

# **Uzun Açıklıklı Köprü Kesitlerinin Rüzgar Altındaki Davranışının Analitik ve Deneysel İncelenmesi**

**Proje No: 110M799**

Yrd. Doç. Dr. Oğuz UZOL  
Yrd. Doç. Dr. Ozgür KURÇ

Haziran 2012  
ANKARA

**ÖNSÖZ**

Rüzgar yükü, inşaat mühendislik yapıları üzerinde en önemli tasarım yüklerinden biridir. Özellikle düşük sönümlendirme ve yüksek esneklik katsayısı bulunan uzun açıklıklı köprüler için rüzgar yükü etkisi daha büyüktür. Uzun açıklıklı köprü kesitleri genellikle etrafında aerodinamik akış kararsızlıkları oluşabilen küt cisimlerdir. Bu tür kararsızlıklar, ciddi yapı yetmezliği felaketlerine yol açabilir. Bu projede uzun açıklıklı köprülerde kullanılan farklı geometrilerdeki kesitlerin aerodinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kesitlerin kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları ile girdap salınım frekansları farklı rüzgar koşullarında ve farklı açıklık oranları için belirlenmiş, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca köprüler üzerinde kullanılan rüzgar bariyerleri konusu da çalışılmış ve örnek modeller üzerinde deneysel veriler toplanarak bariyer etkileri belirlenmiştir.

## **İÇİNDEKİLER**

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>1</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>2</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>2</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>4</b>
1.1.Girdap Etkili Titreşime (Vortex-Induced Vibration) Genel Bakış.....	5
1.2.Uzun Açıklıklı Köprü Aerodinamiği Literatür Analizi.....	6
1.2.1.Deneysel Çalışmalar.....	6
1.2.2.Sayısal Çalışmalar.....	7
1.2.3.Rüzgar Bariyerleri.....	7
<b>2.SAYISAL METODOLOJİ</b> .....	<b>8</b>
2.1.Çalışılan Geometriler.....	8
2.2.Çözüm Ağının Oluşturulması.....	9
2.3.Sınır ve Başlangıç Koşulları.....	9
2.4.Türbülans Modelleri ve Duvara Yakın Bölge Modellemesi.....	10
2.5.Çözüm Prosedürü.....	10
<b>3.DENEYSEL İMKANLAR VE ÖLÇÜM AYRINTILARI</b> .....	<b>10</b>
3.1.Rüzgar Tüneli.....	11
3.2.Denge Sistemi.....	11
3.3.Modeller ve Rüzgar Bariyerleri.....	12
3.4.Ölçüm aletleri.....	12
<b>4.SONUÇLAR</b> .....	<b>12</b>
4.1.Hesaplama Yöntemleri.....	13

4.2.Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması.....	13
.....	13
4.2.1.Kaldırma Katsayısı.....	13
4.2.2.Sürükleme Katsayısı.....	14
4.2.3.Girdap Kopma Frekansı.....	14
4.2.4.Strouhal Sayısı.....	15
4.3.Köprü Kesit Geometrisinin Farklı Aerodinamik Parametreler Üzerindeki Etkileri..	16
4.3.1.Kaldırma Katsayısı.....	16
4.3.2.Sürükleme Katsayısı.....	17
4.3.3.Moment Katsayısı.....	18
4.3.4.Girdap Salınım Frekansı.....	19
4.3.5.Strouhal Sayısı.....	19
4.4.Açıklık Oranının Aerodinamik Parametrelere Etkisi.....	20
4.4.1.Kaldırma Katsayısı.....	20
4.4.2.Sürükleme Katsayısı.....	21
4.4.3.Moment Katsayısı.....	21
4.4.4.Girdap Kopma Frekansı.....	22
4.4.5.Strouhal Sayısı.....	23
4.5.Farklı Köprü Kesitleri için Aerodinamik Katsayı Değişimi.....	23
<b>5.SONUÇ.....</b>	<b>27</b>
<b>REFERANSLAR.....</b>	<b>27</b>
<b>EK A.....</b>	<b>31</b>
A.1.Rüzgar Tünel Karakterizasyonu.....	32
A.2. FAN BOYUTLARI.....	32
<b>EK B.....</b>	<b>33</b>
B.1.Sayısal Sonuçlar.....	33
<b>EK C.....</b>	<b>56</b>
C.1. Deneysel Sonuçlar.....	56

## Şekil Listesi

Şekil 2.1 Köprü Kesit Alanı Geometrileri- (a) Eliptik Kesit Alanı- (b) Altıgen Kesit Alanı- (c) Dikdörtgen Kesit Alanı- (d) İkizkenar Yamuk Kesit Alanı.....	9
Şekil 2.2 Genel çözüm alanı taslağı.....	9
Şekil 2.3 Yapısal olmayan çözüm ağı- Köprü kesiti (Yan açısı 45° olan ikizkenar yamuk).....	9
Şekil 2.4 Sınır tabaka yapısal çözüm ağı- Köprü kesiti (Yanal açısı 45° olan ikizkenar yamuk).....	9
Şekil 2.5 Sınır Koşulları - A: Hız Girişi, B: Basınç Çıkışı, C: Duvar.....	10
Şekil 3.1 Rüzgar tünelinin farklı açılardan görünümü.....	11
Şekil 3.2 Rüzgar tüneli parçaları.....	11
Şekil 3.3 Denge sistemi ve yük hücreleri.....	11
Şekil 3.4 Modeller ve rüzgar bariyerleri.....	12
Şekil 4.1 İkizkenar yamuk kesit alanı için kaldırma katsayısı değişimi-AR=15.....	14
Şekil 4.2 İkizkenar yamuk kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=12.....	14
Şekil 4.3 Eliptik kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=12.....	14
Şekil 4.4 Altıgen kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=15.....	14
Şekil 4.5 İkizkenar yamuk kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=15.....	14
Şekil 4.6 Dikdörtgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=12.....	15
Şekil 4.7 Eliptik kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=12.....	15
Şekil 4.8 Altıgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=15.....	15
Şekil 4.9 İkizkenar yamuk kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=15...15	15
Şekil 4.10 Dikdörtgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=12.....	15
Şekil 4.11 Eliptik kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=12.....	16
Şekil 4.12 Altıgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=15.....	16
Şekil 4.13 İkizkenar yamuk kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=15.....	16
Şekil 4.14 AR=10 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi.....	17
Şekil 4.15 AR=12 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi.....	17

Şekil 4.16 AR=15 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi.....	17
Şekil 4.17 AR=10 ve V=5m/s için basınç katsayısı (a): Eliptik - (b): Dikdörtgen - (c): Altıgen - (d): İkizkenar yamuk.....	17
Şekil 4.18 AR=10 için farklı geometrilerdeki sürükleme katsayısının değişimi.....	18
Şekil 4.19 AR=12 için farklı geometrilerdeki sürükleme katsayısının değişimi.....	18
Şekil 4.20 AR=15 için farklı geometrilerdeki sürükleme katsayısının değişimi.....	18
Şekil 4.21 AR=10, V=5 m/s için basınç konturları - (a): Eliptik - (b): Dikdörtgen - (c): Altıgen - (d): İkizkenar yamuk.....	18
Şekil 4.22 AR=10 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi.....	18
Şekil 4.23 AR=12 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi.....	18
Şekil 4.24 AR=15 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi.....	19
Şekil 4.25 AR=10 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi.....	19
Şekil 4.26 AR=12 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi.....	19
Şekil 4.27 AR=15 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi.....	19
Şekil 4.28 AR=10, V=5m/s için girdap şiddeti eğrileri - (a): Eliptik - (b): Dikdörtgen - (c): Altıgen - (d): İkizkenar yamuk.....	19
Şekil 4.29 AR=10 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi.....	20
Şekil 4.30 AR=12 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi.....	20
Şekil 4.31 AR=15 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi.....	20
Şekil 4.32 İkizkenar yamuk kesit alanı için kaldırma katsayısı değişimi-Yan aç 450.	21
Şekil 4.33 Dikdörtgen kesit alanı için sürükleme katsayısı değişimi.....	21
Şekil 4.34 Eliptik kesit alanı için sürükleme katsayısı değişimi.....	21
Şekil 4.35 Altıgen kesit alanı için sürükleme katsayısı değişimi-Yan aç 450.....	21
Şekil 4.36 İkizkenar yamuk kesit alanı için sürükleme katsayısı değişimi-Yan aç 450 .....	21
Şekil 4.37 Dikdörtgen kesit alanı için moment katsayısı değişimi.....	22
Şekil 4.38 Eliptik kesit alanı için sürükleme katsayısı değişimi.....	22
Şekil 4.39 Altıgen kesit alanı için moment katsayısı değişimi-Yan aç 450.....	22

Şekil 4.40 İkizkenar yamuk kesit alanı için moment katsayısı değişimi-Yan aç 450..	22
Şekil 4.41 Dikdörtgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi.....	22
Şekil 4.42 Eliptik kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi.....	22
Şekil 4.43 Altıgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-Yan aç 450.....	22
Şekil 4.44 İkizkenar yamuk kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-Yan aç 450.....	23
Şekil 4.45 Girdap şiddeti konturu-Hız 15m/s- (a): AR=10 - (b): AR=12 - (c): AR=15 .....	23
Şekil 4.46 Dikdörtgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi.....	23
Şekil 4.47 Eliptik kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi.....	23
Şekil 4.48 Altıgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-Yan aç 450.....	23
Şekil 4.49 İkizkenar yamuk kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-Yan aç 450.....	23
Şekil 4.50 AR=12 olan dikdörtgen kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.51 AR=12 olan dikdörtgen kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.52 AR=12 olan eliptik kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.53 AR=12 olan eliptik kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi .....	24
Şekil 4.54 AR=15 olan altıgen kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.55 AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.56 AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.57 AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	24
Şekil 4.58 AR=12 olan dikdörtgen kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25

Şekil 4.59 AR=12 olan dikdörtgen kesit için hıza göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.60 AR=12 olan eliptik kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.61 AR=12 olan eliptik kesit için hıza göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.62 AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.63 AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hıza göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.64 AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.65 AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	25
Şekil 4.66 AR=12 olan dikdörtgen kesit için kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	26
Şekil 4.67 AR=12 olan dikdörtgen kesit için sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	26
Şekil 4.68 AR=12 olan dikdörtgen kesit için girdap salınım frekansı değişimi.....	26
Şekil 4.69 AR=12 olan eliptik kesit için kaldırma kuvveti katsayısı değişimi.....	26
Şekil 4.70 AR=12 olan eliptik kesit için sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi.....	26
Şekil 4.71 AR=12 olan eliptik kesit için girdap salınım frekansı değişimi.....	27
Şekil A-1 Referans ölçme ucu ölçümlerine göre akış hızının motor frekansına göre değişimi.....	32
Şekil A-2 Sıcak-tel ölçümlerine göre akış hızının motor frekansına göre değişimi.....	32
Şekil A-3 Test bölmesi girişindeki türbülans yoğunluğu.....	32
Şekil 0-4 Sol- Fanın yandan görünüşü, Sağ- Fanın önden görünüşü.....	32



## ÖZET

Rüzgar etkilerine maruz kalabilen uzun açıklıklı köprülerin rüzgardan kaynaklanan titreşim özelliklerini çalışmak muhtemel yapısal problemlerin önlenmesi açısından önemlidir. Bu projede, sıklıkla kullanılan bazı örnek uzun açıklıklı köprü kesit modellerinin aerodinamik karakteristiklerini belirleme amacı ile yapılan sayısal ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmaktadır. Rijid kesit modelleri üzerindeki akış karakteristiklerinin ilgili aerodinamik katsayılarını ve girdap salınım frekanslarını belirlemek amacı ile deneyler yapılmıştır. Ayrıca farklı Reynolds sayılarında ticari CFD yazılımı kullanılarak Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür. Elde edilen sayısal sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve aerodinamik katsayıların hesabı konusunda nümerik hesapların güvenilirliği kontrol edilmiştir. Sonuçlar köprü kesit şekli ve özellikle kenar şekillerinin tasarımının aerodinamik parametreler açısından mutlaka gözönüne alınması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca rüzgar bariyerlerinin köprü aerodinamik katsayılarını, özellikle sürüklenme katsayısını, önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır.

### **Anahtar kelimeler**

Rüzgar, Uzun açıklıklı köprü, Girdap salınımı, Aerodinamik kuvvet katsayıları, Rüzgar bariyerleri

### **ABSTRACT**

Long span bridges are susceptible to wind thus it is important to study their wind-induced vibrations to avoid any probable structural failures. In this project, the results of an experimental and computational investigation of the aerodynamic characteristics of frequently used long-span bridge deck cross-sections are presented. The flow around the rigid fixed bridge deck models was experimentally examined to obtain relevant aerodynamic coefficients, vortex-shedding frequency, and Strouhal number. Two dimensional unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations are solved using commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software at different Reynolds numbers. The numerical results were compared with the experimental data and the reliability of the numerical simulations for obtaining certain aerodynamic parameters were questioned. The results also indicated that the influence of the shape of the deck edges must be taken into account for all aerodynamic parameters. Finally the addition of wind barriers has major effects on the aerodynamic performance of bridge decks.

## **Keywords:**

Wind, Long-Span bridges, Vortex shedding, Aerodynamic force coefficients, wind barrier

## **1. GİRİŞ**

Rüzgar yükü, inşaat mühendislik yapıları üzerinde en önemli tasarım yüklerinden biridir. Özellikle düşük sönümlendirme ve yüksek esneklik katsayısı bulunan uzun açıklıklı köprüler için rüzgar yükü etkisi daha büyüktür (Ding et al. [2000]). Uzun açıklıklı köprü kesitleri genellikle etrafında aerodinamik akış kararsızlıkları oluşabilen küt cisimlerdir. Bu tür kararsızlıklar, 1940 yılında yaşanan Old Tacoma Köprüsü'nün yıkılışında olduğu gibi ciddi yapı yetmezliği felaketlerine yol açabilir.

Rüzgarın köprüler üzerindeki etkileri dört ana kategoride toplanabilir (Gu et al.[1999]): (1) statik mukavemet veya statik sapma (divergence) sorunlarına neden olabilen daimi rüzgar; (2) rüzgarın ve köprünün yapısal hareketleri arasındaki aero-elastik etkileşimin neden olduğu, etki altında kendiliğinden oluşan, köprü kesitindeki çarpıntı; (3) yapısal hareketin ve yaklaşan rüzgarın aero-elastik etkileşiminden ve köprü kesitinden salınan girdap kaynaklı titreşim; (4) kendiliğinden kaynaklanan (signature) türbülans ve/veya yaklaşan rüzgarın oluşturduğu türbülansın köprü kesitine çarpması.

Eğer köprü kesit yapısı boylamasına eksenine göre narin gövde olarak kabul edilirse, statik kuvvetlerin ve çarpan kuvvetlerin tamamı aerodinamik katsayılara bağlı olacaktır (Tubino [2005]). Genellikle, bu aerodinamik katsayılar köprünün kesit modelinin rüzgâr tüneli testleri ile veya Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi ile belirlenir (Bosch ve Dhall, [2008]). Şu anda HAD, aerodinamik parametreleri belirlemek için köprünün iki boyutlu kesiti etrafında karmaşık çalkantılı rüzgar alanı hesaplarında kullanılmaktadır ancak sonuçların güvenilirliği ve doğruluğu tartışılır olabilmektedir. Bu nedenle rüzgar tüneli testi, halen uzun açıklıklı köprülerin aerodinamik katsayılarının belirlenmesinde kullanılan en popüler ve hatta bazen tek yöntemdir (Matsuda et al. [2001]). Ancak hem rüzgar tüneli testinin maliyeti çok yüksektir hem de farklı köprüler, farklı kesit özellikleri ve farklı dinamik özelliklere sahip olduğundan test sonuçları genellikle sadece hedef köprü için geçerli olmaktadır. Bu sınırlamanın sonucu olarak,

rüzgar tüneline test edilemeyen köprülerin rüzgar direnç yeteneği tasarımı ve denetimi için gerekli olan bilgiler eksik kalacaktır. Ayrıca, ölçekli modelin sadeleştirilmesi, yüzey pürüzlülüğü, sınır koşulları, vb. gibi sebeplerden kaynaklanan hataların oluşması rüzgar tüneline testleri yapılmadığı sürece kaçınılmaz olacaktır. Rüzgar tüneline testleri dışında şu anda kullanılan yöntemlerden hiçbiri bu eksikliği giderebilecek potansiyele sahip değildir (Law et al.[2008]).

### 1.1. Girdap Etkili Titreşime (Vortex-Induced Vibration) Genel Bakış

Bu kısımda girdap etkili titreşim ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve bu titreşimlerin uzun açıklıklı köprü aerodinamiğine etkisi açıklanmıştır.

Uzunluk-genişlik oranı yeterince yüksek olan narin bir cisim ya da yeterince yüksek hücum açısında çalışan aerodinamik bir cisim viskoz akış alanı içerisine konduğunda modelin yüzeyinden serbest akış alanına doğru aşamalı olarak artan bir hız profili oluşur. Bu hız profili sınır tabakayı tanımlar. Süreklilik varsayımının geçerliliğinden dolayı, serbest akış sınır tabakayı akış yönünde iteklemekte, diğer bir taraftan ise yüzey sürtünmesi bu durumu yavaşlatmaktadır. Bütün bu süreç akışta bozukluğa sebep olabilir ve bu durum sınır tabakanın model yüzeyinden ayrılmasına sebep olabilir. Bu olay ayrılma ya da akış-kopması olarak adlandırılır (Atkin et al. [2005]).

Ayrılmadan sonra, akış yönünde girdaplar model köşelerinden başlayacak şekilde kopmaya başlar. Bu durum nesne arkasında dalgalanan bir yüksek-düşük basınç bölgesi oluşumuna neden olur. Serbestçe salınabilen model kısımları için, girdap kopma frekansı ve doğal frekans birbirine yakın olduğu zamanlarda akış yönüne dik etkiyen kuvvette dalgalanmalar olur. Bu girdaplara von Karman Girdap Yolu adı verilmektedir (Giosan et al).

Yukarıda anlatılanlar serbest akış hızının, model boyutlarının ve viskozitenin girdap kopmasını etkileyen temel etkenler olduğunu göstermektedir. Bu üç parametre aynı zamanda Reynolds sayısını da tanımlamaktadır.

Modelin karakteristik uzunluğuna ve serbest akış hızına bağlı olarak girdap kopma aralıklarını Reynolds sayısına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür:

Alt kritik aralık:  $Re < 3 \times 10^5$

Kritik aralık:  $3 \times 10^5 < \mathfrak{R} < 3 \times 10^6$

Geçiş kritik aralığı:  $\mathfrak{R} > 3 \times 10^6$

$3 \times 10^5 < \mathfrak{R} < 3 \times 10^6$  aralığı kritik aralık olarak adlandırılır. Bu aralıkta girdap kopma frekansı asimetrik ve olağandışı bir davranış gösterir. Bu durum “kenetlenme (locking in)” olarak adlandırılır ve yapısal kırılmaya sebep olan en önemli etkenlerden biridir (Dyrbye et al. [1999]).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, girdap kopmasının düşük hızlarda gerçekleşmediği ve yeterince yüksek türbülanslı hızlarda ise türbülansın kopma işlemini engellemesinden ötürü yine girdap kopmasının gerçekleşmediği görülmüştür. Bundan dolayı, zamana bağlı olmayan sürekli akış, kritik hızda ve periyodik frekansta, yani nesnenin doğal frekansı ile rezonansta, ise akış yönüne dik büyük kuvvetlere sebep olur. Ayrıca, nesnenin yapısı bu kuvvetlere dayanamazsa, bu durum yapısal kırılmalara yol açar (Dexter et al. [2002]).

Girdap kopmasının sebep olduğu en önemli problemlerden biri nesnede titreşime sebep olan salınımlı hareketlerdir. Bu salınımların frekansı ve serbest akış hızı ise birbiri ile ilişkilidir. 1878’de Vincenc Strouhal’ın Strouhal sayısı olarak tanımladığı boyutsuz parametre salınım mekanizmasını tanımlamada kullanılır. Strouhal sayısı;

$$St = \frac{fD}{V} = \frac{(\rho L^3) \left(\frac{V}{t}\right)}{(\rho L^3) \left(\frac{V^2}{D}\right)} = \frac{\text{Zamansal Atalet Kuvvetleri (Temporal Inertial Forces)}}{\text{Konvektif Atalet Kuvvetleri (Convective Inertial Forces)}}$$

(1)

olarak tanımlanır. Burada  $St$  Strouhal sayısı,  $f$  girdap kopma frekansı,  $D$  karakteristik uzunluk ve  $V$  serbest akış hızıdır (White [1999]). Strouhal sayısı, akışın zamanla değişkenliğinden dolayı oluşan atalet kuvvetlerinin, akış alanı içinde bir noktadan bir noktaya değişen hız vektörünün sebep olduğu atalet kuvvetlerine oranını gösterir.

Strouhal sayısına bakarak akışın özelliklerini anlamak mümkündür. Akış alanında viskozite baskınsa Strouhal sayısı büyüktür ve bu durum akış alanında kolektif salınımlı hareketlere yol açar. İkinci kategoride Strouhal sayısı orta düzeydedir ve bu durum hızlı girdap kopmalarına karşılık gelir. Son kategori ise Strouhal sayısının derecesi  $10^{-4}$

olan akış alanlarına karşılık gelir ve hareketin yüksek hızlı zamana bağlı olmayan kısmı uyarımda (excitation) baskındır (Sobey [1982]).

Bu genel bakış bölümünün son kısmında akışkan içindeki nesneye etki eden basınç yüklemeleri ele alınmaktadır. Nesne akışkan içinde hareket ettiğinde, akışkan nesne etrafında akar ve fiziksel olarak nesne üzerindeki noktalara temas eder. Böylelikle, akışkan ile nesne arasında mekanik kuvvet iletimi gerçekleşir ve bu iletim akışkan basıncı ile olur.

Akışkan içinde hareket eden nesneye akış yönüne dik etkiyen basınç kuvveti bileşenine kaldırma kuvveti, akış yönüne paralel etkiyen basınç kuvveti bileşenine ise sürüklenme kuvveti denir. Ayrıca, yüzeyde ağırlık merkezi dışında herhangi bir noktaya etkiyen kuvvetin ağırlık merkezine olan uzaklık vektörü ile vektörel çarpımı momenti verir. Moment, nesnenin kuvvetler karşısında burulma eğiliminin göstergesidir.

Önceden açıklandığı gibi, aerodinamik kuvvetlerin çarpınma (flutter) üzerine etkisi önemlidir. Aerodinamik kuvvetler şu şekilde hesaplanır;

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 A D C_M \quad (4)$$

Burada  $L$  ,  $D$  ve  $M$  sırasıyla, kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve moment,  $\rho$  yoğunluk  $A$  ıslak alan,  $D$  karakteristik uzunluk ve  $C_L$  ,  $C_D$  ,  $C_M$  sırasıyla kaldırma katsayısı, sürüklenme katsayısı ve moment katsayısıdır.

## 1.2. Uzun Açıklıklı Köprü Aerodinamiği Literatür Analizi

Akış alanındaki köprü, akış konfigürasyonunu değiştirir ve bu değişiklikten dolayı, köprü yüzey basıncına maruz kalır. Rüzgar doğası gereği türbülanslı olduğu için köprünün yüzey basıncının zamana bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüzey basıncı; zamandan bağımsız ortalama kısım (time-independent mean part) ve sıfır etrafında dalgalanan ortalama kısım (zero mean fluctuating part) olarak ikiye ayrılabilir. Köprü, küt cisim olarak düşünüldüğü için köprünün kendisi de akışta dalgalanma yaratmaktadır (Simiu et

al. [1996]. Köprüyü etkileyen kuvvetlerin ortalama kısmını statik kuvvetler, dalgalanan kısmını ise akış çarpması (buffeting) kuvvetleri oluşturmaktadır. Uzun açıklıklı köprüler tamamen sabit olmadıkları için bu kuvvetlerin etkisiyle dalgalanmaya başlarlar. Köprüdeki dalgalanma akışın sınır koşullarını etkiler, sınır koşullarındaki değişiklik ise köprüye etkiyen basınç kuvvetlerini değiştirir ve bunun sonucunda köprünün hareketi etkilenir. Yukarıda bahsedilen ve köprüdeki dalgalanmanın sonucunda oluşan basınç kuvvetleri kendinden uyarımlı (self-excited) kuvvetler olarak adlandırılır. Frekans etki alanında, köprü dalgalanmasının ve kendinden uyarımlı kuvvetlerin bileşenleri filtreler ile gösterilir. Filtreler, aerodinamik türevler veya çırpınma (flutter) türevleri olarak da adlandırılır, rüzgar tüneli testleri ile deneysel olarak ya da sayısal yöntemlerle elde edilir (Scalan et al. [1971], Larsen et al. [1997], and Tubino [2005]).

### **1.2.1. Deneysel Çalışmalar**

Köprünün deneysel testi için ölçekleme etkisi ve Reynolds sayısı göz önünde bulundurulması gereken önemli unsurlardır. İnce ve küt cisimler etrafındaki akışın Reynolds sayısından bağımsız olması, köprü tasarımında yaygın bir varsayımdır. Bu yüzden, düşük hızlı rüzgar tünellerini kullanarak aerodinamik katsayılar ve Strouhal sayısı gibi aerodinamik parametreler elde etmek ve bu verileri gerçek köprü için kullanmak mümkündür. Schewe et al [1998], rüzgar tüneli testinde elde edilen sürüklenme katsayısının prototip sürüklenme katsayısıyla uyduğunu göstermiştir. Ancak deneylerinde, kesit alanı keskin kenarlı olan ince cisimlerin Reynolds sayısından etkilenebileceği sonucuna varmıştır. Üç yıl sonra, Matsuda et al [2001], altıgen kesit alanı ile deneyler yapmış, düşük Reynolds sayılı alanların aerodinamik özelliklerinin rüzgar tüneli testinde gerçeğe yakın elde edilebileceğini göstermiştir.

