

HAD Metodu ile Sınır Tabaka Emme Tekniği Kullanılan Rüzgar Destekli Sevk Sistemi Geliştirilmesi

Gözde Nur Küçüksu^{1,2}, Ahmet Ziya Saydam^{2,3}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
²Hidro teknik Tasarım Teknolojileri Ltd., İstanbul, Türkiye
³Piri Reis Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹(sorumlu yazar), gkucuksu@hidro-teknik.net, ORCID: 0000-0002-5003-3359
² zsaydam@hidro-teknik.net, 0000-0002-1266-9401

ÖZET

Gemi kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması kapsamında Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI), Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi (EEXI), Karbon yoğunluk Göstergesi (CII) gibi kavramlar ortaya çıkartılmış ve önümüzdeki süreçte sera gazı emisyonlarının azaltılması için bir yol haritası belirlenerek kurallar yürürlüğe sokulmuştur. IMO tarafından yürürlüğe sokulan kurallar belirli periyotlarda emisyonların azaltılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda tasarım yaklaşımları, gemilerde kullanılan sevk sistemleri ve seyir sürat profilleri değişmektedir. Ancak, bahsi geçen değişimlerle uzun vadede emisyonların kademeli olarak azalmasını talep eden kurallara uyulabilmesi mümkün gözükmemektedir.

Uzun vadede deniz ticaretinin rekabetçi bir şekilde sürdürülebilmesi ve emisyonların azaltılabilmesi için inovatif teknolojilerin geliştirilmesi gerekmekte olup rüzgar destekli sevk sistemleri bu konuda oldukça yüksek potansiyele sahiptir. Sınır tabaka emme tekniği kullanılan kanatlar da rüzgar destekli sevk sistemleri içerisinde yüksek kaldırma kuvveti yaratan alternatifler arasında bulunmaktadır.

Bu çalışmada, sınır tabaka emme tekniği kullanılan bir kanat yapısı için tasarım parametrelerinin aerodinamik performansa etkileri Reynolds Averajlı Navier Stokes (RANS) metodu ile incelenmiştir. Öncelikle, hesaplamalı yaklaşımın çözülen probleme uygunluğu ağdan bağımsızlık çalışması ile irdelenmiş, takiben literatürde bulunan deneysel veriler ile doğrulama çalışması icra edilmiştir. Üretilen kaldırma kuvvetinin mertebesine doğrudan etkisi bulunan flap açısı ve sınır tabaka emme bölgesinin açıl konumu ile ilgili parametrik çalışma icra edilerek optimum konumlar tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sınır tabaka emme, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), rüzgar destekli sevk, turbo-yelken, aerodinamik

Makale geçmişi: Geliş 22/11/2022 – Kabul 06/12/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1208594>

Development of a Wind-Assisted Propulsion System Using Boundary Layer Suction with CFD Method

Gözde Nur Küçüksu^{1,2}, Ahmet Ziya Saydam^{2,3}

¹ İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

² Hidroteknik Nautical Design Technologies Ltd., İstanbul, Türkiye

³ Piri Reis University, İstanbul, Türkiye

¹(corresponding author), gkucuksu@hidro-teknik.net, ORCID: 0000-0002-5003-3359

² zsaydam@hidro-teknik.net, 0000-0002-1266-9401

ABSTRACT

The International Maritime Organization (IMO) establishes a roadmap to put into force new regulations in the context of reducing greenhouse gas emissions from ships and presents new parameters such as Energy Efficiency Design Index (EEDI), Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and Carbon Intensity Indicator (CII). The regulations issued by IMO require emission reductions at specific time intervals in a progressive manner. Ship design approaches, propulsion systems used on ships, and ship operating profiles are changing along with these regulations. However, it does not seem possible to comply with the regulations demanding a gradual reduction in emissions in the long term with the above changes.

Innovative technologies such as wind-assisted propulsion systems which have a very high potential in this manner need to be developed to keep maritime trade competitive and reduce emissions. Devices utilizing boundary layer suction are also among the alternatives that generate high lift in wind-assisted propulsion systems. In this study, the effects of design parameters on aerodynamic performance for a wing structure are investigated by using the boundary layer suction technique with Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) method. First, the suitability of the numerical approach with a grid independence study is assessed for predicting the aerodynamic performance of the suction wing, followed by the validation study with the experimental data found in the literature. Flap angle and the extent of the suction area has been varied parametrically and the effect of the variation of these parameters on the aerodynamic performance has been investigated.

Keywords: Boundary layer suction, computational fluid dynamics (CFD), wind-assisted propulsion, aerodynamics, turbo-sail

Article history: Received 22/11/2022 – Accepted 06/12/2022

1. Giriş

Denizde can güvenliğini sağlamak amacıyla kurulan Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (International Maritime Organization, IMO) yetkisi, 1954 yılındaki Denizlerin Petrolle Kirlenmesinin Önlenmesine ilişkin uluslararası sözleşme (OILPOL Sözleşmesi) ile beraber genişletilmiştir. Can güvenliğinin yanısıra kirlilik sorunlarının sorumluluğunu da üstlenmeye başlayan ve bu konuda başarılı sonuçlar elde eden IMO'nun, şimdiye kadar uluslararası deniz taşımacılığının düzenlenmesi için yürürlüğe soktuğu 53 anlaşmanın 21'i doğrudan çevre ile ilgilidir (IMO, 2011). 1973'te yürürlüğe giren Gemi Kaynaklı Kirlilik Önlenmesine ilişkin sözleşmedeki (MARPOL) Ek VI Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) yeni gemiler için zorunlu hale getirilmiştir. IMO tarafından önerilen Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi formülü (IMO,2012):

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j\right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**}\right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} \left[\frac{g}{t \cdot nm}\right] \quad (1)$$

*: Normal azami elektrik gücünün bir kısmı şaft jeneratör tarafından karşılanıyorsa, SFC_{AE} ve C_{FAE} yerine SFC_{ME} ve C_{FME} kullanılmalıdır.

** : $P_{PTI(i)} > 0$ durumunda, P_{eff} hesaplaması için $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$ ve $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$ 'nin ortalama ağırlık değeri kullanılmalıdır.

Formülde $ME(i)$ ve $AE(i)$ indeksleri ana ve yardımcı makineyi belirtmektedir. C_F yakıt tüketimi ve CO_2 emisyonu arasındaki boyutsuz dönüşüm faktörü, V_{ref} gemi hızı, P ana ve yardımcı makine gücü, f_j spesifik gemi dizayn elementleri için düzeltme faktörü, f_c kapasite faktörü, f_w hava faktörüdür.

IMO tarafından 2023'te yürürlüğe sokulacak olan bir diğer endeks ise Enerji Verimliliği Mevcut Gemi Endeksi (EEXI) sera gazı stratejisinde belirlenen hedeflere ulaşma çalışmalarındaki bir sonraki aşamadır (IMO, 2022a). Mevcut gemilerde EEXI hesaplaması için IMO tarafından önerilen formül ise aşağıdaki gibidir (IMO,2022b):

$$EEXI = \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j\right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(j)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE*})}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} + \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME**}\right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_1 \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \left[\frac{g}{t \cdot nm}\right] \quad (2)$$

Yukarıda belirtilen yeni kurallar, zaman içerisinde belirli aralıklarda daha düşük sera gazı salınımına izin verecek biçimde kademeli olarak güncellenmektedir. IMO hedefleri kapsamında, gemi kaynaklı sera gazı emisyon seviyesinin 2008 yılı seviyesine nazaran 2030 yılında %40, 2050 yılında ise %70 oranında azaltılması hedeflenmektedir. Bu durumda, mevcut gemiler ve yeni inşa edilecek gemilerin tasarım ve işletilmesi ile ilgili yaklaşımlarında da değişmesi gerekmektedir. Formülasyonda görüldüğü üzere, gemi üzerinde kullanılan inovatif teknolojilerden elde edilen enerji tasarrufu toplam sera gazı salınımindan düşülerek enerji verimliliği parametreleri hesaplanmaktadır. Bu durumda, rüzgar destekli sevk sistemlerinin kullanılması önümüzdeki yıllarda yeni inşa edilen ve mevcut gemiler için enerji verimliliği kurallarına uyum için önem arz etmektedir.

Czermanski v.d. (2022) 12 farklı tipte mevcut gemi üzerinde EEXI hesaplamalarını yapmışlardır. Çalışmanın amacı, EEXI kuralları yürürlüğe girdikten sonraki süreçte yapılacak alternatif uygulamaların IMO hedeflerine ulaşım konusunda yeterliliğinin irdelenmesi olarak belirlenmiştir. Mevcut teknolojilerin ve uygulamaların 2030 hedefleri için yeterli olamayacağı sonucuna varılmıştır. Rüzgar destekli sevk sistemi kullanılmasıyla beraber yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı konusunda Lindstad v.d. (2022) kuru yük gemisi örneğini ele almışlardır. Çalışmada, yenilikçi tasarım yaklaşımları ilerüzgar destekli sevk sisteminin birlikte kullanılması durumunda indeksin %40'a kadar düşebileceği sonuca varılmıştır. Güncel çalışmalar incelendiğinde, mevcut tasarım yaklaşımları, inovatif teknolojiler ve işletme yaklaşımlarının sera gazı azaltımı hedeflerine ulaşabilecek yeterlilikte olmadığı sonucuna varılabilmektedir.

Rüzgar destekli sevk sistemleri, tarihi olarak rüzgarın gemi sevk için kullanılmaya başlanmasından bu yana geliştirilmektedir. Yelkenli tekneler olarak adlandırılan ve sadece rüzgar enerjisi ile sevk edilen teknelerde kare yelken ve bermuda yelken kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişimi ile birlikte yelken benzeri rijit yelken, dynarig ve rüzgarı enerji kaynağı olarak kullanan ancak yelken içermeyen uçurtma, flettner rotor ve turbo-yelken, rüzgardan elektrik elde ederek sevk için kullanan yatay ve dikey rüzgar türbinleri gibi yeni rüzgar sevk sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Sağ üstten sola doğru rüzgâr sevk sistemleri: dynarig, flettner rotor, rijit yelken, turbo-yelken, dikey rüzgâr türbini (sail-world.com, loc.gov, wikipedia.org, cousteau.org, Bockmann & Steen).

Diğer bir teknolojik rüzgar destekli sevk sistemi ise daha tam olarak limitleri keşfedilememiş olan turbo-yelkendir. Flettner rotora benzer silindirik yelkenlere sahip olmasına rağmen, silindirler döndürülmemektedir. Turbo-yelkende, üçgen kesitli bir yönlendirme sistemi ve silindir üzerindeki deliklerden hava emen bir fan sistemi mevcuttur. Üçgen yönlendirme sistemi istenen yönde kuvvet elde edilmesini sağlamakta, hava emişi ise sınır tabakayı istenen yöne çekerek yanal kuvvetin şiddetini arttırmaktadır.

