkileşimlerden dolayı artan türbülans yoğunluğu [Lobo, Schaffarczyk ve Breuer, 2022] ve rüzgar parametrelerinin izbölgesi-rotor etkileşimleri ile dönme hareketinin etkilerinden dolayı zamana bağlı değişimleri [Özçakmak v.d., 2020] verilebilir.

Sınır tabaka emme sistemleri geçtiğimiz yüzyılın başlarından beri havacılıkta ve yakın dönemde rüzgar enerjisi alanında araştırılan aktif akış kontrol cihazlarından biridir [Akhter ve Omar, 2021]. Bu tip sistemler yerleştirildikleri yüzeyin üstündeki düşük momentumlu akışı emerek sınır tabakasının momentumunu artırabilir ve sınır tabakasının yüksekliğini azaltabilir. Böylelikle akış ayrılmasını engelleyebilir ve laminer-türbülanslı sınır tabakası geçişini geciktirebilir [Akhter ve Omar,

\*Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: adam@metu.edu.tr

†Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: nuzol@metu.edu.tr

2021; Pechlivanoglou, 2013]. Sınır tabaka emme cihazlarının rüzgar türbinlerinde kullanılan kanat kesitlerinde daha çok taşıma kuvveti ve daha az sürüklenme kuvveti üretilmesini sağlamanın yanı sıra akış ayrılmasını engelleyebildiği yapılan rüzgar tüneli deneylerinde gösterilmiştir [Hong, Fupeng ve Zuoyi, 2005; Chawla v.d., 2014; Morgulis ve Seifert, 2016]. Her ne kadar havacılık alanında bu cihazın laminer akış üzerine etkisi ayrıntılı bir şekilde araştırılmış olsa da rüzgar enerjisi literatüründe bu özellik çok az incelenmiştir. Rezaeiha, Montazeri ve Blocken [2019] bu cihazın laminer sınır tabakasını uzattığını ve türbülansın etkilerini azalttığını bir dikey eksensli rüzgar türbini üzerinde yaptıkları Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları ile gösterse de çalışmalarının odak noktasını bu özellik oluşturmamıştır.

Bu bildiride, kullanılacak HAD yazılımının ve laminer-türbülans geçişi modelinin bu tür bir problem için uygunluğu değerlendirilmiştir. Buna ek olarak bir rüzgar türbini kanat kesiti üzerindeki sınır tabaka emme sisteminin konumunun ve emme kuvvetinin aerodinamik kuvvet katsayılarına olan etkileri tartışılmıştır.

## YÖNTEM

### Test Türbini ve Kanat Kesiti

Yüksek erozyon ve kirlenmenin kara türbinlerinde daha fazla olması ve bu etmenlerin rotor palası üzerindeki laminer akışı yüksek oranda kısıtlamasından dolayı test geometrisi olarak bir deniz üstü türbinin seçilmesi daha uygun olacaktır. Buna ek olarak orta ve uzun vadedeki ticari kapasite eğilimlerine uyması [Musial v.d., 2021] ve erişime açık geometrik ve aerodinamik verilerinin olması dolayısıyla DTU 10MW deniz üstü rüzgar türbini test geometrisi olarak seçilmiştir.

Rotor üzerindeki merkezci kuvvet ve Coriolis kuvvetinden dolayı laminer-türbülans geçişi aynı kanat kesiti için 2B analizlerden farklı olabilmektedir fakat literatürdeki rüzgar tüneli deneylerinin gösterdiği üzere bir rotor palasının uç istasyonundaki üç boyutlu akış iki boyuttakine benzemektedir [Martinez Hernandez, 2012]. Bu nedenle test türbinin uç istasyonunda kullanılan FFA-W3-241 kanat kesiti bu çalışmada analiz edilmiştir.

### Nümerik Düzen

Açık kaynak bir kod olan SU2 akış çözücü olarak kullanılmıştır. SU2 içerisinde mevcut olan Spalart-Allmaras türbülans modeli ve Baş-Çakmakçioğlu (BC) geçiş modeli Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) formülleri ile beraber kullanılmıştır.

Yapılan HAD simülasyonlarında uzaysal gradyanların hesaplanmasında ağırlıklandırılmış en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sayısı elli olarak sabit olacak şekilde seçilmiştir. Akı hesaplanmasında ikinci-dereceden merkezi bir ayrıklaştırma tekniği olan JST şeması ve türbülans terimlerinin ayrıklaştırmasında birinci-dereceden upwind şeması kullanılmıştır. Her iki şema içerisinde Venkatakrishnan sınırlayıcısı kullanılmıştır. Her simülasyon, en fazla on beş bin iterasyon koşuturulmak koşuluyla, çözüm alanı içerisindeki akış yoğunluğunun karesel ortalamasının karekökü  $10^{-11}$  değerinin altına indiğinde sonlandırılmıştır. Yapılan öncül simülasyonlar bu değerler sonucunda yeterli bir yakınsamanın elde edildiğini göstermiştir.