Köprü aerodinamiği, köprü yapısı ile rüzgar etkileşiminden etkilenmektedir. Bunun yanısıra, bilim adamları, köprü aerodinamiğini etkileyen başka faktörlerin de olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu faktörlerin en önemlilerinden biri köprünün kesit alanıdır. Lin et al [2005] ve Matsumoto et al [1996], köprünün genişlik-derinlik oranının etkisini ayrı ayrı araştırmışlardır. Her ikisi de, bu oran yükseldikçe köprünün stabilitesinin arttığını görmüşlerdir. Ayrıca, Bienkiewicz et al [1987] ve Nagao et al [1993], farklı kesit alanları ve farklı açıklık oranları ile çalışmışlardır. Sonuçları, küt kesit alanlarının aerodinamik stabiliteyi kötü etkilediği yönündedir. Fang et al [2007], iki boyutlu altıgen kesit alanı ile deneysel ve sayısal araştırmalar yapmış ve altıgen kesit alanının dikdörtgene göre daha iyi stabilite sağladığını göstermiştir. Larsen et al [1998], beş farklı kesit alanını sayısal olarak incelemiştir. Bosch et al [2008] ise aynı kesit alanlarını deneysel incelemiştir.

### **1.2.2. Sayısal Çalışmalar**

Son yıllarda, mühendislik problemlerinde sayısal çözümler ve analizler önem kazanmıştır. Gelişmiş bilgisayarların kullanımı, hesaplamalı akışkanlar mekaniği algoritmalarındaki ilerlemeler ve deneysel çalışmaların daha fazla para ve zaman gerektirmesi bu durumun başlıca sebeplerindedir.

Rüzgarın köprülere etkisi, ilk olarak Kawahara ve Hirano [1983] tarafından araştırılmıştır. Kawahara ve Hirano, sonlu elemanlar methodunu kullanarak, köprünün aerodinamik katsayısını ve Strouhal sayısını farklı hücum açıları için elde etmişlerdir. Sonraki yıllarda, Kuroda et al. [1997], Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ve Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) kullanarak Danimarka'da bulunan bir asma köprüyü (Great Belt East Bridge) analiz etmiştir. Daha sonra birçok araştırmacı değişik yöntemler kullanarak köprü etrafındaki akışı incelemiştir. Nieto et al. [2008] ve Braun et al. [2003], farklı köprüler üzerindeki akışları sayısal olarak, ayrı ayrı incelemelerine rağmen, literatürde birbirleriyle örtüşen sonuçlar elde etmişlerdir.

Köprü aerodinamiğini analiz etmek için birçok sayısal simülasyon mevcuttur. Fakat, bunların bir kısmı zaman ve bilgisayar hafızası gerektiren simülasyonlardır. LES (Large Eddy Simulation) ve DES (Detached Eddy Simulation) bunlara örnek verilebilir. Bu yüzden, bazı araştırmacılar, bu simülasyonlar yerine 2 Boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerini kullanmayı tercih etmişlerdir. Sun et al. [2005],  $k-\omega$  türbülans modelinin akış alanını çözümlenmede  $k-\epsilon$  türbülans modeline göre daha iyi olduğunu, iki türbülans modelinin çözümlerinde duvara yakın yerlerdeki türbülans kinetik enerjisinin farklı olmasının bunun sebebi olduğunu söylemiştir. Ayrıca, Nieto et al. [2010] zamana bağlı iki boyutlu simülasyonlarda  $k-\epsilon$  türbülans modelinin girdap kopmasını çözümlenmede başarısız olduğunu saptamıştır.

### 1.2.3. Rüzgar Bariyerleri

Uzun asma köprülerin güçlü yanal rüzgarlara maruz kalan araçların kontrol ve dengesi üzerindeki etkileri trafik güvenliği açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Rüzgar bariyerleri, güçlü rüzgarlara maruz kalan köprülerdeki bu riski engellemek adına hayati öneme sahiptirler.

Önceleri, köprü mühendisleri tasarım sırasında yanal rüzgarların araçlar üzerindeki etkilerini hesaba katmamışlardır. Bu duruma bağlı olarak kazalar meydana gelmeye başladığında bu konu üzerine yönelmişlerdir. Bu kazalardan sonra inşa edilmiş olan köprüler için rüzgar bariyerleri tasarlanmak istenmiş ancak bir takım önemli sorunlarla karşılaşmıştır. Rüzgar bariyerlerinin trafik güvenliğini artırıcı etkileri olmasına rağmen



bu bariyerler köprülerin aerodinamik özellikleri üzerinde istenmeyen etkilere sebep oldukları anlaşılmıştır.

Bu iki çelişkili talep arasındaki sorunu çözmek amacıyla ilk olarak Çin'deki Hangzhou Bay köprüsünün tasarımı yapılmıştır (Wang et al. [2007]). Rüzgar bariyerleri için olabilecek en elverişli ve köprünün aerodinamik kararlılığını (mesela titreşim, girdap rezonansı gibi) önemli derecede bozmayacak bir tasarım önerilmiştir (Procino et al. [2008]).

Rüzgar bariyerlerinin tasarımı önceki yıllarda önemli bir ilgi alanıydı. Rüzgar bariyerlerinin inşasının en önemli sonucu yanal rüzgar etkilerinin azaltılmasıdır. Bu konu hakkında birçok kaynak mevcuttur. Counihan et al. [1974], ve Bradly ve Mulhearn [1983], bariyerin arkasında oluşan akıntı boyunca ortalama hızın azaltılması konusunda çalışmışlardır. Charuvisita et al. [2004], rüzgar bariyerlerinin köprü girdabının içinden geçen bir araç üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Saito et al. [2006], rüzgar bariyerlerinin yanal rüzgarlara maruz kalan demiryolu araçları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Wang et al. [2007], ise Çin'deki Hangzhou Bay köprüsü üzerindeki rüzgar hızlarını azaltmak üzere bir rüzgar bariyeri tasarlamıştır.

Trafik güvenliğini arttırabilecek, araç üzerindeki rüzgar etkilerini azaltabilecek aynı zamanda da köprünün aerodinamik özelliklerinde, performansında ve kararlılığında önemli bir değişime neden olmayacak bir rüzgar bariyeri tasarlayabilmek için çeşitli etmenler dikkate alınmalıdır. Bu etmenler şunlardır:

- Süreklilik: Rüzgar bariyerlerinin köprünün farklı kısımlarına yerleştirilip yerleştirilmediği. Sürekli bir rüzgarlık, güçlü rüzgarlara maruz kalan köprülerden geçen araçlara yarar sağlamaktadır (Soon-Duck et al. [2011]).
- Yükseklik ve gözeneklilik: Yüksek ve az gözenekli bir bariyer, trafiği rüzgardan koruma bakımından daha etkili olacak fakat bir yandan da daha çok malzeme gerektireceğinden köprü, kule ve temeller üzerinde daha yüksek lateral yüklere neden olacaktır (Soon-Duck et al. [2011]).

Yükseklik ve gözeneklilik rüzgar bariyerinin tasarımını etkileyen başlıca değişkenlerdir. Rüzgar bariyerlerinin yüksekliği ve gözenekliliği konularında çeşitli araştırmalar mevcuttur. Bunlar arasında Hırvatistan'daki iki köprünün rüzgar bariyeri gözenekliliği, yüksekliği ve yöneliminin aerodinamik olarak optimize edilmesi Procino et al. [2008], tarafından çalışılmış ve artan bariyer yüksekliği ile azaltılmış gözenekliliğin köprü üzerindeki rüzgar hızlarını azalttığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, tarımsal amaçlarla rüzgar bariyerleri üzerinde rüzgar hızını düşürmeye yönelik rüzgar tüneli

testleri yapılmıştır (Borrelli et al. [1987], Ranga Raju et al. [1988], Papesch [1992]). Bu çalışmalarda farklı geometrilerdeki ve gözenekliliklerdeki rüzgar bariyerinin arkasındaki ortalama ve türbülanslı rüzgar hızları ölçülmüştür.

Bir başka önemli konu ise rüzgar bariyerlerinin, aerodinamik katsayılar ve girdap frekansı gibi köprü aerodinamiği üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Ostenfeld et al. [1992], farklı gözeneklilikteki rüzgar bariyeri modelleri üzerinde yaptığı rüzgar tüneli testlerinde düşük gözenekliliğe sahip bariyerlerin yarattığı sürüklenme kuvvetinin köprünün üst kısmında oluşan sürüklenme kuvvetinden iki kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, %50 ile %75 arasında bir bariyer verimliliği (rüzgar hızının azaltılması açısından) sağlanması ve yaratılan sürüklenme kuvveti yükünün iyi tasarlanmış bir kutu kirişine eşit olması bakımından, 0.4-0.5 arası gözenekliliğe sahip bariyerlerin köprü tasarımları için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Rüzgar testi sonuçları, rüzgar bariyerlerinin aerodinamik kutu kesitleri üzerinde ufak aerodinamik etkileri olsa dahi 0.5 gözeneklilik ile düzenlenebileceğini göstermiştir (Ostenfeld [1989]).

## 2. SAYISAL METODOLOJİ

Reynolds sayısının, köprü açıklık oranının ve köprü kesit alanının aerodinamik parametreler üzerindeki etkisini incelemek için sayısal analizler yapılmıştır. İncelenen aerodinamik parametreler kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları ve girdap kopma frekansıdır. Sayısal analizlerde, zamana bağlı Reynolds Ortalama Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) denklemlerini çözmek için Fluent 6.3.26 kullanılmıştır. Fluent 6.3.26 ile zamanla değişen ve değişmeyen akışları çözmek ve çeşitli sınır koşulları tanımlamak mümkündür.

Literatür araştırmasına dayanarak simülasyonlarda  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılmıştır (Sun et al. [2005] ve Nieto et al. [2010]). Ayrıca, ortalama akışın dikey

değişimi sıfır alınmıştır ( $\partial/\partial y = 0$ ). Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilip, yoğunluğu 1.2041 kg/m<sup>3</sup> ve viskozitesi 1.983e-5 kg/ms alınmıştır.

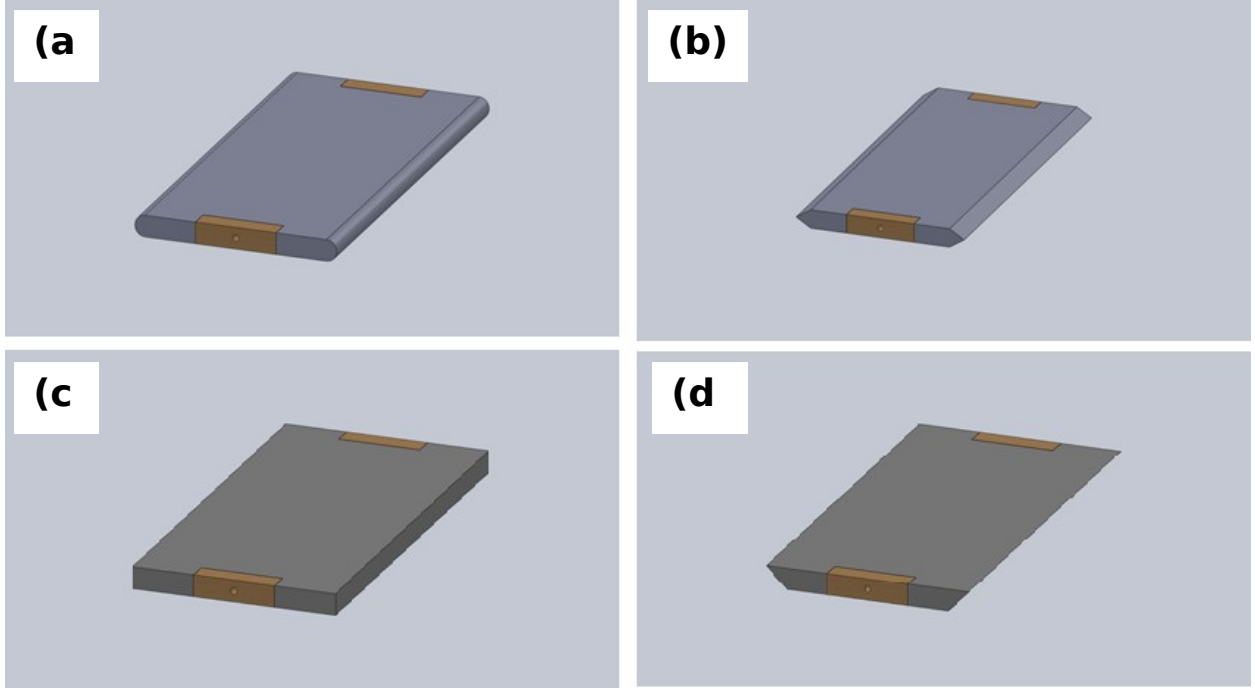
## 2.1. Çalışılan Geometriler

Uzun açıklıklı asma köprü kesit alanları için değişik geometriler kullanılmaktadır. Bu projede, değişik açıklık oranları (genişlik-yükseklik oranı) ve yan açılara sahip dikdörtgen, eliptik, altıgen ve ikizkenar yamuk kesit alanları incelenmiştir.

Kesit alanlarının detaylı geometrik özellikleri Tablo 1 ve Şekil 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 1:** Köprü Kesit Alanlarının Geometrik Özellikleri

Köprü Kesiti	Uzunlu	Genişli	Yükseklik	Açıklık Oranı	Yan Açısı
Dikdörtgen	1.0m	0.5m	0.050m	10	-
Dikdörtgen	1.0m	0.5m	0.042m	12	-
Dikdörtgen	1.0m	0.5m	0.033m	15	-
Eliptik	1.0m	0.5m	0.050m	10	-
Eliptik	1.0m	0.5m	0.042m	12	-
Eliptik	1.0m	0.5m	0.033m	15	-
Altıgen	1.0m	0.5m	0.050m	10	45°
Altıgen	1.0m	0.5m	0.042m	12	45°
Altıgen	1.0m	0.5m	0.033m	15	45°
İkizkenar yamuk	1.0m	0.5m	0.050m	10	45°
İkizkenar yamuk	1.0m	0.5m	0.042m	12	45°
İkizkenar yamuk	1.0m	0.5m	0.033m	15	45°

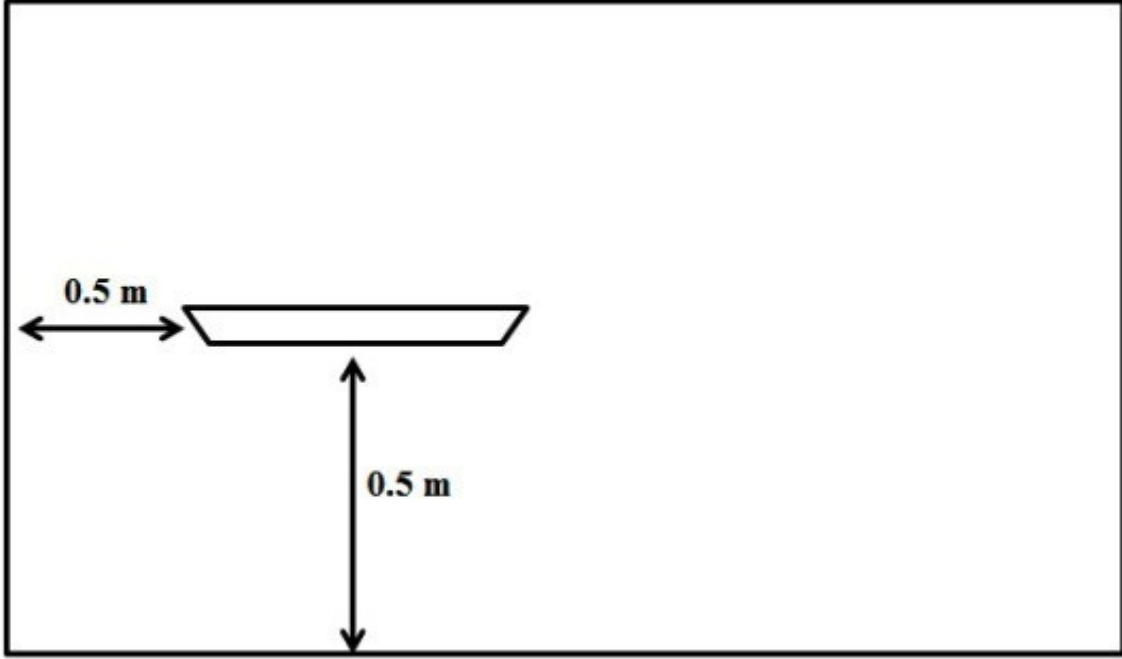


**Şekil 2.1** Köprü Kesit Alanı Geometrileri- (a) Eliptik Kesit Alanı- (b) Altıgen Kesit Alanı- (c) Dikdörtgen Kesit Alanı- (d) İkizkenar Yamuk Kesit Alanı

Sayısal analizlerde harcanan zamanı azaltmak amacıyla tüm durumların iki boyutlu sayısal analizleri yapılmıştır. Ayrıca, tüm modeller sıfır hücum açısında ve geliş hızları 5, 10, 15, 20 and 25 m/s olan türbülanslı akış alanlarında incelenmiştir.

Şekil 2.2 genel çözüm alanı taslağını göstermektedir. Çözüm alanı  $2 \times 1 \text{ m}^2$  dikdörtgen şeklindedir.

Modeller, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, girişten 0.5 m ve alttan 0.5 m uzaklığa yerleştirilmiştir.

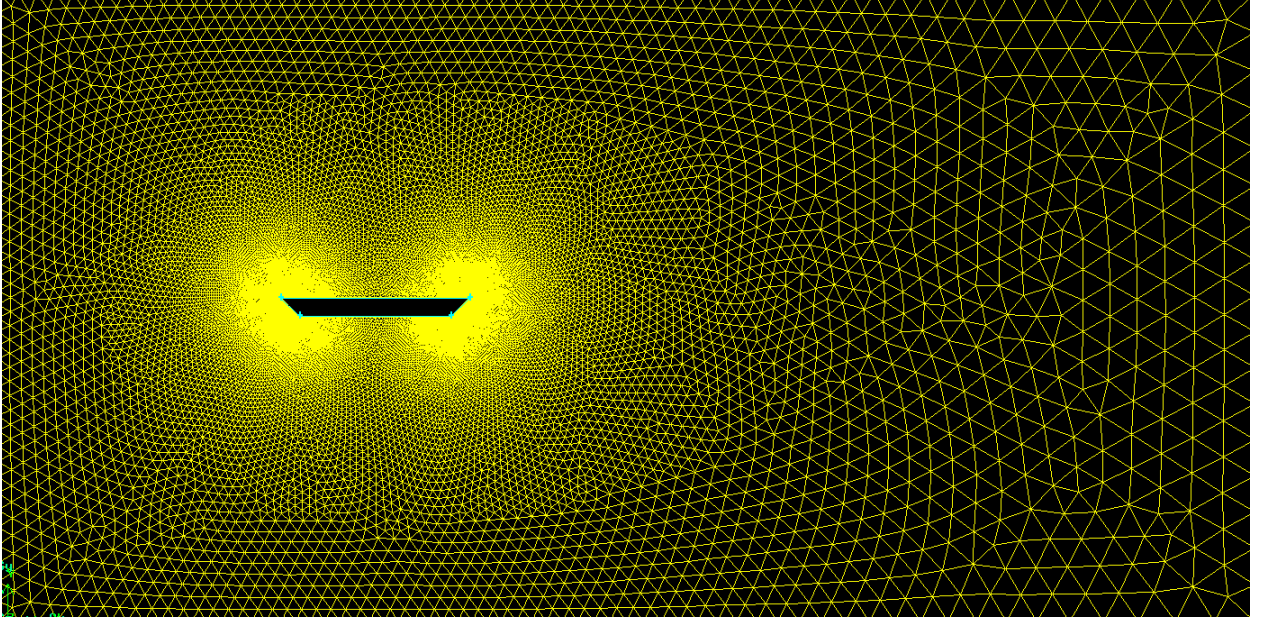


Şekil 2.2 Genel çözüm alanı taslağı

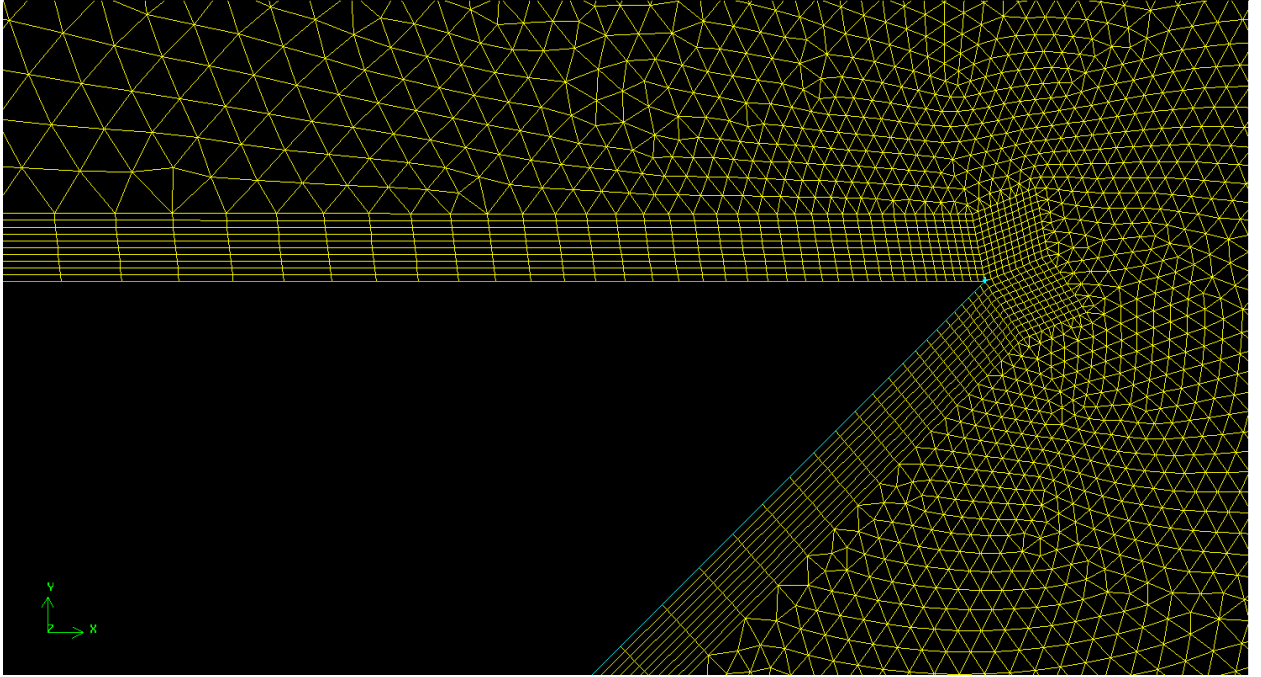
## 2.2.Çözüm Ağının Oluşturulması

Sayısal çözüm alanı iki alt çözüm ağına ayrılmıştır. Sınır tabaka bölgesi, yüksekliği köprü kesitinin yüksekliğinin yüzde biri olan ve on noktadan oluşan yapısal çözüm ağı ile tanımlanırken (Şekil 2.4), geri kalan yerlerde yapısal olmayan çözüm ağı (Şekil 2.3) kullanılmıştır. Çözüm ağı GAMBIT 2.4.6 kullanılarak oluşturulmuştur. Çözümlerde  $y^+$  değeri tüm durumlar için 5'ten küçüktür ve  $k-\omega$  modeli için kabul edilebilir aralıktadır.

Çeşitli büyüklükteki elemanların kullanımına izin vermesi sebebiyle sayısal analizlerde yapısal olmayan çözüm ağı tercih edilmiştir. Böylelikle, sınırlarda fazla sayıda çözüm elemanı olmadan doğru çözümler elde etmek mümkündür (Else [2003]).



**Şekil 2.3** Yapısal olmayan çözüm ağı– Köprü kesiti (Yan açısı  $45^\circ$  olan ikizkenar yamuk)



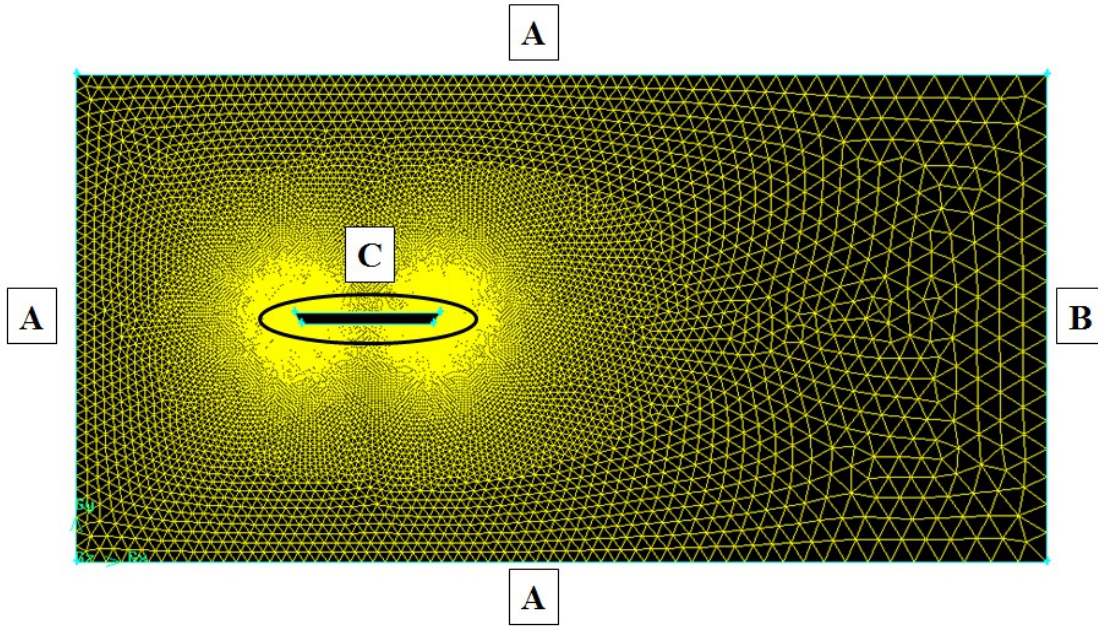
**Şekil 2.4** Sınır tabaka yapısal çözüm ağı– Köprü kesiti (Yanal açısı  $45^\circ$  olan ikizkenar yamuk)

### 2.3. Sınır ve Başlangıç Koşulları

Bütün durumlar için çözümlerde üç farklı sınır koşulu kullanılmıştır. Duvar sınır koşulu akışkan ve katı bölgeleri birbirinden ayırıp, köprü kesitini tanımlamak için kullanılmıştır. Basınç Çıkış sınır koşulu, akış çıkışında uygulanmıştır. Bu sınır koşulu için, bağıl basınç değerini tanımlamak gereklidir. Deney düzeneğinin basıncı atmosfer basıncına eşit olduğu için bu değer çözümlerde sıfır alınmıştır. Ayrıca, ters akışın söz konusu olmadığı da belirtilmiştir.