Bu sistemin uygulandığı en bilinen örnek, Cousteau vakfının 1980 yılında çalışmaya başlayan Alcyone teknesidir (Şekil 1.2.). Gemi 2 adet dizel makineye sahiptir, baş tarafı tek gövdeye kıç tarafı katamaran forma sahiptir. Tekne boyu 31.4 m, genişliği 8.84 m ve 10.65 knot seyir hızına sahiptir. 10.1 m yüksekliğe ve 2 m çapa sahip 2 adet turbo-yelken kullanılmıştır. Turbo-yelkenler hareketli olmadığı için

teknede titreşim, gürültü ve döndürme gücüne ihtiyaç duyulmamaktadır. Cousteau vakfı tarafından yapılan kapsamlı çalışmada, (Charrier v.d., 1985) sınır tabaka emme tekniği ile farklı kesitlerin aerodinamik performansları rüzgar tüneli testleriyle detaylı bir şekilde karşılaştırılmış olup değişik rüzgar destekli sevk sistemleri ile de karşılaştırmalara da yer verilmiştir.



Şekil 1.2. Turbo-yelken entegre edilmiş The Alcione teknesi (fr.cousteau.org)

Turbo-yelkenler ile ilgili deneysel çalışmalara bir örnek Low ve ekibinin Singapur Ulusal Üniversitesi (NUS) bünyesinde gerçekleştirdiği çalışmadır (Low v.d., 1991). Çalışmada kullanılan kanat kesidi silindirik olup, rüzgar tüneli zemininden tavana kadar uzanmaktadır. Bu şekilde, uç girdap etkisinden arındırılarak inceleme yapılması mümkün olup, silindirik keside bağlanan flap ve sınır tabaka emiş tekniği kullanımı ile yüksek kaldırma kuvveti elde edilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmada basınç dağılımı, kaldırma kuvveti ve direnç kuvvetinin flap açısı ve emme alanının konumuna göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Yapılan incelemelerde sınır tabaka emiş miktarı, emme katsayısı ile tanımlanmıştır:

$$C_q = \frac{Q}{Ud} \quad (3)$$

Burada C_q emme katsayısını, Q birim kanat açıklığına karşılık gelen debiyi, U bağıl rüzgar hızını, d ise silindirik çapını ifade etmektedir. Çalışmada farklı emme katsayıları için aerodinamik performans da incelenmiştir.

Turbo-yelken ile ilgili hesaplamalı çalışmalarda, özellikle viskoz etkilerin hassas bir şekilde hesaba katılabilmesi maksadıyla, çoğunlukla RANS metodu kullanılmaktadır (Gurerri v.d., 2016; Yihuai v.d., 2017). Bu çalışmalarda flap pozisyonu, emme katsayısı ve silindirik olmayan kanat yapılar için hücum

açısının etkisi incelenmiş olup kullanılan hesaplamalı yaklaşımın çözülen probleme uygunluğu irdelenmiştir.

Turbo-yelken kanat profili de üretilen aerodinamik kuvvetler üzerine etki etmektedir. Hcini v.d. (2017) tarafından geliştirilen metodoloji ile kanat kalınlığı, emme ve flap açısız konumları Hess-Smith panel yönetimi ile incelenmiştir ve sonuçlar deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Rüzgar destekli sevk sistemlerinin gemilerde kullanılması durumunda oluşacak kuvvet ve moment dengesi, geleneksel sevk sistemlerinin kullanıldığı gemilere göre farklılıklar göstermektedir. Oluşan aerodinamik yanal kuvvet hidrodinamik yanal kuvvet ile dengelenmekte, bu durum geminin bir sürüklenme açısı altında ilerlemesine neden olmaktadır. Ayrıca, yanal kuvvet tarafından oluşturulan yatırıcı moment geminin belirli bir meyil açısında dengeye gelmesine neden olmaktadır. Bunlara ilaveten, pervanenin düşük yüklenmede çalışacak olması münasebetiyle tekne verimi, açık su verimi ve relatif dönme verimi de farklılıklar gösterecektir. Bu koşullar altında işletilecek bir geminin tasarımı aşamasında yukarıda bahsi geçen koşulların hidrodinamik performansa etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılan güncel bir çalışmada (Saydam v.d., 2022) ticari bir geminin meyil ve sürüklenme açısı altında ve farklı hızlarda hidrodinamik performansı RANS metodu ile incelenmiş ve güncel tasarım metodlarının bu tarz gemilere uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Yapılan literatür değerlendirmesinde, turbo-yelken veya sınır tabaka emme tekniği kullanarak rüzgar destekli gemi sevk sistemi geliştirilmesi konusundaki yüksek potansiyele rağmen yeteri kadar çalışma yapılmadığı görülmektedir. Özellikle, Cousteau vakfına ait patent süresinin dolmasını takiben çalışmaların çeşitliliğinin arttığı, silindir dışında farklı kanat kesitlerinin de ileri hesaplamalı yöntemler ile incelendiği görülmektedir. Halihazırda, yapılacak güncel çalışmaların ilgili teknolojinin detaylı olarak anlaşılması, farklı kesit tiplerinin incelenmesi, üretilen kaldırma kuvvetini artırıcı farklı yaklaşımların geliştirilmesi, gemi üzerinde oluşan aerodinamik ortamda performans tahmini, hidrodinamik etkileşimlerin anlaşılması vb. konuların da bilgi birikimini geliştireceği değerlendirilmektedir.

Mevcut çalışmada, RANS metodu kullanılarak ileriye doğru eliptik bir kanat kesidi için flap ve emme alanı açısız konumlarının aerodinamik performansa etkisi incelenmiştir. Literatürde yüksek kaldırma kuvveti üretme potansiyeli olan eliptik kesitler için kısıtlı sayıda çalışma olduğundan, gemi üzerinde kullanılabilecek tasarım alternatifleri üzerinde yapılan çalışmaların konu ile ilgili literatürü geliştireceği değerlendirilmektedir. Günümüz şartlarında, özellikle flettner rotor ve diğer alternatif rüzgar destekli sevk sistemleri ile rekabet edebilecek seviyede kaldırma kuvveti üretebilen turbo-yelken tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada flap konumu ve emme alanı açısız konumu değiştirilerek yüksek kaldırma kuvveti elde edilmesi hedeflenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde hesaplamalı analiz yaklaşımı sunulmuş , takiben üçüncü bölümde inceleme için kullanılacak hesaplamalı yaklaşımın probleme uygunluğu ağdan bağımsızlık analizi ile incelenmiş ve literatürde bulunan deneysel bir çalışmanın sonuçları kullanılarak doğrulama yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise tasarım parametrelerinin aerodinamik performansa etkileri tahmin edilmiştir.

2. Hesaplamalı Analiz Yaklaşımı

Sınır tabaka emme tekniği ile yüksek kaldırma kuvveti üreten kanat yapısının aerodinamik performansının incelenmesi için icra edilecek hesaplamalı çalışmalar üç aşamalı olarak kurgulanmıştır. Öncelikle, silindirik kanat yapısı için ağdan bağımsızlık çalışması icra edilmiştir. Bu aşamada sınır tabaka emme tekniği uygulanmamış olup silindir etrafındaki hücre sayısı ve sınır tabaka ağ yapısı karakteristiği global olarak incelenmiştir. Takiben, deneysel veriler kullanılarak doğrulama çalışması icra edilmiştir.

Bu aşamada, global ağ yapısına ilave olarak sınır tabaka emme bölgesindeki ağ yapısı ve emme işleminin modellenmesi ile ilgili detayların belirlenmesi ve incelenen probleme uygun çözüm stratejisi oluşturulduğunun doğrulanması sağlanmıştır. Takiben, parametrik çalışmalar ilk iki aşamada belirlenen ağ yapısı ve çözüm parametreleri kullanılarak icra edilmiştir.

Hesaplama analizler, bir RANS çözücüsü olan Ansys CFX ticari yazılımı ile icra edilmiştir. Bu yazılım, sonlu hacimler metodu kullanarak ayrıklaştırılmış süreklilik ve momentum denklemlerini düğüm noktası merkezli (vertex centered) bir yaklaşım ile çözmektedir. Taşınım ve türbülans sayısal modelleri “yüksek çözünürlüklü” ayarlanarak çözücünün lokal olarak ilgili denklemleri, çözüm ağı içerisinde karışım (blend) faktörünü yerel akış karakteristiğine uygun şekilde değiştirerek mümkün olan en yüksek doğruluk mertebesine getirmesi sağlanmaktadır (Ansys, 2013).

Hesaplama çalışmaları esnasında türbülans modellemesi olarak Kayma Gerilimi Taşıma (SST) Gamma-Theta türbülans modeli kullanılmıştır. İncelenen deneysel çalışmalarda ve takiben icra edilen analizlerde Reynolds sayılarının (Re) tam türbülanslı akış kabulü yapılabilecek mertebenin altında olması dolayısıyla ($Re < 10^6$) bu yaklaşım tercih edilmiştir. Ağdan bağımsızlık analizleri zamandan bağımsız (steady-state) olarak icra edilmiş olup, takip eden çalışmalar zamana bağlı (unsteady) olarak gerçekleştirilmiştir.

Ağdan bağımsızlık çalışması Uluslararası Deney Havuzları Konferansı (ITTC) tarafından önerilen yaklaşım ile icra edilmiştir. Bu yaklaşıma göre en az üç analiz icra edilmesi gerekmektedir. Ağ yapısını oluşturan hücrelerin boyutları iyileştirme katsayısı oranında (r_i) her bir analiz için küçültülmektedir. Bu çalışmada, silindirik yüzeyi üzerindeki hücre boyutlarının elde edilen kuvvetlere etkisi incelenmiş olup $r_i \sqrt{2}$ olarak alınmıştır. Kaldırma kuvveti ve direnç için yakınsama oranları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir (ITTC, 2017):

$$R_i = \frac{S_{i2} - S_{i1}}{S_{i3} - S_{i2}} = \frac{\epsilon_{i,21}}{\epsilon_{i,32}} \quad (4)$$

Burada R_i yakınsama oranını, S_i ilgili analizin sonucu elde edilen parameter değerini, $\epsilon_{i,21}$ orta yoğunluklu ve düşük yoğunluklu ağlar ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkı ve $\epsilon_{i,32}$ ise yüksek yoğunluklu ve orta yoğunluklu ağ yapıları ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkı simglemektedir. Bu durumda, elde edilen yakınsama oranına göre dört farklı yakınsama koşulu elde edilebilmektedir:

- (i) Monoton yakınsama ($0 < R_i < 1$),
- (ii) Salınımlı yakınsama ($-1 < R_i < 0$),
- (iii) Monoton ıraksama ($1 < R_i$),
- (iv) Salınımlı ıraksama ($R_i < -1$).