### Tasarım Uzayı

Bu çalışmada sınır tabakası emme sisteminin FFA-W3-241 kanat kesitinin taşıma ve sürüklenme katsayısı üzerine olan etkisini incelemek için bir tasarım uzayı oluşturulacaktır. Emme sisteminin tasarım parametreleri arasında emme hızı, uzunluğu, açısı ve konumu verilebilir. Aerodinamik kazanımlar açısından veter uzunluğunun %2,5'inden geniş emme sistemlerinin kayda değer bir

kazanç sağlamadığı bilinmektedir [Dannenber ve Weiberg, 1952; Huang v.d., 2004]. Bu sebeple emme sisteminin genişliği veter uzunluğunun %2,5'i olarak sabitlenmiştir. Benzer bir şekilde, yüzeye dikey açıda yapılan emme akış kontrolünün daha etkili olduğu bilindiğinden [Huang v.d., 2004], akış kontrolü açısı  $90^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada emme sisteminin hızı, serbest akış hızının 0,0 ile 0,2 katı arasında ve 0,025'lik aralıklarda ve emme sisteminin konumu, hücum kenarından veter uzunluğunun 0,05 ile 0,9 katı arasında ve 0,05'lik aralıklardaki uzaklıklarda değiştirilecektir.

Tasarım uzayı oluşturmak için yapılan simülasyonlardaki hücum açısı literatürdeki DTU 10MW türbin analiz sonuçları ile bağlantılı olarak  $\alpha = 7^\circ$  olarak seçilmiştir [Zahle v.d., 2014]. Test türbini bir IEC Class 1A türbini olarak tasarlandığından dolayı serbest akış hızı  $U_\infty = 10$  m/s olarak alınmış ve Reynolds sayısı yaklaşık olarak 11 milyon olarak kullanılmıştır.

## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

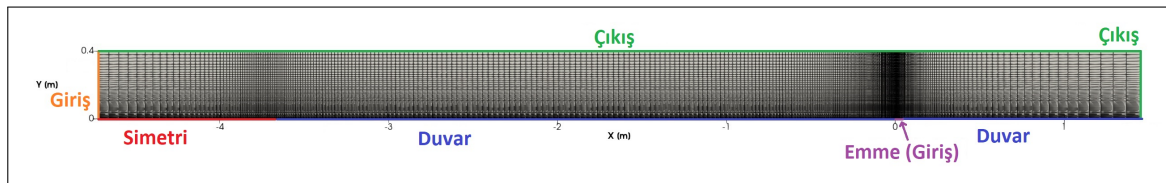
### Doğrulama Simülasyonları

Transitional SST [Tadjfar, Kasmaiee ve Noori, 2019] ve  $k - k_L - \omega$  [Genç, Kaynak ve Yapıcı, 2011] modellerinin de aralarında olduğu çeşitli laminar-türbülans geçiş modellerinin bir sınır tabaka emme problemi için uygunluğu literatürde doğrulanmasına rağmen SU2 içerisindeki BC modeli için bu tarzda bir araştırma henüz yapılmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada BC geçiş modeli emme sisteminin uygulandığı düz plaka ve NACA2415 kanat kesiti HAD simülasyonları ile test edilmiştir.

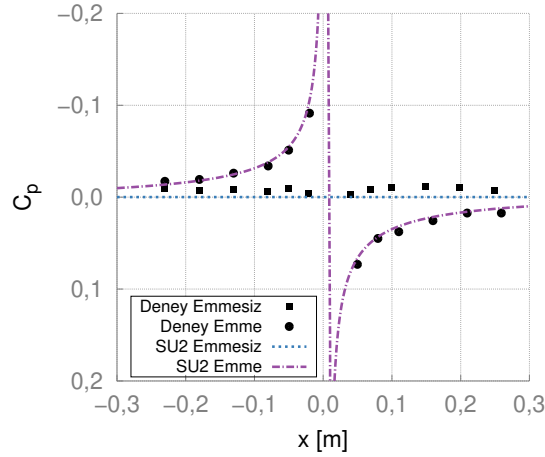
Düz Tabaka Simülasyonu: van der Hoeven [2013]'ün yaptığı düz tabaka deneylerinde kullanılan konfigürasyon HAD yazılımını ve akış modellerini doğrulamak için kullanılmıştır. Deneyde, basınç değişiminin olmadığı bir tabaka üzerinde bulunan 10 mm uzunluğundaki bir açıklık aracılığıyla kullanılan emme sisteminin etkileri incelenmiştir. Referans deney 28 m/s büyüklüğündeki bir serbest akış hızı ile yapılmıştır. Emme açıklığının bulunduğu konumdaki momentum kalınlığı  $\theta_0 = 5,6$  mm olarak ölçülmüştür. Bu uzunluğun referans olarak alındığı Reynolds sayısı da  $Re_{\theta_0} = 10100$  değerine denk gelmektedir. van der Hoeven [2013]'ün belirttiğine göre bu değer rüzgar türbini kanat profilleri üzerinde gözlemlenen Reynolds sayısı ile benzer düzeydedir.