Akış hızını tanımlamak için hız koşulu kullanılmıştır. Hız koşulunda hızın yönünü ve büyüklüğünü tanımlamak mümkündür. Bahsedilen her durum 5, 10, 15, 20, ve 25 m/s akış hızları için çözülmüştür. Türbülans özelliği, türbülans yoğunluğu seçeneği ile belirtilmiştir. Türbülans yoğunluğu için, rüzgar tüneli testlerinden elde edilen deneysel değerler kullanılmıştır. Girişteki türbülans yoğunluğu, 15 m/s' den düşük akış hızları için %1, 15 m/s'den yüksek akış hızları için %2 olarak alınmıştır.

Şekil 2.5, sayısal analizlerde kullanılan sınır koşullarını göstermektedir.



Şekil 2.5 Sınır Koşulları – A: Hız Girişi, B: Basınç Çıkışı, C: Duvar

## 2.4. Türbülans Modelleri ve Duvara Yakın Bölge Modellemesi

Nümerik çözümlerde  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport) türbülans modeli kullanılmıştır (Sun et al. [2005]). Eddi viskozite denklemlerinde transport etkisini dahil ettiği için bu model, akış ayrılmasını çözümlenmede oldukça iyidir. Bardina et al. [1997], birçok çalışmada  $k-\omega$  SST türbülans modelinden yararlanmışlardır. Seçilen türbülans modelindeki sabit değerler, programda varsayılan şekliyle bırakılmıştır.

Sayısal yaklaşımlarda, duvar sınırında akışkanın hızı sıfır kabul edildiği için, bağlı değişkenlerde güçlü gradyanlar ve transport işlemlerinde ise büyük viskoz etkiler ile karşılaşılabilir.  $k-\omega$  SST modelinin otomatik duvar sınırı düzeltmeleri ile bu problemlerim çözülebileceği öngörülmüştür. Otomatik duvar sınırı düzeltmesinden dolayı oluşan hataları azaltmak için, sınır tabaka en az 10 nokta kullanılarak çözülmelidir (Turb. & Near-Wall modeling [2011]). Bunun için köprüye yakın yerlerde sayısal ağ yüksekliği köprü yüksekliğinin yüzde biri alınmıştır (Zhu et al. [2007]).

## 2.5. Çözüm Prosedürü

Önceden belirtildiği gibi, bu çalışmada zamana bağlı Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri FLUENT 6.3 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Her zaman adımında, momentum, süreklilik ve türbülans denklemleri iterasyon yapılarak çözülmüştür. İkinci derece kapalı (implicit) zamana bağlı formülasyon, zaman türevlerinin ayrıklaştırılmasında kullanılmıştır. Ayrıca, momentum ve türbülans denklemleri, daha doğru sonuçlar elde etmek için ikinci derece yöntemlerle ayrıklaştırılmıştır. Çözümlerde standart basınç ayrıklaştırması kullanılmıştır. Basınç-hız eşleşmesi PISO (Pressure Implicit Splitting of Operators) uygulanmıştır. Çünkü, PISO zamana bağlı çözümlerde, çözümün stabilitesini etkilemeden yüksek zaman adımı kullanma imkanı sağlar (Cornell University [2011]).

Zaman adımı büyüklüğünü belirlemek için, Strouhal sayısı kullanılabilir. Strouhal sayısı kullanarak girdap kopma frekansını elde etmek de mümkündür. Bu frekans, kopma devrini gösterir. Girdap kopmasını tam olarak belirleyebilmek için, bir kopma devrinde en az 20 zaman adımı olması gerekir (Cornell University [2011]). Literatürde, ikizkenar yamuk kesit alanı için Strouhal sayısının yaklaşık 0.2 olduğu görülmüştür (Bosch et al. [2008]). Modelin karakteristik uzunluğu 0.033 m ve maksimum hız 25 m/s olarak alınmıştır. Maksimum frekans 150 Hz'dir. Bu değerler göz önüne alındığında, zaman adımı 0.0001 seçildiği zaman tüm durumlar için girdaplar gözlenebilmektedir. Ayrıca, literatür araştırmasında, ikizkenar yamuk kesit alanı için minimum frekansın 20 Hz olduğu görülmüştür (Bosch et al. [2008]). Son olarak, zaman adım sayısı 20000 alınmıştır.



FLUENT 6.3'de ardışık iterasyonlarda elde edilen sonuçlar arasındaki farka bakılarak sayısal yakınsama kontrol edilmiştir. Bütün denklemler için iterasyon sonuçları arasındaki fark  $10^{-3}$ 'ten küçükse, çözüm yakınsamış kabul edilmiştir.

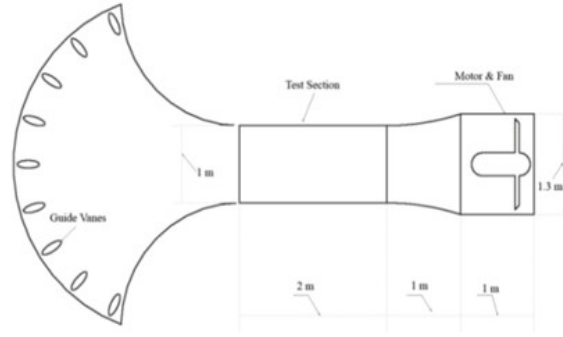
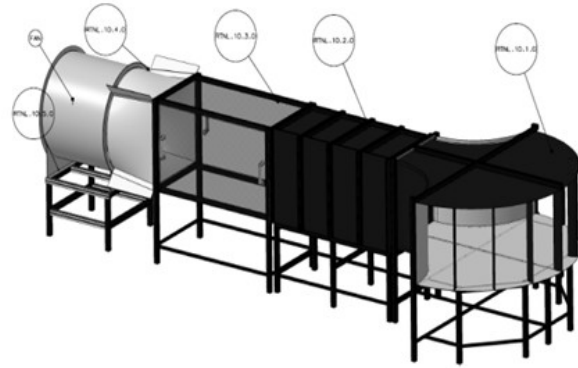
### **3. DENEYSEL İMKANLAR VE ÖLÇÜM AYRINTILARI**

Bu projede sayısal olarak da incelenmiş olan köprü kesitlerinin rüzgar tüneli testleri yapılmış ve sonuçlar sayısal olarak elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu kısım test olanaklarının tasarım ve üretimi ile ölçüm tekniklerinin detaylarını sunmaktadır.

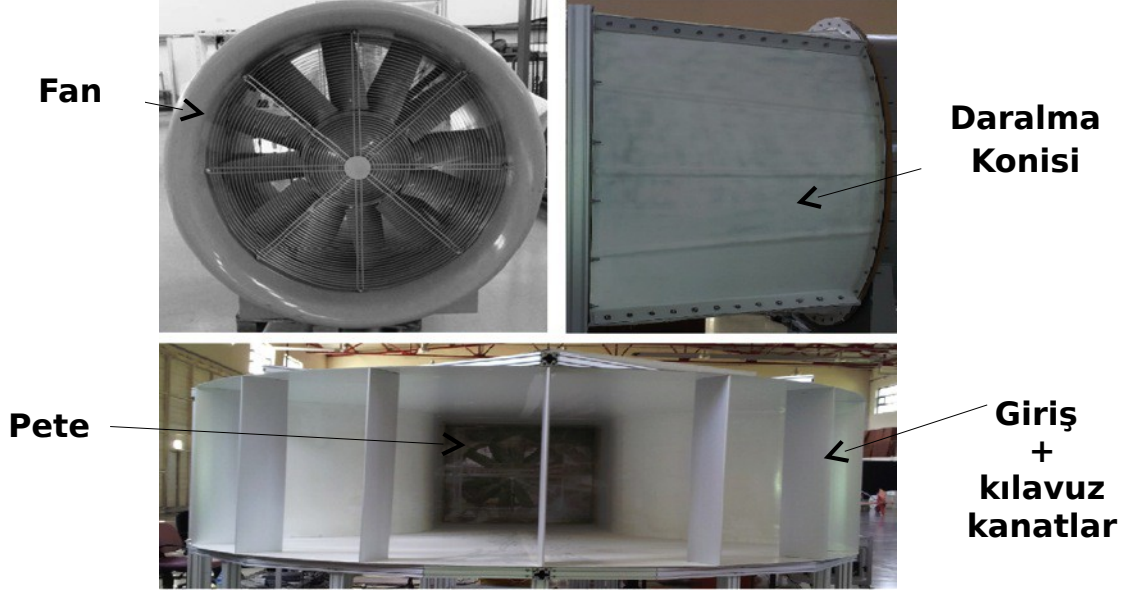
#### **3.1. Rüzgar Tüneli**

Rüzgar tüneli, 1500 devir hızında, 30 kW (40 hp) elektrik motoruyla çalışan, 1.2m çaplı aksel fana sahip bir emişli açık devre tünelidir. Bu rüzgar tüneli  $1 \times 1 \text{ m}^2$ 'lik kesit alanlı ve 2m uzunluğunda tamamı saydam pleksiglastan üretilmiş bir test alanına, test alanının önünde bir adet 1 metrelik daralma kısmına sahiptir. Bu tünelin en yüksek hızı 20 m/s'dir ve türbülans yoğunluğu %1'den küçüktür. Bir adet petek ve rüzgar paravanı akış kalitesini yükseltmek amacıyla test bölgesinin ön kısmına yerleştirilmiştir.

Rüzgar tünelinin test bölgesi içerisindeki hız ve türbülans yoğunluğu dağılımını belirlemek üzere yapılan nitelendirme Ek A'da belirtilmiştir.



Şekil 3.6 Rüzgar tünelinin farklı açılardan görünümü



Şekil 3.7 Rüzgar tüneli parçaları

### 3.2. Denge Sistemi

Dört adet yük hücrelerinden oluşan denge sistemi modelin tünelin içine yerleştirilmesinde ve aerodinamik sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin ölçümünde kullanılmıştır. Dikey olarak yerleştirilmiş iki adet yük hücresi kaldırma, yatay olarak yerleştirilmiş iki adet yük hücresi ise sürüklenme kuvvetlerini ölçmek için kullanılır. Yük hücrelerinde doğrusal rulmanlar kullanılarak birleşme kollarındaki hareket kısıtlanmış ve böylelikle kaldırma ya da sürüklenme kuvveti ölçümlerinin birbirlerini etkilemesi önlenmiştir.

Denge sisteminde kullanılan yük hücreleri S tipi kiriş yük hücreleridir ve bu tip yük hücreleri sinyallerini gerilme veya sıkıştırma kuvveti olarak aktarırlar. Kullanılan yük hücrelerinin en yüksek kapasitesi 5 kg'dır ve hassasiyetleri %0.02 F.S'tir bu da  $\pm 0.001\text{kg}$ 'a denk gelir.

Yük hücreleri bir test kutusu ile birlikte bir veri toplama sistemine bağlıdır ve bu sistem TESTLAB DYNAMICS yazılımı tarafından kontrol edilir. Yük hücreleri kg cinsinden sonuç vermeleri için nitelendirilmişlerdir.

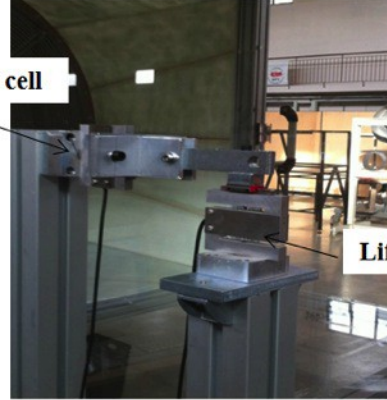
**Model ve**

**Model  
+  
Wind  
Barrier**



**Drag load cell**

**Balance  
system**



**Lift load cell**

**k hücreleri**

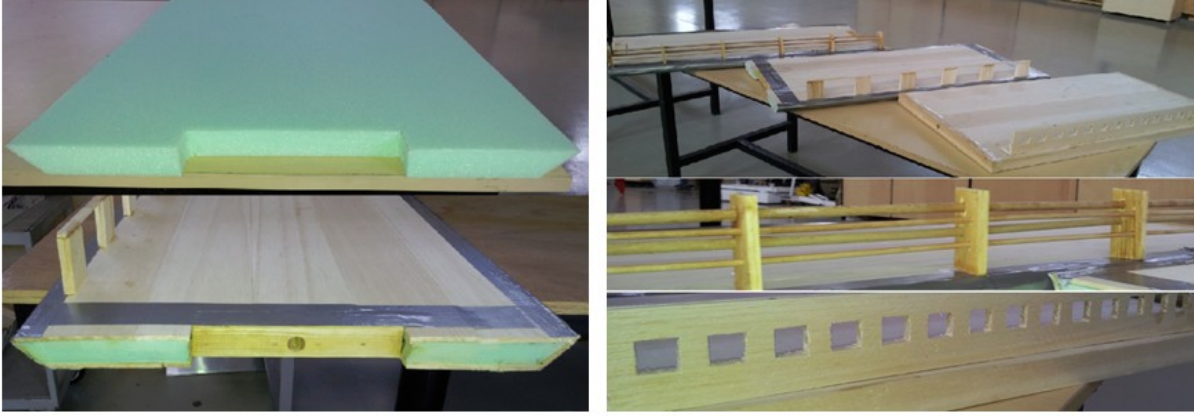
**Şekil 3.8** Denge sistemi ve yük hücreleri

### **3.3. Modeller ve Rüzgar Bariyerleri**

Modeller yoğun köpük ve balsa ağacı kullanılarak yapılmıştır. Köpük, istenilen kesit alanını elde etmek amacıyla akım teli makinesinde kesilmiş daha sonra yüksek hızlarda meydana gelebilecek yapısal hasar veya bozulmaları engellemek amacıyla dayanıklılığı arttırmak için balsa ile kaplanmıştır. Modeller Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Yapılan köprü modelleri üzerindeki ölçümler bittikten sonra çeşitli rüzgar bariyerleri tasarlanmış ve etkileri çalışılmak üzere köprülere yerleştirilmişlerdir.

Denge sistemine yerleştirilen modeller, test bölmesinin girişinden ve alt yüzeyinden 50'şer cm uzağa konulmuştur. Test bölmesinin önüne modelin blokaj etkisinden kaynaklanan hız değişimlerini ölçmek amacıyla bir adet referans hız probu, girdap salınım frekansını ölçmek amacıyla ise de modelin firar kenarından 30 cm uzağa ve modelin alt kısmına model kalınlığından 2 veya 3 kat daha uzak olacak şekilde bir sıcak-tel sensörü yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.9** Modeller ve rüzgar bariyerleri

### **3.4. Ölçüm aletleri**

Sıcak-tel hızölçeri anlık rüzgar hızını ölçmek için kullanılabilen bir alettir. Hız verilerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak frekans alanında veriler elde edilir ve bu verilerdeki zirve noktaları girdap salınım frekanslarını ifade eder.

Çok kanallı CTA modüllü DANTEC 54N81 tarafından kontrol edilen tek sensörlü sıcak-tel ve referans probu modellerin akım yönündeki ölçümlerini gerçekleştirmek üzere kullanılmışlardır. Her bir ölçüm, sıcak-tel modülünden elde edilen verilerin NI 9205 analog giriş modülü kullanılarak 250 kS/s örnekleme oranında her bir 10 s'de 5 kHz için örneklenmiştir. Sabit sıcaklık anemometri ölçüm sensörü sıcaklık değişimine çok duyarlı olduğundan, her bir ölçümden önce referans prob kullanılarak kalibre edilmiştir. Bütün sistem Lab View yazılımı tarafından bilgisayarda kontrol edilmektedir.

## **4. SONUÇLAR**

Bu bölümde, deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Sayısal analizlerin güvenilirliği doğrulandıktan sonra, farklı kesit alanları etrafındaki akış incelenmiş, aerodinamik katsayılar, girdap kopma frekansı ve Strouhal sayısı hesaplanmıştır.

Karşılaştırma iki ayrı kategoride yapılmıştır. Birinci kategori çeşitli açıklık oranları için farklı kesit alanlarının aerodinamik parametreler üzerine etkisini içermektedir. İkinci kategori ise açıklık oranı ve Reynolds sayısının aynı kesit alanları için aerodinamik parametrelere etkisini içermektedir. Ayrıca, başka bir alt bölümde çeşitli kesit alanları için hücum açısının aerodinamik parametrelere etkisinin deneysel araştırması anlatılmıştır. Son olarak, rüzgar bariyerinin köprü kesiti performansı ve stabilitesine etkisini incelemek için rüzgar bariyeri tasarlanıp, analizler yapılmıştır.

Elde edilen tüm deneysel ve sayısal sonuçlar ek B ve C'de verilmiştir.

#### **4.1. Hesaplama Yöntemleri**

Bu çalışmada incelenen aerodinamik parametreler; kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları, girdap kopma frekansı ve Strouhal sayısıdır.

Sayısal simülasyonlarda aerodinamik katsayıları elde etmek için referans değerler tanımlanarak, bu katsayıların zaman geçişleri kaydedilmelidir. Modelin kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları, bu katsayıların zaman geçişlerinin ortalaması alınarak bulunur.

Deneysel çalışmalarda bu işlem farklıdır. Önceki bölümde açıklandığı gibi, modele bağlanan denge sistemi yardımı ile kuvvetler ölçülür. Daha sonra, bu kuvvetlerden kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları hesaplanır. Aerodinamik katsayıları elde etmek için kullanılan veri toplama sisteminin örnekleme oranı 100 Hz ve toplam örnekleme süresi 30 saniyedir. Ölçüm yapıldıktan sonra her bir yük hücresinden alınan sonuçların ortalaması alınarak ortalama kuvvetler elde edilir. Kullanılan denge sisteminin özelliği gereği kaldırma kuvvetini ve sürüklenme kuvvetini ölçen hücrelerdeki ortalama veriler ayrı ayrı toplanır.

Girdap kopma frekansı deneysel ve sayısal çalışmalarla elde edilen bir diğer aerodinamik parametredir. Sayısal simülasyonlarda küçük zaman adımları kullanmak mümkün olduğu için, kaldırma katsayısının zaman geçişi girdap kopma frekansını bulmada referans olarak kullanılabilir. Kaldırma katsayısının zaman geçişine Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) uygulanıp, çözüm grafiği çizildiğinde, grafiğin uç noktası girdap kopma frekansını verir. Fakat, deneysel çalışmalarda elde edilen aerodinamik katsayılar anlık sonuçlar olarak düşünülmediği için, bunları kullanarak frekans hesaplamak mümkün değildir. Bu yüzden, frekans hesaplamak için sıcak tel (hotwire) yöntemi ya da yüksek hızlı PIV yöntemi kullanılmalıdır. Bu çalışmada sıcak tel yöntemi kullanılmıştır. Girdap kopma frekansını sıcak tel metodu ile elde etmek için proplar modelin yüksekliğinin 2 ya da 3 katı uzaklığa, akış aşağı, modelin yukarısına

veya aşığıısına yerleştirilmelidir. Bu yer sayısal simülasyon yardımı ile kolayca bulunmuştur.

Sıcak tel ile hız değerlerini anlık yakalamak mümkündür. Sıcak tel sisteminde kullanılan veri toplama sisteminin örnekleme oranı 5 KHz ve toplam örnekleme süresi 10 saniye olan veri toplama sistemi kullanılmıştır. Girdap kopma frekansı, sayısal simülasyonlarda hesaplandığı gibi Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanıp grafiğin uç noktası bulunarak hesaplanmıştır.

## **4.2. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması**

Bu bölümde, farklı köprü kesit alanları için deneyler ve sayısal analizler sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Bu bölüm aerodinamik parametrelere göre dört alt bölüme ayrılmıştır.

Aşağıda verilen grafikler farklı kesit alanları için aerodinamik parametrelerin sıfır hücum açısındaki hız değişimlerini göstermektedir.

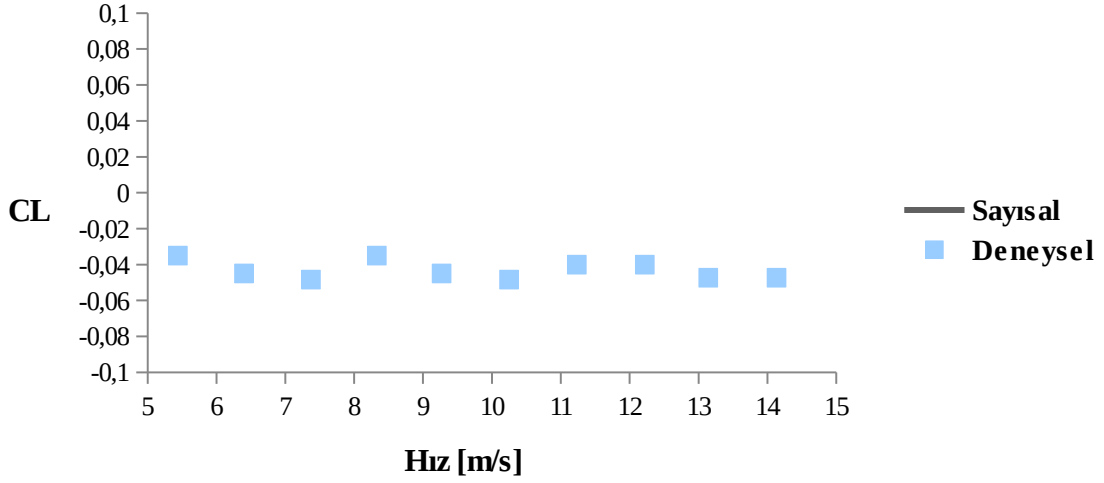
Dikdörtgen ve eliptik kesit alanları için aerodinamik parametrelerin karşılaştırılması 12 açıklık oranı için yapılmıştır. Altıgen ve ikizkenar yamuk kesit alanları için ise karşılaştırmalar 15 açıklık oranı ve 45<sup>0</sup> yan açısı için yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan denge sisteminin moment ölçememesi sebebiyle moment katsayısı için karşılaştırma yapılamamıştır.

### **4.2.1. Kaldırma Katsayısı**

Deneysel ve sayısal sonuçlar dikdörtgen, eliptik ve altıgen kesit alanlarının sıfır hücum açısında farklı hızlardaki kaldırma katsayılarının sıfır olduğunu göstermektedir. Ancak, asimetric geometrisinden dolayı ikizkenar yamuk kesit alanı için sıfır hücum açısındaki kaldırma katsayısı sıfır değildir.

Ayrıca, deneysel ve sayısal analiz sonuçlar kaldırma katsayısının hız ile değişmediğini, yani sadece geometriye bağlı olduğunu göstermektedir.



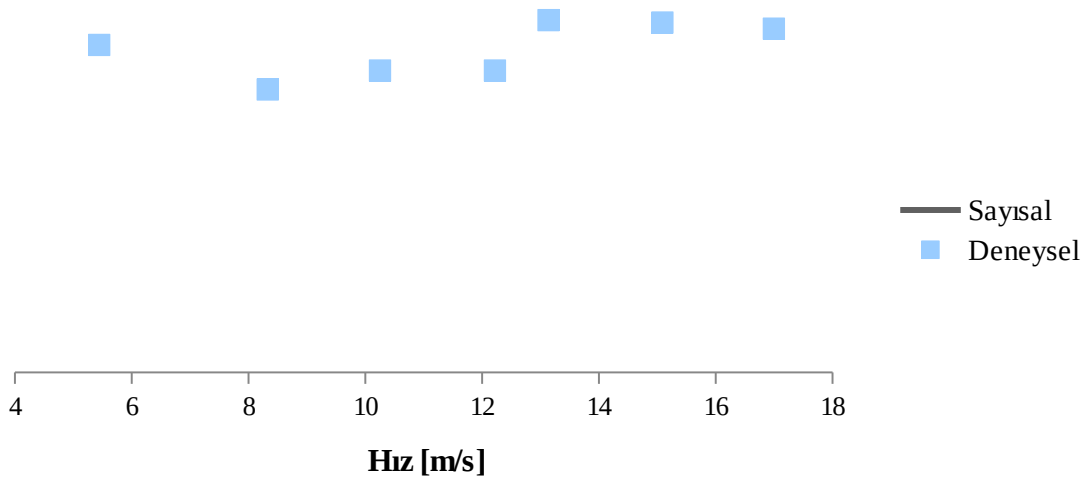
**Şekil 4.10** İkizkenar yamuk kesit alanı için kaldırma katsayısı değişimi-AR=15

#### 4.2.2. Sürükleme Katsayısı

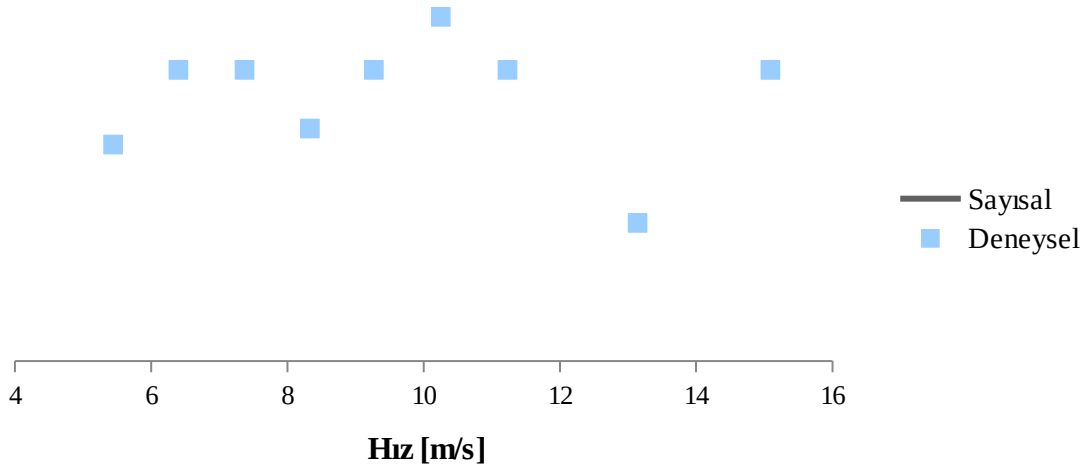
Şekil 4.2- 4.5 farklı kesit alanları için sürükleme katsayısının hız ile değişimini göstermektedir.