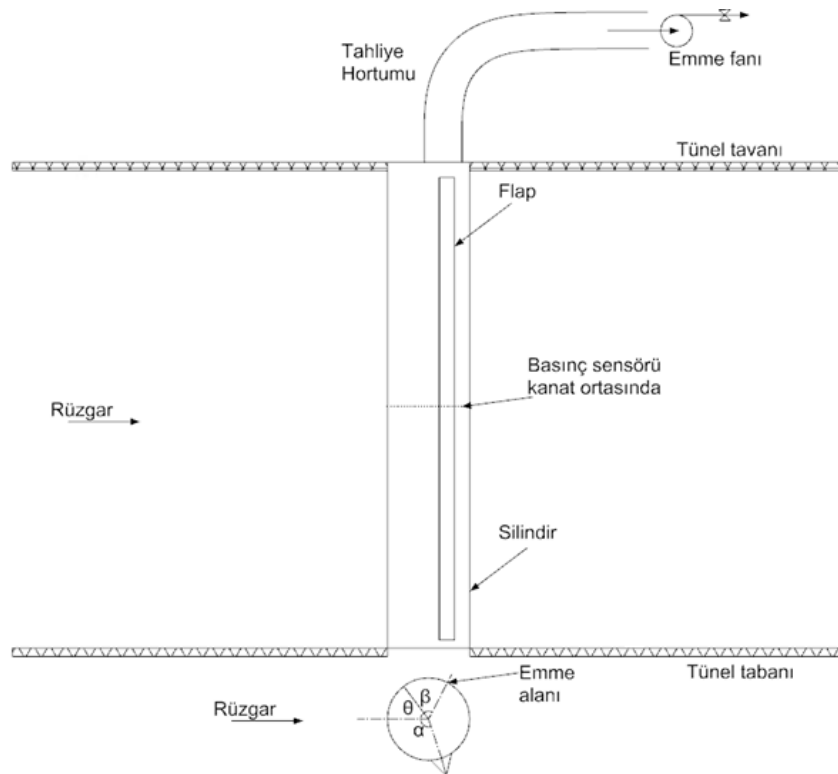
3. Doğrulama Çalışması

Detaylı parametrik analizler öncesinde, kullanılacak hesaplamalı model ve belirlenen çözüm parametrelerinin uygunluğunun tespit edilebilmesi amacıyla ağdan bağımsızlık analizi ve doğrulama analizleri yapılmıştır. Yapılan hesaplamalı çalışmalardan elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan (Low, Luo, & Winoto, 1991) deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Doğrulama analizleri kapsamında Low ve diğerleri (1991) tarafından National University of Singapore bünyesindeki rüzgar tüneline gerçekleştirilen deney sonuçları ele alınmıştır. Rüzgar tüneli 0.6 m

yüksekliğinde ve 1 m genişliğindedir. Deney 6×10^4 Reynolds sayısına karşılık gelen 9 m/s sürat için gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan sınır tabaka emişli kanat modeli 1 m çapında ve 0.6 m yüksekliğinde silindirik bir yapıdadır. Model, rüzgar tünelinin merkezine tavandan ve tabandan bağlı olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.1.). Model üzerinde flap ve %18 oranında gözenekli bir emme alanı bulunmaktadır. Emme alanı 2 mm delikli 4 boyuna kolondan oluşmaktadır. Flap 30 mm derinliğinde kanat boyunca uzanan üçgen kesit alanlı bir yapıdır. Flap ve emme alanı sırasıyla α ve β açılarına bağlı olarak konumlandırılmıştır.

Deneyde emme akışı, kanadın üst kısmına bağlı 370 W santrifüj fan ile sağlanmıştır. Deneyde ölçülen maksimum debi $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ve karşılık gelen azami emme katsayısı (C_q) 0.2'dir. Deneyde basınç dağılımı silindirik kanat yapısının merkez hattına 15° açı aralıklarıyla yerleştirilen 24 basınç sensörü ile ölçülmüştür. Deneyde emme alanı açıl konumu, β , 10° aralıklarla 90 - 130° arasında değiştirilmiştir. Her emme alanı açıl konumu için flap açıl konumu, α , 10° aralıklarla 80 - 160° arasında deney icra edilmiştir.



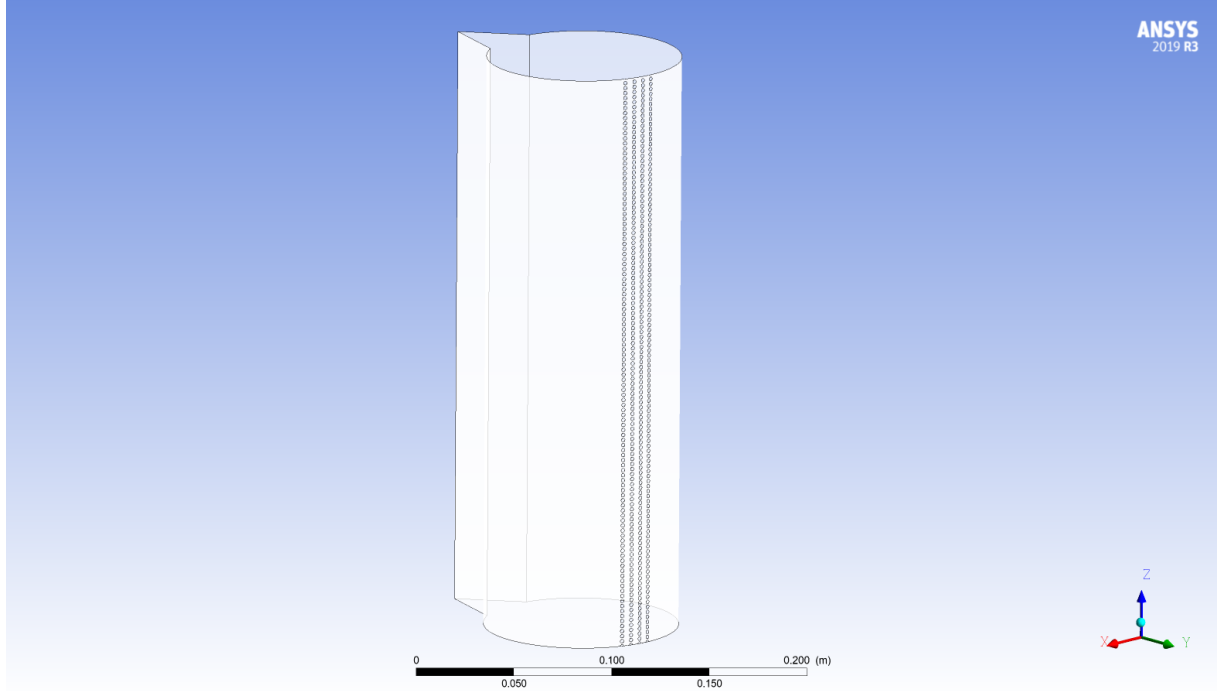
Şekil 3.1. Turbo-yelken modeli deney düzeneği

Deneyde emme alanı açıl konumunun direnç ve kaldırma kuvveti üzerindeki etkisi $C_q=0.09$ için incelenmiştir. Aynı zamanda emme alanı açıl konumunun basınç üzerindeki etkisi flap açıl konumu $\alpha=110^\circ$ de sabit tutularak 3 farklı açı, $\beta=90, 110$ ve 130° için ölçülmüştür. Emme katsayısının kaldırma kuvveti üzerindeki etkisini incelemek için iki farklı katsayıda deney icra edilmiştir: $C_q=0.09$ ve $C_q=0.2$.

Flap açıl konumunun kaldırma ve direnç kuvveti üzerindeki etkisi $C_q=0.09$ için incelenmiştir. Flap açıl konumunun basınç dağılımı üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiş olup, emme alanı açıl konumu $\beta=110^\circ$ de sabit tutularak üç farklı flap açıl konumu $\alpha=90, 110$ ve 150° için analiz yapılmıştır.

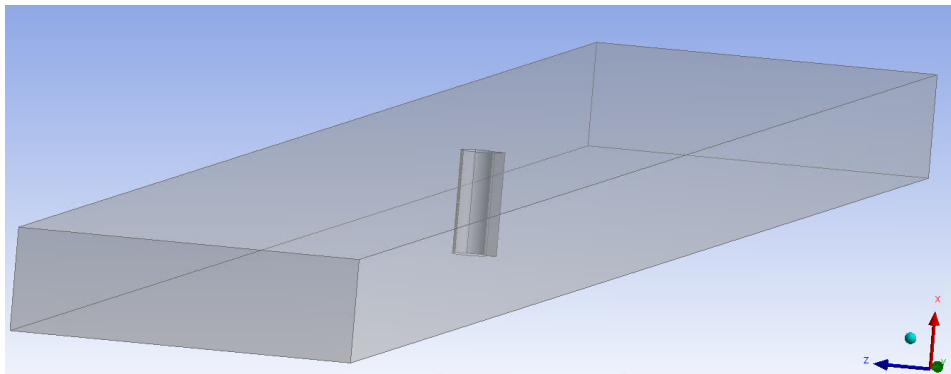
Sınır tabaka emmeli kanat, deneyde verilen model ve rüzgar tünel ölçülerine uygun olarak Rhinoceros programı ile modellenmiştir. Emme alanı %18 oranında gözenekli yapıyı sağlayacak şekilde 2 mm delikli 4 kolon olarak modellenmiştir (Şekil 3.2.). Turbo-yelken modeli 0.1 m çapında ve 0.6 m yüksekliğinde

silindirik bir yapı olarak tünelin merkez hattına yerleştirilmiştir (Şekil 3.3). Emme alanı ve flap her analiz için farklı açılarda modellenmiştir. Flap, deneye uygun şekilde 30 mm derinliğinde üçgen kesitli silindirik boyunda bir katı cisim olarak modellenmiştir. Yapının simetrik olmasından kaynaklı analizler yarı model üzerinden gerçekleştirilmiştir.