Doğrulama simülasyonu için  $\sigma = 0,7$  emme katsayısı ile elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Bu katsayı değerinin denk geldiği emme hızı da  $U_{suc} \approx 10,98$  m s<sup>-1</sup> değerine eşittir. HAD simülasyonunda kullanılan düzenli çözüm ağı ve sınır koşulları Şekil 1'de görülebilmektedir. Çözüm ağı içerisinde toplamda yaklaşık 50.000 hücre bulunmaktadır. Açıklık çevresindeki düğüm aralığı  $5 \times 10^{-4}$  m'dir. Sınır tabakası  $y^+ \ll 1$  olacak şekilde modellenmiştir. Çözüm ağı içerisindeki düz tabakanın başlangıcı ve emme açıklığı arasındaki mesafe, emme sisteminin bulunduğu konumda deneydeki momentum kalınlığı elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. Emme açıklığı giriş (*inlet*) sınır koşulu ile modellenmiştir.

HAD simülasyonları ve deneylerden elde edilen yüzey basınç katsayısı dağılımları Şekil 2'de verilmiştir. Sınır tabaka emme sisteminin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlardan elde edilen deneysel ve hesaplamalı sonuçlarda yakın bir uyum gözlenmektedir. Emme sisteminin açık olduğu



Şekil 1: Düz tabaka analizlerinde kullanılan çözüm ağı. Yeşil, kırmızı, sarı, mavi ve mor çizgiler sırasıyla çıkış, simetrik, giriş, duvar ve emme (giriş) sınır koşullarını ifade etmektedir



Şekil 2: Düz plaka üzerinde sınır tabakası emme sisteminin olduğu ve olmadığı durumlardaki hesaplamalı ve deneysel [van der Hoeven, 2013] yüzey basınç katsayısı dağılımları

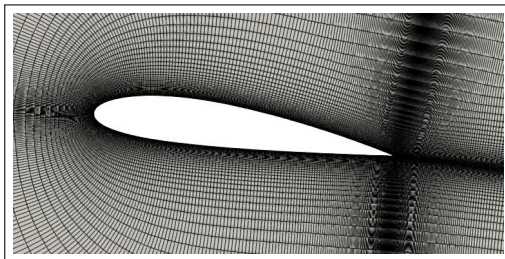
sonuçlarda açıklıktan hem önceki hem de sonraki dağılımının benzerliği kullanılan akış çözücünün ve modellerin bu tür bir problem için doğruluğunu göstermektedir.

**Kanat Kesiti Simülasyonu:** NACA2415 simülasyonlarında kullanılan çözüm ağının kanat kesiti civarındaki görüntüsü Şekil 3'de gösterilmiştir. Her iki çözüm ağında da yaklaşık 120.000 hücre bulunmaktadır. Simülasyon konfigürasyonu [Genç, Kaynak ve Yapıcı, 2011] çalışmasından alınmıştır. Kanat kesiti 8 derecelik hücum açısında gelen ve Reynolds sayısı  $Re_c = 200.000$  olan bir akışa mağruz kalmaktadır. Serbest akıştaki türbülans yoğunluğu  $TI = \%0,1$ 'dir.

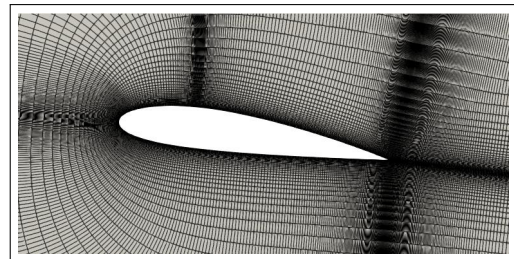
Emme sistemi düz tabaka simülasyonlarındaki gibi basit bir giriş sınır koşulu ile modellenmiştir. Test edilen durumda akış kontrol sistemi yüzey eğimine göre  $30^\circ$  açıda emme işlemi yapmaktadır. Sistem kanat kesiti üzerinde  $x/c = 0,26$  konumunda yer almaktadır,  $x/c = 0,025$  uzunluğundadır ve  $U_{jet}/U_\infty = 0,156$  kuvvetinde akış çekmektedir.