Grafikler sürükleme katsayısının hız değişiminden etkilenmediğini göstermektedir. Deneysel sonuçları ve sayısal analiz sonuçları arasındaki farklılığın deneylerde kullanılan yük hücrelerinin lineer rulmanlarının yük hücrelerinin hareketine direnmelerinden dolayı olduğu düşünülmektedir.

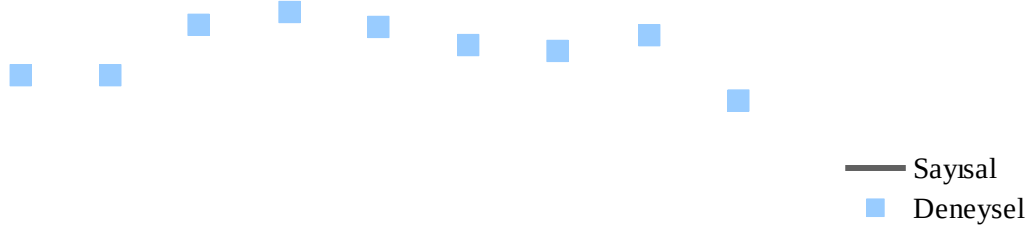




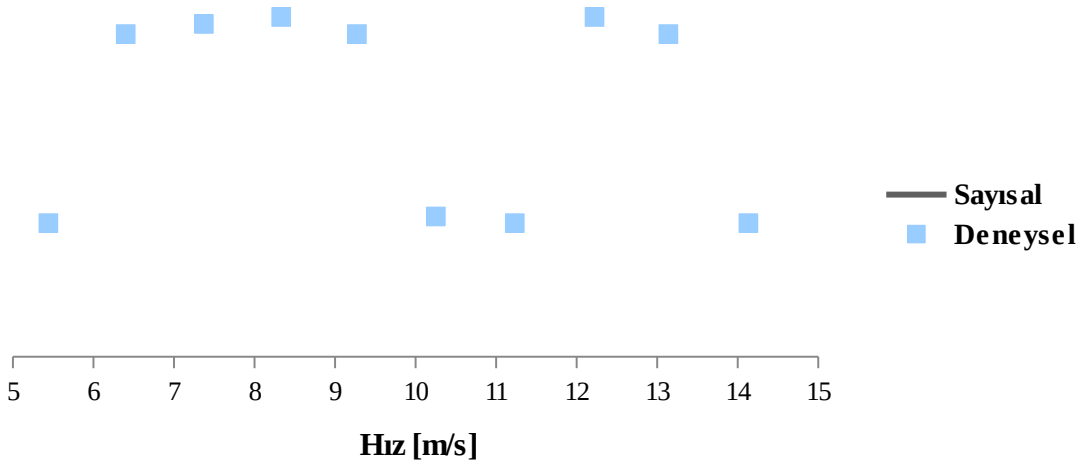
Şekil 4.11 İkizkenar yamuk kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=12



Şekil 4.12 Eliptik kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=12



Şekil 4.13 Altıgen kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=15



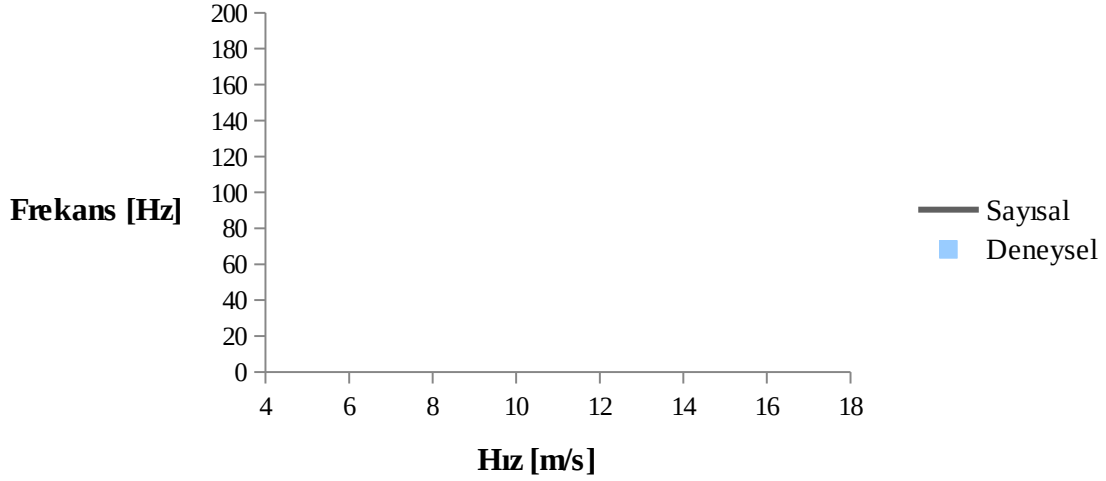
Şekil 4.14 İkizkenar yamuk kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-AR=15

#### 4.2.3. Girdap Kopma Frekansı

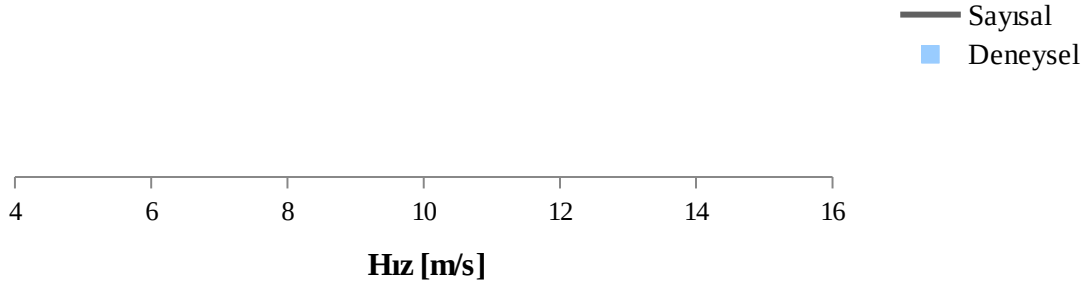
Şekil 4.6-4.9 farklı kesit alanları için girdap kopma frekansının hız ile değişimini göstermektedir.

Literatür araştırması, girdap kopma frekansının hız artışı ile arttığını göstermektedir (Matsuda et al. [2001]). Deney ve sayısal analiz sonuçları bunu doğrulamaktadır.

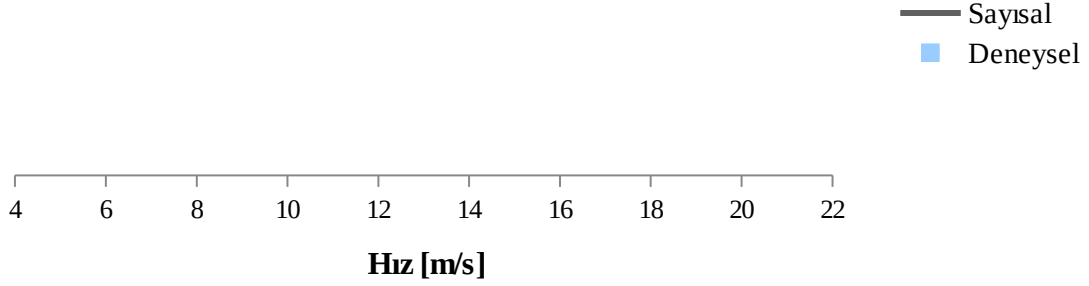
Ayrıca, deneysel ve sayısal sonuçların uyum derecesi yüksektir. Bu durum, sayısal analizlerde kullanılan yaklaşımın ve türbülans modelinin güvenilirliğinin bir göstergesidir.



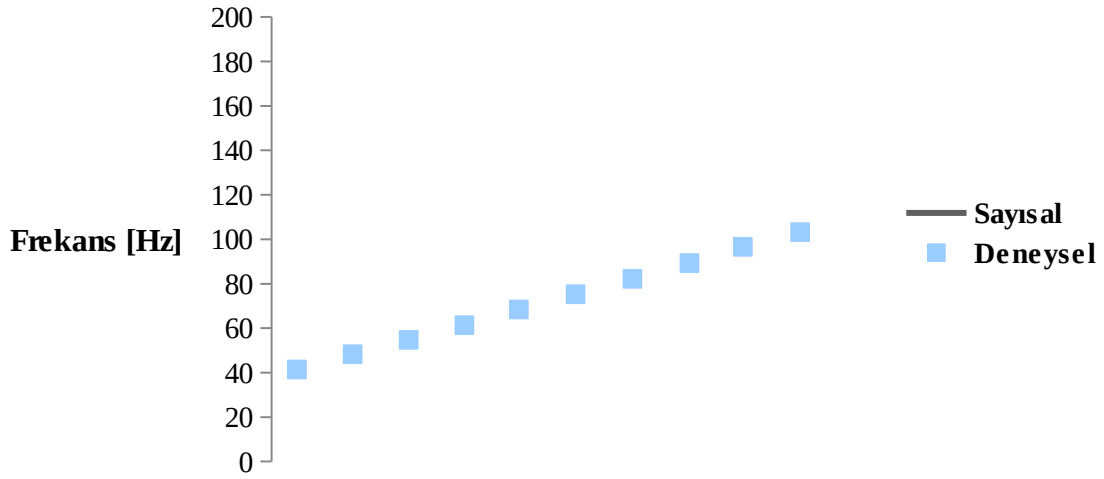
Şekil 4.15 Dikdörtgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=12



Şekil 4.16 Eliptik kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=12



**Şekil 4.17** Altıgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=15



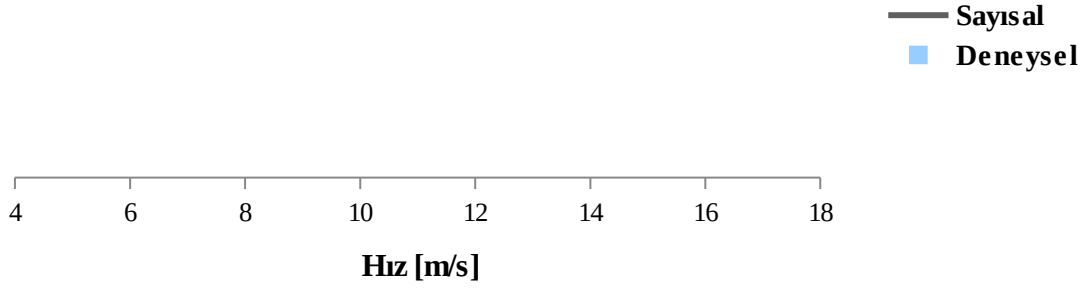
**Şekil 4.18** İkizkenar yamuk kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-AR=15

#### 4.2.4. Strouhal Sayısı

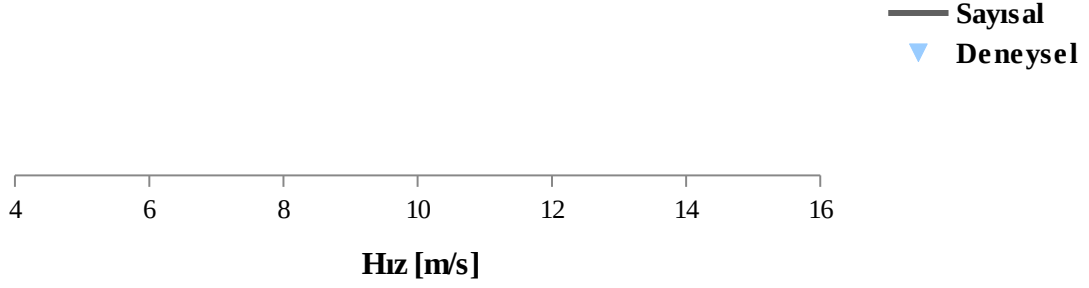
Şekil 4.10-4.13 farklı kesit alanları için Strouhal sayısının hız ile değişimini göstermektedir.

Beklenildiği gibi Strouhal sayısı hız değişiminden etkilenmemektedir. Fakat deneysel sonuçlar bunu doğrulamamaktadır. Özellikle altıgen kesit alanı için 15 m/s'den düşük hızlar için Strouhal sayısının hız ile değiştiği gözlenmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki bu farklılığın sebeplerinin sıcak-tel anemometresinden elde edilen verilerin deney ortamı sıcaklığıyla değişmesi ve sistemin titreşimi olduğu düşünülmektedir.

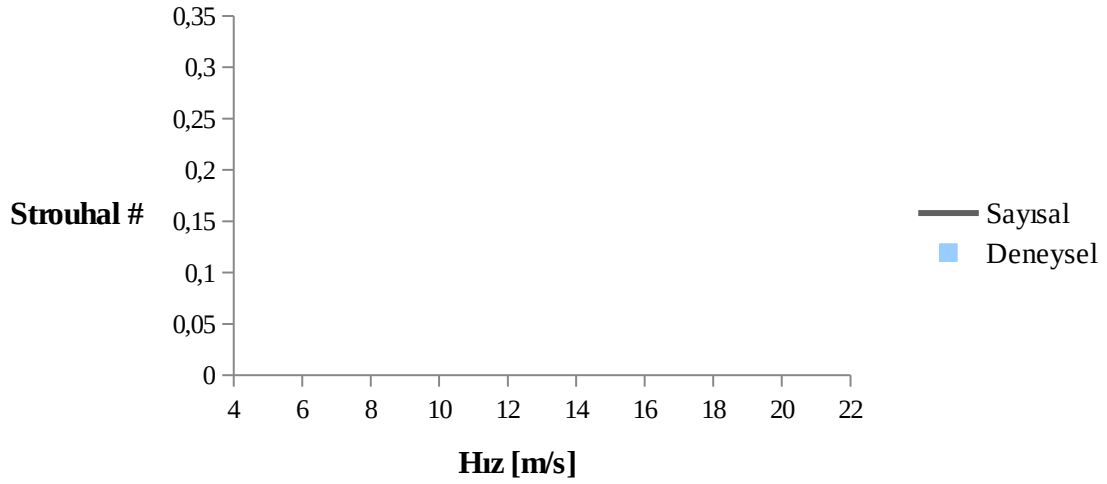
Deneysel ve sayısal sonuçlar tüm kesit alanları için büyük ölçüde tutarlılık göstermektedir. Strouhal sayısı dikdörtgen, altıgen ve ikizkenar yamuk kesit alanları için 0.1-0.15 arasında, eliptik kesit alanı için ise 0.24 civarındadır. Bu değerler literatürdeki değerler ile uyushmaktadır (Bosch el al. [2008], Taylor et al. [2009]).



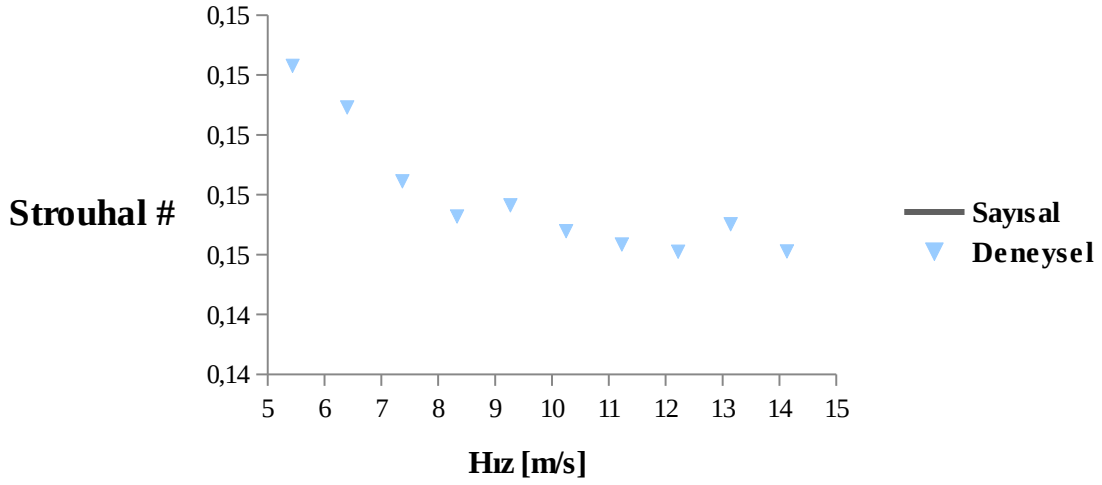
**Şekil 4.19** Dikdörtgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=12



**Şekil 4.20** Eliptik kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=12



**Şekil 4.21** Altıgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=15



**Şekil 4.22** İkizkenar yamuk kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-AR=15

Deney sonuçları ve sayısal analiz sonuçları, sayısal analizlerin güvenilirliğini test etmek amacı ile yapılmış ve zaman bağlı iki boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin SST- $k\omega$  türbülans modeli ile çözümünün farklı köprü kesitlerinin aerodinamik parametrelerinin incelenmesinde güvenilir sonuçlar verdiğine karar verilmiştir.

### 4.3. Köprü Kesit Geometrisinin Farklı Aerodinamik Parametreler Üzerindeki Etkileri

Sayısal simülasyonların doğruluğu kanıtlandıktan sonra daha önce belirtilmiş olan farklı geometrilerdeki köprülerin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu bölüm bu karşılaştırmaları içermektedir. Ayrıca bu bölüm, en uygun köprü geometrisini bulmak amacıyla farklı geometrilerdeki ve farklı açıklık oranlarındaki köprülerin aerodinamik parametreler üzerindeki etkilerinin incelenmesini de içermektedir.

İncelenen aerodinamik parametreler kaldırma sürükleme ve moment katsayılarıyla, girdap salınım frekansı ve Strouhal sayısıdır. Bütün modeller sıfır derece hücum açısında ve 5 m/s ile 25 m/s arasında değişen türbülanslı giriş hızlarına maruz bırakılmıştır. Aerodinamik parametrelerin hız ve farklı açıklık oranlarıyla değişimi aşağıda gösterilmiştir.

### 4.3.1. Kaldırma Katsayısı

Şekil 4.14'ten 4.17'e kadar kaldırma katsayısının farklı köprü geometrilerindeki ve farklı açıklık oranlarındaki hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

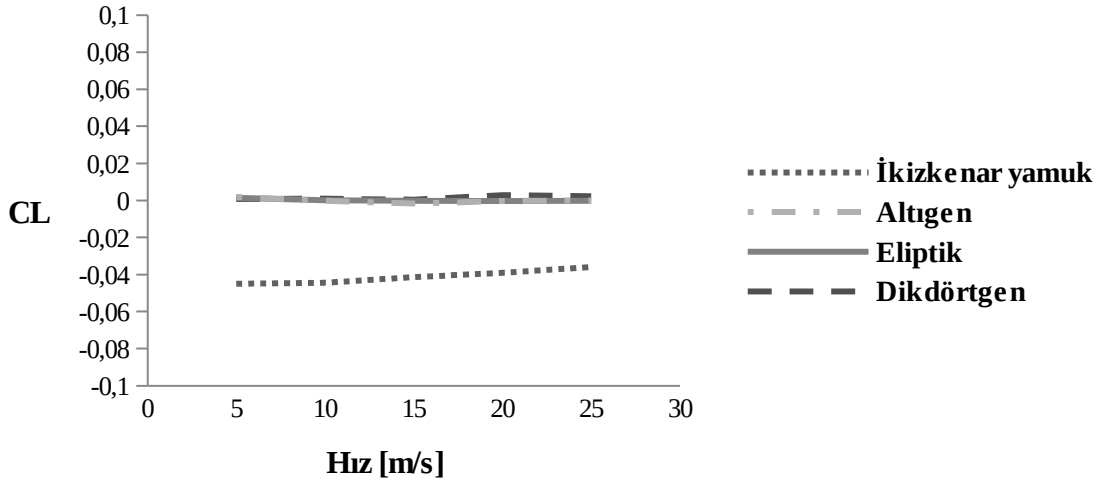
Kaldırma katsayısının hıza bağlı değişiminin sabit bir eğilim göstermesi açıkça bellidir ve bu göstermektedir ki kaldırma katsayısı akış hızına değil de tamamen modelin geometrisine bağlıdır. Buna ek olarak, ikizkenar yamuk geometrilerde kaldırma katsayısı sıfırdan farklı iken dikdörtgen, elips ve altıgen için kaldırma katsayısının sıfır olduğu açıktır. Bu durum sıfır derece hücum açısında simetrik kesit alanları üzerinde kaldırma katsayısının sıfır, simetrik olmayanlarda ise bu katsayısının sıfırdan farklı olmasından kaynaklanır.

Ayrıca bu grafikler açıklık oranının kaldırma katsayısı üzerinde herhangi bir etkilerinin olmadığını göstermektedir. Altıgen geometriler için kaldırma katsayılarında küçük bir farklılık olmasına karşın, bu aralık ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

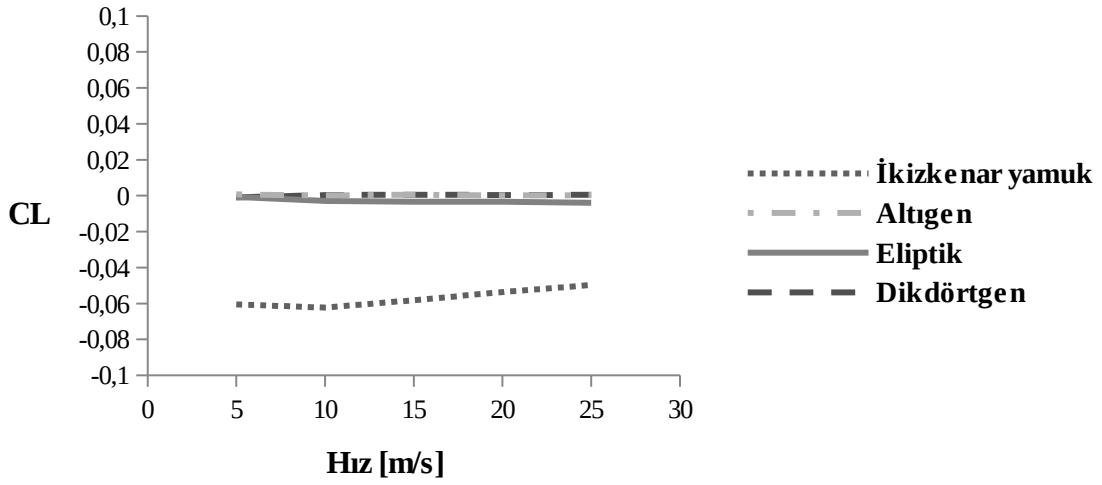
Bu durum, Şekil 4.17'de gösterilen köprü basınç katsayısı dağılımına bakılarak simetrik köprü geometrilerindeki kaldırma katsayısının sıfır derece hücum açılarında sıfır iken neden simetrik olmayan geometrilerde bu katsayının sıfır derece hücum açılarında sıfır olmadığı açıkça görülebilir.

Basınç katsayısı grafiklerindeki pozitif değerler basınç yüzeyini temsil ederken negatif değerler emilim yüzeyini temsil etmektedir. Açıkça görülmektedir ki simetrik köprülerde basınç dağılımı basınç ve emilim yüzeylerinde benzer özellikler gösterdiğinden sıfır derece hücum açılarında integral hesaplamaları sıfır kaldırma katsayısı vermektedir. Diğer yandan, ikizkenar yamuk geometrilerde basınç değerleri her iki yüzey için de negatif değerler almakta ve köprü üzerinde oluşan negatif kaldırma kuvveti değerleriyle örtüşmemektedir. İkizkenar yamuk geometrilerde negatif kaldırma kuvveti değerleri elde edilmesinin nedeni emilim yüzeyindeki basıncın basınç yüzeyindekinden daha büyük olmasıdır.