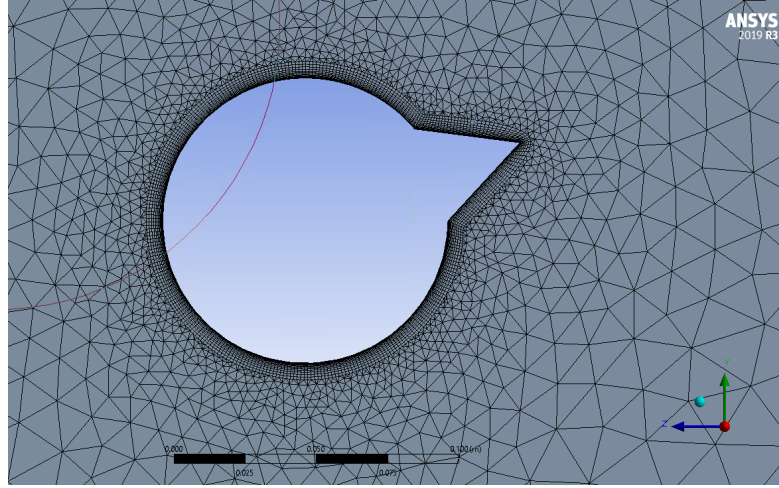


Şekil 3.2. Analiz için modellenen kanada ait perspektif görünüş

Analizler ANSYS-CFX yazılımı ile icra edilmiştir. Oluşturulan katı model öncelikle çözüm hacmi haline getirilmiştir. Şekil 3.3. ile gösterilen çözüm hacminin uzunluğu 10m, genişliği 1m ve yüksekliği model boyuyla aynı olup 0.6 metredir. Ağ yapısından bağımsızlık analizi emmenin olmadığı koşulda zamandan bağımsız (steady state) gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısını oluşturmak için ANSYS Mesher yazılımı kullanılmıştır. Kanat etrafında sınır tabaka ağ yapısı uygulanmıştır (Şekil 3.4). Analiz için 3 farklı hücre boyutunda, Δx_i , $r = \sqrt{2}$ iyileştirme oranına sahip ağ yapıları kullanılmıştır. Analizi gerçekleştirilen hücre boyutları ve toplam hücre sayısı bilgileri Tablo 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Analiz çözüm hacmi



Şekil 3.4. Ağ numarası 003 için kanat üzerinde oluşturulan sınır tabaka çözüm ağı

Tablo 3.1. Ağ yapısından bağımsızlık analiz ağı bilgileri

Ağ numarası	Hücre boyutu [m]	Toplam hücre sayısı
1	0.00222	955094
2	0.00157	1843528
3	0.00111	3213050

Ağ yapısından bağımsızlık analizde elde edilen direnç ve kaldırma kuvvet Tablo 3.2 ile gösterilmiştir. Analiz sonucu elde edilen parametrelerin değişimi ve yakınsama oranları Tablo 3.3 ve yakınsama grafiği Şekil 3.5 ile gösterilmiştir. Kaldırma kuvveti (L) ve direnç (D), aşağıda verilen formüller kullanılarak katsayı halinde incelenmiştir:

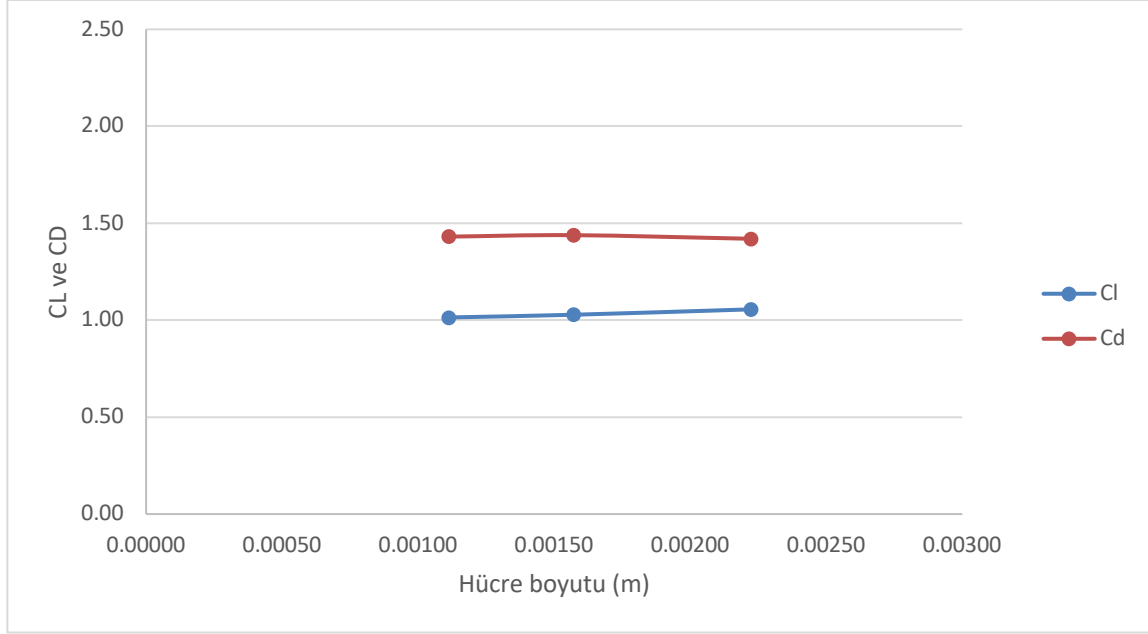
$$C_L = \frac{L}{0.5\rho SV^2}, C_D = \frac{D}{0.5\rho SV^2} \quad (5), (6)$$

Tablo 3.2. Ağ yapısından bağımsızlık analizi kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları

Ağ numarası	L [N]	C _L	D [N]	C _D
1	1.52	1.06	2.04	1.42
2	1.48	1.03	2.07	1.44
3	1.46	1.01	2.06	1.43

Tablo 3.3. Ağ yapısından bağımsızlık analizi yakınsama oranları

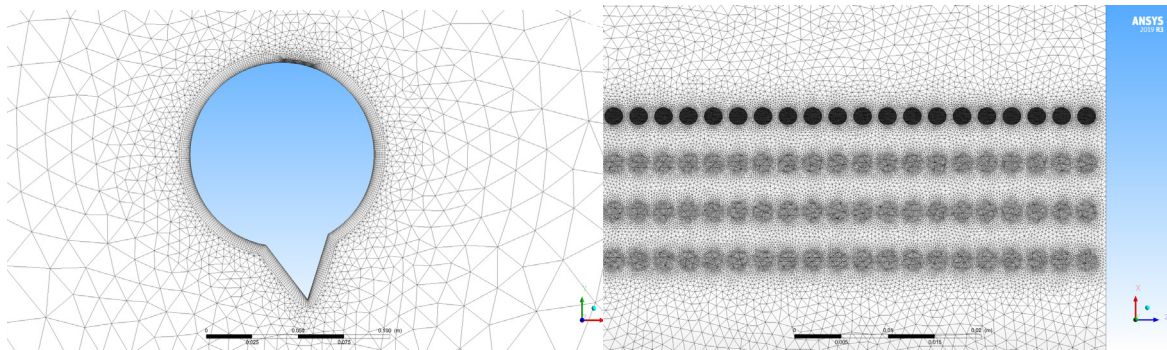
	C _L	C _D
ε_{1,2}	-0.028	0.019
ε_{2,3}	-0.014	-0.008
R₁	0.500	-0.410



Şekil 3.5. Ağdan bağımsızlık analizi yakınsama grafiği

Yapılan ağdan bağımsızlık çalışması sonucunda, kaldırma kuvvetinin monoton olarak yakınsadığı görülmüştür. Direnç kuvvetinde ise salınımlı yakınsama elde edilmiştir. Çalışmanın ana hedefi kaldırma kuvveti üretme potansiyellerini değerlendirmek olduğundan mevcut aşamada elde edilen sonuçlara göre, 3 numaralı ağ yapısı kullanılarak flap ve emme alanının açılma konumunun ve emme katsayısının direnç, kaldırma kuvveti ve basınç dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizler ANSYS-CFX yazılımında zamana bağlı (transient) ve SST Gamma-Theta türbülans modeli ile icra edilmiştir. Deneyde belirtilen 6×10^4 Reynolds sayısına göre analizler 9 m/s sürat için gerçekleştirilmiştir.

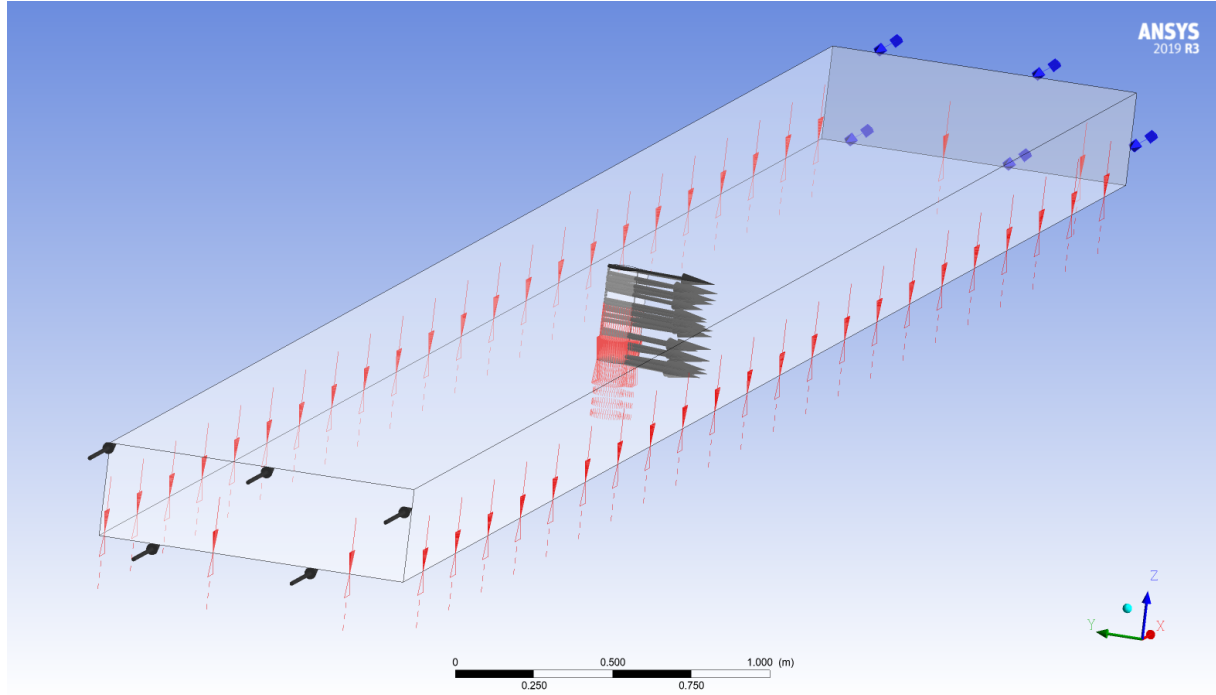
Oluşturulan katı model, ağ yapısını oluşturmak için ANSYS Mesher yazılımına aktarılmıştır. Ağ yapısından bağımsızlık analizinde farklı olarak emme yüzey alanındaki ağ yapısı daha küçük elemanlarla oluşturulmuştur (Şekil 3.6.). Turbo-yelken etrafında sınır tabaka ağ yapısı uygulanmıştır. Ağ yapısında toplam 9,378,091 eleman bulunmaktadır.



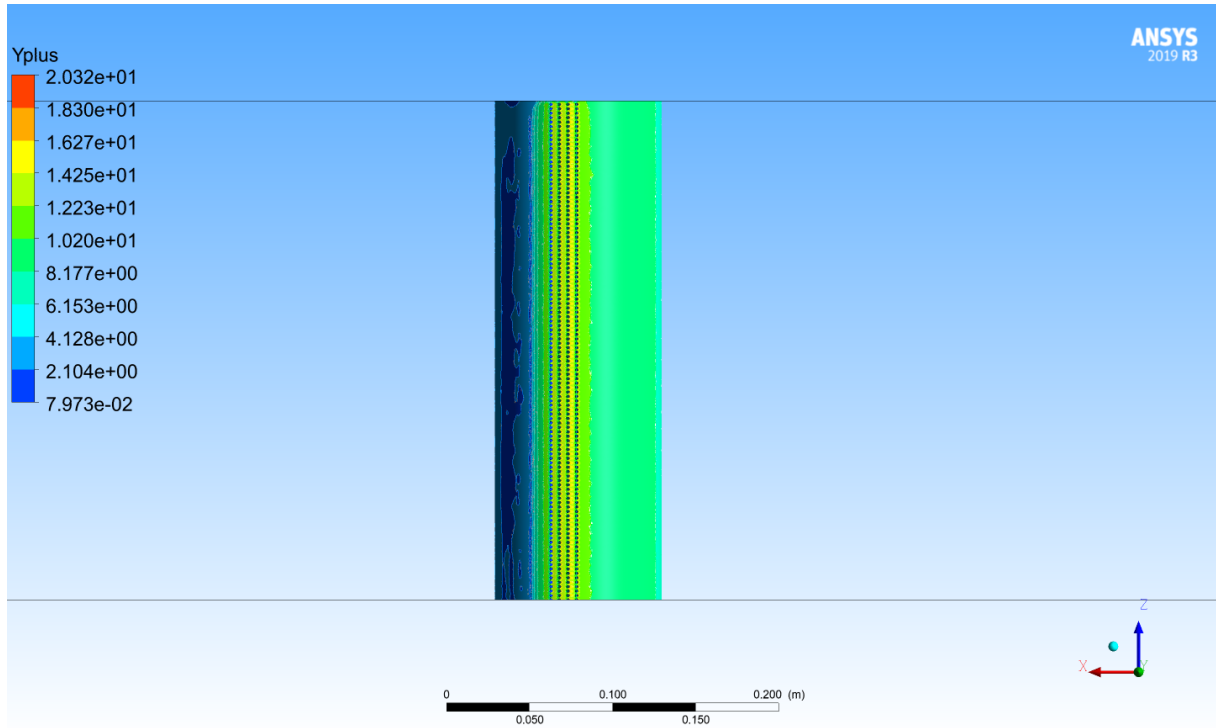
Şekil 3.6. Kanat üzerinde oluşturulan sınır tabaka ağ yapısı

Analiz sınır şartları Şekil 3.7'de verilmektedir. Simetrik akış dolayısıyla yarım model kullanılmış olup, toplam kanat açıklığının ortasında bulunan düzlemde simetri koşulu uygulanmıştır. Turbo-yelken emiş deliklerinde, istenilen emme katsayısını sağlayacak akış hızı tespit edilip başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır.

Analiz sonucu elde edilen Yplus dağılımı Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Kanat yüzeyinde genel olarak 10 ve altında değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 3.7. Analiz sınır koşulları

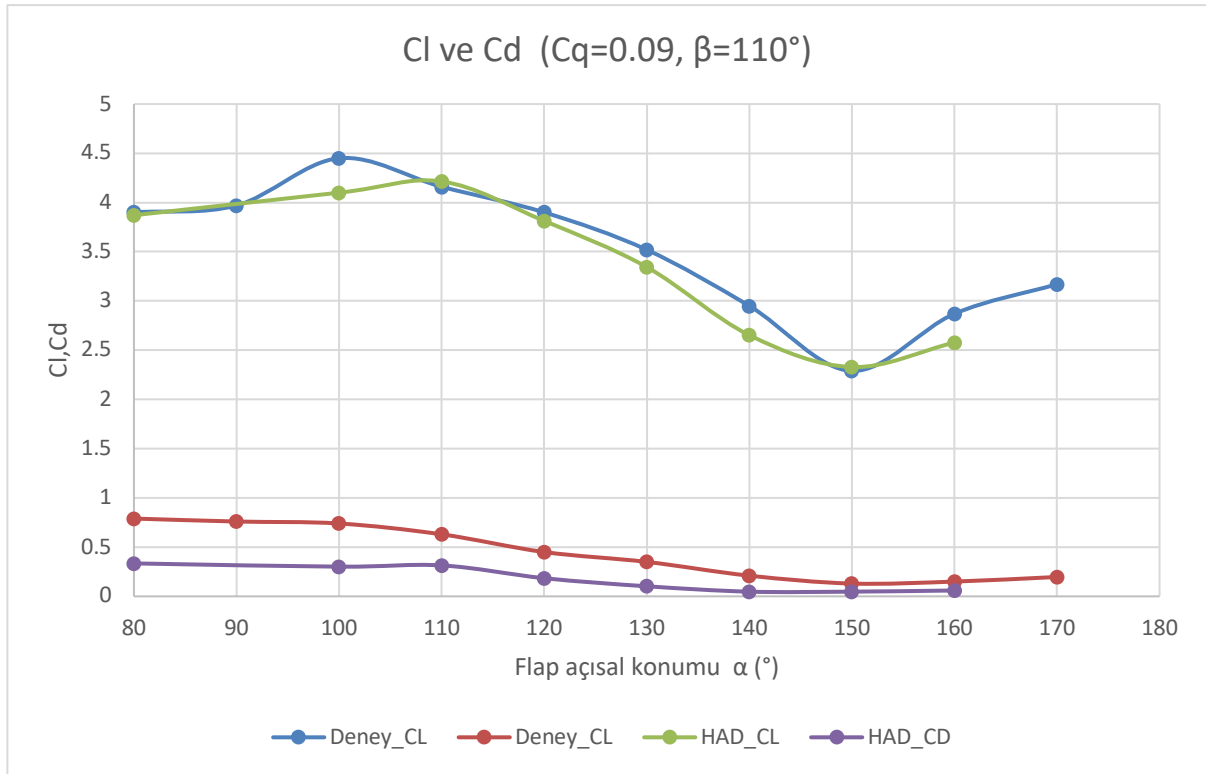


Şekil 3.8. Tuboyelken model üzerindeki y+ dağılımı

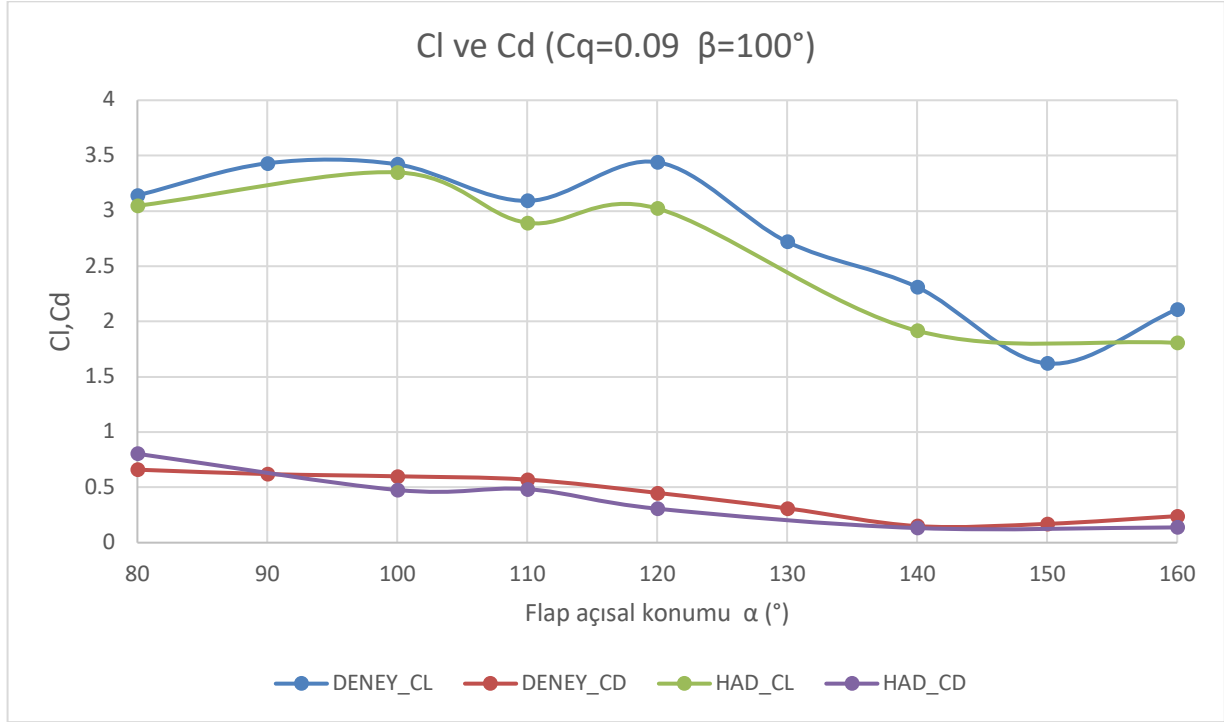
Emme katsayısı 0.09 ve iki farklı emme alanı açısıl konumu 100° ve 110° için farklı flap açısıl konumlarında elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 ile gösterilmiştir. Emme katsayısı 0.2 için elde edilen sonuçlar Şekil 3.11 ile gösterilmiştir. Her iki emme katsayısında elde edilen hesaplamalı

kaldırma kuvveti değerlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Kaldırma kuvveti değerleri ve kuvvetin değişim eğiliminin deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlarda benzer şekilde davrandığı değerlendirilmektedir. Flap açıl konumu ve emme alanı açıl konumunun değişiminin kaldırma kuvvetine etkisi mevcut hesaplamalı yaklaşım ile hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir.

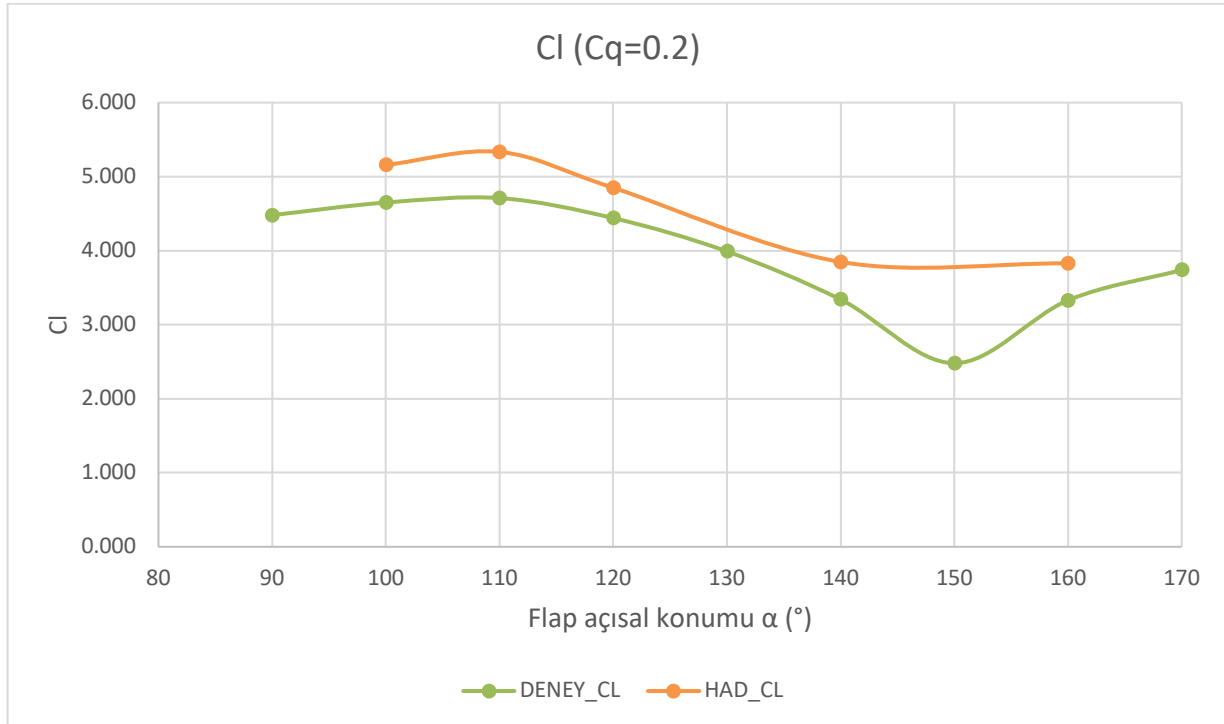
Direnç değerleri karşılaştırıldığında, belirli koşullarda deneysel sonuçlar ile hesaplamalı sonuçların benzer olduğu ancak genel olarak mertebelerin uyumlu olmadığı görülmektedir. Silindirik yapılar için direnç değerlerinin RANS metodu ile tahmin edilmesi kendi içerisinde belirli zorluklar barındırmakta olduğundan, mevcut metodoloji ile silindirik yapılar özelinde ağ yapısı ve türbülans modelleme yaklaşımının değiştirilmesinin etkilerinin kısıtlı olacağı değerlendirilmiştir. Turbo-yelken özelinde, silindirik yapıdan farklı bir kesit kullanılması durumunda da deneysel veri yaratılarak, ağdan bağımsızlık ve doğrulama çalışmasının gözden geçirilmesi faydalı olacaktır.



Şekil 3.9. Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ($Cq=0.09$ ve $\beta=110^\circ$)



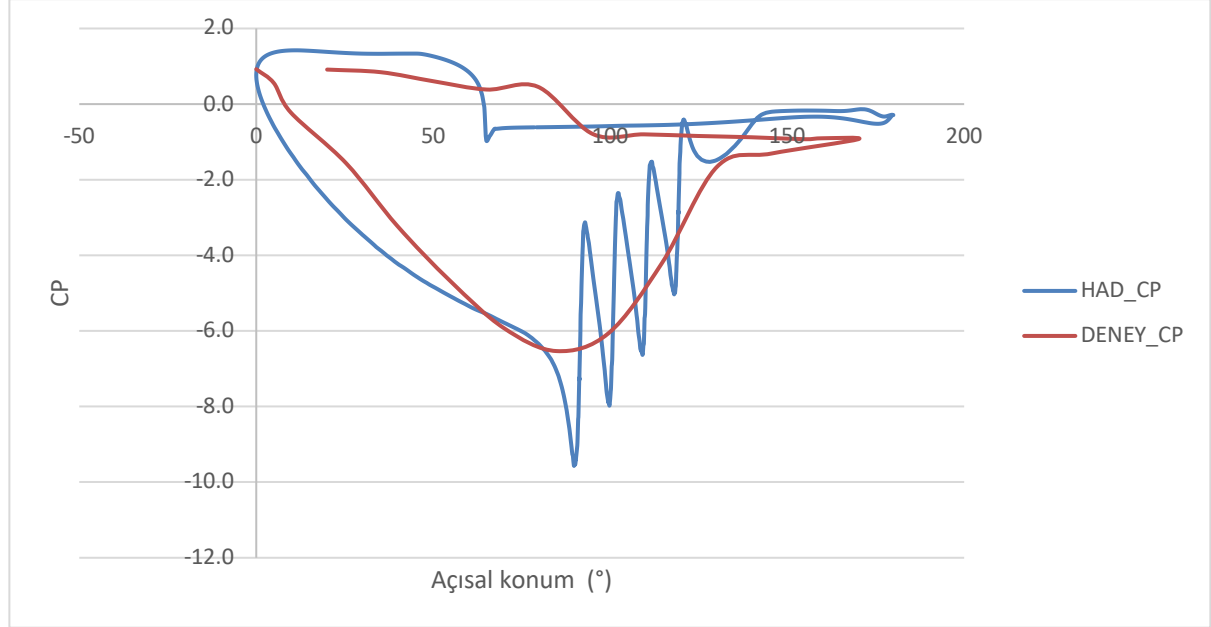
Şekil 3.10. Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ($C_q=0.09$ ve $\beta=100^\circ$)



Şekil 3.11. Deneysel ve hesaplamalı kaldırma ve direnç kuvvet katsayıları değerleri ($C_q=0.2$ ve $\beta=110^\circ$)

Basınç dağılımları, 110° flap açısı ve 110° emme alanı açısı için karşılaştırılmıştır (Şekil 3.12.). Kanat önder kenarında bulunan durma noktasında (stagnation point) basınç mertebeleri her iki yaklaşımda eşittir. Pozitif basınç bölgesinde, akışın flap öncesinde hızlanması dolayısıyla görülen ani basınç değişimi deneyde yaklaşık 80° açıl konumunda oluşmakta olup, hesaplamalı çalışmada 65° mertebesindedir. Basınç katsayısı eğrilerinin altında kalan alanlar birbirine oldukça yakın olduğundan benzer kaldırma kuvveti değerleri ortaya çıkmaktadır. Hesaplamalı çalışmada negatif basınç alanında

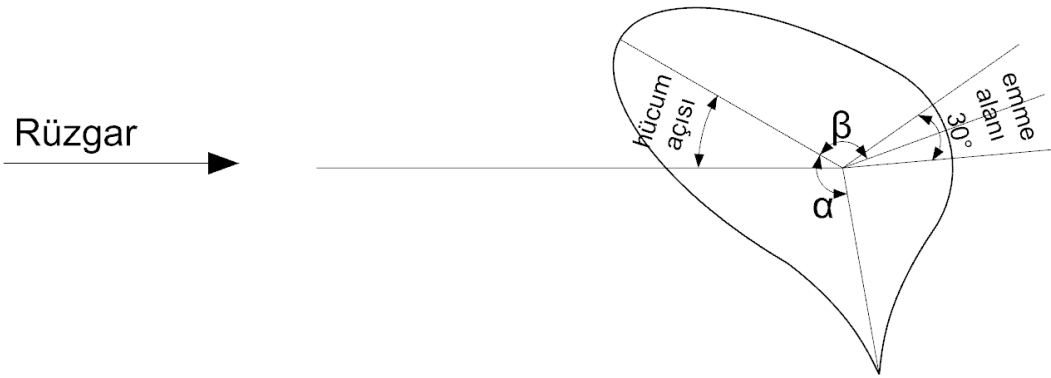
deliklerden de basınç değerleri alındığı için salınım görülmekte olup deneysel düzende bu durum oluşmadığından daha düzgün bir basınç dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.12. Flap açısı 110° ve emme alanı açısı 110° için basınç dağılım karşılaştırması

4. Tasarım Parametrelerinin Aerodinamik Performansa Etkileri

Bu bölümde flap ve emme alanı açısı konumları değiştirilerek farklı oryantasyonlarda analizler icra edilmiştir. Bu konu üzerinde literatürde birkaç çalışma bulunmaktadır (Low, Luo, & Winoto, 1991) (Hcini, Abidi, Kamoun, & Afungchui, 2017) (Yihuai, Taiyou, & Yongli, 2017). Bu bölümde amaç, farklı flap ve emme alanı açısı konumları denenmesi ile en iyi kaldırma kuvvetini elde etmektir. Analiz edilecek modelde, doğrulama çalışmasından farklı olarak ileriye doğru eliptik kesit yapısı ve kavisli üçgen flap kesit kullanılmıştır, emme alanı 30° bir alanı taramaktadır ve modelin hücum açısı 30°'dir. Flap ve emme alanı açısı konumu 90°-130° arasında her 10° için modellenmiştir. Parametrize edilen model Şekil 3.13 ile gösterilmiştir. Şekilde gösterilen modelde flap ve emme alanı açısı konumu 90°'dir. Flap açısı konumu β ile ve emme alanı konumu α ile gösterilmektedir. α ve β açıları 10° aralıklarla değiştirilerek farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur. Toplamda 36 farklı modelin analizi icra edilmiş olup oluşturulan test matrisi Tablo 3.4 ile gösterilmiştir.

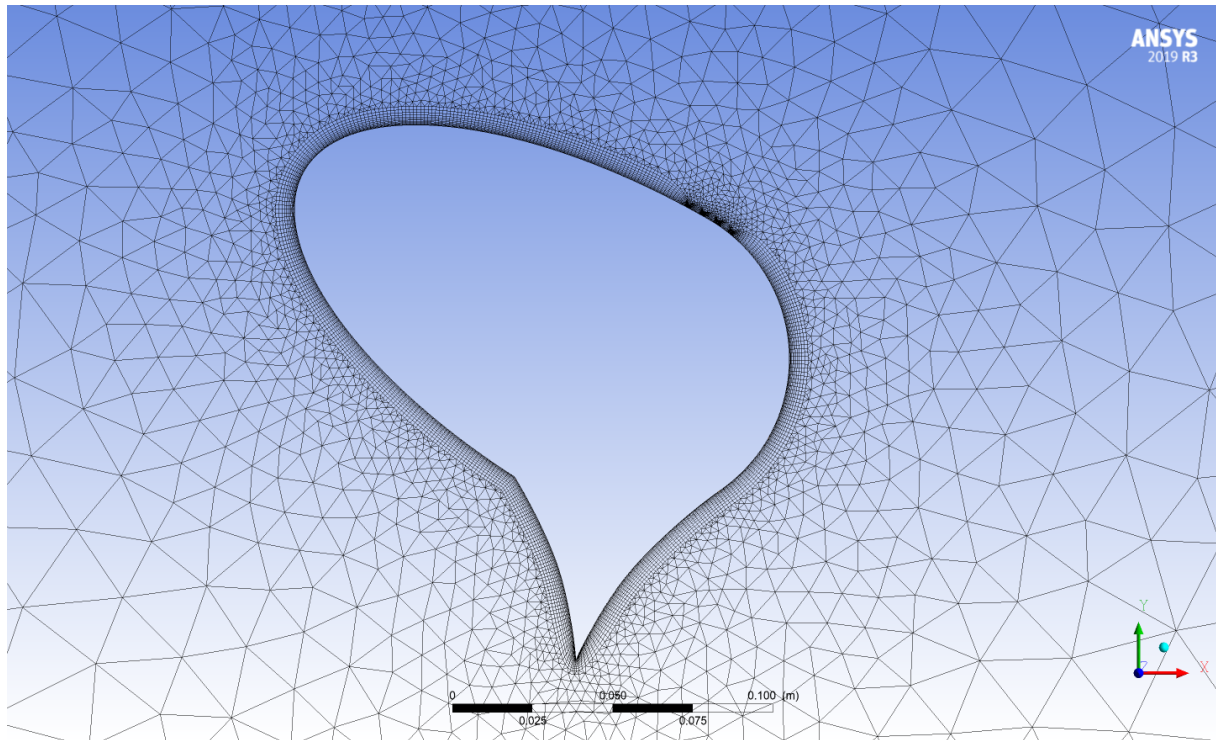


Şekil 3.13. Değişik flap ve emme alanı açıları için model tanımı

Tablo 3.4. Farklı flap ve emme alanı açılal konumları için oluşturulan test matrisi

Parametreler					
β (°)	90	100	110	120	130
α (°)	90	100	110	120	130

Model, doğrulama çalışmasında kullanılanlar ile aynı çözüm hacmi ve çözüm ağı boyutlarına sahiptir. Elde edilen çözüm ağı Şekil 3.14 ile gösterilmiştir.



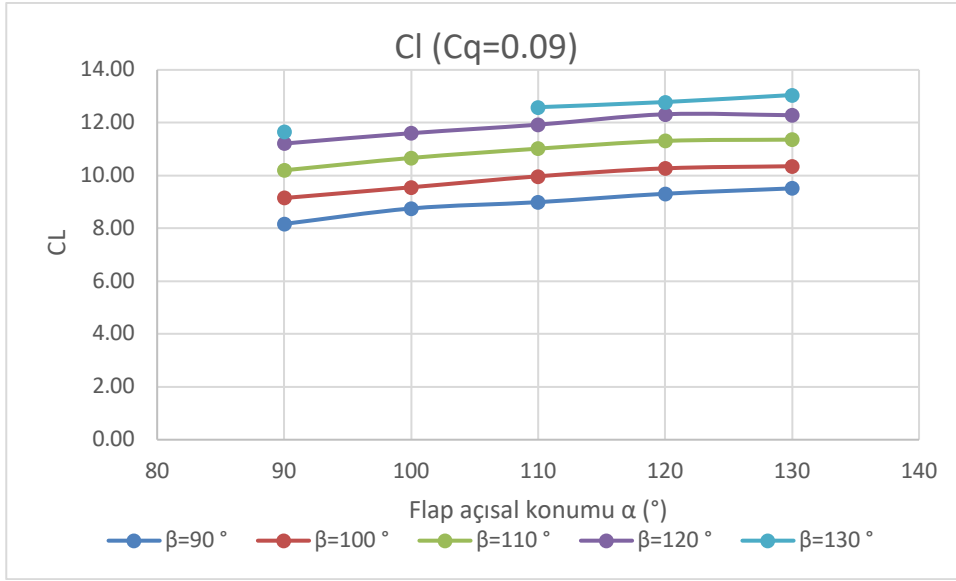
Şekil 3.14 Farklı flap ve emme alanı açılal konumunda gerçekleştirilecek analizler için oluşturulan çözüm ağı

Analizler emme katsayısı 0.09 ve rüzgar hızı 9 m/s için zamana bağımlı (transient) olarak gerçekleştirilmiştir. 0.01 sn zaman adımı ile 4 sn boyunca çalıştırılan analizlerden elde edilen sonuçlar

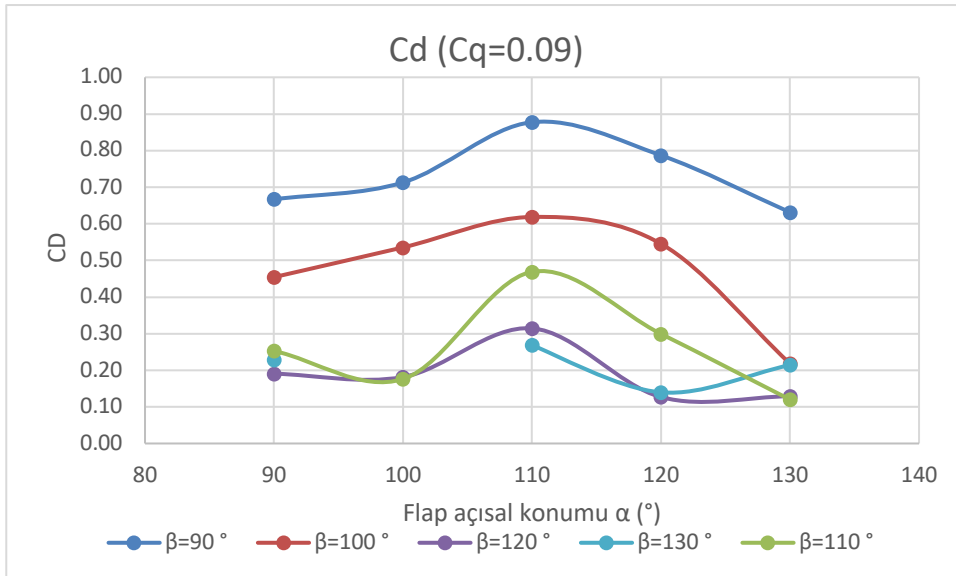
Tablo 3.5'de gösterilmiştir. Emme alanı açısız konumunun farklı flap açısız konumuna göre katsayılar üzerindeki etkisi Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilen grafiklerle gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında emme alanı açısız konumunun izler kenara doğru ötelenmesi ile beraber kaldırma kuvveti artmakta ve direnç kuvveti azalmaktadır. Flap açısının artımı ile kaldırma kuvveti de artmakta olup, aynı durum direnç kuvvetinde gözlenmemiştir. Flap etkisi için yapılacak genel yorum, tüm durumlarda flap açısız konumu 110° iken en yüksek direnç elde edilmiştir. Yüksek flap açısız konumlarında elde edilen direnç değerleri daha düşüktür. Emme alanı açısız konumu 130° için flap açısız konumu 100° analizde stol gözlenmiştir. Sonuçlar göz önüne alındığında en yüksek kaldırma kuvveti flap açısız konumu ve dinamik emme açısız konumu 130° iken elde edilmiştir.

Tablo 3.5. Farklı flap ve emme alanı açısız konumunda gerçekleştirilen analizlerde elde edilen sonuçlar

β (°)	α (°)	L (N)	C_L	D (N)	C_D
90	90	3.92	8.17	0.32	0.67
	100	4.20	8.75	0.34	0.71
	110	4.32	8.99	0.42	0.88
	120	4.47	9.31	0.38	0.79
	130	4.57	9.51	0.30	0.63
100	90	4.39	9.15	0.22	0.45
	100	4.59	9.56	0.26	0.54
	110	4.79	9.97	0.30	0.62
	120	4.93	10.27	0.26	0.55
	130	4.97	10.35	0.10	0.22
110	90	4.89	10.20	0.12	0.25
	100	5.12	10.67	0.08	0.18
	110	5.29	11.02	0.23	0.47
	120	5.43	11.31	0.14	0.30
	130	5.45	11.36	0.06	0.12
120	90	5.38	11.21	0.09	0.19
	100	5.57	11.60	0.09	0.18
	110	5.72	11.93	0.15	0.31
	120	5.91	12.32	0.06	0.13
	130	5.90	12.28	0.06	0.13
130	90	5.60	11.66	0.11	0.23
	100	STOL	STOL	STOL	STOL
	110	6.04	12.59	0.13	0.27
	120	6.13	12.78	0.07	0.14
	130	6.26	13.05	0.10	0.21

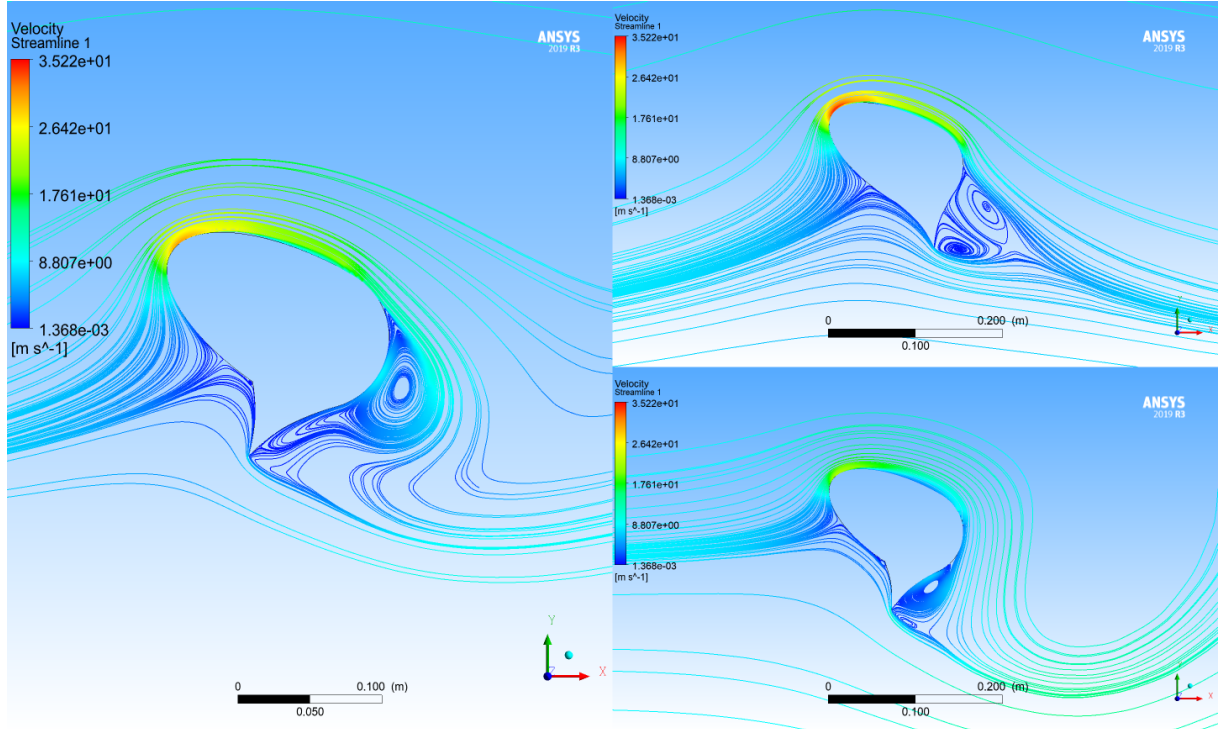


Şekil 3.15. Farklı flap ve emme açılal konumu için elde edilen kaldırma kuvvet katsayıları



Şekil 3.16. Farklı flap ve emme açılal konumu için elde edilen direnç kuvvet katsayıları

Stol durumu, en yüksek ve en düşük kaldırma kuvveti elde edilen durumlar, turbo-yelken etrafındaki akım hatları görselleştirilerek Şekil 3.17’de karşılaştırılmıştır. Flap açısının doğru konumlandırılması durumunda, akımın düzgün bir şekilde yönlendirilebildiği ve girdap yapısının kontrol edilebildiği görülmüştür. Yüksek flap açılarında, bu kontrol mekanizması verimli bir şekilde çalışmaktadır. Flap ve emme açısının konumuna göre durma noktası pozisyonu da değişim göstermektedir. Durma noktasının flap bölgesine yaklaştığı durumlarda, negatif basınç tarafında ilerleyen akışın daha büyük bir eğrilik ile karşılaşması dolayısıyla daha fazla hızlanma oluşmakta, bu durum da elde edilen kaldırma kuvvetini artırmaktadır.



Şekil 3.17. 3 farklı durum için turbo-yelken etrafındaki akım hatlarının karşılaştırılması (sol: en düşük kaldırma kuvveti elde edilen durum; sağ üst: en yüksek kaldırma kuvveti elde edilen durum; sağ alt stol durumu)

5. Sonuç

Yapılan çalışmada, gemilerde rüzgâr destekli sevk sistemi olarak kullanılabilir sınır tabaka emme tekniği ile yüksek kaldırma kuvveti üretebilen bir kanat profili için (turbo-yelken) hesaplama analiz gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, ağdan bağımsızlık çalışması yapılarak ağ yapısında kullanılan hücre boyutlarının sonuçlara etkisi incelenmiştir. Takiben, silindirik kesite sahip bir kanat için yapılmış olan deneysel çalışma, RANS metodu ile sayısal olarak modellenmiş ve yöntemin incelenecek probleme uygunluğu doğrulanmıştır. Oval bir kanat yapısı için farklı flap açıları ve emme alanı konumlarının aerodinamik kuvvetlere etkisi incelenmiştir. Flap açısının artırılması durumunda tüm emme alanı açılma konumları için üretilen kaldırma kuvvetinin de arttığı görülmüştür. Sabit flap açısında, emme alanı açısının artırılması durumunda da kaldırma kuvveti artmaktadır. Flap açısının 110° mertebesinde bulunması durumunda direnç kuvvetinin yükseldiği, daha düşük ve yüksek flap açılarındaki etkinin azaldığı görülmüştür.

Mevcut çalışmada kaldırma kuvveti katsayısı 13 mertebesine kadar çıkarılabilmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı tasarım parametrelerinin performansa etkisinin incelenmesi ile kaldırma kuvveti katsayısının daha da artırılacağı değerlendirilmektedir. Bu durumda, dönen parçaların az olması ve düşük enerji tüketimi ile turbo-yelken teknolojisinin rüzgâr destekli sevk sistemi alternatifleri arasında oldukça avantajlı bir konuma geleceği öngörülebilmektedir. Bu tarz rekabetçi sistemlerin mevcut gemiler veya yeni inşalarda kullanılması durumunda, enerji verimliliği indekslerinde daha düşük değerler elde edilebilecektir. İndeks değerlerinde elde edilecek iyileşme gemi tipine, taşınan yük miktarına, gemi hızına ve gemi kurulu gücüne göre değişmekte olup her bir koşul için ayrı bir şekilde değerlendirilmelidir.

RANS metodu ile turbo-yelken tarafından üretilen kaldırma kuvvetinin hassas bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür. Silindirik kesite sahip yelken için direnç karakteristiği mevcut metodoloji ile

yeteri kadar hassas bir şekilde tespit edilememektedir. Bu sonucun silindirik yapılar haricinde kesite sahip turbo-yelkenlerdeki geçerliliğinin detaylı bir şekilde irdelenebilmesi için silindik olmayan kesite sahip turbo-yelken ile deneysel çalışmalar icra edilerek doğrulama verisi üretilmesi gereklidir.

Turbo-yelken teknolojisinin gemi üzerindeki performansının anlaşılabilmesi ve gerçekçi bir şekilde olası yakıt tüketimi azaltım mertebelerinin belirlenebilmesi için gemi üzerindeki aerodinamik koşullarda performans tahminleri yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, atmosferik sınır tabaka etkileri, rüzgâr açısının düşeyde değişimi (twist), gemi üst binası-turbo-yelken etkileşimleri ile birden fazla turbo-yelken kullanılması durumunda turbo-yelkenler arası etkileşimlerin hesaba katılarak daha detaylı analiz modellerinin oluşturulması gerekmektedir.

Rüzgâr destekli sevk durumunda oluşan hidrodinamik koşulların, olası yakıt tüketimi değişimlerinin öngörülmesi aşamasında hesaba katılması gerekmektedir. Meyil ve sürüklenme açısı altında tekne direncinin değişimi, teknenin yanal kuvvet üretebilme kabiliyeti, pervane yükünün değişmesi dolayısıyla oluşacak genel sevk verimi değişimlerinin hız tahminlerinde hesaba katılabilmesi için bu hususlarda bilgi birikiminin artırılması gerekmektedir.

Mevcut gemilere yapılacak tadilatlar (retrofit) ile eklenecek rüzgâr destekleri sevk sistemleri haricinde, yeni gemi tasarım süreçlerinde meyil ve sürüklenme açısı altındaki performansın incelenerek bu koşullarda yapılacak incelemelerin gemi tasarım sürecine katılması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda pratik metodolojilerin geliştirilmesi ile tasarımcıların meyil ve sürüklenme açısı altında gemi hidrodinamik performansını inceleyebileceği araçların geliştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

6. Teşekkür

Bu çalışma, “RÜZGAR DESTEKLİ GEMİ SEVK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ, ANALİZİ VE PROTOTİP DOĞRULAMASI” projesi içeriğinde gerçekleştirilmiş olup 1501 Sanayi Ar-Ge Destek Programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

7. Referanslar

ANSYS (2013). *Ansyes CFX Solver Modelling Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.

Bockmann, E., Steen, S. (2011). Wind turbine Propulsion of Ships. Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP 11). Hamburg, Almanya, 17-18 Haziran 2011.

Charrier, B., Constans, J., Cousteau, J., Daif, A., Malavard, L., Quinio, J. (1985). Foundation Cousteau and Windship Propulsion 1980-1985 System Cousteau Pechiney. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (20), 39-60.

Czermanski, E., Jastrzabek, A.O., Spangenberg E.F., Kozłowski, Ł., Adamowicz, M., Jankiewicz, J., Cirella, G.(2022) Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy* (145).

[En.wikipedia.org/wiki/Alcyone_%281985_ship%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Alcyone_%281985_ship%29), [Erişim 18.11.2022].

en.wikipedia.org/wiki/USA_17, [Erişim 18.11.2022].

fr.cousteau.org/turbovoile.php, [Erişim 18.11.2022].

Guerra, O., Liberge, E., Hamdouni, A. (2016). Numerical Simulation of the Turbulent Flow Around an Oval-Sail. *Journal of Applied Fluid Mechanics* (9) 2009-2023.

Hcini, C., Abidi, E., Kamoun, B., Afungchui, D. (2017). A Turbosail Profile Analysis Code Based on the Panel Method. *Energy*, (118), 147-155.

<https://www.sail-world.com/news/235003/DynaRig-by-Southern-Spars-on-two-superyachts>, [Erişim 18.11.2022].

IMO (2011). IMO and the Environment.

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx> [Erişim 03.12.2022].

IMO (2012). IMO Train the Trainer Course, Module 2: Ship Energy Efficiency Regulation and Related Guidelines. Londra. Ocak 2016.

IMO (2022a). Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force. [Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force \(imo.org\)](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx). [Erişim 03.12.2022].

IMO (2022b). MEPC 78/1/Add.1 Annex 12: 2022 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). 10 Haziran 2022.

ITTC (2017). Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures, 7.5-0.3-01-01. <https://www.ittc.info/media/8153/75-03-01-01.pdf> [Erişim 29.07.2022].

Lindstad, E., Stokke, T., Alteskjær, A., Borgen, H., Sandaas, I. (2022) Ship of the future – A slender dry-bulker with wind assisted propulsion. *Marine Transport Research* (3).

[loc.gov/item/2014717912/](https://www.loc.gov/item/2014717912/), [Erişim 18.11.2022].

Low, H. T., Luo, S. C., Winoto, S. H. (1991). Flow Past a Wind-Assisted Ship Propulsion Device. *Ocean Engn*, (18), 555-565.

Saydam, A.Z., Küçüksu, G. N., İnel, M., Gökçay, S. (2022). Investigation of the Influence of Wind-Assisted Propulsion Devices on Hull Design. *Sustainable Development and Innovations in Marine Technologies*, Taylor and Francis, London.

Yihuai, H., Taiyou, W., Yongli, L. (2017). Numerical Simulation and Kinetic Analysis of Turbine Sail. *Journal of Energy and Power Engineering*, (11), 127-134.