Elde edilen yüzey basınç katsayısı ve yüzey sürtünme katsayısı dağılımları emme sisteminin açık ve kapalı olduğu durumlar için Şekil 4a ve 4b'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deneysel ve hesaplamalı sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Görülebileceği üzere HAD simülasyonu emme sisteminin kapalı olduğu durumda deney sonuçlarına oldukça yakın bir dağılım vermiştir. Buna ek olarak, laminer ayrılma kabarcığının ve laminer-türbülanslı sınır tabakası geçişinin konumu doğru bir şekilde belirlemiştir.

Emme sisteminin açık olduğu durumdaki simülasyon sonuçları Genç, Kaynak ve Yapıcı [2011]'nin çalışmasında sunulan  $k - k_L - \omega$  geçiş modeli ile yapılan HAD simülasyonu verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4a'daki HAD simülasyonlarından gelen basınç katsayısı dağılımı emme

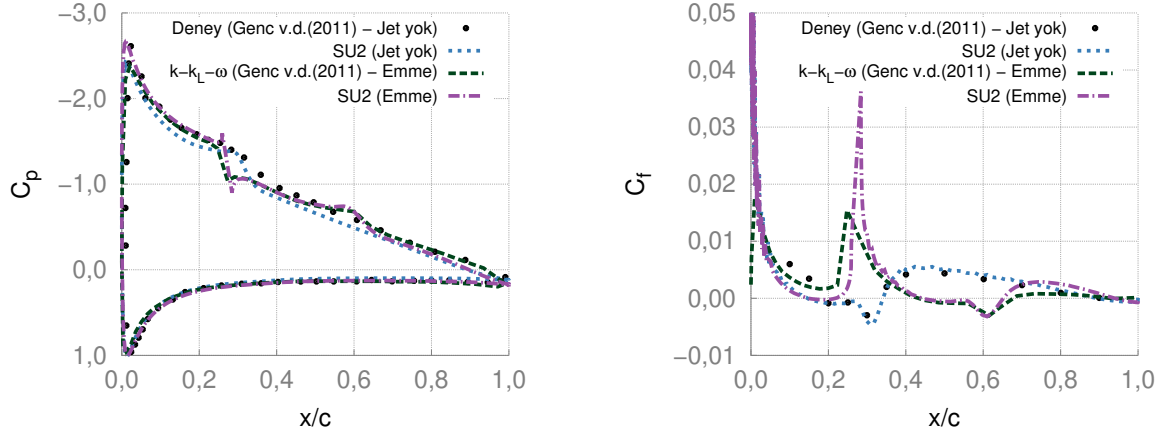


(a) Emme sisteminin olmadığı durum



(b) Emme sisteminin olduğu durum

Şekil 3: NACA2415 simülasyonları için kullanılan çözüm ağları



(a) Yüzey basınç katsayısı dağılımı

(b) Yüzey sürtünme katsayısı dağılımı

Şekil 4: NACA2415 kanat kesiti yüzeyinde emme sisteminin kapalı ve açık olduğu durumlardaki kuvvet katsayıları

sisteminin yerleştirildiği bölge dışında oldukça yakındır. Sistemin bulunduğu yerdeki farklılığın sınır koşullarındaki farklılıktan kaynaklanması muhtemeldir. Şekil 4b'deki yüzey sürtünme katsayıları için de benzer yorumlar yapılabilir. Her iki simülasyon da laminar-türbülans geçişini neredeyse aynı konumda tespit etmiştir.

### Çözüm Ağı Bağımsızlık Çalışması

Tasarım uzayı analizleri öncesinde bir çözüm ağı bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bu başlık altında sunular sonuçların tamamında O şeklindeki çözüm ağları kullanılmıştır ve dış sınırlar ile kanat kesiti arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 200 veter uzunluğu olarak belirlenmiştir. İlk aşamada kanat kesiti üzerindeki düğüm sayısı ve sınır tabakası içerisindeki ilk hücrenin yüksekliği değiştirilerek oluşturulan çözüm ağları kullanılarak, emme sistemi olmaksızın HAD simülasyonları yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan çözüm ağlarının özellikleri ve elde edilen aerodinamik kuvvet katsayıları Tablo 1'de ve yüzey basınç katsayısı dağılımları Şekil 5'te gösterilmiştir. Her üç çözüm ağı ile elde edilen sürüklenme katsayısı çok büyük bir değişim göstermezken kaba çözünürlükteki çözüm ağı ile elde edilen taşıma kuvveti katsayısı diğer çözüm ağları ile elde edilenlerden oldukça farklı çıkmıştır. Benzer şekilde, hücum kenarına yakın bölgede orta ve ince çözünürlüklü çözüm ağları yakın bir basınç katsayısı dağılımı vermiştir.

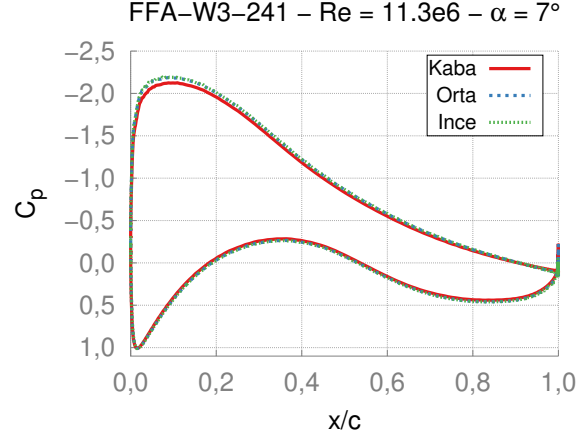
Tablo 1'de analiz sonuçları gösterilen çözüm ağları arasından orta çözünürlükteki çözüm ağı baz alınarak  $x/c=0,1$  konumuna yerleştirilen sınır tabakası emme sistemi, çözüm ağı içerisinde farklı hücre genişliklerinde modellenmiştir. Bu aşamada oluşturulan akış kontrol sistemi çözüm ağları kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Çözüm ağlarının Tablo 1'de sonuçları sunulan çözüm ağları ile karışmaması için isimlendirmelerinde E- ön eki kullanılmıştır. E-Kaba çözüm ağı ile elde edilen sonuçlar diğerlerinden farklı olmakla beraber, E-Orta ve E-İnce çözüm ağları kullanılarak elde edilen aerodinamik kuvvet katsayıları birbirlerine oldukça yakındır. Bu sebeple Şekil 6'de kanat kesiti çevresindeki görüntüsü verilen orta çözünürlükteki sınır tabakası emme sistemi çözüm ağı tasarım uzayı çalışmasında kullanılmıştır. Diğer konumlardaki emme sistemleri için oluşturulan çözüm ağlarının özellikleri Şekil 6'daki çözüm ağı ile benzerdir.

### Tasarım Uzayı Çalışması

Aktif akış kontrol sistemi parametrelerinin değişimi ile elde edilen taşıma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve taşıma ile sürüklenme kuvvetlerinin oranından elde edilen aerodinamik verimliliği

Tablo 1: Çözüm ağı bağımsızlık çalışması sonuçları

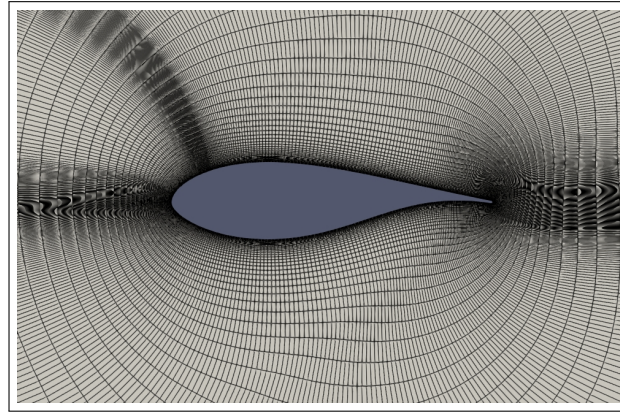
Çözüm ağı	Hücre sayısı	Yüzey düğüm sayısı	İlk hücre yüksekliği (m)	En yüksek $y^+$	$C_l$	$C_d$
Kaba	36 bin	339	$2 \times 10^{-5}$	4,60	1,131	0,01366
Orta	70 bin	505	$2,5 \times 10^{-6}$	0,773	1,184	0,01350
İnce	141 bin	939	$1 \times 10^{-6}$	0,305	1,190	0,01321



Şekil 5: Çözüm ağı bağımsızlık çalışmasında kullanılan çözüm ağlarından elde edilen yüzey basınç katasyısı

Tablo 2: Sınır tabakası emme sistemi üzerinde yapılan çözüm ağı bağımsızlık çalışması sonuçları

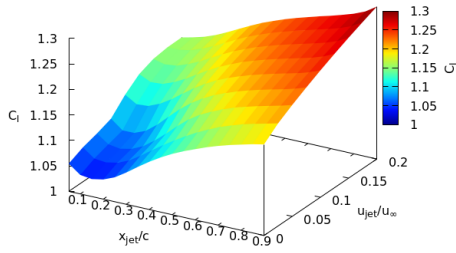
Çözüm ağı	Hücre sayısı	Akış kontrol düğüm aralığı (m)	$C_l$	$C_d$
E-Kaba	70 bin	$2,3 \times 10^{-2}$	1,136	0,01359
E-Orta	74 bin	$2,5 \times 10^{-3}$	1,145	0,01298
E-İnce	91 bin	$6 \times 10^{-4}$	1,146	0,01290

Şekil 6: Çözüm ağı bağımsızlık çalışması sonucunda elde edilen  $x/c=0,1$  konumundaki emme sistemi için oluşturulmuş çözüm ağının kanat kesiti çevresine yakınlaştırılmış şekli

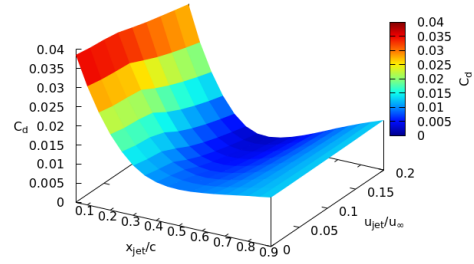
sonuçları Şekil 7-9'da verilmiştir. Emme kuvvetinin artmasıyla taşıma katsayısı ve aerodinamik verimlilikte artış ve sürüklenme katsayısında düşüş gözlenmektedir. Buna ek olarak kontrol sisteminin konumu da sonuçları yüksek oranda etkilemiştir. Emme sistemi firar kenarına doğru ilerledikçe taşıma katsayısının, emme sisteminin hücum kenarına yakın olduğu ve düşük emme

kuvvetinin uygulandığı birkaç analiz dışında, arttığı gözlemlenmiştir. Bundan farklı olarak sürüklenme katsayısının emme sistemi firar kenarına doğru ilerledikçe en başta azaldığı ve her emme kuvvetinde değişiklik gösterse de yaklaşık olarak orta veter konumundan itibaren arttığı görülmektedir. Sürüklenme katsayısının taşıma katsayısına nazaran daha yüksek oranda değişim göstermesi, aerodinamik verimliliğin de sürüklenme katsayısına benzer bir eğilimi takip etmesinden anlaşılabilir.

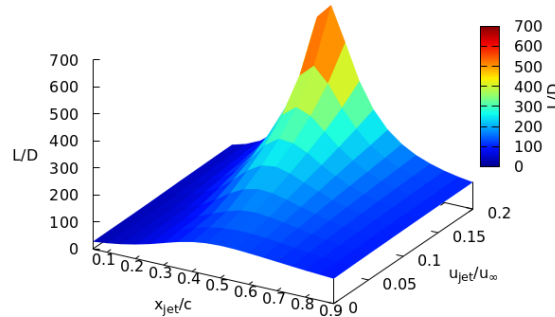
Aerodinamik verimliliğin en yüksek olduğu  $x_{jet}/c = 0,4$  ve  $U_{jet}/U_{\infty} = 0,2$  analizinden elde edilen yüzey basınç katsayısı dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Emme yüzeyinde kontrol sisteminin akış yukarı yönünde elde edilen taşıma katsayısını artırdığı gözlemlenmekte ve farkın emme aralığında en yüksek seviye ulaştığı anlaşılmaktadır. Emme sisteminin konumunun firar kenarına yaklaşıp taşıma kuvvetindeki sürekli artış bundan kaynaklı olabilir çünkü akış kontrolünün uygulandığı konumdan sonra yüzey basınç katsayısında kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Aynı analizler için çevrinti ağırlığı dağılımı Şekil 11'de görselleştirilmiştir. Emme sisteminin uygulanmasıyla birlikte hem yüzey üzerindeki hem de kanat kesitinin kuyruk izindeki çevrinti ağırlığında ciddi oranda bir düşüş görülmüştür. Sınır tabakasının içerisindeki, yüzeye yakın olan düşük enerjili havanın emme sistemi ile akıştan alınmasıyla birlikte sınır tabakası içerisindeki enerji transferi azalmış ve bu durum akışın türbülans seviyesini düşürmüştür. Sürüklenme katsayısındaki ciddi düşüş bundan kaynaklanmaktadır.



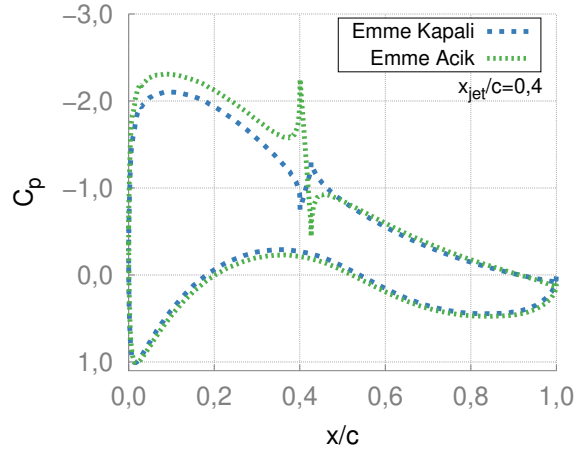
Şekil 7: Taşıma katsayısının sınır tabakası emme sisteminin konumu ve kuvvetine göre değişimi



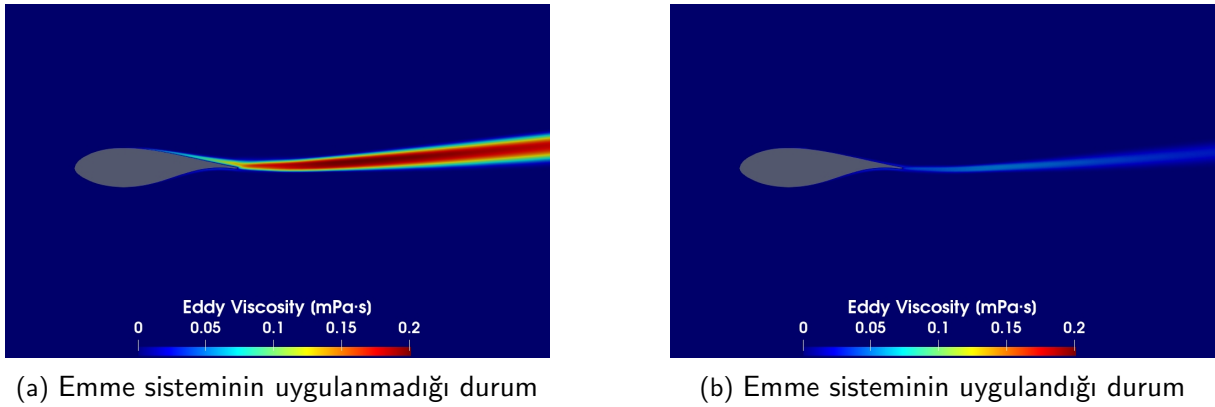
Şekil 8: Sürüklenme katsayısının sınır tabakası emme sisteminin konumu ve kuvvetine göre değişimi



Şekil 9: Aerodinamik verimliliğinin sınır tabakası emme sisteminin konumu ve kuvvetine göre değişimi



Şekil 10: En yüksek aerodinamik verimliliğin elde edildiği akış kontrol durumundan elde edilen basınç katsayısı dağılımları



(a) Emme sisteminin uygulanmadığı durum

(b) Emme sisteminin uygulandığı durum

Şekil 11: En yüksek aerodinamik verimliliğin elde edildiği akış kontrol durumundan elde edilen çevrinti ağdalığı dağılımları

## SONUÇ

Gelen akış koşulunun sıklıkla değişkenlik gösterdiği rüzgar türbinlerinin verimliliği aktif akış kontrol cihazları ile artırılabilir. Bu sistemler arasında yer alan sınır tabaka emme sistemi literatürdeki çalışmalarda araştırılmasına rağmen rotor palası üzerindeki türbülanslı akışı nasıl etkilediği yeterince incelenmemiştir. Bu çalışmada SU2 açık-kaynak akış çözücünün Baş-Çakmakçıoğlu geçiş modeli ile beraber bir sınır tabaka emme sisteminin kullanıldığı durumlardaki doğruluğu hem deneysel hem de başka bir laminer-türbülans geçiş modeli ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ek olarak bir rüzgar türbini kanat kesiti farklı emme sistemi konumları ve emme kuvvetleri ile analiz edilmiş ve bir tasarım uzayı oluşturulmuştur. Elde edilen tasarım uzayı sonucunda akış kontrol sisteminin firar kenarına yakın yerleştirilmesinin ve yüksek emme kuvveti ile kullanılmasının taşıma kuvvetini en yüksek miktarda artırdığı fakat en düşük sürüklenme kuvvetinin, bu kanat kesiti için orta veter konumu civarındaki emme sistemi ile elde edildiği görülmüştür. Ayrıca aerodinamik verimliliğin emme sisteminin parametrelerine sürüklenme katsayısı ile benzer bir eğilim göstermesi sürüklenme kuvvetindeki değişimin taşıma kuvvetine kıyasla daha güçlü olduğunu ortaya koymaktadır. Buna ek olarak emme sisteminin türbülanslı akışın etkilerini ciddi oranda azalttığı, kanat kesiti çevresindeki çevrinti ağdalığındaki ve kanat kesitine uygulanan sürüklenme kuvvetindeki düşüş ile gözlemlenmiştir.



Gelecekteki çalışmalarda, sınır tabaka emme sistemi parametrelerinin rüzgar türbinin ürettiği enerjiye etkileri HAD simülasyonlarından elde edilen sonuçlar ile pala elementi yöntemi aracılığıyla elde edilecektir. Benzer bir şekilde emme kuvveti ile akış kontrol sisteminin harcadığı güç arasında bir ilişki kullanılarak emme sistemi parametreleri ile net enerjinin değişimi incelenecektir. En yüksek net enerji artışının elde edildiği durum kullanılarak 3B rotor HAD simülasyonları yapılacak ve elde edilen sonuçlar 2B HAD bulguları ile karşılaştırılacaktır.

## Kaynaklar

- Akhter, M.Z. ve Omar, F.K., 2021. *Review of Flow-Control Devices for Wind-Turbine Performance Enhancement*. Energies, 14.
- Chawla, J.S., Suryanarayanan, S., Puranik, B., Sheridan, J. ve Falzon, B.G., 2014. *Efficiency improvement study for small wind turbines through flow control*, Sustain. Energy Technol. Assess., 7.
- Dannenber, R.E. ve Weiberg, J.A., 1952. *Section Characteristics of a 10.5-percent-thick Airfoil with Area Suction as Affected by Chordwise Distribution of Permeability*, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA TN 2847.
- Genç, M.S., Kaynak, Ü. ve Yapıcı, H., 2011. *Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction*, P. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 30.
- Hong, L., Fupeng, H. ve Zuoyi, C., 2005. *Analysing and Optimizing the Aerodynamic Performance of Wind Turbine Blades Using Injected-Air Jets at Variable Frequency and Amplitude for Flow Control*, Wind Engineering, 4.
- Huang, L., Huang, P. G., LeBeau, R. P. ve Hauser, T., 2004. *Numerical Study of Blowing and Suction Control Mechanism on NACA0012 Airfoil*, Journal of Aircraft, 41(5), s.1005-1013.
- Lobo, B.A., Schaffarczyk, A.P. ve Breuer, M., 2022. *Investigation Into Boundary Layer Transition Using Wall-Resolved LES and Modeled Inflow Turbulence*, Wind Energ. Sci., 7, s.967-990.
- Martinez Hernandez, G.G., 2012. *Laminar-Turbulent transition on Wind Turbines*, Danmarks Tekniske Universitet (DTU) Doktora Tezi.
- Morgulis, N. ve Seifert, A., 2016. *Fluidic flow control applied for improved performance of Darrieus wind turbines*, Wind Energy, 19.
- Musial, W., Spitsen, P., Beiter, P., Duffy, P., Marquis, M., Cooperman, A., Hammond, R. ve Shields, M., 2021. *Offshore Wind Market Report: 2021 Edition*, U.S. Department of Energy.
- Pechlivanoglou, G., 2013. *Passive and active flow control solutions for wind turbine blades*, Technischen Universität Berlin Doktora Tezi.
- Özçakmak, Ö.S., Sørensen, N.N., Madsen, H.A. ve Sørensen, J.N., 2019. *Laminar-turbulent transition detection on airfoils by high-frequency microphone measurements*, Wind Energy, 22.
- Özçakmak, Ö.S., Madsen, H.A., Sørensen, N.N. ve Sørensen, J.N., 2020. *Laminar-turbulent transition characteristics of a 3-D wind turbine rotor blade based on experiments and computations*, Wind Energ. Sci., 5.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. ve Blocken, B., 2019. *Active flow control for power enhancement of vertical axis wind turbines: Leading-edge slot suction*, Energy, 189.

- Tadjfar, M., Kasmaiee, S., ve Noori, S., 2020. *Continuous Blowing Jet Flow Control Optimization in Dynamic Stall of NACA0012 Airfoil*, Proceedings of the ASME 2020 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2020 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2020 18th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Volume 2: Fluid Mechanics; Multiphase Flows, 13-15 Temmuz.
- van der Hoeven, T., 2013. *Slot Suction of the Turbulent Boundary Layer: An Experimental Study*, Delft University of Technology Yüksek Lisans Tezi.
- Zahle, F., Bak, C., Sørensen, N.N., Guntur, S. ve Troldborg, N., 2014. *Comprehensive Aerodynamic Analysis of a 10 MW Wind Turbine Rotor Using 3D CFD*, 32nd ASME Wind Energy Symposium, Reston, Virginia, 13-17 Ocak.