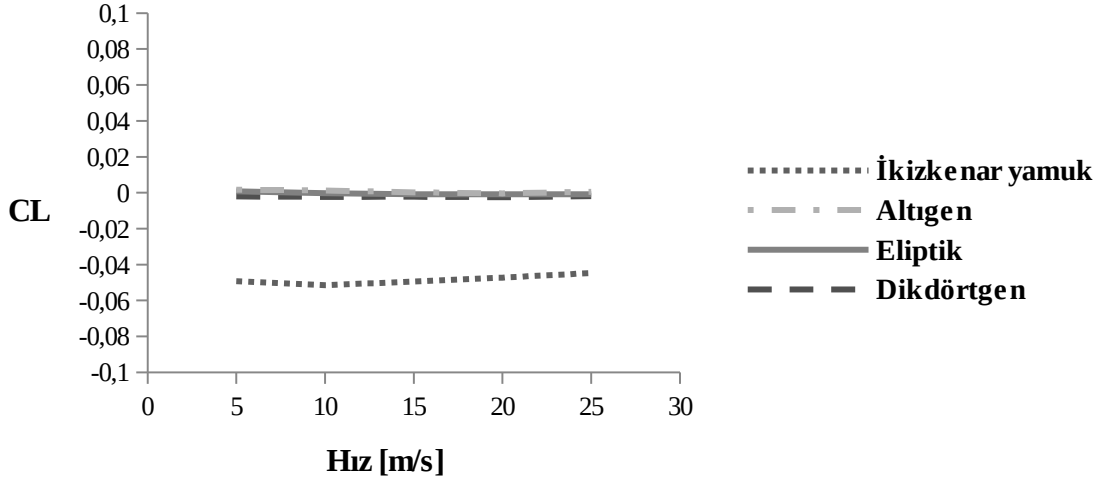




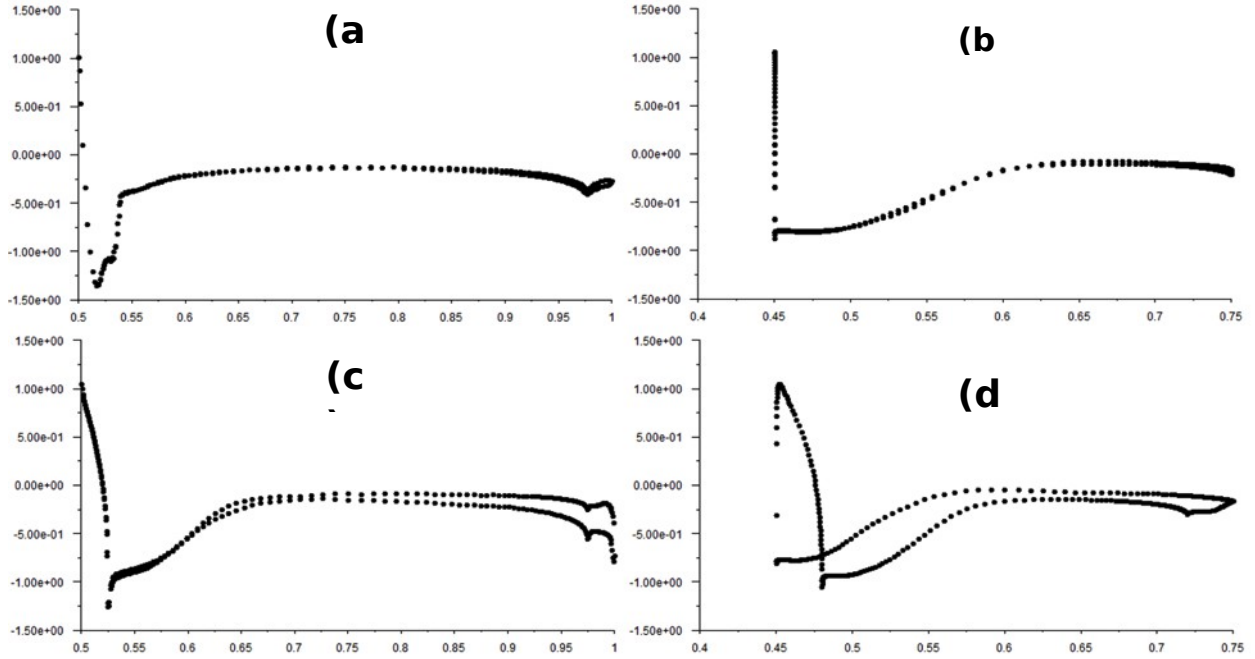
Şekil 4.23 AR=10 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi



Şekil 4.24 AR=12 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi



Şekil 4.25 AR=15 için farklı geometrilerdeki kaldırma katsayısının değişimi



Şekil 4.26 AR=10 ve V=5m/s için basınç katsayısı (a): Eliptik – (b): Dikdörtgen – (c): Altıgen – (d): İkizkenar yamuk

#### 4.3.2. Sürükleme Katsayısı

Şekil 4.18'den 4.22'ye kadar sürükleme katsayısının farklı köprü geometrilerindeki ve farklı açıklık oranlarındaki hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

Bu şekillerde açıkça görülmektedir ki sürüklenme katsayısı değişen hıza rağmen neredeyse sabit bir eğilim göstermektedir. Ayrıca, sürüklenme katsayısı dikdörtgenel köprülerde en yüksek değerlerine ulaşırken en düşük değerler eliptik geometrilerde elde edilmiştir.

Altıgen, ikizkenar yamuk ve dikdörtgen köprüler kaba, aerodinamik olmayan geometrilerken elips köprü hücum kenarında daha yumuşak açılara sahip olduğundan bu kaba geometrilerle oranla daha düşük bir sürüklenme katsayısına sahiptir.

Kaba geometrilerin aerodinamiğinde sınır tabakasının ayrılması model geometrileri açısından kaçınılmaz bir durumdur ancak sınır tabakası oluşumu ve ayrılması farklı geometrilerde farklılık gösterir ve durum Şekil 4.21'de de görüldüğü üzere sürüklenme katsayısında da değişikliklere sebep olabilir.

Sürüklenme katsayısının dikdörtgen köprü için daha yüksek olmasının sebebi ayrılan sınır tabakasının sürüklenme katsayısında büyük bir artışa neden olmasıdır. Bu artış, her bir modelde sınır tabakası ayrılmasından meydana gelen basınç sürüklenme kuvveti nedeniyle meydana gelir.

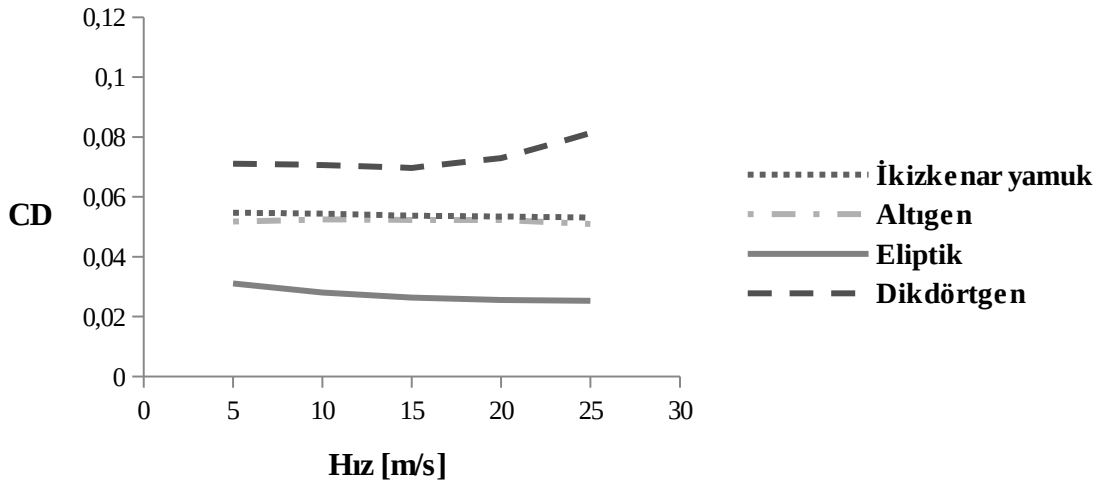
Açıkça görülmektedir ki açıklık oranının sürüklenme katsayısı üzerinde etkisi vardır. Sürüklenme katsayısı yükselen açıklık oranıyla ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu da gösterir ki köprü kalınlığı arttıkça sürüklenme kuvveti de artmaktadır. Yani sürüklenme kuvveti ve model boyutları arasında deneysel bir ilişki bulmak mümkündür.



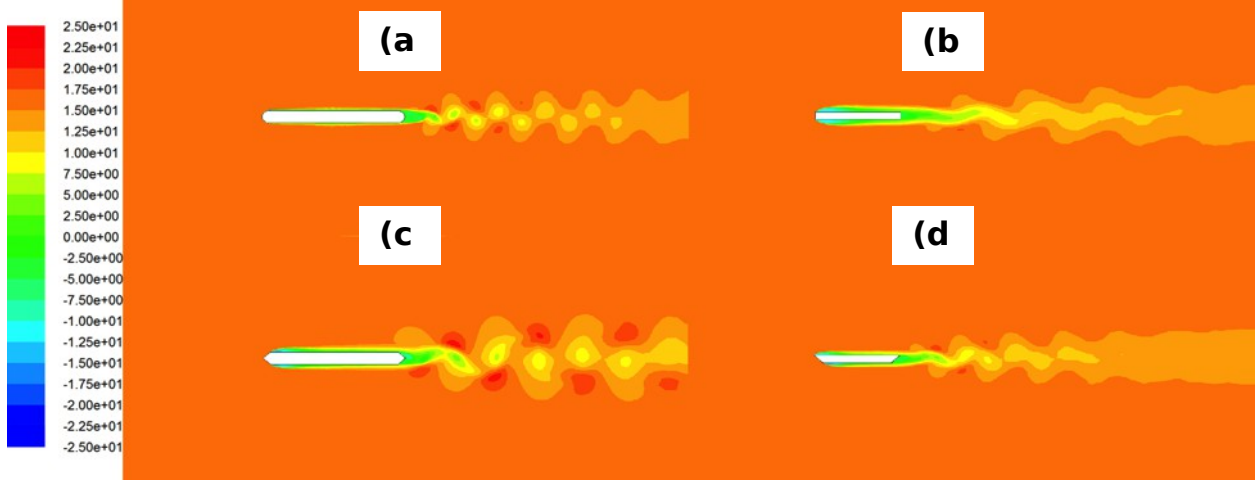
Şekil 4.27 AR=10 için farklı geometrilerdeki sürüklenme katsayısının değişimi



Şekil 4.28 AR=12 için farklı geometrilerdeki sürüklenme katsayısının değişimi



Şekil 4.29 AR=15 için farklı geometrilerdeki sürüklenme katsayısının değişimi



**Şekil 4.30** AR=10, V=5 m/s için basınç konturları – (a): Eliptik – (b): Dikdörtgen – (c): Altıgen – (d): İkizkenar yamuk

### 4.3.3. Moment Katsayısı

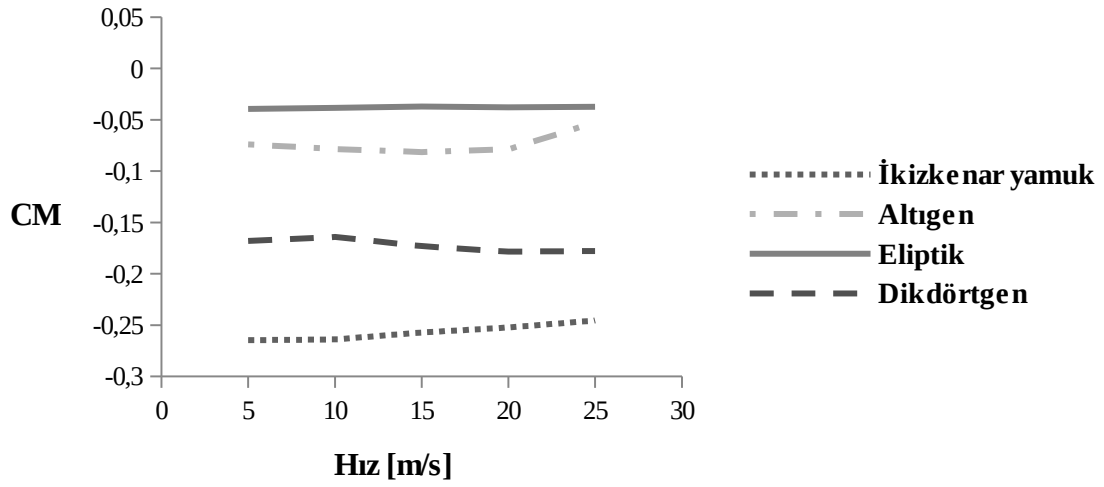
Şekil 4.22'den 4.24'e kadar moment katsayısının farklı köprü geometrilerindeki ve farklı açıklık oranlarındaki hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

Moment katsayısının eğiliminden görüldüğü gibi hız değişiminin moment katsayısı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

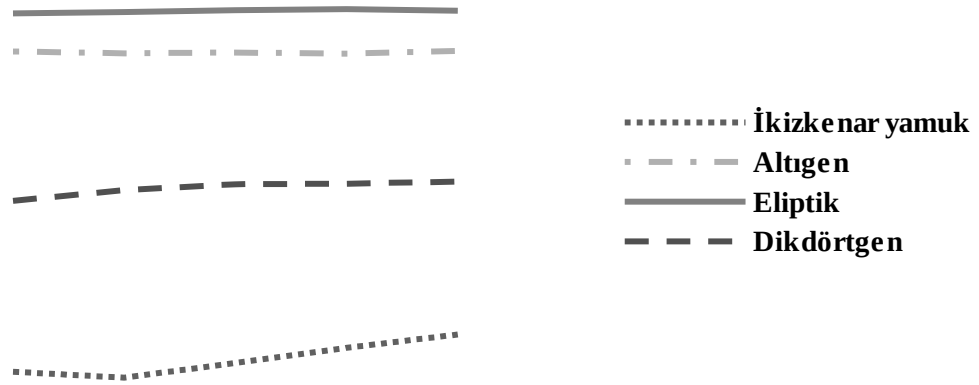
Ayrıca bu grafikler açıklık oranının simetrik modeller için moment katsayısı üzerinde herhangi bir etkilerinin olmadığını gösterirken, İkizkenar yamuk geometrisindeki köprü modelleri için bu katsayı artan açıklık oranına bağlı olarak azalmaktadır.

Sıfır derece hücum açısındaki simetrik köprüler için moment katsayısı aerodinamik merkezdeki moment katsayısına eşittir. Aerodinamik merkez, buradaki moment katsayısının kaldırma katsayısından ya da hücum açısından bağımsız olduğu yerdir.

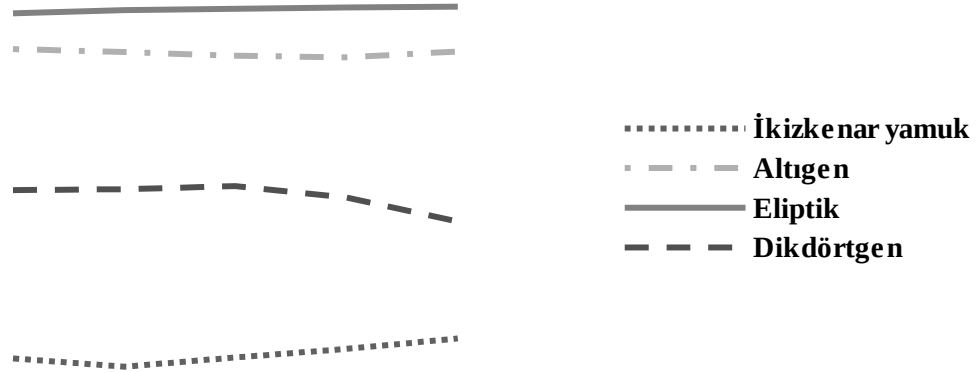
Ayrıca açıkça görülmektedir ki eliptik köprüler modeller arasındaki en düşük moment katsayısına sahipken İkizkenar yamuk geometriye sahip köprüler en yüksek değerlere sahiptir.



Şekil 4.31 AR=10 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi



Şekil 4.32 AR=12 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi



**Şekil 4.33** AR=15 için farklı geometrilerdeki moment katsayısının değişimi

#### 4.3.4. Girdap Salınım Frekansı

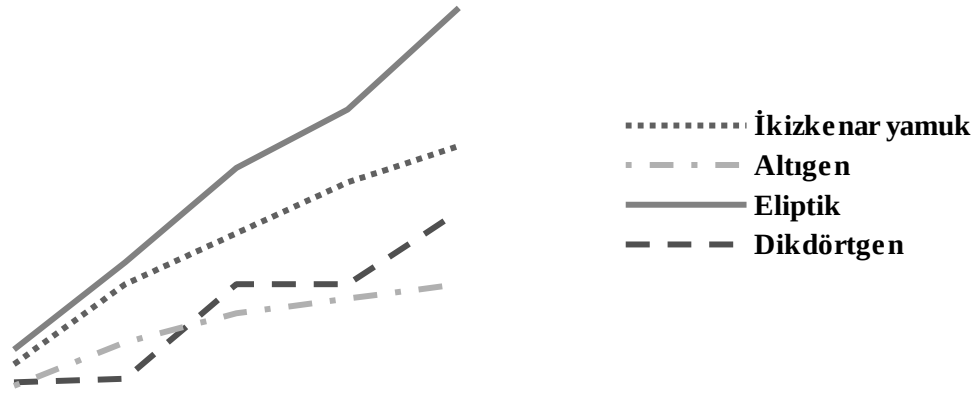
Şekil 4.25'ten 4.27'ye kadar girdap salınım frekansının farklı köprü geometrilerindeki ve farklı açıklık oranlarındaki hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

Grafiklerden de görüldüğü üzere hız arttıkça girdap salınımı fenomeninden beklenildiği gibi salınım frekansı artmaktadır. Bunun yanı sıra, açıkça görülmektedir ki eliptik köprüler en yüksek salınım frekans aralığına sahipken altıgen köprüler diğer modellerle karşılaştırıldığında en düşük değer aralığındadır.

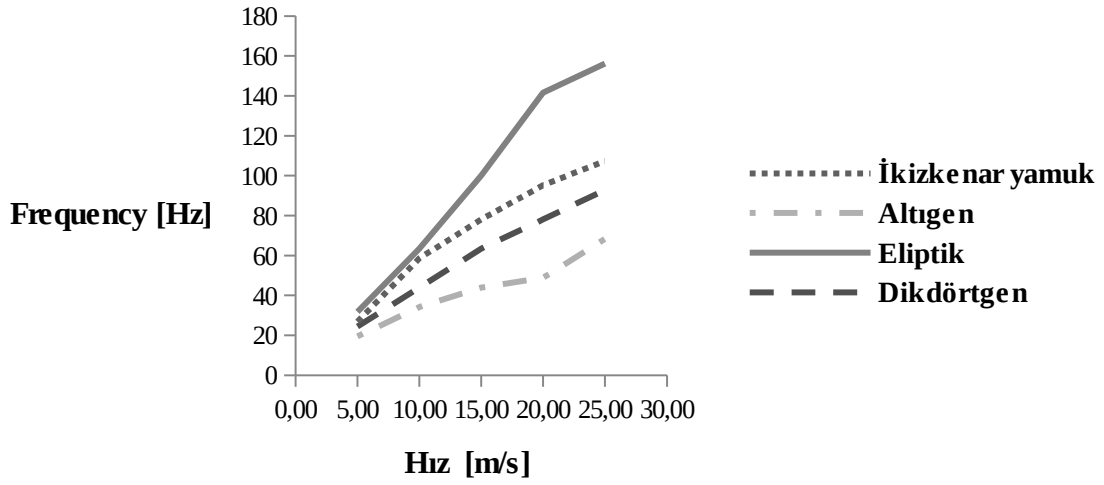
Bu sonuç Şekil 4.28'deki farklı geometriler için çizilmiş AR=10 ve 5 m/s'deki girdap büyüklük eğrilerine bakılarak gösterilebilir.

Her bir modelin kuyruk türbülansında meydana gelen girdaplara bakarak girdabın gücünü etkileyen birçok etmen olduğu söylenebilir. Küçük girdaplar yüksek frekanslara denk gelirken büyük girdapları küçük frekanslar temsil etmektedir. Bu olay spektral analiz paradigmasıyla açıklanabilir (J.O Hinze [1959]).

İncelenen modellerde oluşan girdapların boyutlarına bakılacak olursa, açıkça görülmektedir ki eliptik köprülerde diğer modellere kıyasla en küçük girdaplar oluşmakta yani eliptik modeller en yüksek frekans aralığına sahiptirler. Altıgen köprüler ise beklenildiği üzere en büyük girdaplara yani en düşük frekans aralığına sahiptirler.

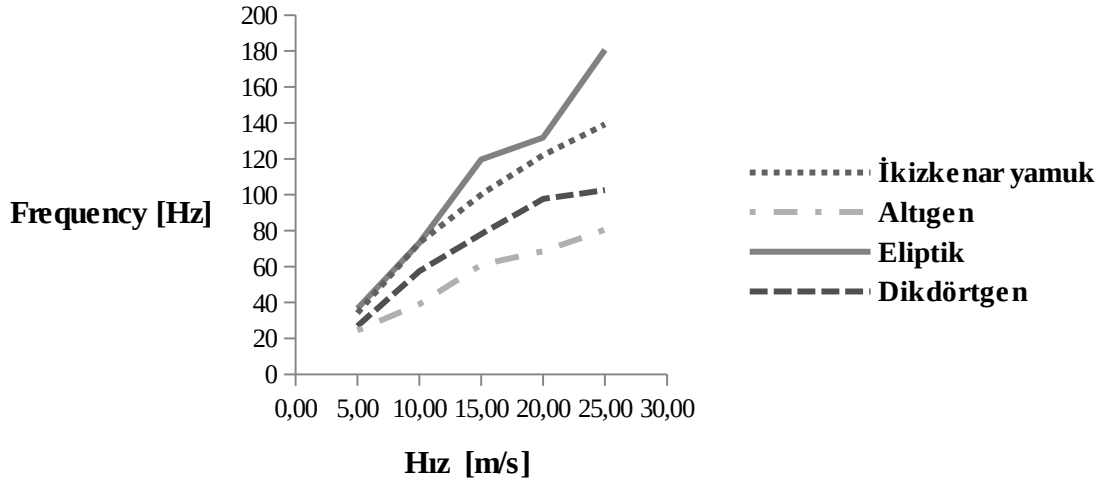


Şekil 4.34 AR=10 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi

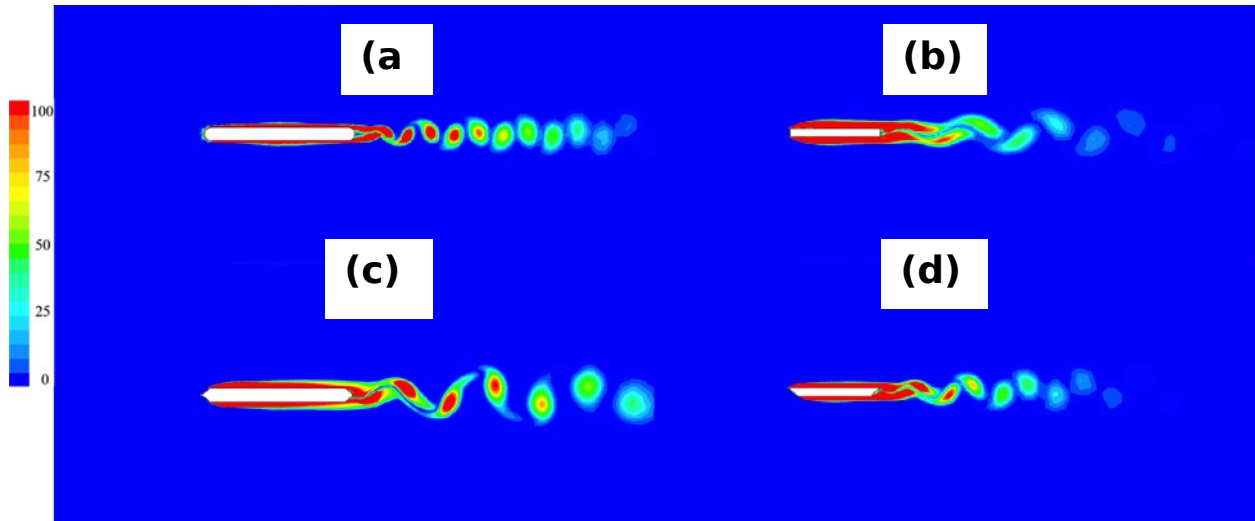


Şekil 4.35 AR=12 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi





Şekil 4.36 AR=15 için farklı geometrilerdeki girdap salınımı frekans değişimi



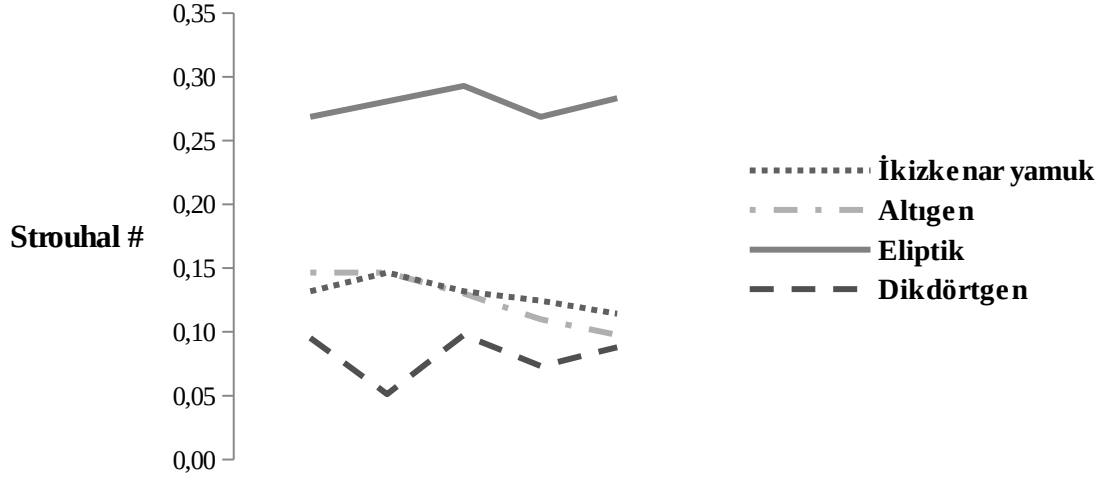
Şekil 4.37 AR=10, V=5m/s için girdap şiddeti eğrileri – (a): Eliptik – (b): Dikdörtgen – (c): Altıgen – (d): İkizkenar yamuk

#### 4.3.5. Strouhal Sayısı

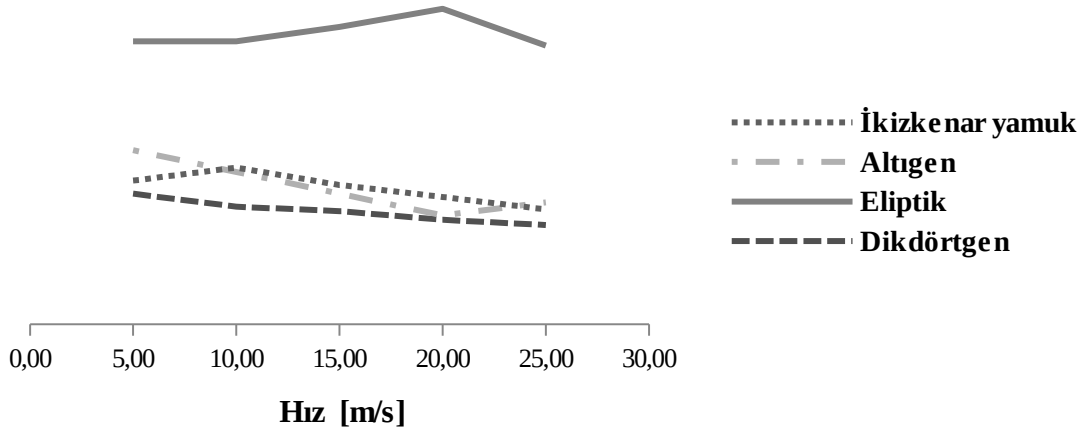
Şekil 4.29'dan 4.31'e kadar Strouhal sayısının farklı köprü geometrilerindeki ve farklı açıklık oranlarındaki hıza bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

Strouhal sayısı her bir köprü geometrisi ve akış hızı için sabit eğilim göstermiş ve açıklık oranıyla değişmemiştir.

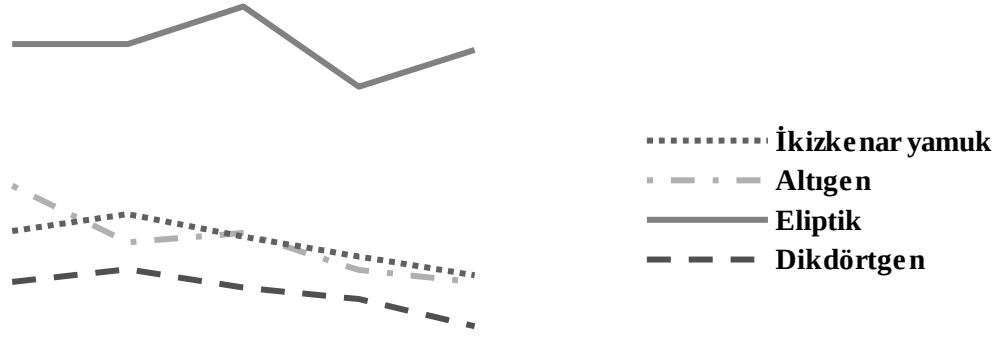
Eliptik köprü yüksek girdap salınımı frekansına sahip olduğundan modeller arasındaki en yüksek Strouhal sayısı değerine sahiptir.



Şekil 4.38 AR=10 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi



Şekil 4.39 AR=12 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi



**Şekil 4.40** AR=15 için farklı geometrilerdeki Strouhal sayısı değişimi

#### 4.4. Açıklık Oranının Aerodinamik Parametrelere Etkisi

Bu bölümde farklı kesit alanları için açıklık oranının aerodinamik parametrelere etkisi incelenmiş, sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Önceki bölümde açıklık oranının etkisinden kısaca bahsedilmiş, bu bölümde ise aerodinamik parametreler üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

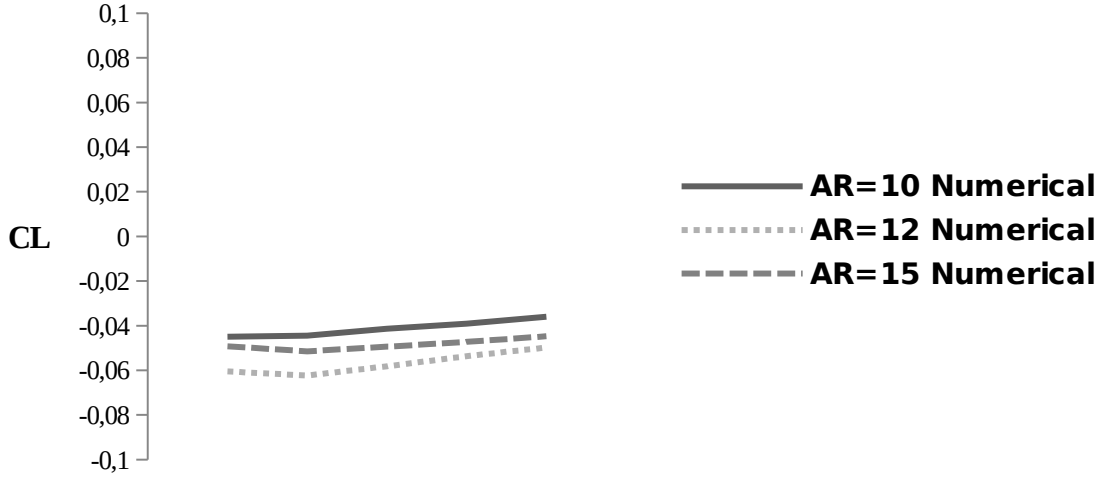
Sayısal analizler üç farklı açıklık oranı (10, 12 ve 15) için yapılmıştır. Kaldırma, sürükleme ve moment katsayılarının, girdap kopma frekansının ve Strouhal sayısının açıklık oranı ile değişimleri grafikleri elde edilmiştir.

##### 4.4.1. Kaldırma Katsayısı

Şekil 4.32, farklı açıklık oranları için, yan açısı  $45^{\circ}$  olan ikizkenar yamuk kesit alanı için kaldırma katsayısının hız ile değişimini göstermektedir.

Eliptik, altıgen ve dikdörtgen kesit alanları için sıfır hücum açısındaki kaldırma katsayısı sıfırdır, ikizkenar yamuk kesit alanı için ise sıfırdan farklıdır. Buradan ne hızın ne de açıklık oranının kaldırma katsayısına önemli bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Bu durumun sebebi şu şekilde açıklanabilir: Yüzeyler arasındaki basınç dağılımı farkı kaldırma kuvvetini oluşturur. Köprü modellerinin genişlikleri sabit tutulduğu için yüksekliklerinin değişimi kaldırma kuvvetini etkilemez.

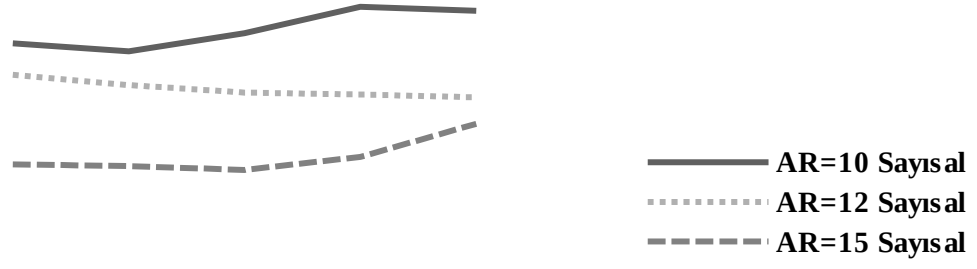


**Şekil 4.41** İkizkenar yamuk kesit alanı için kaldırma katsayısı değişimi-Yan açı 45°

#### 4.4.2. Sürükleme Katsayısı

Farklı açıklık oranları için sürükleme katsayısının hız ile değişimi Şekil 4.33, 4.34, 4.35 ve 4.36'da verilmiştir.

İncelenen tüm kesit alanları için sürükleme katsayısının hız ile değişmediği görülmüştür. Bu durumun sebebi Bölüm 4.4.1.'de açıklanmıştır. Ancak, açıklık oranının sürükleme katsayısına önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Açıklık oranının artması sürükleme katsayısını düşürmektedir ve bu tüm kesit alanları için geçerlidir.



**Şekil 4.42** Dikdörtgen kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi



**Şekil 4.43** Eliptik kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi



**Şekil 4.44** Altıgen kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-Yan aç 45<sup>0</sup>

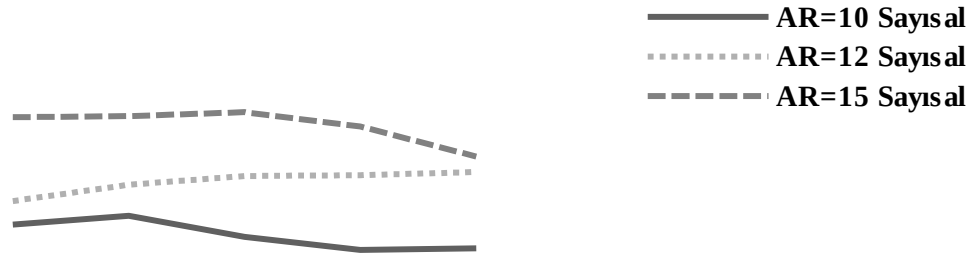


**Şekil 4.45** İkizkenar yamuk kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi-Yan aç 45<sup>0</sup>

#### 4.4.3. Moment Katsayısı

Farklı açıklık oranları için moment katsayısının hız ile değişimi Şekil 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'da verilmiştir.

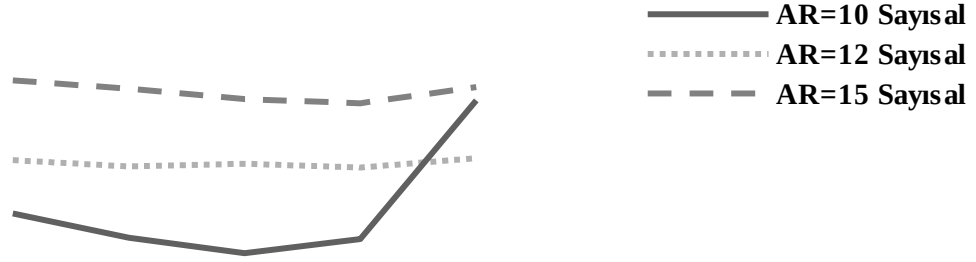
Bu şekillerden hız değişiminin moment katsayısına bir etkisi olmadığı ve açıklık oranının artması ile moment katsayısının azaldığı sonuçlarına ulaşılmaktadır. Literatür araştırmaları, moment katsayısının burulma eğiliminin ölçütü olduğunu göstermektedir. Yani, moment katsayısı küçük ise köprü modeli daha kararlıdır. İnce modellerin burulmadan kaçınmak için daha iyi olduğu açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.46** Dikdörtgen kesit alanı için moment katsayısı değişimi



**Şekil 4.47** Eliptik kesit alanı için sürüklenme katsayısı değişimi



**Şekil 4.48** Altıgen kesit alanı için moment katsayısı değişimi-Yan aç 45°



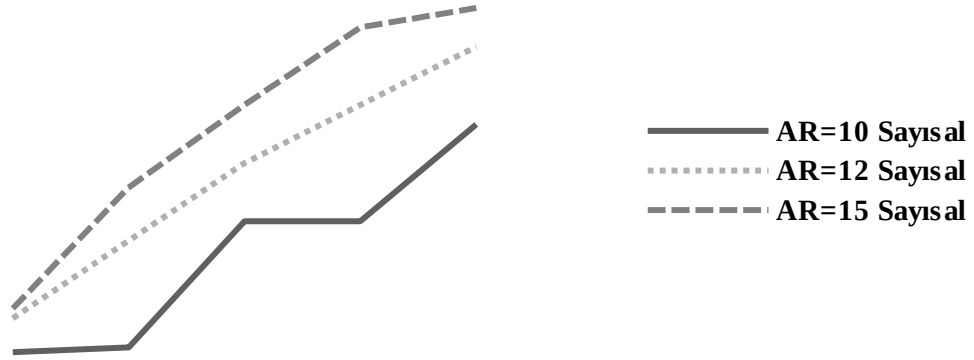
**Şekil 4.49** İkizkenar yamuk kesit alanı için moment katsayısı değişimi-Yan aç 45°

#### 4.4.4. Girdap Kopma Frekansı

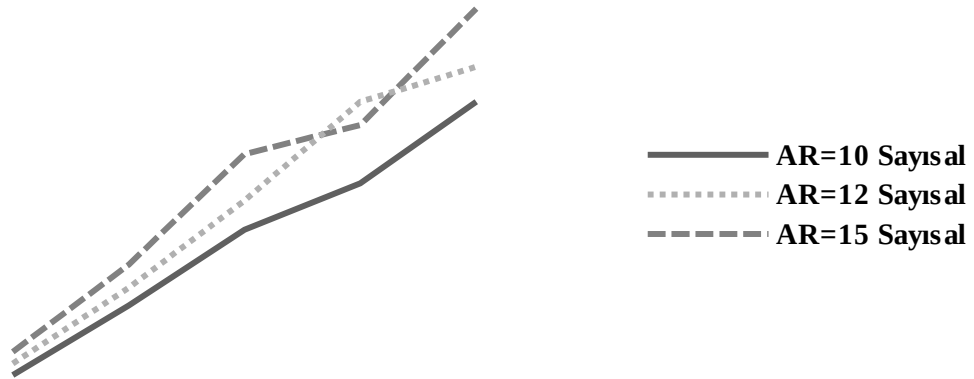
Şekil 4.41, 4.42, 4.43 ve 4.44 farklı açıklık oranları için girdap kopma frekansının hız ile değişimini göstermektedir.



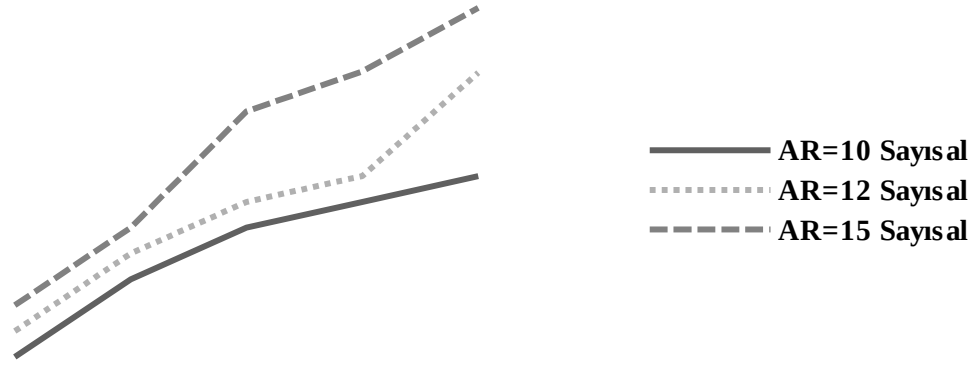
Girdap kopma frekansı hız ve açıklık oranı ile artmaktadır. Çünkü, açıklık oranı arttıkça modelin yüksekliği azalmaktadır. Bu durum iz bölgesindeki girdapların büyüklüğü ile doğrudan ilgilidir. Diğer bir deyişle, açıklık oranının artması ile girdapların büyüklüğü azalmakta, girdap kopma frekansı ise artmaktadır. Şekil 4.45 eliptik kesit alanı için 15m/s'de oluşan iz bölgesini göstermektedir.



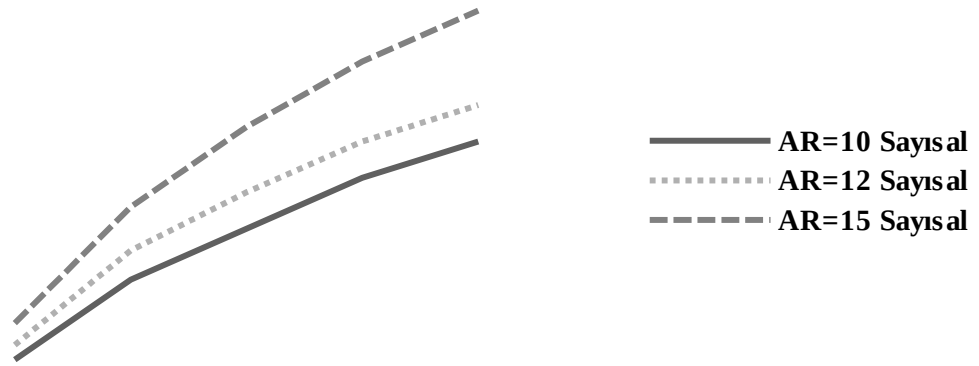
**Şekil 4.50** Dikdörtgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi



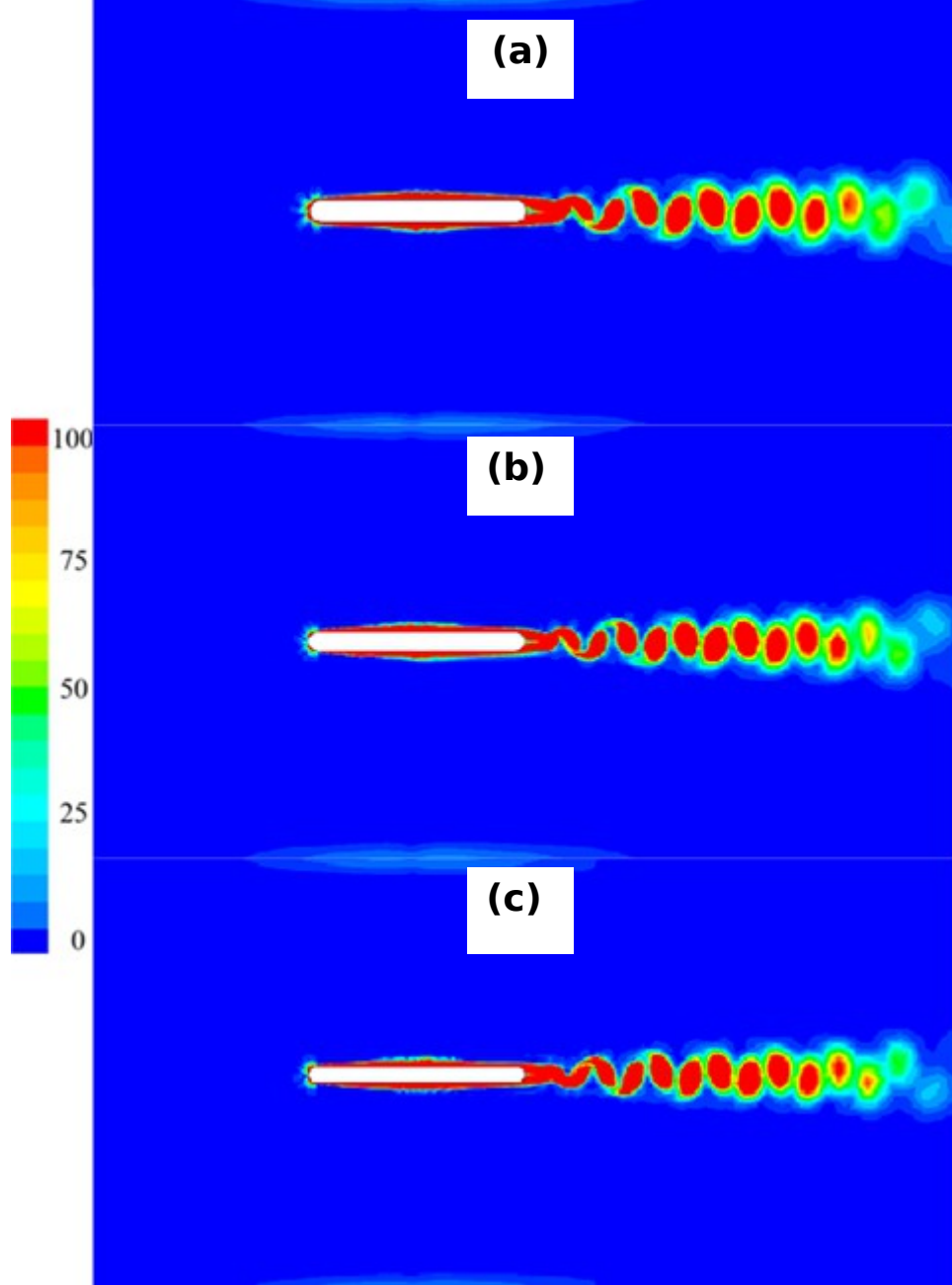
**Şekil 4.51** Eliptik kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi



**Şekil 4.52** Altıgen kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-Yan aç 45°



**Şekil 4.53** İkizkenar yamuk kesit alanı için girdap kopma frekansı değişimi-Yan aç 45°

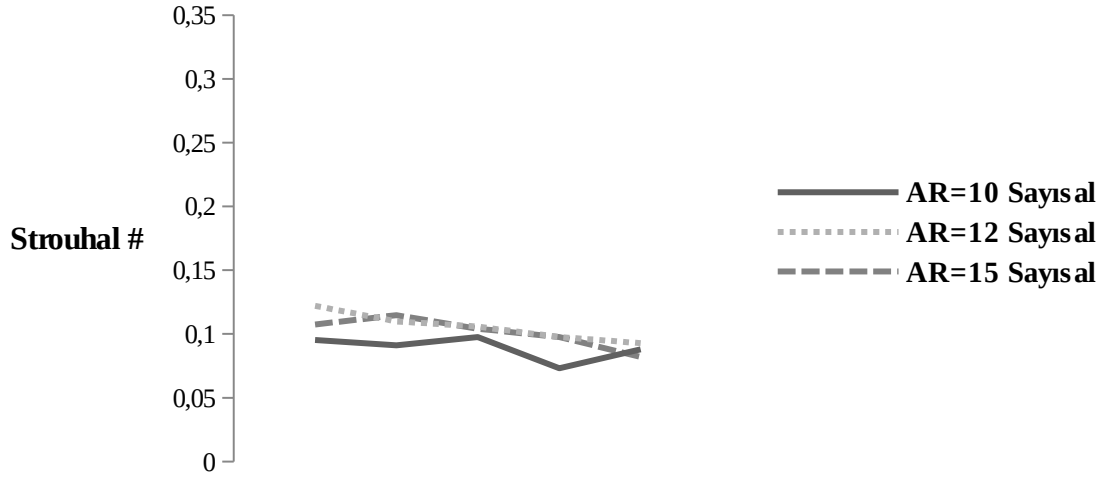


**Şekil 4.54** Girdap şiddeti konturu-Hız 15m/s- (a): AR=10 – (b): AR=12 – (c): AR=15

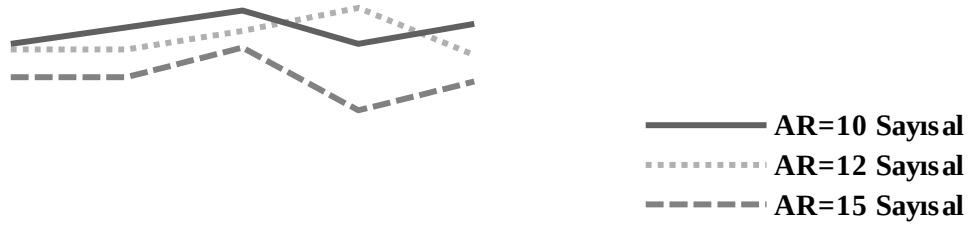
#### 4.4.5. Strouhal Sayısı

Şekil 4.41, 4.42, 4.43 ve 4.44 farklı açıklık oranları için Strouhal sayısının hız ile değişimini göstermektedir.

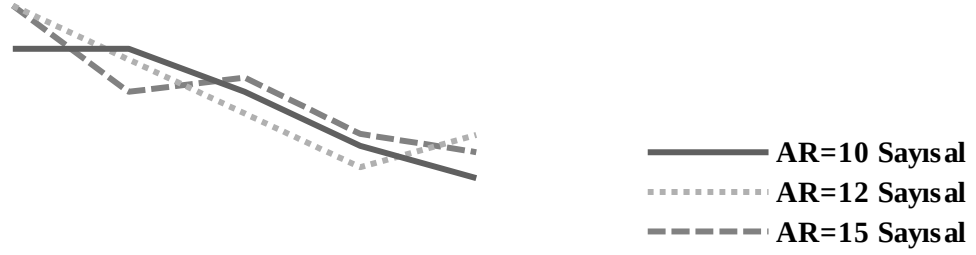
Grafiklerden açıklık oranı ve hız değişimlerinin Strouhal sayısına önemli bir etkilerinin olmadığı görülmektedir.



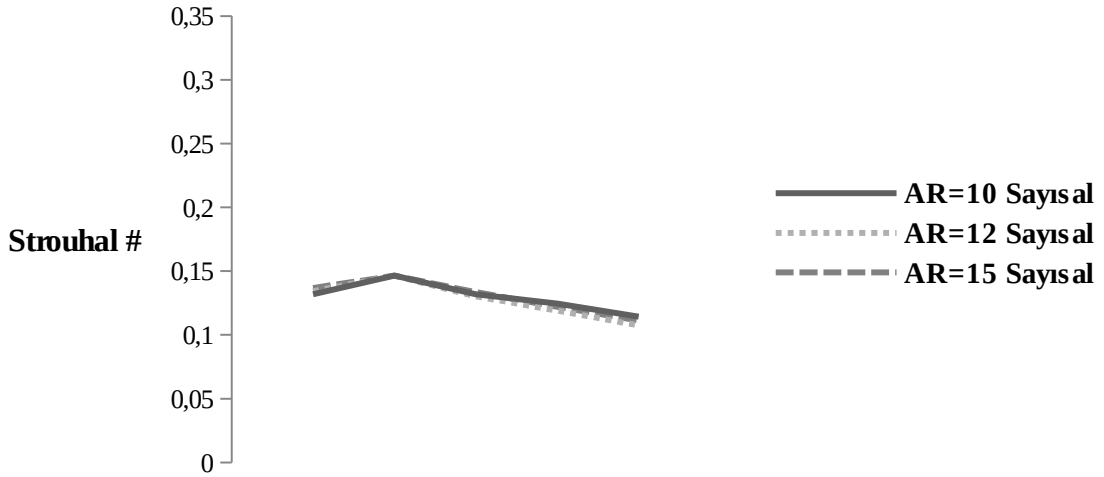
Şekil 4.55 Dikdörtgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi



Şekil 4.56 Eliptik kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi



**Şekil 4.57** Altıgen kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-Yan aç 45°



**Şekil 4.58** İkizkenar yamuk kesit alanı için Strouhal sayısı değişimi-Yan aç 45°

#### 4.5. Farklı Köprü Kesitleri için Aerodinamik Katsayı Değişimi

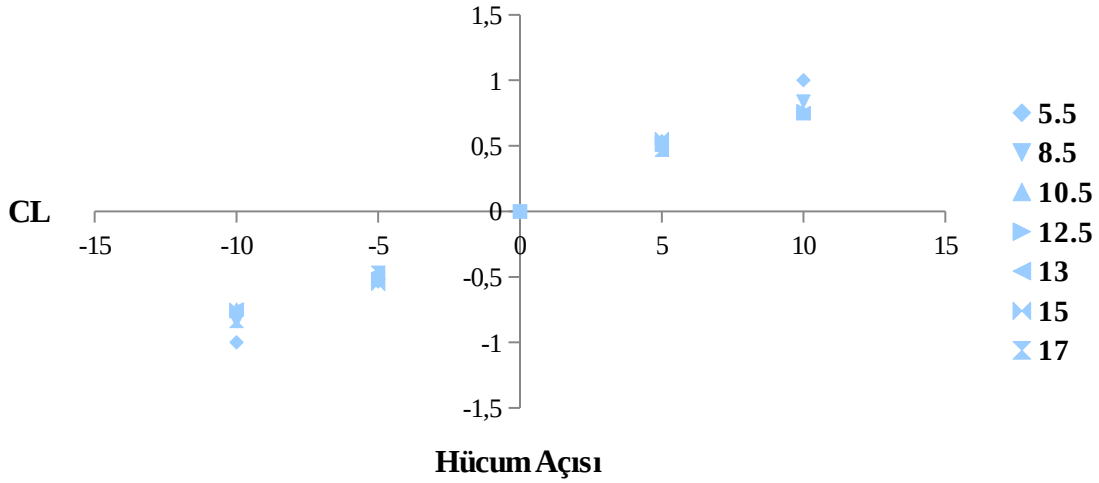
Bu bölümde, elimizdeki köprü kesit modelleriyle yapılan deneysel çalışmalar sunulacaktır. Her model için kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayıları hıza ve hücum açısına göre deneysel etkilerini incelemek için çizdirilmiştir.

Her model için elde edilen sonuçlar, kuvvet katsayılarının hıza ve Reynolds sayısına bağlı olmadığını göstermektedir. Ancak, hücum açısı ile bağlı olarak değiştikleri açıkça

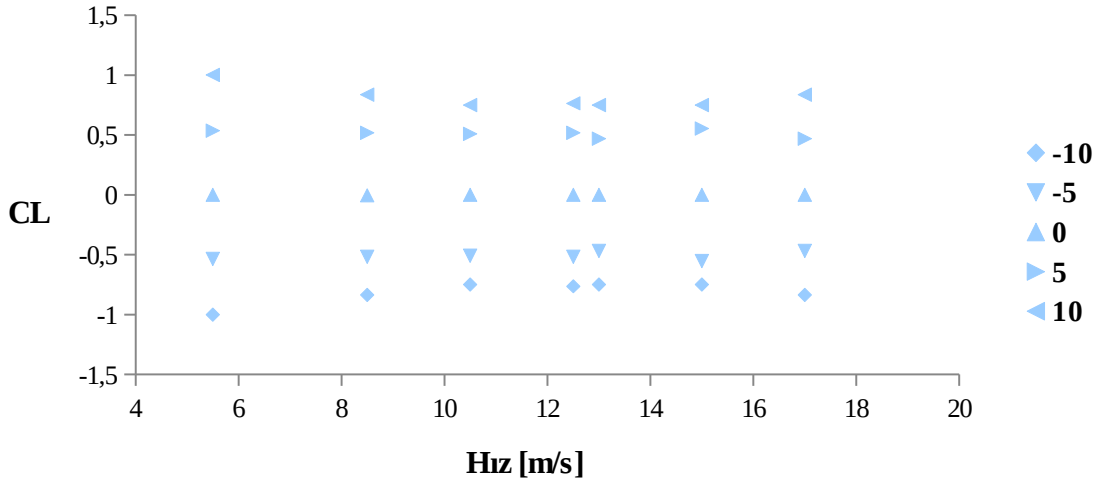
$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=0} + C_D \quad \frac{\partial C_M}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=0}$$

görülmektedir. Bu değişim, ve kriterinin işaretinin belirlenmesi ile modelin galloplamaya ve kendiliğinden dönmeye yatkınlığını anlamak için kullanılmıştır. Her iki durumda da eğer işaret pozitif ise sistemin kararlı olduğunu göstermektedir, ve bu işlemde elde edilen değerler sistemin kararlı yada kararsız olduğunu açıklanmasını sağlar (Bosch et al. [2008]).

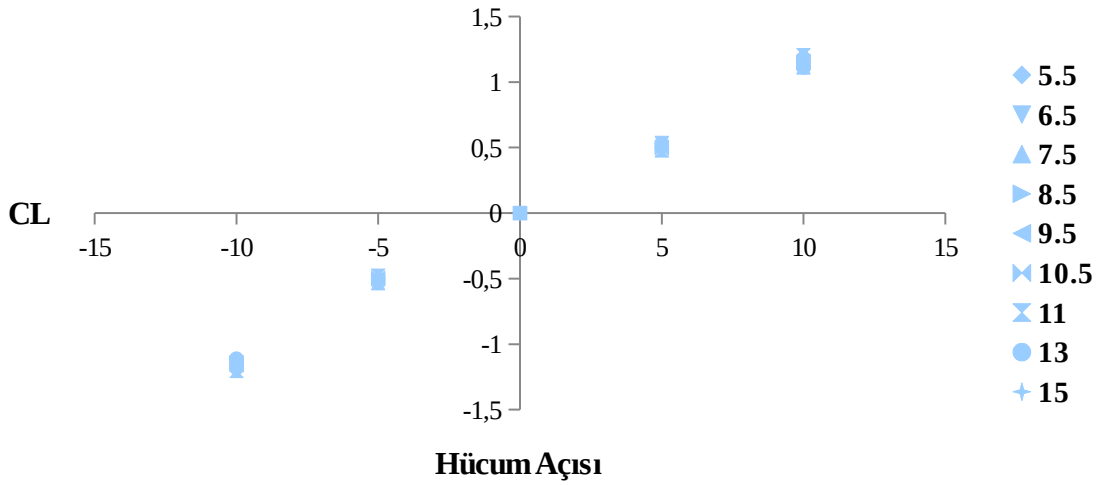
Grafiklerde görüldüğü gibi, hücum açısının sıfır olduğu durumlarda kaldırma kuvveti katsayısının eğiminin ve sürükleme kuvveti değerinin pozitif değerli olması ve o modelin bükülme modunda galloplamaya karşı kararlı olduğunu göstermektedir. Ne yazık ki, moment katsayıları ile ilgili bir sonuca sahip olmadığımızdan kararlılık hakkında bir tahmin yürütemedik.



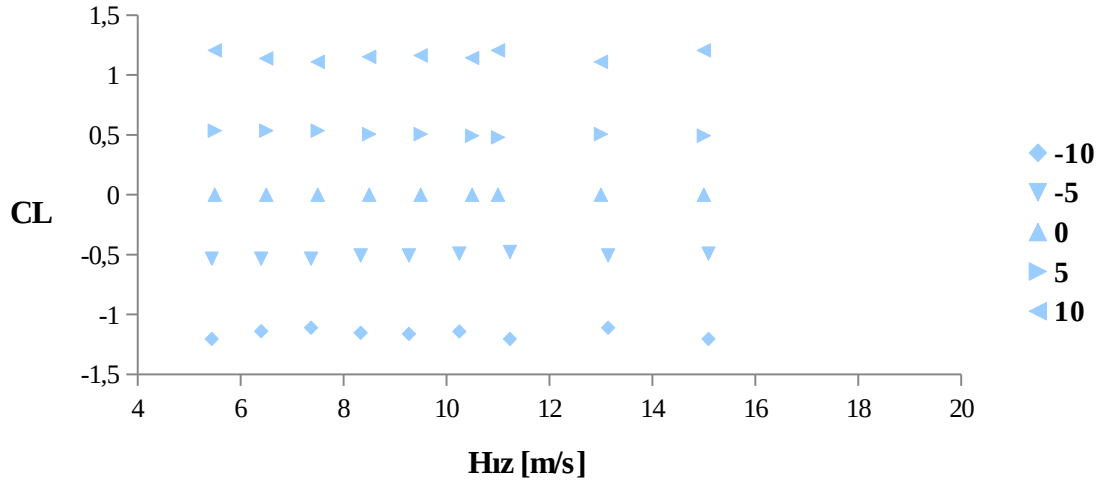
**Şekil 4.59** AR=12 olan dikdörtgen kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi



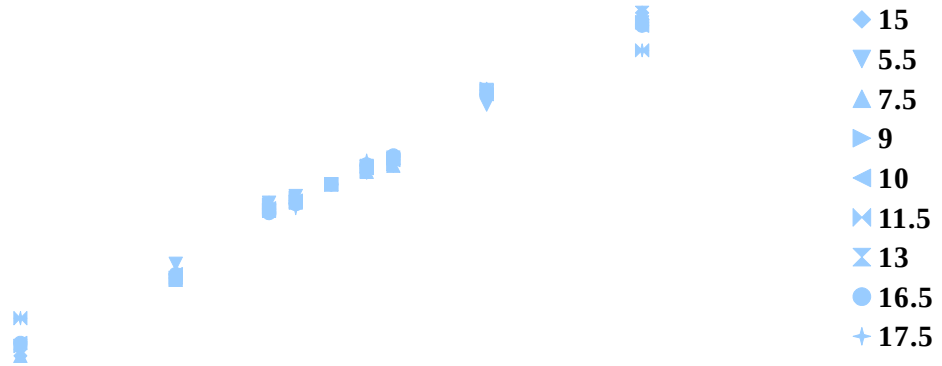
Şekil 4.60 AR=12 olan dikdörtgen kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi



Şekil 4.61 AR=12 olan eliptik kesit için hücüm açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi

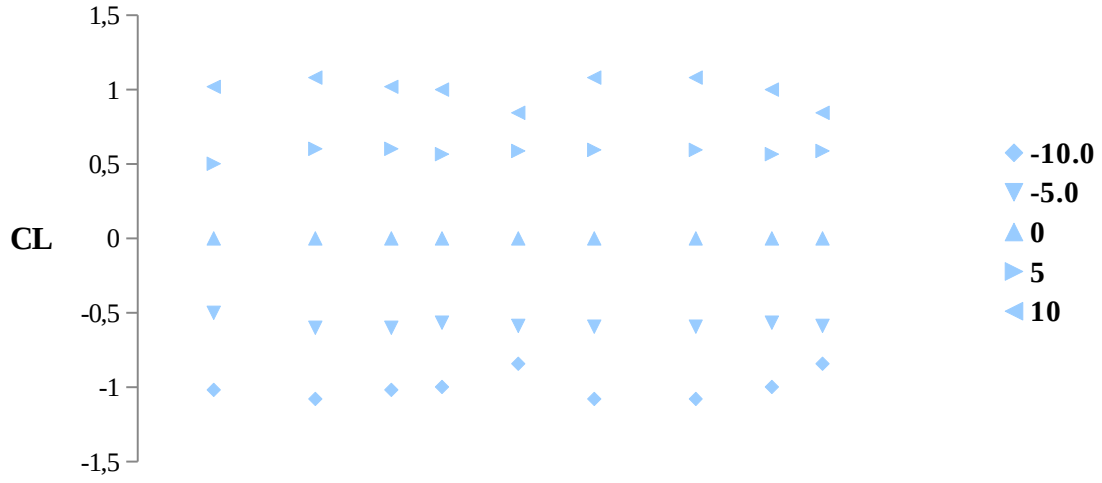


Şekil 4.62 AR=12 olan eliptik kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi

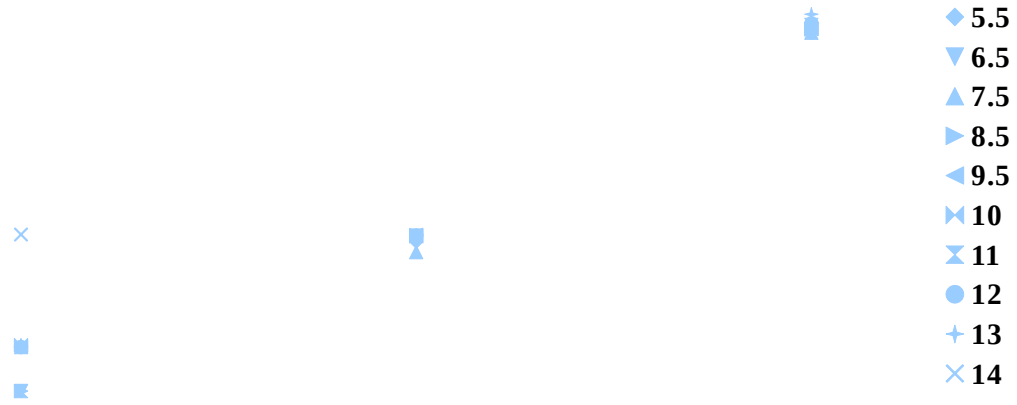


Şekil 4.63 AR=15 olan altıgen kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi





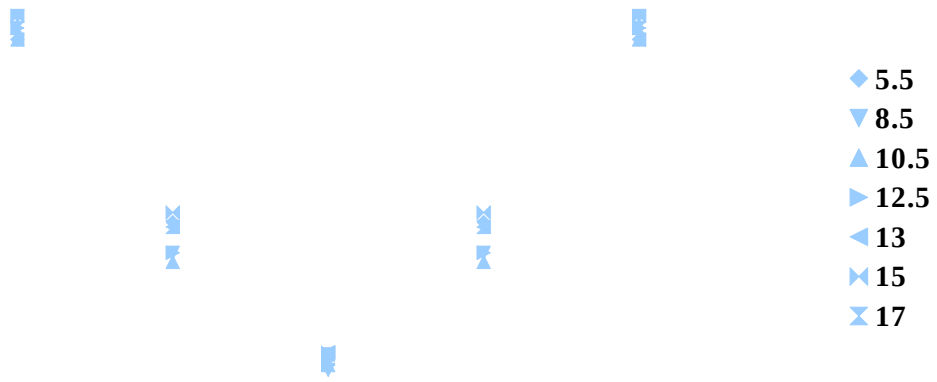
**Şekil 4.64** AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.65** AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.66** AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hıza göre kaldırma kuvveti katsayısı değişimi



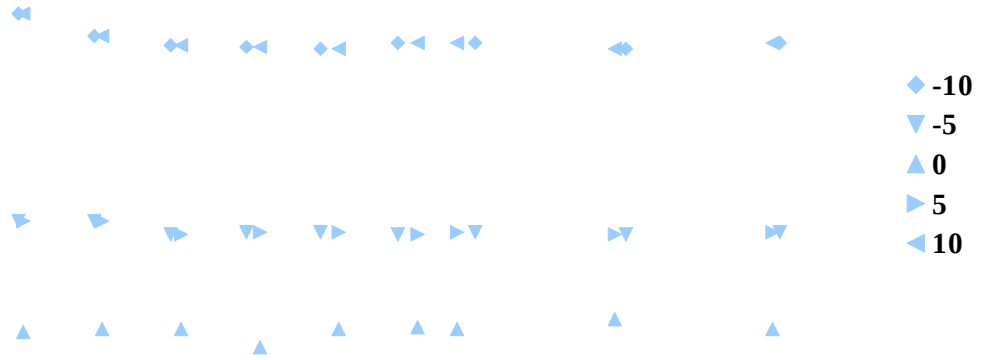
**Şekil 4.67** AR=12 olan dikdörtgen kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



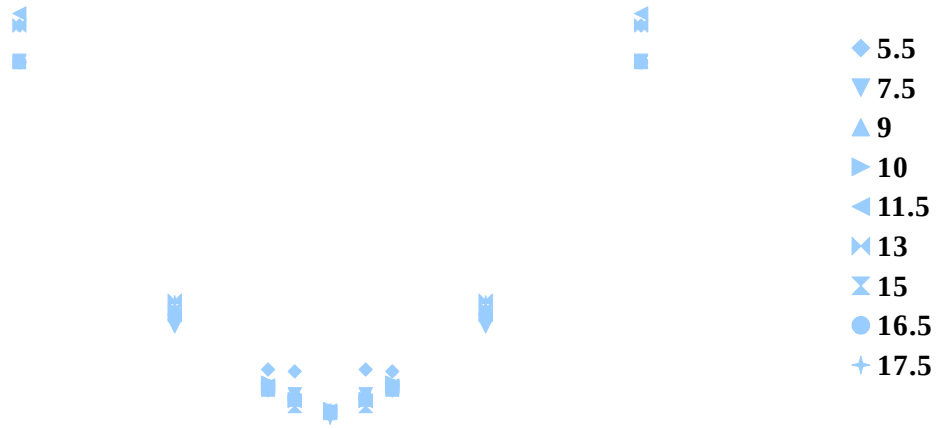
**Şekil 4.68** AR=12 olan dikdörtgen kesit için hızla göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.69** AR=12 olan eliptik kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.70** AR=12 olan eliptik kesit için hıza göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



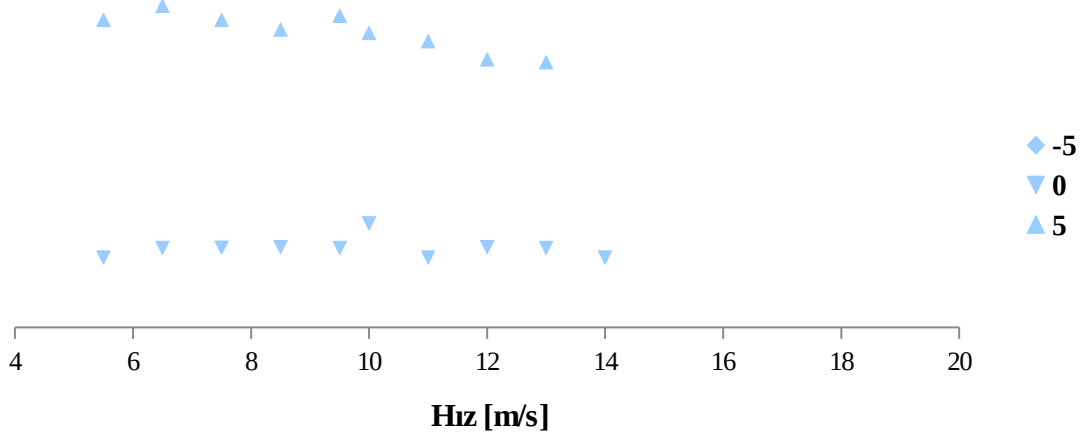
**Şekil 4.71** AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.72** AR=15 olan altıgen şeklindeki kesit için hızla göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.73** AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.74** AR=15 olan ikizkenar yamuk şeklindeki kesit için hücum açısına göre sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi

#### 4.6. Rüzgar Bariyeri Tasarımı ve Analizi

Daha önceden de bahsedildiği gibi, yükseklik ve gözenekliliğin rüzgar bariyeri tasarımında önemli etkileri vardır ve ayrıca bunların köprü kesitlerinin aerodinamik karakteristikleri üzerinde de önemli etkileri bulunmaktadır.

Kwon et al. [2011] tarafından belirtilen rüzgar tüneli testlerine göre rüzgar hızını %50 oranında azaltmak için rüzgar bariyerinin minimum yüksekliğinin yol genişliğinin %12.5 olması gerektiğini ve gözeneklilik oranının da %40-%50 civarında olması gerektiğini göstermiştir.

Bu projede, farklı gözeneklilikleri olan iki adet rüzgar bariyeri tasarımı yükseklikleri, kesit genişliğinin %12.5'u olacak şekilde sabitlenerek kullanılmıştır. Dikdörtgensel ve eliptik kesitleri rüzgar bariyerinin etkisini araştırma araştırmak için seçilmiştir.

Rüzgar bariyerlerinin gözenekliliği %70 civarında iken, yüksekliği ise 6.5 cm'dir. Bariyerler arasındaki fark konfigürasyondan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada, rüzgar bariyerinin aerodinamik katsayılar ve girdap salınım frekansına olan etkisi hücum açısının sıfır durumu için incelenmiştir.

Hem eliptik hem de dikdörtgen kesit için rüzgar bariyerinin eklenmesi, hücum açısı sıfır iken kaldırma kuvveti katsayısında herhangi bir değişliğe neden olmamıştır.

Öte yandan, Ostenfeld et al. [1992]. çalışmalarına göre beklenildiği üzere, rüzgar bariyerinin eklenmesi sürüklenme kuvveti katsayısının neredeyse 2 kat artmasına yol açmıştır.

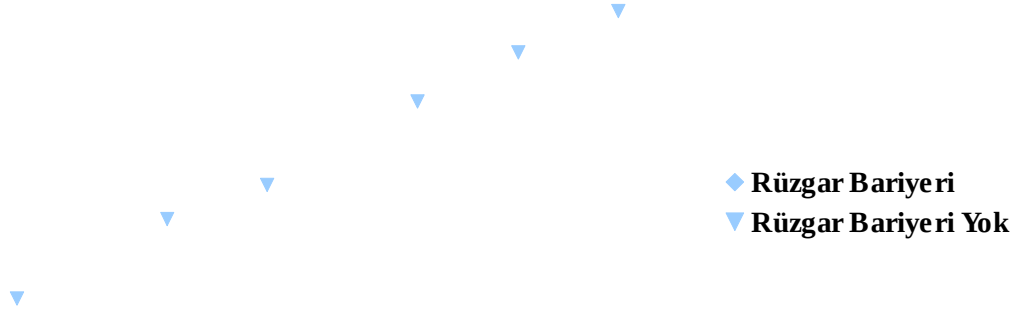
Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, rüzgar bariyerinin eklenmesinin ardından dikdörtgen kesitin frekansı önemli ölçüde azalırken, eliptik kesitin frekansı az oranda azalmıştır.

- ◆ Rüzgar Bariyeri
- ▼ Rüzgar Bariyeri Yok

**Şekil 4.75** AR=12 olan dikdörtgen kesit için kaldırma kuvveti katsayısı değişimi

- ◆ Rüzgar Bariyeri
- ▼ Rüzgar Bariyeri Yok

**Şekil 4.76** AR=12 olan dikdörtgen kesit için sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.77** AR=12 olan dikdörtgen kesit için girdap salınım frekansı değişimi

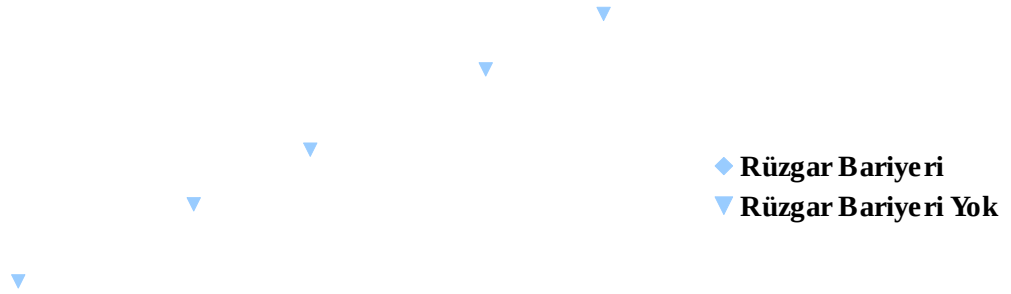


**Şekil 4.78** AR=12 olan eliptik kesit için kaldırma kuvveti katsayısı değişimi





**Şekil 4.79** AR=12 olan eliptik kesit için sürüklenme kuvveti katsayısı değişimi



**Şekil 4.80** AR=12 olan eliptik kesit için girdap salınım frekansı değişimi

## 5. SONUÇ

Bu projede rüzgarın uzun asma köprüler üzerindeki etkileri sayısal ve deneysel olarak çalışılmıştır. Ayrıca sayısal analizlerin güvenilirliği de deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Genel olarak şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında genel bir uyumluluk gözlenmiştir. Bundan dolayı tanımlanmış modelin CFD çözümleri köprü analizlerini hızlandırmak üzere kullanılabilir.
- Yapılandırılmamış SST-k $\omega$  türbülans modeli girdap salınımını tespit etmede başarılı olmuş ve sonuçlar literatürdeki sonuçlarla tutarlılık göstermiştir.
- Sonuçlar göstermiştir ki aerodinamik katsayılar ve Strouhal sayısı 7.59E+04'e kadar olan Reynolds sayılarında incelenen modeller için neredeyse sabit kalmışlardır.
- Köprü geometrisinin aerodinamik parametreler üzerinde önemli bir etkisi vardır. Eliptik köprü üzerindeki çalışmalar kanıtlamıştır ki bu geometriye sahip köprüler en düşük sürüklenme ve moment katsayılarına sahipken bir yandan da en yüksek frekanslara sahiptirler. Diğer yandan, dikdörtgensel köprünün en yüksek sürüklenme katsayısına, ikizkenar yamuğun en yüksek moment katsayısına ve altigenin ise en düşük frekans aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Açıklık oranı aerodinamik katsayılar üzerinde özellikle de sürüklenme ve moment katsayılarıyla girdap salınım frekansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sürüklenme ve moment katsayıları artan açıklık oranıyla azalırken girdap salınım frekansı artan açıklık oranıyla artmaktadır. Diğer taraftan ise kaldırma katsayısı ve Strouhal sayısı açıklık oranı değişiminden pek etkilenmemişlerdir. Sonuç olarak ince uzun gövdeler daha iyi aerodinamik kararlılığa sahipken aynı zamanda da yüksek girdap salınım frekanslarından olumsuz etkilenmektedirler.
- Rüzgar bariyerleri köprülerin aerodinamik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Rüzgar bariyerleri nedeniyle sürüklenme katsayısının önemli ölçüdeki artışı olumsuz bir etki yaratmaktadır.

## REFERANSLAR

Atkin, R. J., Fox, N., 2005, "**An Introduction to the Theory of Elasticity**", *Dover Publications*, ISBN-10: 0486442411.

Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J., 1997, "**Turbulence Modeling Validation**", *AIAA Paper*.

Bienkiewicz, B., 1987, "**Wind Tunnel Study of Effects of Geometry Modification on Aerodynamics of a Cable Stayed Bridge Deck**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 26.

Borrelli, J., Gregory, J.M. and Abtew, W., 1987, "**Wind Barrier: A Re-evaluation of Height, Spacing, and Porosity**", *Proceedings of the Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*, Baltimore, MD, USA, June-July.

Bosch, H. R. and Dhall, T., 2008, "**Aerodynamic Investigation of Generic Bridge Deck Section Models**", *BBA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy.

Bradly, E.F. and Mulhearn, P.J., 1983, "**Development of Velocity and Shear Stress Distribution in the Wake of Porous Shelter Fence**", *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 15, 145-156.

Braun, A. L., Awruch, A. M., 2003, "**Numerical Simulation of the Wind Action on a Long-Span Bridge Deck**", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. XXV.

Charuvisita, S., Kimura, K. and Fujino, Y., 2004, "**Effects of Wind Barrier on a Vehicle Passing in the Wake of a Bridge Tower in Cross Wind and its Response**", *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, 92(7-8), 609-639.

Cornell University, "**FLUENT Learning Modules**", SimCafe, <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>, (Last accessed date: August 31, 2011).

Counihan, J., Hunt, J.C.R. and Jackson, P.S., 1974, "**Wake Behind Two-Dimensional Surface Obstacles in Turbulent Boundary Layer**", *J. Fluid Mech.*, 64(3), 529-563.

Dexter, R.J., Ricker, M.J., 2002, "**Fatigue-Resistant Design of Cantilevered Signal, Sign, and Light Supports**", *NCHRP Report 469, University of Minnesota, USA, Published by: National Academy Press.*

Ding, Q., Lee, P. K. K., & Lo, S. H., 2000, "**Time Domain Buffeting Analysis of Suspension Bridges Subjected to Turbulent Wind with Effective Attack Angle**", *Journal of Sound and Vibration, 233(2), 311-327.*

Dyrbye, C., Hansen, S. O., 1999, "**Wind Loads on Structures**", *John Wiley & Sons Publications.*

Else, M. R., 2003, "**Efficient and Accurate Unstructured Mesh Generation**", *Research Experiences for Undergraduates, University of Michigan.*

Fang, F. M., Li, Y. C., Liang, T. C., Chen, C. C., 2007, "**Investigation on the Aerodynamic Instability of a Suspension Bridge with a Hexagonal Cross-Section**", *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 30.*

Giosan, I., Eng., P., "**Vortex Shedding Induced Loads on Free Standing Structure**", Structural Vortex Shedding Response Estimation methodology and Finite Element Simulation, *West Coast Engineering Group Limited, CDN.*

Gu, M., Xiang, H., & Lin, Z., 1999, "**Flutter- and Buffeting-Based Selection for Long-Span Bridges**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 80(3), 373-382.*

Hinze, 1959, "**Turbulence: An Introduction to its Mechanism and Theory**", *McGrawHill Book Co., Library of Congress, Catalog No: 58-9860.*

Kawahara, M., Hirano, H., 1983, "**A Finite Element Method for High Reynolds Number Viscous Fluid Flow Using Two Step Explicit Scheme**", *International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 28.*

Kuroda, S., 1997, "**Numerical Simulation of Flow around a Box Girder of a Long Span Suspension Bridge**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 67&68.*

Law, S., Zhang, K., & Duan, Z., 2008, "**Identification of Bridge Aerodynamic Coefficients from Measured Displacement or Acceleration**", *15th International Congress on Sound and Vibration, Daejeon, Korea.*

Larsen, A., Walther, J. H., 1997, "**Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections Based on Discrete Vortex Simulations**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 16.

Larsen, A., Walther, J. H., 1998, "**Discrete Vortex Simulation of Flow around Five Generic Bridge Deck Sections**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 77&78.

Lin, Y. Y., Cheng, C. M., Wu, J. C., Lan, T. L., Wu, K. T., 2005, "**Effects of Deck Shape and Oncoming Turbulence on Bridge Aerodynamics**", *Journal of Science and Engineering*, Vol. 8.

Matsuda, K., Cooper, K. R., Tanaka, H., Tokushige, M., & Iwasaki, T., 2001, "**An Investigation of Reynolds Number Effects on the Steady and Unsteady Aerodynamic Forces on a 1:10 Scale Bridge Deck Section Model**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(7-8), 619-632.

Matsumoto, M., Kbayashi, Y., Shirato, H., 1996, "**The Influence of Aerodynamic Derivative on Flutter**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 60.

Nagao, F., Utsunomiya, H., Oryu, T., Manabe, S., 1993, "**Aerodynamic Efficiency of Triangular Fairing on Box Girder Bridge**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, Vol. 74.

Nieto, F., Kusano, I., Hernandez, S., Jurado, J. A., 2010, "**CFD Analysis of the Vortex Shedding Response of a Twin-Box Deck Cable-Stayed Bridge**", *The 5<sup>th</sup> International Symposium on Computational Wind Engineering*, North Carolina, USA.

Nieto, F., Zasso, A., Rocchi, D., Hernandez, S., 2008, "**CFD Verification of Aerodynamic Devices Performance for the MESSINA STRAIT Bridge**", *BBA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy.

Ostenfeld K.H., 1989, "**Denmark's Great Belt Link**", *The 1989 ASCE Annual Civil Engineering Convention*. New Orleans.

Ostenfeld K.H., Larsen A., 1992, "**Bridge Engineering and Aerodynamics, Aerodynamics of Large Bridges**", *Larsen A. (ed.):3-22*, Rotterdam.

Papesch, A.J.G., 1992, "**Wind Tunnel Tests to Optimize Barrier Spacing and Porosity to Reduce Wind Damage in Horticultural Shelter Systems**", *J. Wind Eng. & Ind. Aerod.* 44(1-3), 2631-2642.

Procino, L., Kozmar, H., Bartoli, G., Borsani, A., 2008, "**Wind Barriers on Bridges: The Effect of Wall Porosity**", *Proceedings of the 6th Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications, Milan, Italy. July, 20-24.*

Ranga Raju, K.G., Garde, R.J., Singh, S.K. and Singh, N., 1988, "**Experimental Study on Characteristics of Flow Past Porous Fences**", *J.Wind Eng. Ind. Aerod.*, 29(1-3), 155-163.

Saito, H., Suzuki, M. and Tanemoto, M. (2006), "**Effects of Wind Fences on Aerodynamic Characteristics of Train/Vehicles in Cross Winds**", *Proceedings of the APCWE6, Seoul, Korea, September.*

Scanlan, R. H., Tomoko, J.J., 1971, "**Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives**", *Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 97, No. 6.*

Schewe. G., Larsen, A., 1998, "**Reynolds Number Effects in the Flow around a Bluff Bridge Deck Cross Section**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76.

Simiu, E., Scanlan, T. A., 1996, "**Wind Effects on Structures**", *Wiley Publications.*

Sobey, Ian, J., 1982, "**Oscillatory Flows at Intermediate Strouhal Number in Asymmetry Channels**", *Journal of Fluid Mechanics.*

Soon-Duck Kwon, Dong Hyawn Kim, Seung Ho Lee, Ho Sung Song, 2011, "**Design Criteria of Wind Barriers for Traffic. Part 1: Wind Barrier Performance**", *Wind and Structures, Vol. 14, No. 1, 55-70, (Received August 8, 2009, Accepted September 7, 2010).*

Sun, D., Wright, N. G., Owen, J. S., Liaw, K., 2005, "**Identification of 18 Flutter Derivatives Using CFD Turbulence Modeling**", *The 4<sup>th</sup> European & African Conference on Wind Engineering, Prague, Czech Republic.*

Tubino, F., 2005, "**Relationships among Aerodynamic Admittance Functions Flutter Derivatives and Static Coefficients for Long-Span Bridges**", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), 929-950.

Turbulence and Near-Wall Modeling, "[http://iceberg.shef.ac.uk/docs/cfx-pdf/solver\\_modelling/TurbulenceAndNearWallModelling.pdf](http://iceberg.shef.ac.uk/docs/cfx-pdf/solver_modelling/TurbulenceAndNearWallModelling.pdf)", (Last accessed date: August 31, 2011).

Tyalor J. Zachary, Gurka Roi, Kopp A. Gregory, 2009, "**Geometric Effects on Shedding Frequency for Bridge Sections**", *11<sup>th</sup> Americas Conference on Wind Engineering-San Juan, Puerto Rico June 22-26*.

Wang D.L., Chen A.R., Zhou Z.Y., 2007, "**Aerodynamic Characters of a Trans-Oceanic Cable-Stayed Bridge with Wind Barrier**", *ICWE12, CAIRNS, 807-814*.

White, F. M., 1999 "**Fluid Mechanics**", *McGraw Hill Publications, ISBN: 0071168486*.

Zhu, Z., GU, M., Chen, Z., 2007, "**Wind Tunnel and CFD Study on Identification of Flutter Derivatives of a Long-Span Self-Anchored Suspension Bridge**", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering Journal, Vol. 22*.

## **A.1. Rüzgar Tünel Karakterizasyonu**

Rüzgar tünelinin inşasından sonra test bölmesi içindeki ortalama hız ve türbülans yoğunluğu gibi tünelin akış özelliklerinin belirlenebilmesi için tünelin karakterizasyonunun yapılması gereklidir. Bu adım rüzgar tünelinin tasarımında tünelin verimliliği açısından hayati önem taşır.

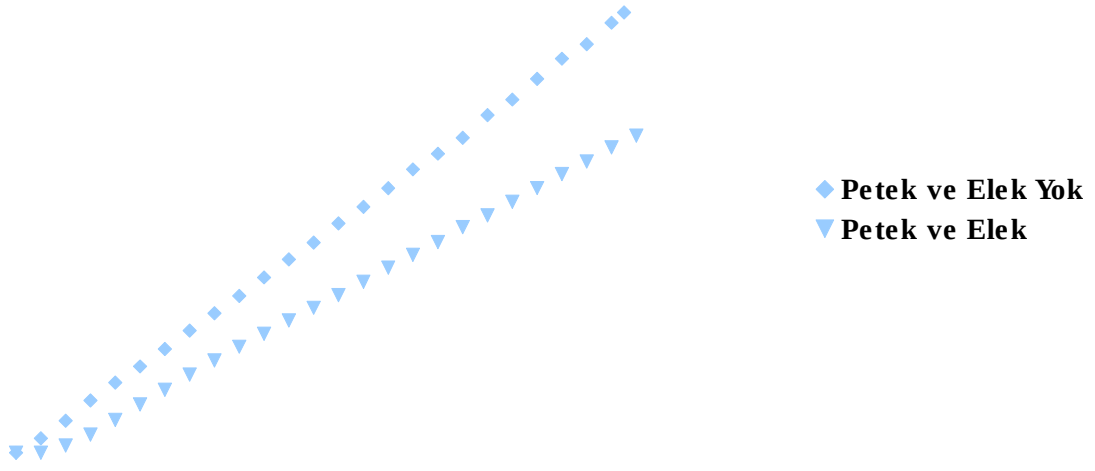
Rüzgar tüneli karakterizasyonu iki aşamada gerçekleştirilir. İlk olarak test bölümünün girişinde ortalama hız ve türbülans yoğunluğu akım teli ve referans ölçme ucu aracılığıyla ölçülür. İkinci olarak ise bir petek ve elek test bölümünün önüne yerleştirilerek aynı ölçüm yapılır.

Birinci aşamada yapılan ölçümlere bakıldığında test bölümünde ulaşılan en yüksek hızın yaklaşık 30 m/s ve türbülans yoğunluğunun ise %1.2 olduğu gözlemlenmiştir.

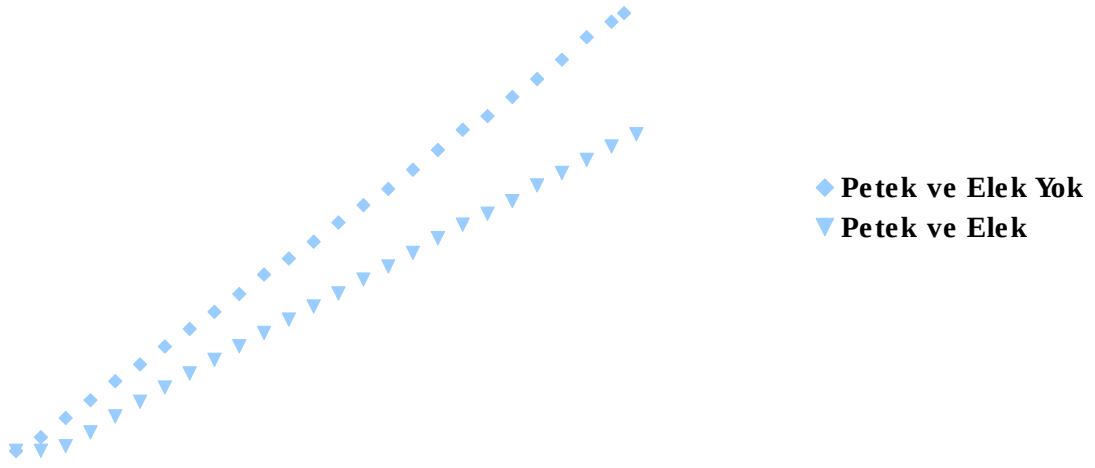
İkinci aşamada ise petek ve eleğin konulmasından sonra test bölümünde ulaşılan yüksek ortalama hızın yaklaşık 20 m/s ve türbülans yoğunluğunun ise %0.6 olduğu gözlemlenmiştir.

Bu iki karakterizasyon aşaması arasında ortalama hız ve türbülans yoğunluğu için yapılan karşılaştırmalarda gözlenmiştir ki petek ve eleğin konulmasından sonra ortalama hız olumsuz etkilenmiş ve büyük bir düşüş yaşamışken akış kalitesi türbülans yoğunluğunun neredeyse iki katı kadar azalmasına bağlı olarak artmıştır.

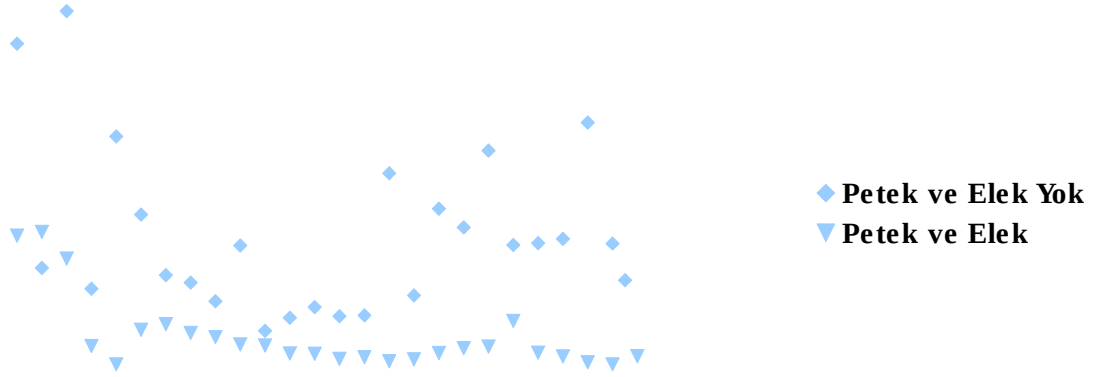




**Şekil A-81** Referans ölçme ucu ölçümlerine göre akış hızının motor frekansına göre değişimi

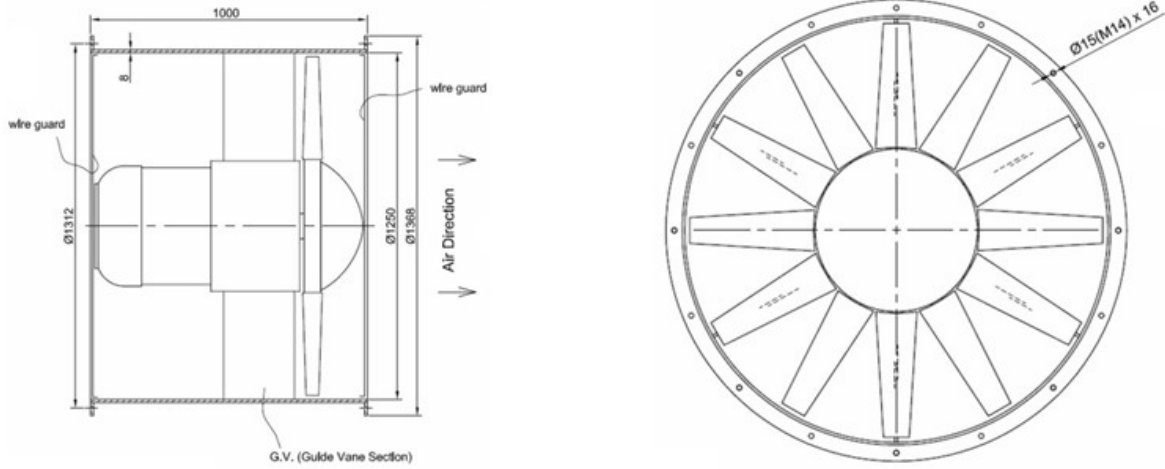


**Şekil A-82** Sıcak-tel ölçümlerine göre akış hızının motor frekansına göre değişimi



Şekil A-83 Test bölgesi girişindeki türbülans yoğunluğu

## A.2. FAN BOYUTLARI



Şekil 0-84 Sol- Fanın yandan görünüşü, Sağ- Fanın önden görünüşü

## EK B

### B.1. Sayısal Sonuçlar

ikizkenar yamuk							
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	Frekans [Hz]	Strouha l #	Re #
10	5	-0.045	0.080	-0.265	21.973	0.132	9.11E+03
10	10	-0.044	0.079	-0.264	48.828	0.146	1.82E+04
10	15	-0.041	0.079	-0.257	65.918	0.132	2.73E+04
10	20	-0.039	0.079	-0.252	83.008	0.125	3.64E+04
10	25	-0.036	0.078	-0.246	95.215	0.114	4.55E+04
12	5	-0.060	0.068	-0.266	26.855	0.134	7.59E+03
12	10	-0.062	0.068	-0.269	58.594	0.146	1.52E+04
12	15	-0.058	0.067	-0.260	78.125	0.130	2.28E+04
12	20	-0.054	0.067	-0.250	95.215	0.119	3.04E+04
12	25	-0.050	0.066	-0.242	107.422	0.107	3.80E+04
15	5	-0.049	0.055	-0.211	34.180	0.137	6.07E+03
15	10	-0.051	0.054	-0.215	73.242	0.146	1.21E+04
15	15	-0.049	0.054	-0.211	100.098	0.133	1.82E+04
15	20	-0.047	0.053	-0.206	122.070	0.122	2.43E+04
15	25	-0.045	0.053	-0.201	139.160	0.111	3.04E+04
Altıgen							
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	Frekans [Hz]	Strouha l #	Re #
10	5	0	0.077	-0.074	14.648	0.146	1.52E+04
10	10	0	0.078	-0.078	29.297	0.146	3.04E+04
10	15	0	0.079	-0.081	39.063	0.130	4.55E+04
10	20	0	0.078	-0.079	43.945	0.110	6.07E+04
10	25	0	0.079	-0.053	48.828	0.098	7.59E+04
12	5	0	0.065	-0.064	19.531	0.163	1.27E+04
12	10	0	0.065	-0.065	34.180	0.142	2.53E+04
12	15	0	0.065	-0.065	43.945	0.122	3.80E+04
12	20	0	0.065	-0.065	48.828	0.102	5.06E+04
12	25	0	0.064	-0.063	68.359	0.114	6.33E+04
15	5	0	0.052	-0.049	24.414	0.163	1.01E+04
15	10	0	0.052	-0.050	39.063	0.130	2.02E+04
15	15	0	0.052	-0.052	61.035	0.136	3.04E+04
15	20	0	0.052	-0.053	68.594	0.114	4.05E+04
15	25	0	0.051	-0.050	80.566	0.107	5.06E+04
Eliptik							
AR	U	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	Frekans [Hz]	Strouha	Re #

	[m/s]					I #	
10	5	0	0.042	-0.040	26.855	0.269	1.52E+04
10	10	0	0.039	-0.038	56.152	0.281	3.04E+04
10	15	0	0.037	-0.037	87.891	0.293	4.55E+04
10	20	0	0.037	-0.038	107.422	0.269	6.07E+04
10	25	0	0.037	-0.037	141.602	0.283	7.59E+04
12	5	0	0.039	-0.040	31.738	0.264	1.27E+04
12	10	0	0.035	-0.039	63.477	0.264	2.53E+04
12	15	0	0.033	-0.038	100.098	0.278	3.80E+04
12	20	0	0.032	-0.037	141.602	0.295	5.06E+04
12	25	0	0.032	-0.038	156.250	0.260	6.33E+04
15	5	0	0.031	-0.030	36.621	0.244	1.01E+04
15	10	0	0.028	-0.028	73.242	0.244	2.02E+04
15	15	0	0.026	-0.028	119.629	0.266	3.04E+04
15	20	0	0.026	-0.027	131.836	0.220	4.05E+04
15	25	0	0.025	-0.027	180.664	0.241	5.06E+04

Dikdörtgen							
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>M</sub>	Frekans [Hz]	Strouha I #	Re #
10	5	0	0.102	-0.168	15.869	0.095	9.11E+03
10	10	0	0.100	-0.164	17.090	0.051	1.82E+04
10	15	0	0.104	-0.173	48.828	0.098	2.73E+04
10	20	0	0.111	-0.179	48.828	0.073	3.64E+04
10	25	0	0.110	-0.178	73.242	0.088	4.55E+04
12	5	0	0.094	-0.158	24.414	0.122	7.59E+03
12	10	0	0.091	-0.151	43.945	0.110	1.52E+04
12	15	0	0.089	-0.147	63.477	0.106	2.28E+04
12	20	0	0.089	-0.147	78.125	0.098	3.04E+04
12	25	0	0.088	-0.146	92.773	0.093	3.80E+04
15	5	0	0.071	-0.123	26.855	0.107	6.07E+03
15	10	0	0.071	-0.122	57.373	0.115	1.21E+04
15	15	0	0.070	-0.121	78.125	0.104	1.82E+04
15	20	0	0.073	-0.127	97.656	0.098	2.43E+04
15	25	0	0.081	-0.139	102.539	0.082	3.04E+04

## EK C

### C.1. Deneysel Sonuçlar

ikizkenar yamuk						
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	Frekans [Hz]	Strouhal #	Re #
15	5.5	- 0.035	0.030	41.428	0.152	1.16E+04
15	6.5	- 0.045	0.034	48.294	0.151	1.36E+04
15	7.5	- 0.048	0.034	54.703	0.148	1.57E+04
15	8.5	- 0.035	0.034	61.340	0.147	1.77E+04
15	9.5	- 0.045	0.034	68.436	0.148	1.97E+04
15	10.5	- 0.048	0.030	75.226	0.147	2.18E+04
15	11	- 0.040	0.030	82.169	0.146	2.39E+04
15	12	- 0.040	0.034	89.264	0.146	2.60E+04
15	13	- 0.047	0.034	96.588	0.147	2.79E+04
15	14	- 0.047	0.030	103.226	0.146	3.00E+04

Altigen						
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	Frekans [Hz]	Strouhal #	Re #
15	5.5	0	0.030	10.223	0.063	1.16E+04
15	7.5	0	0.030	*	*	1.57E+04
15	9.5	0	0.034	*	*	1.97E+04
15	11	0	0.035	20.752	0.069	2.39E+04
15	13	0	0.034	*	*	2.79E+04
15	15	0	0.033	49.057	0.112	3.20E+04
15	17	0	0.032	54.932	0.112	3.61E+04
15	19	0	0.033	58.441	0.114	4.03E+04
15	21	0	0.028	62.790	0.120	4.44E+04

Eliptik						
AR	U [m/s]	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	Frekans [Hz]	Strouhal #	Re #
12	5.5	0	0.048	37.537	0.241	1.32E+04
12	6.4	0	0.050	*	*	1.55E+04
12	7.6	0	0.050	*	*	1.79E+04
12	8.5	0	0.049	56.992	0.242	2.02E+04
12	9.5	0	0.050	*	*	2.25E+04
12	10.5	0	0.051	70.724	0.240	2.49E+04
12	11	0	0.050	*	*	2.73E+04
12	13	0	0.046	90.942	0.240	3.19E+04

12	15	0	0.050	104.904	0.240	3.67E+04
			<b>Dikdörtgen</b>			
<b>AR</b>	<b>U [m/s]</b>	<b>C<sub>L</sub></b>	<b>C<sub>D</sub></b>	<b>Frekans [Hz]</b>	<b>Strouhal #</b>	<b>Re #</b>
12	5.5	0	0.07	31.05	0.143	1.39E+04
12	8.5	0	0.06	47.76	0.143	2.12E+04
12	10.5	0	0.06	54.93	0.134	2.61E+04
12	12	0	0.06	*	*	3.12E+04
12	13	0	0.08	72.40	0.138	3.35E+04
12	15	0	0.07	82.70	0.137	3.85E+04
12	17	0	0.07	91.40	0.134	4.34E+04

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. OĞUZ UZOL
Proje No:	110M799
Proje Başlığı:	Uzun Açıklıklı Köprü Kesitlerinin Rüzgar Altındaki Davranışının Analitik Ve Deneysel İncelenmesi
Proje Türü:	Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	ÖZGÜR KURÇ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/04/2011 - 15/04/2012
Onaylanan Bütçe:	24900.0
Harcanan Bütçe:	24900.0
Öz:	Uzun açıklıklı köprü kesitleri genellikle etrafında aerodinamik akış kararsızlıkları oluşabilen küt cisimlerdir. Bu tür kararsızlıklar, ciddi yapı yetmezliği felaketlerine yol açabilir. Bu projede uzun açıklıklı köprülerde kullanılan farklı geometrilerdeki kesitlerin aerodinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kesitlerin kaldırma, sürükleme ve moment katsayıları ile girdap salınım frekansları farklı rüzgar koşullarında ve farklı açıklık oranları için belirlenmiş, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Rüzgar, Uzun açıklıklı köprü, Girdap salınımı, Aerodinamik kuvvet katsayıları, Rüzgar bariyerleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır