

**OSMAN GAZİ KÖPRÜSÜNE ETKİYEN RÜZGÂR YÜKLERİNİN HAD
METODU İLE İNCELENMESİ**

Volkan KİRİÇÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Temmuz, 2016

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Volkan Kiriççi'nin "Osman Gazi Köprüsüne Etkiyen Rüzgâr Yüklerinin HAD Metodu ile İncelenmesi" başlıklı tezi 25/07/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı, Adı-Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Şafak BİLGİÇ

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

OSMAN GAZİ KÖPRÜSÜNE ETKİYEN RÜZGÂR YÜKLERİNİN HAD METODU İLE İNCELENMESİ

Volkan KİRİÇÇİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz, 2016

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan ÇELİK

Rüzgâr yükleri, yüksek ve geniş açıklıklı yapıların tasarımında göz ardı edilmemesi gereken önemli dinamik yüklerdir. Özellikle, ulaştırma, yapı ve akışkanlar mekaniği gibi farklı disiplinlerin bir arada değerlendirilmesini gerektirdiği için özel bir mühendislik problemi olarak gösterilebilir. Gelişen mühendislik teknikleri ve teknoloji ile birlikte, artan ihtiyaçlara paralel olarak köprü ve köprüyol tasarımları daha geniş ve daha yüksek açıklıkları aşmak için sınırları zorlamaktadır. Genellikle bu tür yapıların aerodinamik açıdan değerlendirilebilmesi için hazırlanmış yönetmelikler ve rüzgâr tüneli testleri kullanılmaktadır. Ancak, söz konusu yöntemlerin beraberinde getirdiği kısıtlamalar ve dezavantajlar, sayısal model çalışmalarını daha önemli bir hale getirmiştir. Geliştirilen sonlu elemanlar uygulamaları, farklı sınır koşulu uygulamaları ve başarılı türbülans kapatma yöntemleri ile birlikte yüksek performanslı bilgisayarlar kullanılarak her türlü geometrik yapı için yüksek hassasiyette analizler yapabilmek mümkün hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında, Osman Gazi Köprüsü tabliyesinin, farklı rüzgar hızları ve farklı türbülans modelleri için aerodinamik analizi sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelleme için oldukça güvenilir bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS CFX kullanılmıştır. Köprüye etkiyen rüzgâr yükleri, yapısal güvenliğinin yanı sıra, trafik konforu ve güvenliğine etkisi açısından da değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, köprü tabliyesinin oldukça düşük rüzgâr direncine maruz kaldığı ve geometrik olarak akıma uyumlu bir yapıda tasarlandığı tespit edilmiştir. Köprü üzerindeki trafik güvenliği ve konforu açısından ise uzun ve geniş araçlar için yüksek hızlarda dahi herhangi bir devrilme riskinin bulunmadığı anlaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: HAD, Aerodinamik analiz, Trafik güvenliği, Köprü tasarımı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF WIND LOADS EFFECT ON OSMAN GAZI BRIDGE USING CFD

Volkan KIRIÇÇI

Department of Civil Engineering

Anadolu University, Graduate School of Science, July, 2016

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet Ozan CELIK

Wind loads are important dynamic loads that should not be ignored in the design of high and long span structures. In particular, it can be defined as a specific engineering problem, due to requirement of combining different disciplines such as transportation, structural and fluid mechanics. Advance in technology and civil engineering techniques enable engineers to push limits in the design of bridge and viaducts for higher and longer spans. Generally, the main methods used to analyze aerodynamic performance of such structures are design codes and wind tunnel tests. Limitations and disadvantages of these methods make numerical modeling studies more important. Recent advances in finite element methods, different boundary condition options and successful turbulence closures have facilitated highly accurate aerodynamic analysis of any type of geometry using high performance computers. In this thesis, aerodynamic analysis of the Osman Gazi Bridge deck has been performed for different wind velocities and different turbulence models. ANSYS CFX was used for numerical modeling as a quite reliable Computational Fluid Dynamics (CFD) software. Wind loads effect on bridge has been also evaluated in terms of traffic comfort and safety as well as structural safety.

As a result, it was detected that the bridge deck is exposed quite low wind resistance and it has a streamlined geometric design. In terms of traffic safety and comfort on the bridge, even at high speeds for long and large vehicles, it has understood that there is any risk of tipping over.

Keywords: CFD, Aerodynamic analysis, Traffic safety, Bridge design

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen aileme, mühendislik konusunda en iyi şekilde yetişmemi sağlayan, bilgi ve birikimleriyle beni hayata hazırlayan ve öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım başta Sayın **Yrd. Doç. Dr. Ahmet Ozan Çelik** hocam ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür ederim. Bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan saygı değer hocam **Yrd. Doç. Dr. Ender Demirel**'e de teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca her zaman yanımda olan, yoğun çalışmalarım sırasında sabır göstererek desteğini esirgemeyen nişanlım **Tuğçe Anlatıcı**'ya teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla

Volkan KİRİÇÇİ

Temmuz-2016

25/07/2016

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarda bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Volkan KIRIÇÇI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1.GİRİŞ	1
2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	2
2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Teorisi.....	4
2.2 Çözüm Alanının CAD Geometrisinin Oluşturulması	7
2.3 Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması.....	7
2.4 Problemin fiziksel koşulları, başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi	10
3. LİTERATÜR.....	14
4. YÜKSEK YAPILARA ETKİYEN RÜZGÂR YÜKLERİNİN BELİRLENMESİNDE RÜZGÂR TÜNELİ VE HAD UYGULAMALARI.....	18
5. YÜKSEK YAPILARDA RÜZGÂR YÜKLERİ HESABI VE YÖNETMELİKLER.....	23
6.4 Köprü Modeline ait Sınır ve Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi.....	40
6.5 Kullanılan Türbülans Modelleri.....	42

7. İKİ BOYUTLU SAYISAL ÇÖZÜM SONUÇLARI VE YORUMLANMASI.....	45
8. RÜZGÂR YÜKLERİNİN TRAFİK GÜVENLİĞİNE ETKİSİ	58
8.1 Üç Boyutlu Köprü ve Tır Sayısal Modelinin Hazırlanması	58
8.2 Üç Boyutlu Köprü ve Tır Sayısal Modeli Sonuçları ve Yorumlanması	62
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. a) Tipik bir dolu savak HAD modelinin CAD geometrisi	7
Şekil 2.1. b) Bir kanal üzerinde köprü ayakları HAD modelinin CAD geometrisi	7
Şekil 2.2. a) Bir kanal ve savak geometrisi için oluşturulan yapılandırılmış çözüm ağı yan görünüş.....	8
Şekil 2.2. b) Bir kanal ve savak geometrisi için oluşturulan yapılandırılmış çözüm ağı izometrik görünüş	8
Şekil 2.3. Küre Vana katı geometrisi için oluşturulmuş melez çözüm ağı	9
Şekil 2.4. a) Çözüm ağı elemanları skewness	10
Şekil 2.4. b) Çözüm ağı elemanları aspect ratio	10
Şekil 2.4. c) Çözüm ağı elemanları eleman boyutları arasındaki geçiş	10
Şekil 2.5. Tipik bir çözüm ağından bağımsız HAD çözümü çalışması	10
Şekil 2.6. Tipik bir basınçlı boru HAD modeli üzerinde sınır şartlarının gösterimi	12
Şekil 3.1. Tacoma Köprüsünün rüzgâr etkisiyle oluşan salınımı	16
Şekil 3.2. Rüzgâr hızının zamana ve yüksekliğe bağlı değişimi	17
Şekil 4.1. TÜBİTAK-SAGE'ye bağlı Ankara Rüzgâr Tüneli	18
Şekil 4.2. Atmosferik sınır tabaka rüzgâr tüneli ve arazi pürüzlülüğü	19
Şekil 5.1. Referans yüksekliği	24
Şekil 5.2. Oreography faktörü ve rüzgâr hız profilleri	25
Şekil 5.3. Hava akımı nedeniyle yapının yan yüzeylerinde oluşan vorteksler	28
Şekil 6.1. Osman Gazi Köprüsünün konumu	30
Şekil 6.2. Osman Gazi Köprüsünün genel yerleşim planı ve boyuna uzunlukları	31
Şekil 6.3. Osman Gazi Köprüsü tabliyesinin kesit boyutları ve detayları	31

Şekil 6.4. Osman Gazi Köprüsü projesinin bitmiş halinin illüstrasyonu	32
Şekil 6.5. Osman Gazi Köprüsü tabliyesi 2 boyutlu çözüm alanı	33
Şekil 6.6. Osman Gazi Köprüsü tabliyesi sayısal ağ bölgeleri	35
Şekil 6.7. a) Köprü tabliyesi sayısal ağ 1	36
Şekil 6.7. b) Köprü tabliyesi sayısal ağ 2	36
Şekil 6.7. c) Köprü tabliyesi sayısal ağ 3	36
Şekil 6.7. d) Köprü tabliyesi sayısal ağ 4	36
Şekil 6.8. Dört farklı ağ yapılandırması için kontrol parametresinin değişimi.....	37
Şekil 6.9. Evrensel Duvar Kanunu.....	39
Şekil 6.10. Ağ 4 için köprü tabliyesi çevresinde ve tabliye çeperindeki sıklaştırma bölgesindeki ağ yapısı.....	40
Şekil 6.11. Çözüm alanı sınır koşulları.....	41
Şekil 7.1. Bazı temel geometrik şekiller sürüklenme katsayıları.....	46
Şekil 7.2. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi (k-ε türbülans modeli)	47
Şekil 7.3. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi (RNG k-ε türbülans modeli)	48
Şekil 7.4. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi (k- ω türbülans modeli).....	48
Şekil 7.5. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi (SST türbülans modeli).....	49
Şekil 7.6. a) Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri (k-ε türbülans modeli)	51
Şekil 7.6. b) Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri (RNG k-ε türbülans modeli)	51
Şekil 7.6. c) Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri (k- ω türbülans modeli).....	51

Şekil 7.6. d) Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri (SST türbülans modeli).....	51
Şekil 7.7. a) Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri (k-ε türbülans modeli)	52
Şekil 7.7. b) Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri (RNG k-ε türbülans modeli)	52
Şekil 7.7. c) Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri (k- ω türbülans modeli).....	52
Şekil 7.7. d) Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri (SST türbülans modeli).....	52
Şekil 7.8. a) Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri (k-ε türbülans modeli)	53
Şekil 7.8. b) Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri (RNG k-ε türbülans modeli)	53
Şekil 7.8. c) Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri (k- ω türbülans modeli).....	53
Şekil 7.8. d) Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri (SST türbülans modeli).....	53
Şekil 7.9. Çözüm süresi ve sürüklenme katsayısının değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s).....	54
Şekil 7.10. Çözüm süresi ve kaldırma katsayısının değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s).....	54
Şekil 7.11. Çözüm süresi ve tabliyeye etkiyen maksimum basınç değerinin değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s).....	55
Şekil 7.12. a) Farklı rüzgâr hızlarına karşılık sürüklenme katsayısının değişimi (SST türbülans modeli).....	57
Şekil 7.12. b) Farklı rüzgâr hızlarına karşılık kaldırma katsayısının değişimi (SST türbülans modeli).....	57
Şekil 8.1. Rion Antirion Köprüsü üzerinde rüzgar nedeniyle devrilmek üzere olan tır	58

Şekil 8.2. Üç boyutlu çözüm alanı geometrisi izometrik görünümü ve tabliye üstten görünümü	59
Şekil 8.3. Rüzgâr yönüne göre tırın tabliye üzerindeki farklı konumları	60
Şekil 8.4. Temsili tır geometrisi.....	60
Şekil 8.5. Köprü tabliyesi ve tıra ait sayısal ağ	61
Şekil 8.6. Köprü tabliyesi ve tır yüzeyinde oluşan basınç dağılımı (I. Durum)	63
Şekil 8.7. Köprü tabliyesi ve tır yüzeyinde oluşan basınç dağılımı (II. Durum) ...	63
Şekil 8.8. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (tırın olmadığı kesit)...	64
Şekil 8.9. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (I. durum)	64
Şekil 8.10. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (II. durum)	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Sayısal ve fiziksel modelleme avantaj ve dezavantajları.....	4
Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülük uzunlukları ve minimum uzunluklar	26
Çizelge 6.1. İki boyutlu tabliye analizlerinde kullanılmış olan tabliye konum değerleri	33
Çizelge 6.2. Tabliye analizlerinde kullanılmış olan geometri ve sayısal ağ detayları	36
Çizelge 6.3. Dört farklı ağ yapılandırması için kontrol parametresinin değişimi....	37
Çizelge 7.1. Dört türbülans modeli için sürüklenme katsayıları ($u_x=38$ m/s).....	49
Çizelge 7.2. Dört türbülans modeli için kaldırma katsayıları ($u_x=38$ m/s)	49
Çizelge 7.3. Farklı rüzgâr hızlarına karşılık sürüklenme ve kaldırma katsayıları ...	56
Çizelge 8.1. Tıra etkiyen farklı doğrultulardaki toplam rüzgâr kuvvetleri	65

SİMGELER DİZİNİ

- ρ : Yoğunluk
- t : Zaman
- $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$: Hız vektör bileşenleri
- τ : Kayma gerilmesi
- μ : Dinamik Viskozite
- k : Türbülans kinetik enerjisi
- ϵ : Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
- ω : Türbülans kinetik enerjinin birim hacim ve zamanda termal enerjiye dönüşme oranı
- μ_t : Eddy viskozitesi
- τ_{ij} : Serbest Reynolds gerilme tensörü
- F_d : Sürüklenme katsayısı
- F_l : Kaldırma katsayısı
- C_d : Sürüklenme katsayısı
- C_l : Kaldırma katsayısı
- Re : Reynolds sayısı
- F_w : Rüzgâr kuvveti
- $c_s c_d$: Yapısal faktör
- c_f : Kuvvet katsayısı
- z_e : Referans yüksekliği
- $q_p(z_e)$: Referans yüksekliğindeki hız basıncının pik değeri
- A_{ref} : Yapının referans alanı
- $v_m(z)$: z yüksekliğindeki ortalama rüzgâr hızı,
- $l_v(z)$: z yüksekliğindeki türbülans şiddeti
- $c_e(z)$: z yüksekliğindeki maruziyet (exposure) faktörü
- k_I : Türbülans faktörü
- $c_o(z)$: Oreography faktörü
- z_0 : Pürüzlülük uzunluğu

σ_v : Dinamik rüzgâr hızı
 $c_o(\mathbf{z})$: Yüksekliğe bağlı pürüzlülük faktörü
 k_r : Arazi faktörü
 $v_{b,0}$: Temel rüzgâr hızının temel değeri
 c_{dir} : Doğrultu faktörü
 c_{season} : Mevsim faktörü
 v_b : Temel rüzgâr hızı
 c_{prob} : Olasılık faktörü
 d_{min} : Rüzgâra dik doğrultudaki en kısa genişlik
 f_{oy} : Binanın rüzgâra dik doğrultudaki doğal frekansı
 St : Strouhal sayısı
 w_d : Tabliye genişliği
 h_d : Tabliye yüksekliği
 u : Çepere paralel akışkan hızı
 y : Çepere dik mesafe
 u_τ : Kayma hızı
 τ_w : Çeper kayma gerilmesi
 u_+ : Boyutsuz hız
 y_+ : Boyutsuz mesafe
 A_r : Cismin kuvvet yönündeki iz düşüm alanı
 C_r : Courant sayısı
 \bar{v} : Ortalama doğrusal hız
 Δt : Zaman aralığı
 Δl : Sayısal ağ eleman boyutu

KISALTMALAR DİZİNİ

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)

RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynold Ortalamalı Navier-Stokes)

LES : Large Eddy Simulation

SST : Shear Stress Transport

TÜBİTAK-SAGE : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü

AASHTO LRFD : American Association of State Highway and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design

ASCE : American Society of Civil Engineers

TS : Türk Standartı

EN : European standards

RNG : Renormalization Group

DNS : Direct Numerical Simulation

SIMPLE : Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

1. GİRİŞ

Sanat yapısı, ulaştırma mühendisliği projelerinde sıklıkla rastlanan, drenaj amaçlı ya da yarma-dolgu işlemlerinin azaltılması için yapılan tünel, köprü, köprüyol (viyadük), menfez, istinat duvarı ve benzeri yapılara verilen genel bir isimdir. Bir sanat yapısı olan köprü ve köprüyol ise vadi, akarsu veya deniz üzerinden karayolu veya demiryolu geçişini sağlayan, ayaklar üzerine oturmuş yüksek ve uzun açıklıklı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Sanat yapılarının tasarımında, yapının kullanım amacı ve özelliklerine bağlı olarak farklı ölçütler göz önünde bulundurulmaktadır. Genel mühendislik uygulamalarında, tasarım ve boyutlandırma, deneysel çalışmalardan türetilmiş ve farklı koşullar için genelleştirilmiş bir boyutlu ampirik ifadeler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak inşaat mühendisliği projelerinin kendine özgü koşulları ve incelenen problemdeki etken parametrelerin karmaşık yapısı gereği farklı yaklaşımlar altında değerlendirilmesi gerekebilmektedir. Bu çalışmada, bir ulaştırma sanat yapısı olan Osman Gazi Köprüsü bir sayısal modelleme yöntemi olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanılarak çözümlenmiş, yapıya etki eden dinamik rüzgâr kuvvetlerinin benzetimi yapılarak ve yapının bu dinamik yükler altındaki performansı incelenmiştir. Gerçekleştirilen HAD analizlerinin barındırması muhtemel hata payının asgariye indirgenmesi için gerekli sayısal modelleme incelikleri göz önüne alınarak söz konusu sonuçların olabildiğince hassas ve doğru olması sağlanmıştır. Köprü tabliyesi çevresindeki basınç ve hız dağılımlarının yanı sıra kaldırma ve sürüklenme gibi aerodinamik katsayılar farklı rüzgâr hızları ve türbülans modelleri için hesaplanmıştır.

Köprülerin aerodinamik performansının belirlenmesi ve rüzgâr yüklerinin trafik konforu üzerine etkileri inşaat mühendisliği ve ulaştırma mühendisliği açısından incelenmesi uygun rüzgâr tüneli tesislerinin varlığını gerektiren oldukça özellikli, disiplinler arası ve zaman alan süreçlerdir. Bu noktada inşaat mühendisliği alanında fazlaca kullanılmayan nümerik modelleme ve HAD metodunun kullanılması, incelenen yapı ve durum ile alakalı oldukça detaylı bilgi ortaya koymasının yanı sıra zaman ve maliyet avantajı da sağlamaktadır.

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Akışkanlar mekaniğinin bir alt kolu olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, hareket halindeki akışkanın davranışını, matematiksel yaklaşımlar kullanılarak, bilgisayar destekli hesaplama gücü yardımı ile inceleyen bilim dalıdır. HAD metodu, karmaşık akışkanlar dinamiği problemlerinin, sonlu farklar, sonlu elemanlar veya sonlu hacimler gibi yöntemler kullanılarak sayısal olarak modellenmesi ve analiz edilmesi temeline dayanmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin temelleri havacılık ve ısı transferi problemleri ekseninde atılmışsa da sonrasında akışkanlar mekaniğinin etkin olduğu pek çok mühendislik problemine uyarlanarak geliştirilmiştir. 1950'li yıllarda sayısal yöntemlerdeki gelişmeler ile başlayan süreç 2000'li yıllarda ivme kazanarak bugün bildiğimiz anlamda karmaşık problemlerin modellenmesini sağlayan genel ve özel amaçlı HAD algoritmalarının ve yazılımların oluşturulması noktasına gelmiştir. Günümüzde havacılık, makine, kimya, biyomekanik, çevre ve inşaat gibi birçok mühendislik dalında oldukça yaygın olarak kullanılan metod, tasarım ve analiz süreçlerinde hem endüstriyel hem de akademik anlamda etkili sonuçlar vermektedir. Özellikle, gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak, HAD alanında kullanılan yazılımlarda da önemli ilerlemeler kaydedilerek birçok ticari ve açık kaynak kodlu yazılım geliştirilmiştir.

Mühendislik problemlerinin çözümünde genellikle analitik yöntem, deneysel yöntem ve nümerik yöntem olmak üzere üç temel yaklaşım uygulanmaktadır. Üzerinde çalışılan konuya ait tüm fiziksel bağıntılar herhangi bir kabul gerektirmeden matematiksel olarak çözümlenebiliyorsa, bu gerçek çözüm ya da analitik çözüm olarak tanımlanmaktadır. Problemin çözümünde gerekli analitik formüller hali hazırda mevcut ya da türetilebiliyor ise çözümün doğrudan analitik olarak yapılması yoluna gidilebilir. Diğer taraftan birçok mühendislik probleminin çözümlenmesi noktasında analitik bir yaklaşım bulunmayabilir ya da problemin doğası gereği analitik bir çözüme ulaşmak mümkün olmayabilir. Bu gibi durumlarda deneysel yöntemlere başvurulur ve araştırılan durum fiziksel olarak modellenerek gerekli ölçüm ve gözlemler yapılır. Bu ölçüm ve gözlemler sonucunda deneye dayalı ifadeler geliştirilerek, benzer durumlarda kullanılmak üzere genelleştirilmiş formüller elde edilebilir. Ancak fiziksel modelleme oldukça

zaman alan, zahmetli ve ayrıca incelenen modelin ölçeği ve ölçüm araçlarının limitleri nedeniyle her durum için uygulanması mümkün olmayan bir metottur. Modelin oluşturulması sürecinde uygun ve gerçekçi başlangıç ve sınır koşullarının uygulanması da fiziksel modellemenin getirdiği bir diğer zorluktur. Analitik ve deneysel metotların yanı sıra bir diğer çözüm metodu ise nümerik yöntemler ve sayısal modellemedir. Nümerik yöntemlerde, probleme uygun matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlar uygulanarak yakınsak bir çözüm elde edilmesi amaçlanmaktadır. Nümerik çözüm, içerisinde kullanılan yöntemin hassasiyeti oranında belirli bir hata barındırmakla birlikte karmaşık mühendislik analizlerinde oldukça pratik ve yeterli ölçüde isabetli sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Bu bağlamda, HAD metodu, istenilen geometrik yapı içerisinde sonsuz küçük ifadelerden oluşan diferansiyel denklemlerinin hesaplanabilir sonlu küçük parçalar içeren cebrik ifadelerle dönüştürülerek uzayda ve zamanda ayrıklaştırılmış bir biçimde bilgisayar yardımıyla çözülmesi prensibine dayanan bir nümerik yöntem olarak tanımlanabilir.

Günümüzde ANSYS CFX gibi gelişmiş HAD yazılımları ile üç boyutta karmaşık akım problemlerini istenilen türbülans modeli kullanılarak, zamana bağlı olarak gerçek koşullar tamamıyla yansıtacak biçimde modelleyerek çözebilmek mümkündür.

Sayısal ve fiziksel modelleme metotlarının sahip olduğu kendine özgü avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu nedenle iki yöntemi birbirine alternatif olarak değil birbirini tamamlayan araçlar olarak görmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır. **Çizelge 2.1**'de fiziksel ve sayısal modellemenin avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Sayısal ve fiziksel modelleme avantaj ve dezavantajları

	Sayısal Modelleme	Fiziksel Modelleme
Avantajlar	<ul style="list-style-type: none">• Zamandan tasarruf• Her geometri ve fiziksel koşulun ölçek gerektirmeden uygulanabilmesi• İstenilen her parametrenin hesaplanabilmesi	<ul style="list-style-type: none">• Gerçekçi ve güvenilir sonuçlar vermesi• Doğrudan gözleme yapılabilmesi
Dezavantajlar	<ul style="list-style-type: none">• Bilgisayar ve kod kaynaklı yuvarlama hataları• Bilgisayar performansı ve hesaplama gücü ile sınırlı olması• Ayırıklaştırma hataları• Doğrulama gerektirmesi	<ul style="list-style-type: none">• Ölçeklendirme gerektirmesi• Zaman ve maliyet• Her geometri ve fiziksel duruma uygulanamaması• Sınırlı ölçüm imkânı

Sayısal model çalışmalarının fiziksel model testleri ile desteklenerek kullanılması durumunda, uygulanan sayısal yöntemin hassasiyet mertebesi, bilgisayar performansı ve ayırıklaştırma sonucu oluşabilecek hataların kontrolü sağlanarak, güvenilir ve isabetli sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Teorisi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, temel akışkanlar mekaniği denklemleri kullanılarak akışkan hareketinin benzetiminin yapılmasını sağlar. Akışkanlar hareketini tanımlayan temel denklemler, kütle, momentum ve enerjinin korunumu prensibinden türetilmiş olan Navier-Stokes denklemleridir. Navier-Stokes denklemlerinin karmaşık ve lineer olmayan (eliptik, hiperbolik) diferansiyel ifadeler içermesi nedeniyle doğrudan çözümü oldukça zordur. Özellikle uzayda üç boyutta çözüm gerektiren problemlerde, çözümlenmesi gereken terim sayısı ile kullanılan denklem takımı sayısı da artmaktadır. Bu nedenle bazı durumlarda çözümü yapılacak probleme özgü kabuller yapılarak denklemler belirli parametreler çerçevesinde sadeleştirilebilir (sıkıştırılmaz akım kabulü, laminar akım durumu). Aşağıda Navier-Stokes denklemlerini oluşturan üç boyutta süreklilik, momentum ve enerji kısmi diferansiyel denklemleri gösterilmiştir.

Süreklilik;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.2)$$

x yönünde momentum;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.3)$$

$$p \frac{Du}{Dt} = p B_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.4)$$

y yönünde momentum;

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$p \frac{Dv}{Dt} = p B_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2.6)$$

z yönünde momentum;

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.7)$$

$$p \frac{Dw}{Dt} = p B_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.8)$$

$$B = B_x i + B_y j + B_z k \text{ (birim kütleleyen etki eden kuvvet)}$$

Yerçekimi etkisi altında (-y yönünde);

$$B_x = B_z = 0 \rightarrow B_y = -g$$

Enerji;

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w E)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial(u \sigma_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(u \tau_{yx} + v \sigma_{yy} + w \tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(u \tau_{zx} + v \tau_{zy} + w \sigma_{zz})}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Sıkıştırılmaz akışkan kabulü yapılırsa $\left(\frac{D\rho}{Dt} = 0\right)$;

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} + u \frac{\partial\rho}{\partial x} + v \frac{\partial\rho}{\partial y} + w \frac{\partial\rho}{\partial z} &= 0 \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ p \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= pB_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ p \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= pB_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ p \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= pB_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad (2.10)$$

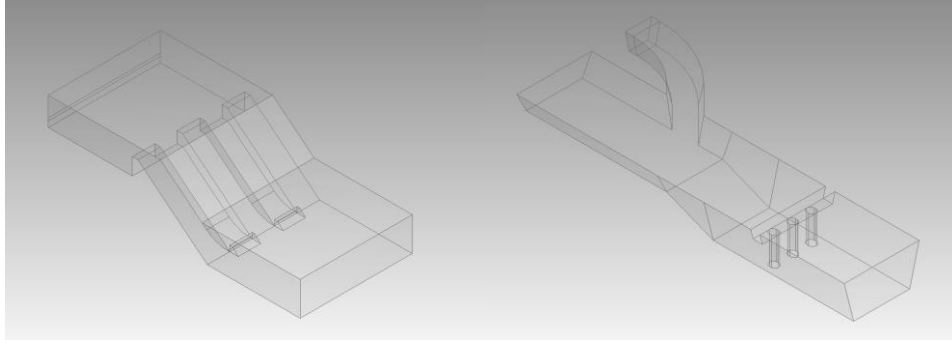
HAD metodu akışkan davranışının bilgisayar ortamında sayısal olarak benzetimin yapılması prensibine dayanmaktadır. Süreklilik, momentumun korunumu, enerjinin korunumu ve Navier-Stokes gibi temel akışkanlar mekaniği diferansiyel denklemleri cebrik ifadelerle dönüştürülerek uzayda ve zamanda nümerik metotlarla ayrıklaştırıldıktan sonra belirlenen başlangıç ve sınır şartları çerçevesinde çözümlenmektedir. Çözümü yapılacak olan modelin CAD geometrisi oluşturulduktan sonra sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri uygulanarak çözüm alanına ait sayısal çözüm ağı (mesh) oluşturulur. Çözüm ağını oluşturan her bir eleman için gerekli denklem takımları çözülerek akımın davranışı ve akıma ait hız, basınç, sıcaklık gibi parametreler hesaplanabilmektedir. Tipik bir HAD çözümünün aşamaları aşağıdaki gibidir;

- 1) Modelin CAD geometrisinin oluşturulması
- 2) Çözüm alanına uygun çözüm ağının oluşturulması
- 3) Problemin fiziksel koşulları, başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi
- 4) Bilgisayar destekli çözümün yapılması
- 5) Çözümün görselleştirilmesi ve yorumlanması

Bu projede su yapısının sayısal çözümü için ticari bir HAD yazılımı olan ANSYS CFX kullanılacaktır. Akışkanlar dinamiği alanında oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan ANSYS CFX içerisinde kendi CAD ve Mesh oluşturma modüllerini barındırmaktadır. Kullanılan yazılım çerçevesinde HAD metodunun aşamaları tarafımdan daha önce yapılmış olan çalışmalar üzerinden genel örneklerle açıklanacaktır.

2.2 Çözüm Alanının CAD Geometrisinin Oluşturulması

HAD çözümünün ilk aşaması probleme ait çözüm alanını belirleyen geometrinin hazırlanmasıdır. İncelenmesi planlanan probleme bağlı olarak geometri iki boyutlu veyahut üç boyutlu olabilir. Eğer iki boyutta çalışılacak ise uygulanacak sayısal yöntem değişecek ve ayrıklaştırma olarak metodu sonlu farklar metodu kullanılacaktır. CFX yazılımı ise sonlu hacimler metodunu kullanarak üç boyutta çözümler yapabilmektedir. Modelin geometrisi hazırlanırken eğer özellikle bir katı sıvı etkileşimi analiz edilmeyecek ise doğrudan akışkana ait çözüm alanı oluşturulması gerekmektedir. ANSYS CFX içerisinde kendi CAD modülü olan DesignModeler isimli geometri çizim aracını bulundurmaktadır. **Şekil 2.1 a) ve b)** de sırasıyla DesignModeler ile hazırlanmış bir dolu savak ve bir trapez kanal üzerindeki köprü ayağı geometrisi örnek olarak verilmiştir.

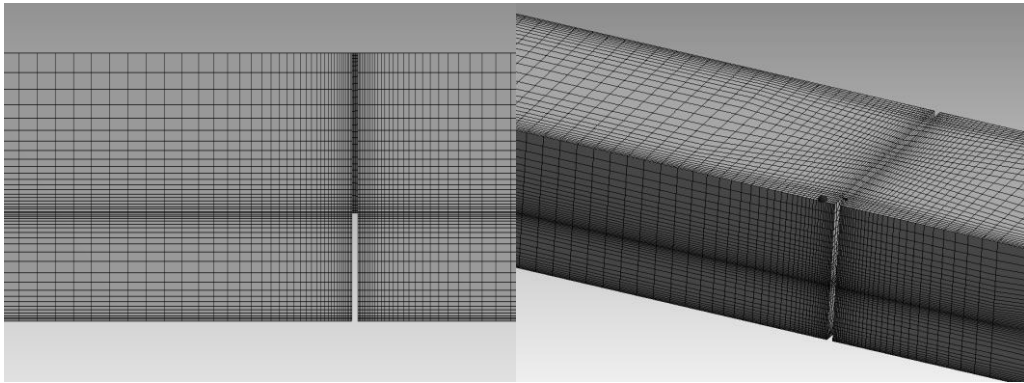


Şekil 2.1. a) *Tipik bir dolu savak HAD modelinin CAD geometrisi*
b) *Bir kanal üzerinde köprü ayakları HAD modelinin CAD geometrisi*

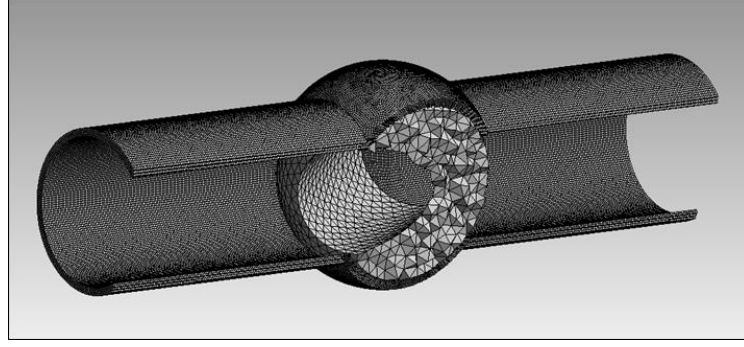
2.3 Sayısal Çözüm Ağının Oluşturulması

Çözüm ağının (mesh) oluşturulması aşaması bir HAD çözümünün en kritik ve çözümün sonuçlarına doğrudan etki eden aşamalarından biridir. Daha önce geometrisi hazırlanmış olan akışkana ait çözüm alanı sonlu küçük hacimlere ayrılarak akışkanın hareket denklemleri her bir sonlu hacim elemanı için çözülerek tüm model için HAD çözümüne ulaşılmış olur. Kullanılacak çözüm ağı elemanlarının biçimi ve boyutları model geometrisi ve çözümlenen problemin

fiziksel yapısı göz önüne alınarak belirlenmelidir. Genel olarak yapılandırılmış (structured) ve yapılandırılmamış (unstructured) veya bu ikisinin de bir arada bulunduğu melez (hybrid) çözüm ağı olmak üzere üç tür çözüm ağı oluşturulabilmektedir. Kullanılacak çözüm ağı türlerinin çözüm içerisinde kendine özgü etkileri bulunmaktadır. Yapılandırılmış çözüm ağı üniform dikdörtgen veya küp ve altıyüzlü elemanlardan oluşan düzenli bir çözüm ağı oluşturma imkânı sağlamakla birlikte karmaşık geometriler için uygun olamayabilmektedir. Karmaşık geometrik yapılar söz konusu olduğunda üçgen prizma altıgen veya dörtgen gibi farklı şekillerde elemanlardan oluşan yapılandırılmamış çözüm ağı uygulanır. Çözümlerde, yapılandırılmış çözüm ağına göre daha fazla hesaplama süresi gerektirmesine karşın eğriliklerin veya düzensiz geometrik yapıların bulunduğu modellerde kolaylık sağlar. **Şekil 2.2 a) ve b)** de içerisinde savak bulunan dikdörtgen kesitli bir kanal geometrisine uygulanan yapılandırılmış çözüm ağı örneği gösterilmektedir. **Şekil 2.3**'te ise küresel bir vana geometrisine uygulanmış olan melez çözüm ağı örneği gösterilmektedir. **Şekil 2.2 a) ve b)** de oluşturulan çözüm ağı incelenirse eğer belirli bölgelerde ağ elemanlarının boyutlarının değiştiği görülmektedir. Kanalda katı cidara ve savağa yakın bölgelerde giderek sıklaşan (inflation) bir çözüm ağı kullanılmasının nedeni katı cidar ile akışkan etkileşimi ve viskoz etkilerin yüksek hız, basınç gradyanları gibi akımda ani değişikliklerin oluşmasına neden olabileceği öngörüsüdür. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere uygun çözüm ağının oluşturulması ancak yeterli derecede akışkanlar mekaniği bilgisi ve tecrübe ile mümkün olabilmektedir.

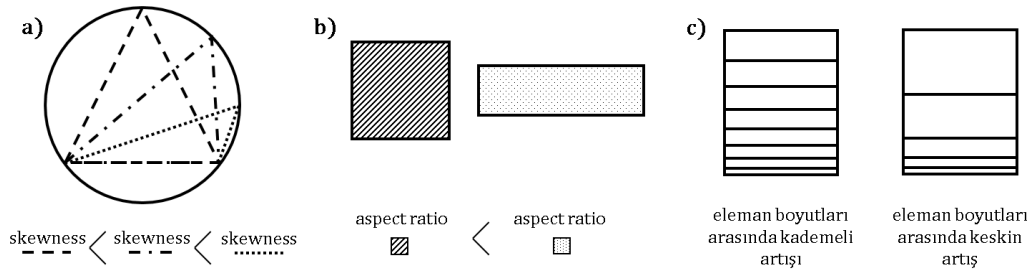


Şekil 2.2. Bir kanal ve savak geometrisi için oluşturulan yapılandırılmış çözüm ağı
a) Yan görünüş b) İzometrik görünüş



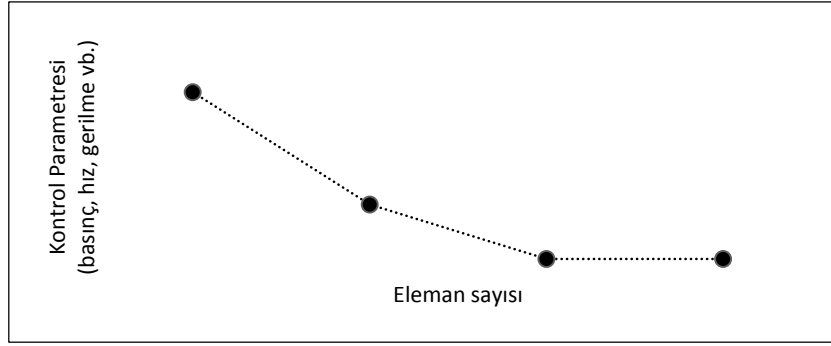
Şekil 2.3. Küre Vana katı geometrisi için oluşturulmuş melez çözüm ağı

Kullanılan çözüm ağı eleman boyutu ve şekli yapılan çözümün doğruluğuna ve stabilitesine doğrudan etki etmektedir. Her ne kadar küçük eleman boyutu daha hassas bir çözüm elde edilmesini sağlasa da getirdiği hesaplama yükü nedeniyle çözüm süresi ve bilgisayar performans limitlerini zorlamaktadır. Ayrıca çözümü yapılacak fiziksel durumun gerektirdiği hassasiyetin doğru belirlenmesi gereğinden fazla sayıda eleman kullanılmasını önleyecektir. Bu nedenle çözüm ağının uygunluğunun ve elemanların boyutlarının belirlenebilmesi için bir takım kıstaslar göz önüne alınmalıdır. Bu kıstasların başında çözüm ağı elemanlarının geometrik yapısı ile ilgili olan “skewness” parametresi gelmektedir. Skewness değeri çözüm ağı içerisindeki elemanların eşkenarlılığını ve eş açılı yapısını ifade eden bir parametredir (Şekil 2.4). Skewness değeri yükseldikçe çözüm ağı elemanlarının kalitesi düşmekte ve çözümün güvenilirliği azalmaktadır. Bunun yanı sıra “boy oranı (aspect ratio)” ve “ortogonal kalite (orthogonal quality)” gibi çözüm ağı eleman kalitesini belirleyen parametrelerde bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Çözüm ağı elemanları a) Skewness b) Aspect Ratio c) Eleman boyutları arasındaki geçiş

Geometrik parametrelerin yanı sıra çözüm ağını oluşturan elemanların sayısı ve boyutları da HAD sonuçlarını etkilememektedir. Yapılacak HAD çözümünün sonuçlarının kullanılan eleman sayısından bağımsız olması (mesh independency) beklenmektedir. Bu nedenle büyükten küçüğe olacak şekilde farklı eleman boyutları kullanılarak aynı çözüm tekrar edilmeli ve akıma ait seçilen kontrol parametresinin daha küçük eleman sayıları için değişmediği ya da kabul edilebilir mertebede değişiklikler göstermeye başladığı maksimum eleman boyutu belirlenmelidir [1,2] (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Tipik bir çözüm ağından bağımsız HAD çözümü çalışması

2.4 Problemin fiziksel koşulları, başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi

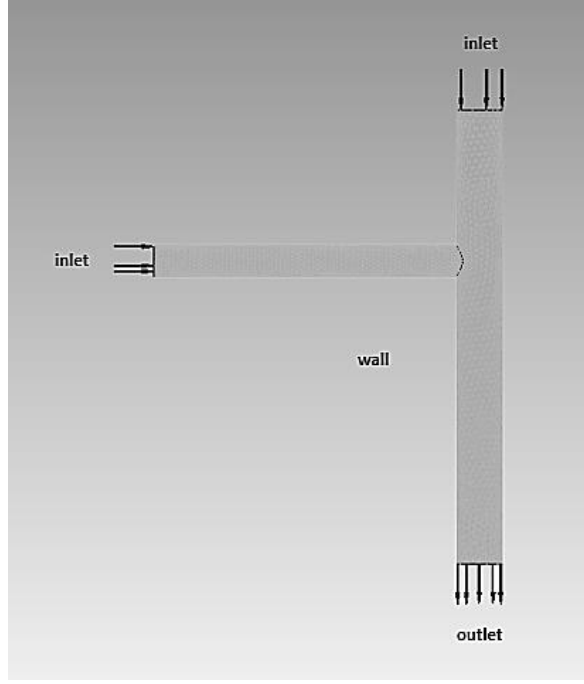
Modelin geometrisi ve çözüm ağı oluşturulduktan sonra çözümlenecek problemin ana hatlarının belirlenmesi aşamasına geçilir. Bu anlamda problemin fiziksel koşulları, başlangıç ve sınır şartları, kullanılacak sayısal yöntemin detayları, akışkana ve akıma ait temel parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. ANSYS CFX yazılımı detaylı ve gerçekçi koşulların oluşturulabilmesi için yeterli derecede seçenek sunmaktadır. Yazılımın inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılacak genel yeterlilikleri aşağıdaki gibi listelenebilir;

- Zamana bağlı (transient) ya da zamanda bağımsız (steady) çözümler yapılabilir,
- Sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılamaz akım durumları için çözüm yapılabilir,
- Laminar ya da türbülanslı akım koşulları çözümlenebilir,

- Newtonian ya da non-newtonian akışkan modellemeleri yapılabilir,
- Basıncı boru akımları ya da serbest yüzeyli açık kanal akımları çözümlenebilir,
- Akışkan içerisinde katı madde hareketi modellenenebilir,
- Katı sıvı etkileşimi içeren çözümler yapılabilir

Çözümlenecek akım durumuna göre çözümün zamana bağlı mı yoksa zamandan bağımsız ortalama sonuçlar verecek şekilde mi çözümlenmesi gerektiğine karar verilmelidir. Akımın zamanla değişmeyen bir davranış sergileyeceğinin ön görüldüğü durumlarda zamandan bağımsız çözümler daha düşük hesaplama yükü getirdiği için pratik uygulamalarda faydalı olmasına karşın anlık akım davranışına yönelik bilgi veremeyeceği için fiziksel model destekli HAD analizlerinde zamana bağlı çözümlerin tercih edilmesi gerekebilmektedir.

HAD çözümünün gerçek koşullara uygun olarak modellenmesi için çözüm alanına ait başlangıç ve sınır şartlarının özenle belirlenmesi gerekmektedir. Çözüm alanına giren veya çıkan akımın hızı, debisi, basıncı, katı çeperle temas eden bölgelerde pürüzlülük, adezyon ve akışkanın aynı anda hem giriş hem çıkış yapmasına izin veren sınır koşulları gibi çözüm yapılan olayın fiziğine uygun sınır şartları uygulanabilmektedir (**Şekil 2.6**). “Dirichlet” tipi ilgili parametrenin doğrudan değerini yansıtan sınır şartları tanımlanabileceği gibi parametrenin değişimini ifade eden “Neumann” tipi sınır şartları da uygulanabilmektedir.



Şekil 2.6. *Tipik bir basınçlı boru HAD modeli üzerinde sınır şartlarının gösterimi*

Türbülans, akım parametrelerinin (hız, basınç, sıcaklık...) tahmin edilemez biçimde çalkantılar oluşturduğu henüz tam olarak çözülememiş bir akışkanlar mekaniği problemidir. Doğrudan analitik çözümünün yapılması mümkün olmasa bile matematiksel ve istatistiksel bir takım yaklaşımlar türetilerek farklı hassasiyet mertebelerinde yaklaşık modeller oluşturulmuştur. Sayısal çözümlemenin sağladığı bir diğer avantaj ise türbülanslı akım koşulları için farklı türbülans modelleri için probleme uygun modelin belirlenerek çözümün yapılabilmesidir. ANSYS CFX yazılımı içerisinde Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ve Large Eddy Simulation (LES) türbülans benzetim modellerin kullanılabilmesi mümkündür. Mühendislik problemlerinde problemin yapısına uygun genellikle olarak $k-\epsilon$, $k-w$, SST (Shear Stress Transport) ve bunların düzenlenmiş biçimleri kullanılmaktadır. Üzerinde çalışılan akım durumuna uygun türbülans modeli öngörülemiyor ise birkaç farklı model tercih edilerek çözüm yapılmalı ve sonuçlar fiziksel model deneyleri ile doğrulanarak uygun türbülans modeli belirlenmelidir [3].

İdeal bir HAD çözümü bir takımı gereklilikleri sağlamak zorundadır. Sayısal benzetimin yakınsak bir çözüm sağlaması nedeniyle gerçek çözüm ile

arasında belirli mertebelerde hata payı bulunacaktır. Gerçek çözüm ile sonlu farklar yöntemi ile yapılan çözüm arasında denklemlerin ayrıklaştırılması noktasında tercih edilen hassasiyet mertebesi nedeniyle “kesme hatası (truncation error)” olarak tanımlanan bir hata ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle hassas çözüm gerektiren çözümlerde uzayda ve zamanda en az ikinci dereceden hassas ayrıklaştırma metotları kullanılmaktadır. Çözümde beklenen bir diğer gereklilik ise “tutarlılık (consistency)” sağlamasıdır. Çözümün tutarlı olduğunu söyleyebilmek için uzayda ve zamanda ayrıklaştırılan sonlu küçük farkların limiti sıfıra giderken kesme hatasının da limitinin sıfıra gitmesi gerekmektedir. Ayrıca bilgisayar ve yazılım kaynaklı oluşabilecek, işlem yapılan sayıların hane sayısı nedeniyle oluşan “yuvarlama hatası (round-off error)” olarak bilinen hatalara neden olabilmektedir. Bu hatanın daha düşük mertebelerde kalmasını sağlamak amacıyla yazılımın “çift hassasiyet (double precision)” sayısal veri tanımı kullanması ve böylelikle daha fazla hane ile işlem yapması gerekmektedir.

Genel olarak HAD metodu eğer doğru kullanılırsa oldukça hassas ve güvenilir sonuçlar verebilmektedir. Fiziksel koşulların, sınır ve başlangıç şartlarının gerçekçi bir biçimde belirlenmesi, model için oluşturulan sayısal ağın probleme özgü koşulların göz önüne alınarak oluşturulması ve uygun sonlu elemanlar yaklaşımının kullanılması ile fiziksel model hassasiyetinde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesi mümkündür. Burada önemli olan bir diğer nokta hesaplama yükünün gereğinden fazla ya da az olmaması gerektiğidir. Bu nedenle HAD metodu kullanılarak çözümlenecek model ve olayın fiziki noktasında gerekli bilgi ve tecrübeye sahip olunması gerekmektedir.

3. LİTERATÜR

Rüzgâr yükü, köprü ve köprüyol gibi yüksek ve geniş açıklıklı yapıların tasarımında göz ardı edilmemesi gereken önemli bir dinamik yüküdür. Özellikle ulaştırma, yapı ve akışkanlar mekaniği gibi farklı disiplinlerin bir arada değerlendirilmesini gerektirdiği için özel bir mühendislik problemi olarak gösterilebilir. Gelişen mühendislik teknikleri ve teknoloji ile birlikte artan ihtiyaçlara paralel olarak köprü ve köprüyol tasarımları daha geniş ve daha yüksek açıklıkları aşmak için sınırları zorlamaktadır. Şu anda dünyanın en yüksek köprüyolu olarak kabul edilen 2004 yılında Fransa’da inşa edilen Millau Viyadüğü toplam 2450 m uzunluğa ve maksimum 343 m yerden yüksekliğe sahiptir [4]. Artan yükseklik ve genişlik sonucunda yapılara etkiyen rüzgâr yüklerinin de çok daha kritik seviyelere ulaştığı göz önüne alınırsa rüzgâr yükü dikkate alınmadan yapılan tasarımların yapının güvenliği açısından öngörülemez sonuçlara yol açabileceği aşikârdır.

Sanayi devrimi ile birlikte inşaat teknolojisi ve kullanılan malzemelerin yapısı da hızlı bir değişim göstermiştir. Özellikle endüstriyel çeliğin yapılarda kullanılmaya başlaması daha hafif ve geniş açıklıklı tasarımlar yapılmasına imkân sağlamıştır. 18. ve 19 yüzyılda çok sayıda orta açıklıklı asma köprü inşa edilmiş ancak bu köprülerin büyük bölümü rüzgâr etkileri nedeniyle zarar görmüş veyahut yıkılmıştır.

Amerika’da 1940 yılında inşa edilen Tacoma Köprüsü, mühendisler açısından köprü ve köprüyolların aerodinamik tasarımına yönelik bir milat olarak kabul edilen çarpıcı bir örnektir. 1524 m uzunluğundaki asma köprü, 140 km/s hızındaki rüzgâra dayanabilecek şekilde tasarlanmış olmasına rağmen yapımından sonra 67 km/s hızındaki rüzgâr karşısında rezonansa girerek yıkılmıştır (**Şekil 3.1**). Bunun nedeni olarak köprünün açıklık genişlik oranı ve kullanılan boyuna “I” kesitli çelik profillerinin rüzgârın geçişine izin vermemesi gösterilmiştir. Köprünün yıkılmasında doğrudan etkiyen rüzgâr yükü miktarının değil, rüzgârın oluşturduğu hava burgacı yapılarının neden olduğu dinamik yüklerin köprüyü rezonansa sokması olarak belirlenmiştir. Daha sonrasında köprü rüzgâr geçişine izin verecek kafes tipi kiriş sistemleri ile 1950 yılında tekrar inşa edilerek faaliyete geçirilmiştir.

Tacoma Köprüsünde yaşanan bu problem köprü ve köprüyol tasarımlarında mühendisleri, rüzgâr yükünün sadece statik bir yük olmadığını kabul ederek dinamik etkilerinin de daha dikkatle incelenmesi yönünde yeni arayışlara itmiştir [5,6].

Doğal rüzgâr çalkantıları ve Tacoma Köprüsü örneğinde olduğu gibi zamana bağlı anlık rüzgâr tepkileri yapı üzerinde titreşim ve burulma etkileri yaratmaktadır. Bu nedenle köprü tasarımlarında rüzgar kaynaklı hareketli yüklerin tanımlanması amacıyla için bir takım analitik, ampirik ve nümerik çalışmalar yapılmıştır [7,8].

Özellikle geniş açıklıklı asma köprülerin tasarımında yatay statik rüzgar yükü belirleyici kriter olmaktadır. Açıklığın 1000 m'yi geçtiği durumlarda kablo boyları uzadığı için kablolarda meydana gelebilecek yatay deformasyonlar sonucu oluşan geometrik non-lineer etkiler rijitliği önemli ölçüde düşürerek rüzgâr karşısında köprüyü daha hassas hale getirmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, 100 m/s rüzgâr hızı karşısında en uzun kablonun elastisite modülünde 0 m/s rüzgâr hızı ile karşılaştırıldığında %50 oranında bir düşüş meydana geldiğini görülürken kısa kablolarda bu etki çok düşük seviyelerde oluşmaktadır. Rüzgâr hızı arttıkça ve kablo boyu uzadıkça kabloların elastisite modülünde meydana gelen düşüş artmaktadır. Ayrıca kablolarda meydana gelen rüzgâr yükünün etkisi köprü girişlerindeki daha kritik olduğu görülmüştür bu nedenle geniş açıklıklı asma köprülerde kablolardaki rüzgâr yükünü düşürmek öncelikli tasarım ölçütü olmaktadır [9].



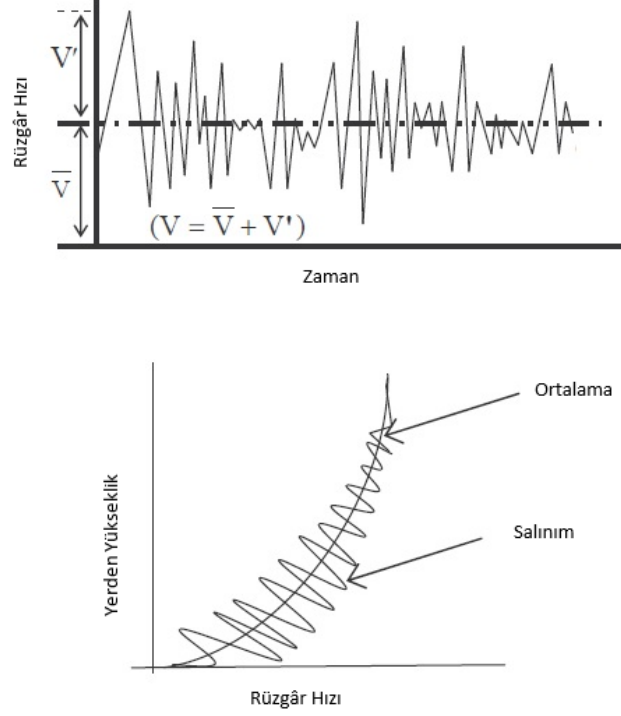
Şekil 3.1. Tacoma Köprüsünün rüzgâr etkisiyle oluşan salınımı

Kaynak: <http://faculty.plattsburgh.edu/margaret.campion/seconded/second/Kent/Kent.html>

Köprü aerodinamik tasarımında göz önüne alınması gereken bir diğer eleman ise köprü tabliyesinin yapısı ve mesnetleme çeşitleridir. Tacoma Köprüsü örneğinde olduğu gibi tabliyenin rüzgâr geçişine izin vermeyen bir yapıda tasarlanması köprü'nün yıkılmasındaki başlıca etken olmuştur. Bu amaçla farklı çelik kafes yapıları ve sığ kutu tasarımları gibi çeşitli tabliye yapıları rüzgâr tüneli testlerine sokularak aerodinamik çalışmalar yapılmıştır [10,11].

Rüzgâr, rastgele yapıda ve zamana bağlı değerlendirilmesi gereken bir dinamik etki olarak hesaba katılmalıdır. Tasarım sürecinde ortalama bir rüzgâr hızı ve buna ek olarak anlık hız salınımları dikkate alınmalıdır. Rüzgâr hız profili, yükseklik ve zaman ile değişmekle birlikte arazinin fiziksel yapısı da profil yapısı üzerinde belirleyici olmaktadır (Şekil 3.2). Rijit yapılar söz konusu olduğunda doğrudan statik bir rüzgâr yükü yaklaşımı yeterli olabileceği gibi rüzgâr etkisi karşısında hassas esnek yapılar tasarlanırken yapının frekansı, rüzgâr-enerji spektrumu, ortalama zaman etki alanı gibi parametreler önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle rüzgâr tasarım hızı belirlenirken ortalama hız ile birlikte anlık türbülans

salınımları da dikkate alınmalıdır. Yapı üzerindeki titreşimleri yaratan türbülans etkileri gelişigüzel yükler olması nedeniyle istatistiksel yöntemler ile ele alınır.



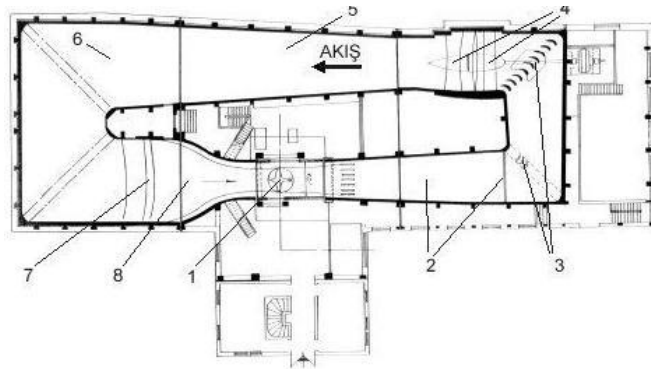
Şekil 3.2. Rüzgâr hızının zamana ve yüksekliğe bağlı değişimi

Geniş açıklıklı köprü ve köprüyol gibi yapılar rüzgâra karşı oldukça hassas esnek yapılardır. Birinci doğal frekansları oldukça düşük olan bu tür yapılarda açıklık oranı arttıkça doğal frekansları ters orantılı olarak düşmektedir. Bu sebeple, dinamik rüzgâr yükleri sonucu köprü üzerinde oluşabilecek düşük frekanslı titreşimler yapının rezonansa girerek zarar görmesine neden olabilmektedir.

4. YÜKSEK YAPILARA ETKİYEN RÜZGÂR YÜKLERİNİN BELİRLENMESİNDE RÜZGÂR TÜNELİ VE HAD UYGULAMALARI

Yüksek yapılara etkiyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi ve yapının aerodinamik performansının incelenmesi noktasında yakın geçmişe kadar uygulanan en güvenilir yöntem rüzgâr tüneli testleri olmuştur. Rüzgâr tüneli testi incelenen yapının boyutlarına bağlı olarak ölçekli bir modelinin oluşturularak laboratuvar şartlarında yapay olarak oluşturulan rüzgâr etkisine maruz bırakılması olarak tanımlanabilir. Rüzgâr tünelleri önceleri yalnızca havacılık alanında kullanılmaktayken daha sonrasında yüksek yapılar ve köprüler gibi inşaat ve ulaştırma alanlarında da kullanılmaya başlamıştır. Rüzgâr tüneli testlerinde, tünel boyutları ve ölçüm sistemleri tünelin yeterliliğini belirlemektedir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında, atmosferik sınır tabakanın oluşturulması, ses altı ve sıkıştırılmaz akım koşulları yeterli olurken havacılık ile ilgili uygulamalarda farklı akım ve sıcaklık koşullarının uygulanabilir olması gerekmektedir.

Ülkemizde atmosferik sınır tabakanın oluşturulması için gerekli uzunluğa sahip tek rüzgâr tüneli kapalı devre bir tünel olan TÜBİTAK-SAGE'ye bağlı Ankara Rüzgâr Tüneli'dir [12] (Şekil 4.1). 90 m/s'lik rüzgâr hızının benzetiminin yapılabildiği deney odası 6.10 m uzunluğa ve 3.05 m'ye 2.44 m boyutlarında kesit alanına sahiptir. Ancak tünel deney odasının uzunluğu nedeniyle atmosferik tabakanın oluşturulması ancak kesit girişine pürüzlülük sağlayacak geometrik şekiller yerleştirilerek mümkün olabilmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. TÜBİTAK-SAGE'ye bağlı Ankara Rüzgâr Tüneli



Şekil 4.2. *Atmosferik sınır tabaka rüzgâr tüneli ve arazi pürüzlülüğü (University of Western Ontario) [13]*

Yüksek yapılara uygulanan üç farklı rüzgâr testi yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi modellenen yapı üzerinde basınç ölçümleri yapılarak yapıya etkiyen rüzgâr kuvvetlerin yarattığı yüzey basınç farklarının belirlenmesidir. Bir diğeri yapının tabanına yerleştirilen ölçüm sistemleri sayesinde yapıda meydana gelen tepkilerin ve titreşimlerin ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu iki testte de yapı rijit olarak modellenmektedir. Üçüncü yöntemde ise yapının rijit davranışı değil yapının rüzgâr yükü ile etkileşimi aeroelastik metot ile modellenmektedir. Bu nedenle daha gerçekçi sonuçlar vermesine karşın maliyeti ve modelleme zorluğu nedeniyle daha az tercih edilmektedir.

Rüzgâr tüneli testlerinde deney odası boyutları nedeniyle yapının ölçeklenerek modellenmesi gerekmektedir. Bu ölçeklendirme sonucunda gerçekçi akım koşullarının yansıtılması için akım parametrelerinin de uygun şekilde ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Reynolds, Richardson, Rossby, Prandtl ve Eckert gibi çeşitli boyutsuz ifadeler kullanılmaktadır. Burada en önemli benzetim unsuru Reynolds sayısı olmakla birlikte büyük boyutlu yüksek yapıların ölçekli modellerinde gerekli Reynolds sayısının test koşulları altında yakalanması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle atmosferik sınır tabakanın tamimiyle olmasa bile olabildiğince gerçeğe yakın biçimde modellenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra modellenecek yapının çevresel koşulları, topoğrafyası ve arazi yapısına bağlı

sınır tabaka koşulları modele dâhil edilmelidir. Ayrıca rüzgâr doğrultusunda modelin izdüşümü alanı deney odası kesit alanının %8'inde fazla olmamalı ve oluşabilecek tüm ölçeklerdeki türbülans uzunluklarının sağlanması gerekmektedir [14,15].

Rüzgâr tüneli testleri ile yüksek yapıların aerodinamik özelliklerinin tayinine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Oldukça güvenilir ve etkili bir yöntem olmasının yanı sıra beraberinde bazı dezavantajları da barındırmaktadır. En önemlisi çoğunlukla ölçeklendirilmiş modellerin kullanılması gerekliliğidir. Model ölçeğine paralel olarak akım şartları ve sınır koşullarının da değiştirilmesi gerekmektedir ki bu da elde edilecek sonuçların belirli oranlarda olması gereken değerlerden farklı olabileceği anlamına gelmektedir. Bir diğer dezavantaj tünel boyutlarından meydana gelen kapasite yetersizlikleri olarak gösterilebilir. Ayrıca ölçüm donanımlarının hassasiyeti, nitelik ve nicelik anlamında eksikliklere neden olabilmektedir.

Son yıllarda rüzgâr tüneli testlerinin yanı sıra bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları da kullanılmaya başlamış ve yapılan çalışmalar neticesinde oldukça gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen sonlu elemanlar uygulamaları, farklı sınır koşulu uygulamaları ve başarılı türbülans kapatma yöntemleri ile birlikte yüksek performanslı bilgisayarlar kullanılarak her türlü geometrik yapı için yüksek hassasiyette analizler yapabilmek mümkün hale gelmiştir.

Gerçekleştirilen sayısal model analizlerinde önemli noktalardan biriside uygun türbülans modeli ve sınır koşullarının oluşturulması olmaktadır. Özellikle Reynolds ortalamalı türbülans yaklaşımları (Reynolds Averaged Navier-Stokes) (RANS) bu tür büyük boyutlu yapıların aerodinamik analizlerinde yetersiz kaldığı bunun yerine Large Eddy Simulation (LES) yaklaşımının daha geçerli ve gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. RANS çözümlerinin kararsız vorteks salınımlarını yakalayamadığı ve sadece zamandan bağımsız sonuçlar üretebildiği belirlenmiştir [16,17]. Ayrıca LES çözümlerinin daha büyük çözüm ağı elemanları kullanılsa bile daha isabetli sonuçlar çıkardığı görülmüştür. Diğer taraftan LES yaklaşımı kullanılırken giriş sınır koşulunun tanımlanmasında türbülans

karakteristiğinin doğru şekilde yansıtılması büyük önem taşımaktadır [18]. LES modeli kullanılarak yapılan nümerik model çalışmalarında çözüm alanına giren rüzgâr akımın türbülans özellikleri hassas bir çözüm için doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Büyük türbülans bileşenlerinin çözümlenebilmesi için büyük boyutlu sayısal ağ elemanları kullanılmalıdır. Aynı şekilde akımdaki ayrışma bölgeleri, sınır tabaka yakınındaki bölgeler ve çevrıntilerin oluşabileceği bölgelerde ise daha küçük ve sık ağ elemanları kullanılmalıdır. Ancak nümerik LES çözümlerinde gerçekçi giriş türbülans koşullarının tanımlanabilmesi için boş sınır tabaka rüzgar tüneli hız ölçümlerinden elde edilen değerler kullanılabilir ve HAD çözümü üzerinde doğrulama yoluna gidilebilir [19].

Yüksek yapıların aerodinamik açıdan HAD metodu ile incelenmesi tasarım öncesi ve tasarım sonrası problemlerin belirlenip çözümlenmesi açısından da oldukça etkili sonuçlar vermektedir. Yapının aerodinamik performansını arttırmak için rüzgâr yükü etkilerini emen ve minimize eden yapı malzemesi geliştirmelerinin yanı sıra yapının geometrisi üzerinde yapılacak olan iyileştirmeler hem daha ekonomik hem de daha etkili olabilmektedir. Özellikle akımda ayrışmalara ve vortekslere neden olan köşeli yapı kesitleri yerine yumuşatılmış ya da daha farklı geometrik şekiller uygulanmış kesit analizleri, yapıya etkiyen sürüklenme kuvvetleri ve vorteks etkileri gibi aerodinamik kuvvetlerin azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür [20,21].

Yapılan çalışmalar çoğunlukla köprülerin dayanabileceği kritik rüzgâr yüklerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak rüzgâr kaynaklı etkilerin köprü üzerindeki trafik konforunu da etkileyebileceği ortaya konmuştur. Yüksek Reynolds değerleri altında k - ϵ türbülans modeli kullanılarak yapılan nümerik analizde hız ve basınç alanlarının belirlenmesi için SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) metodu kullanılmıştır. Oluşturulan zamana bağlı sayısal model oldukça kararsızlık barındırdığı için çözümde zaman adımları belirlenirken oluşturulan sayısal ağ boyutlarına ve serbest akım hızına bağlı olarak ayrıca Gevşetme Faktörü uygulanmıştır. HAD çözümünden elde edilen sonuçlar neticesinde köprülerde rüzgâr hızı kritik hızın altında olmasına rağmen oluşan titreşimler nedeniyle sürüş konforu etkilenmektedir [22].

HAD metodu ile yapılan rüzgâr yükü analizlerinde genellikle yapı tamamıyla rijit kabulü yapılarak sadece çözüm alanında meydana gelen hız ve basınç dağılımlarının dikkate alındığı görülmektedir. Diğer taraftan akışkanın katı ile etkileşiminin modellendiği FSI (Fluid Solid Interaction) nümerik çalışmalar da mevcuttur. Bu türden yapının rüzgâr etkisi karşısında gösterdiği reaksiyon ve buna bağlı akım davranışındaki değişimlerin gözlemlenebileceği çalışmalar oldukça detaylı ve özenli oluşturulmuş bir model yapısı ile mümkün olabilmektedir. Aynı zamanda akışkanlar dinamiği ve katı dinamiği bir arada çözümlenmesi gerektiği için hesaplama yükü ve zaman açısından oldukça yüksek bilgisayar performansı ve fiziksel detay gerektireceği aşikârdır. Bu şekilde aeroelastik rüzgâr tüneli metodunda olduğu gibi katı ve akışkan etkileşimli sayısal çözümler ile rüzgârın köprü üzerinde yaratabileceği salınımlar ve deformasyonlar daha gerçekçi bir biçimde tespit edilebilmektedir [23].

5. YÜKSEK YAPILARDA RÜZGÂR YÜKLERİ HESABI VE YÖNETMELİKLER

Köprü tasarımında rüzgâr yükünün etkisi ve hesap yöntemleri çeşitli yönetmeliklerde ortaya konulmuştur. Bu anlamda dünyada ve ülkemizde kullanılan başlıca yönetmelikler AASHTO LRFD, ASCE 7-02, EN 1991, TS EN 1991, TS 498 ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliğidir. TS 498 yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerlerini ortaya koyarken özellikle binalar ve çatı elemanlarında meydana gelen rüzgâr yüklerinin hesabı için temel formül katsayı ve çizelgeleri içerisinde barındırmaktadır. Aynı şekilde ASCE 7-02 yönetmeliğinde de yapılar için minimum tasarım yüklerinin belirlenmesine yönelik hesap detayları ve rüzgâr yapının geometrik şekli, arazi yapısı, bölgesel rüzgâr haritası ve diğer dinamik etkilerini içermektedir. AASTHO LRFD ve EN 1991 yönetmelikleri ise özellikle köprü ve köprüyol gibi ulaştırma yapılarında rüzgâr etkilerinin belirlenmesi noktasında detaylı Çizelge ve hesap yöntemlerini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan TS EN 1991 ve İstanbul Büyükşehir Belediyesinin hazırladığı Yüksek Binalar Rüzgâr yönetmeliği bir bakıma EN 1991 yönetmeliğinin çevrilmiş hali olarak ülkemizde kullanılmaktadır. Genel olarak AASTHO LRFD ve EN 1991 arasında çok büyük farklar bulunmamakla birlikte bir takım hesap detaylarında farklılıklar gösterebilmektedir. EN 1991 şartnamesinde özellikle çok geniş açıklıklı köprüler için tasarım detaylarında bir takım limitler ve eksiklikler bulunmaktadır. Türkiye’de ulaştırma yapılarına etkiyen yüklerin hesabı için AASTHO LRFD Türkçe sürümü kullanılmaktadır.

Avrupa Birliği EN 1991 (Eurocode) yönetmeliğinde özellikle köprülere etkiyen rüzgâr yükleri ve tasarım ölçütleri hem köprü tabliyesi hem de köprü ayakları için belirlenmiştir. Buna göre köprü inşa edildikten sonra servis ömrü içerisindeki trafik yükü altında ve trafik koşulları ihmal edildiği durumların yanı sıra oldukça kritik olan inşa süreci için rüzgâr etkisi ayrı ayrı değerlendirilmektedir. EN 1991 yönetmeliğine göre yapıya etkiyen genel rüzgâr kuvveti denklem 2.1 deki gibi ifade edilmiştir.

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (5.1)$$

Burada;

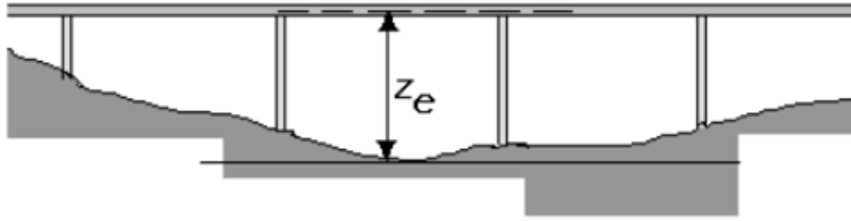
F_w ; rüzgâr kuvveti,

$c_s c_d$; yapısal faktör (eğer dinamik bir tepki analizine gerek yok ise = 1),

c_f ; kuvvet katsayısı (tabliye ve köprü ayaklarının geometrisine göre),

$q_p(z_e)$; z_e referans yüksekliğindeki (Şekil 5.1) hız basıncının pik değeri,

A_{ref} ; yapının referans alanı (tabliye ve köprü ayakları),



Şekil 5.1. Referans yüksekliği

Ortalama ve anlık türbülans etkilerinin dahil edildiği z yüksekliğindeki hız basınç pik değeri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (2.2).

$$q_p(z) = [1 + 7 I_v(z)] \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = c_e(z) q_b \quad (5.2)$$

Burada;

ρ ; havanın yoğunluğu (rakım, sıcaklık ve rüzgâr fırtınaları süresince beklenen bölgesel barometre basıncına göre değişiklik göstermekle birlikte tavsiye edilen değeri $1,25 \text{ kg/m}^3$)

$v_m(z)$; z yüksekliğindeki ortalama rüzgâr hızı,

$I_v(z)$; z yüksekliğindeki türbülans şiddeti, 2.3 ve 2.4 eşitliklerinde ifade edildiği gibi türbülans standart sapma oranının ortalama hıza bölünmesi ile elde edilir,

$c_e(z)$; z yüksekliğindeki maruziyet (exposure) faktörü,

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \ln(z/z_0)} ; \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (5.3)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) ; \quad z \leq z_{\min} \quad (5.4)$$

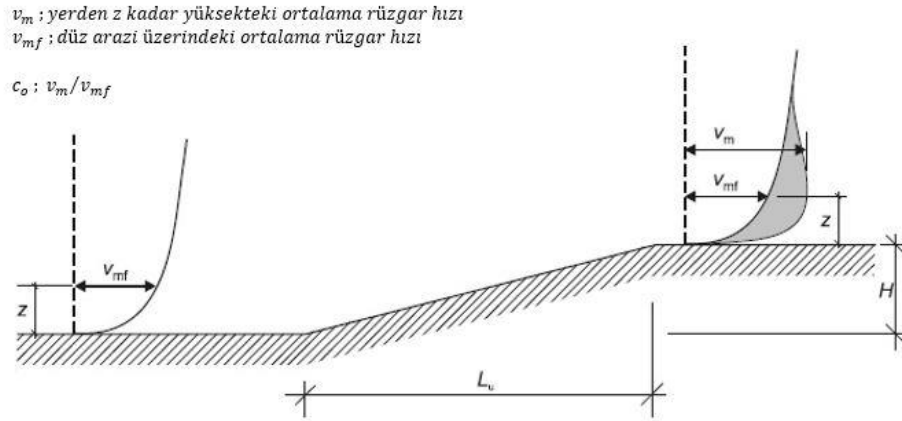
Burada;

k_I ; türbülans faktörü (ulusal belirlenmiş parametre), tavsiye edilen değeri 1,

$c_o(z)$; oreography faktörü (Şekil 5.2),

z_0 ; pürüzlülük uzunluğu (Çizelge 5.1),

σ_v ; dinamik rüzgâr hızı (Dinamik rüzgâr hızı rüzgâr türbülansı olarak adlandırılır. Rüzgâr türbülansı, ortalama değeri sıfır olan normal dağılımlı rastgele (random) süreç olarak modellenir.



Şekil 5.2. Oreography faktörü ve rüzgâr hız profilleri

z yüksekliğindeki ortalama rüzgar hızı ($v_m(z)$), eşitlik 2.5'te gösterildiği şekilde hesaplanır;

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b \quad (5.5)$$

Burada;

$c_o(z)$; yüksekliğe bağlı pürüzlülük faktörü, ulusal olarak belirlenmiş bir değer kullanılabilir, ayrıca aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Çizelge 2);

$$c_r(z) = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right); \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (5.6)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}); \quad z \leq z_{\min} \quad (5.7)$$

Burada;

k_r ; arazi faktörü, pürüzlülük uzunluğuna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (5.8)$$

Burada;

$z_{0,II}$; arazi kategorisine bağlı belirlenir (Çizelge 2) (örneğin arazi kategorisi II için 0.05 m),

z_{\min} ; minimum yükseklik,

z_{\max} ; maksimum yükseklik (200 m olarak alınır)

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülük uzunlukları ve minimum uzunluklar

Arazi Tipi No	Arazi Tipi	z_0 (m)	z_{\min} (m)
0	Denize açık kıyı şeritleri	0.003	1.0
I	Göl çevreleri veya engebesiz düz ve geniş alanlar	0.01	1.0
II	Seyrek ağaçların ve yapıların olduğu ova, çayır tipi Alanlar (engebe aralıkları ortalama engebe yüksekliğinin 20 katından fazla)	0.05	2.0
III	Köyler, banliyöler, ormanlık alanlar (engebe aralıkları ortalama engebe yüksekliğinin 20 katından az)	0.3	5.0
IV	Şehir merkezleri ve benzeri en az %15 oranında ortalama yüksekliği 15m ve üzeri yapılarla kaplı alanlar.	1.0	10.0

Arazi kategorisine göre yerden 10 m yükseklikteki temel rüzgâr hızı (v_b) aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$v_b = (c_{prob}) c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (5.9)$$

Burada;

$v_{b,0}$; temel rüzgâr hızının temel değeri (açık alanda yerden 10 m yükseklikteki herhangi bir doğrultuda ölçülen ve 10 dakikalık ortalama karakteristik rüzgâr hızı),

c_{dir} ; doğrultu faktörü (ulusal olarak belirlenmiş bir değer olabilir, tavsiye edilen değeri 1'dir),

c_{season} ; mevsim faktörü (ulusal olarak belirlenmiş bir değer olabilir, tavsiye edilen değeri 1'dir.),

c_{prob} ; olasılık faktörü (tasarım aşılma olasılığı süresine T (return period) göre belirlenmektedir) aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$c_{prob} = \left(\frac{1-K \ln(-\ln(1-p))}{1-K \ln(-\ln(0.98))} \right)^n \quad (5.10)$$

Burada K ve n, ulusal olarak belirlenmiş değerler olabilir, tavsiye edilen değerleri sırasıyla 0,2 ve 0,5'dir.

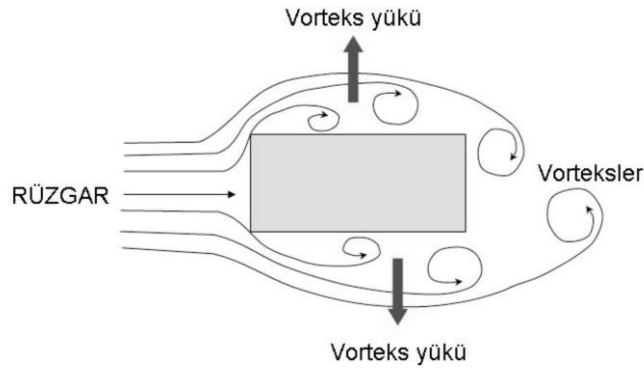
Örneğin İstanbul Atatürk Havalimanında her 1 dakikada için yapılan ölçümlere göre İstanbul ve çevresi için temel rüzgâr hızı 25 m/s olarak belirlenmiştir.

Köprü tabliye ve ayaklarına etkiyen rüzgâr yükünün hesaplanmasında ise sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulanır;

- Temel rüzgâr hızı (v_b) ve rüzgâr hız basıncı pik değeri ($q_p(z)$), uygun c_{dir} , c_{season} , $v_{b,0}$ ve c_{prob} değerleri kullanılarak belirlenir,
- Arazi kategorisi ve referans yüksekliği (z) kullanılarak, z yüksekliğindeki ortalama rüzgâr hızı hesaplanır,
- Hesaplanan referans alanı (A_{ref}) ve seçilen c_s , c_d ve c_f değerleri kullanılarak rüzgâr kuvveti (F_w) belirlenmiş olur.

Belirlenen rüzgâr yükü tasarım sürecinde statik bir yük olarak uygulanır. Ancak rüzgârın dinamik etkilerinin de analiz edilerek belirlenmesi gerekmektedir.

Rüzgârın oluşturduğu hava akımı bir yapının yan yüzleri etrafından geçerken **Şekil 5.3**'te şematik olarak gösterildiği türde vorteksler oluşturur. Vorteksler değişken olarak (önce bir yan yüzde, sonra diğer yan yüzde) oluştuğu için vortekslerin yarattığı dinamik yükler de değişken yönlü olup rüzgâr akış yönüne dik doğrultuda etkirler. Vorteks yükleri çok belirgin ve dar bir frekans bandında etkidiği için sinüzoidal bir yük olarak tanımlanabilirler.



Şekil 5.3. Hava akımı nedeniyle yapının yan yüzlerinde oluşan vorteksler

Vorteks yüklerinin frekansı, binanın rüzgâra dik doğrultudaki doğal frekansına yakın ise yüksek binalarda bu doğrultuda büyük genlikli titreşimler oluşabilir. Aşağıdaki durumlarda vorteks titreşimleri ihmal edilebilir:

$$\frac{h}{d_{min}} < 6, \quad v_{cr} > 1.25v_m(H) \quad (5.11)$$

Bu bağıntılarda h yapının yüksekliğini, d_{min} rüzgâra dik doğrultudaki en kısa genişliğini, $v_m(H)$ yapının tepesindeki ortalama rüzgâr hızını (m/s), v_{cr} ise aşağıda tanımlanan kritik rüzgâr hızını (m/s) göstermektedir.

$$v_{cr} = \frac{b f_{oy}}{s_t} \quad (5.12)$$

Bu bağıntıda, b rüzgârın geldiği yüzdeki genişliğini (m), f_{oy} binanın rüzgâra dik doğrultudaki doğal frekansını (Hz), S_t ise Strouhal sayısını göstermektedir.

Vorteks titreşimleri rezonans tipi titreşimler olduğu için, genlikleri çok yüksek değerlere ulaşabilir. Yukarıdaki kriterler çerçevesinde vorteks olasılığı varsa, binaya vortekslerin oluşmasını önleyici aerodinamik elemanlar veya vorteks titreşimlerinin genliğini azaltıcı sönüm sistemleri eklenir.

Yüksekliğinin genişliğine oranı 4 veya daha büyük ve başka bir yüksek binanın arkasında yer alan yüksek binalar, öndeki binanın rüzgar akışında yaptığı etkiler nedeniyle ilave türbülans etkilerine maruz kalırlar. Bu etki Rüzgâr Kuyruğu Etkileri (Wake Buffeting) olarak adlandırılır. Rüzgâr kuyruğu etkileri aşağıdaki iki koşuldan birinin sağlandığı durumlarda ihmal edilebilir:

- İki bina arasındaki uzaklığın, öndeki binanın rüzgâra dik doğrultudaki genişliğinin 25 katından daha fazla olması durumu,
- Binanın (arkadaki bina) doğal frekansının 1,0 Hz'den daha büyük olması durumu.

Aksi takdirde rüzgâr kuyruğu etkileri göz önüne alınmalıdır. Çözüm için rüzgâr tüneli deneyleri veya uzman tavsiyesi gerekebilir [24-28].

Sonuç itibarıyla, rüzgar yüklerinin belirlenmesi ve yapılar üzerine etkisinin hesaplanması için oluşturulmuş yönetmelikler çoğunlukla bölgesel katsayılar ve ampirik yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Elbette ki belirli bir bilgi ve birikim dâhilinde hazırlanan yönetmelikler yeterli ve güvenli tarafta sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak rüzgârın dinamik bir yük olması sebebiyle bu noktada rüzgâr yüküne eş değer bir statik yük belirlenmesi her durum ve koşul için yeterli olmayabilir. Bu nedenle rüzgâr tüneli testleri ve HAD metodu kullanılarak yapılan analizlere ihtiyaç duyulmaktadır.

6. OSMAN GAZİ KÖPRÜSÜNE ETKİ EDEN RÜZGÂR YÜKLERİNİN HAD METODU İLE BELİRLENMESİ

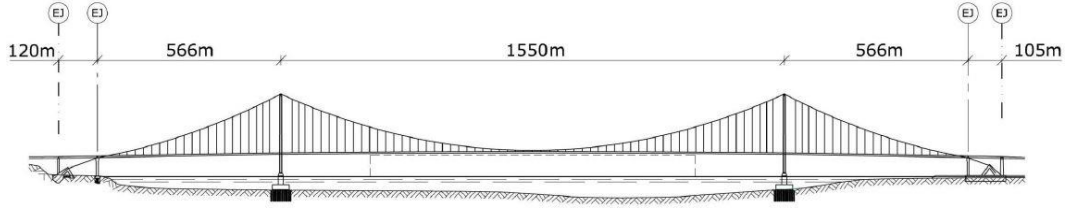
6.1 Osman Gazi Köprüsü Genel Bilgiler

Osman Gazi Köprüsü, 420 km'lik Gebze-İzmir Otoyolu Projesi dâhilinde Marmara Denizi'nin doğusunda İzmit Körfezi'nin Dilovası Dil Burnu ile Altınova'nın Hersek Burnu arasında yapılması planlanan asma köprüdür (**Şekil 6.1**). Tamamlandığında dünyanın en uzun açıklıklı dördüncü asma köprüsü olacak olan Osman Gazi Köprüsünün orta açıklığı 1550 metre ve toplam uzunluğu ise 2682 metredir (**Şekil 6.2**).



Şekil 6.1. Osman Gazi Köprüsünün konumu

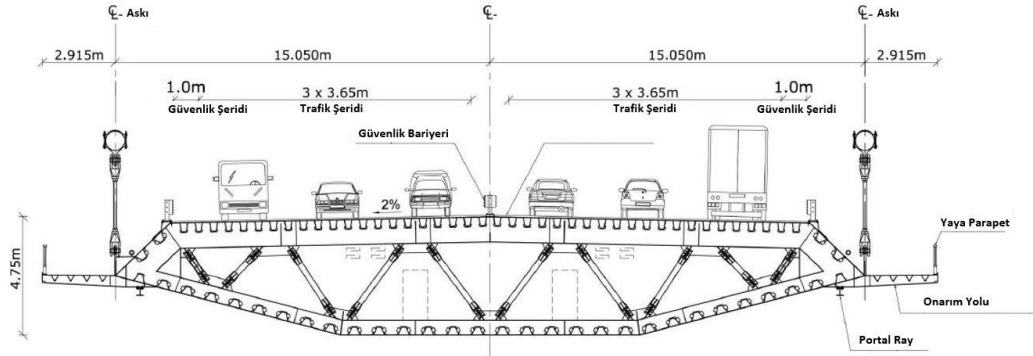
Gebze - İzmir otoyolu projesinin hazırlıklarına 2008 yılı başında yayınlanan ihale ilanı ile başlanmış olup Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğunda 2010 yılında yapılan ihale ile Osman Gazi köprüsünün yapımını OTOYOL Yatırım ve İşletme A.Ş. ve IHI Corporation, köprünün tasarımı ise COWI firması üstlenmiştir. Tasarımın denetimi noktasında ise Halcrow ve Ty-Lin firmaları görev almaktadır. 2013 yılında yapımına başlanan köprünün 2016 yılında bitirilmesi planlanmaktadır.



Şekil 6.2. Osman Gazi Köprüsünün genel yerleşim planı ve boyuna uzunlukları

Kaynak: OTOYOL Yatırım ve İşletme A.Ş.

Köprüünün tabliyesi kapalı çelik kutu tabliye ve kuleler boyunca herhangi bir dikey mesnet kullanılmadan sürekli olacak biçimde tasarlanmıştır. Köprü üzerinde toplam genişliği 30 m olmak üzere 3+3 6 trafik şeridi bulunmaktadır (Şekil 6.3). Tasarım ömrü 100 yıl olarak belirlenen köprü, Eurocode şartnamelerine uygun olarak inşa edilmektedir. Şekil 6.4’de köprüünün bitmiş halinin nasıl görüneceği gösteren bir illüstrasyon bulunmaktadır. Köprüünün iki boyutlu tabliye rüzgâr tüneli testi FORCE Danimarka’da, üç boyutlu elastik kule testi BLWTL Kanada’da ve tam köprü modeli ise Politecnico di Milano İtalya’da gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Osman Gazi Köprüsü tabliyesinin kesit boyutları ve detayları

Kaynak: OTOYOL Yatırım ve İşletme A.Ş.



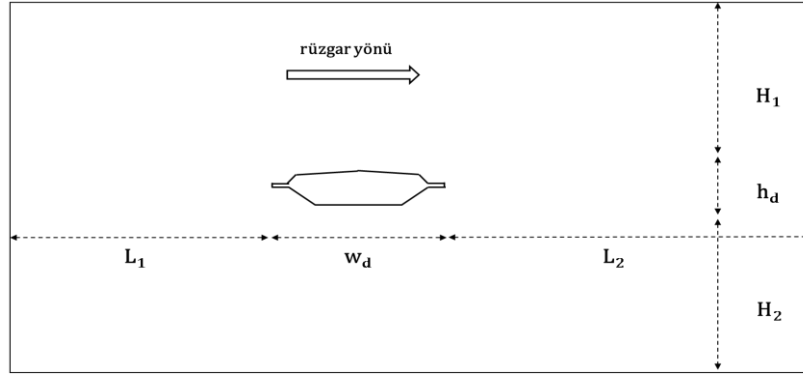
Şekil 6.4. *Osman Gazi Köprüsü projesinin bitmiş halinin illüstrasyonu*

Kaynak: <http://yapim.otoyolas.com.tr/?portfolio=kopru-tasarim-2-2>

Bu çalışmada, HAD metodu kullanılarak Osman Gazi Köprüsünün aerodinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, köprü tabliyesine ait iki boyutlu çözümler gerçekleştirilmiş ve ardından köprü üzerindeki araçlara etkiyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi amacıyla üç boyutlu çözümler uygulanmıştır. Çalışmanın devamında sayısal çözümlere ait detaylar ve sonuçlar verilmiştir.

6.2 Köprü Modelinin Çözüm Alanına ait CAD Geometrisinin Oluşturulması

Osman Gazi Köprüsünün HAD metodu ile aerodinamik özelliklerinin belirlenmesi ve yapıya etkiye rüzgâr yüklerinin belirlenmesi amacıyla ön analizler kapsamında, köprü ayakları ve asma köprüdeki kablolar model dışında bırakılarak sadece köprü tabliyesine ait iki boyutlu çözüm alanı oluşturulmuştur (**Şekil 6.5**). Köprü tabliyesi genişliği (w_d) toplam 31,6 m ve yüksekliği (h_d) 4,75 m olarak birebir ölçülerinde oluşturulmuştur.



Şekil 6.5. Osman Gazi Köprüsü tabliyesi 2 boyutlu çözüm alanı

Köprü tabliyesi kesitinin çözüm alanı içerisindeki konumu ve çözüm alanının boyutlarının belirlenmesi uygulanan sınır şartlarının ve oluşan akımın doğru çözülebilmesi açısından önem taşımaktadır. Çözüm alanı sınır koşulları, köprü tabliyesi çevresinde oluşacak akım yapısını etkilemeyecek mesafede bulunmalıdır. Bu kapsamda, literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalar çerçevesinde belirlenmiş kriterler bulunmaktadır [28,29]. Bu çalışmada kullanılacak olan çözüm alanı boyutları ve köprü tabliyesi konumu iki boyutlu tabliye analizlerinde farklı çalışmalarda kullanılmış olan değerler (Çizelge 6.1) göz önüne alınarak belirlenmiştir [30-35].

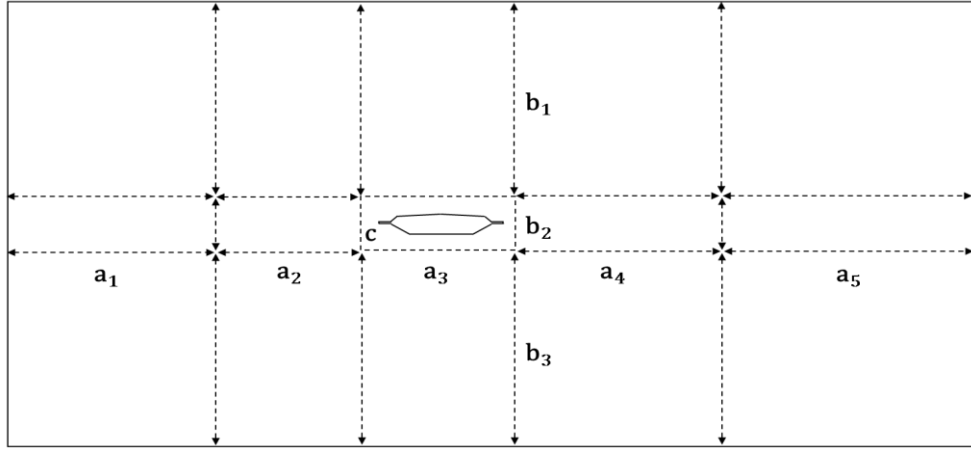
Çizelge 6.1. İki boyutlu tabliye analizlerinde kullanılmış olan tabliye konum değerleri

L_1	L_2	H_1	H_2	Çalışmalar
3,5 W	10,5 W	5 H	5 H	Wang ve ark.
5 W	10 W	3 H	3 H	Shirai ve Ueda
5 W	10 W	4,5 W	4,5 W	Abdel-Aziz
18 H	25 H	12 H	12 H	Haque
15 W	25 W	15 W	15 W	Keerthana ve Harikrishna
15 W	30 W	15 W	15 W	Fransos
3,5 W – 15 W	10 W – 30 W	3 H – 15 W	3 H – 15 W	Genel aralıklar

Çizelge 6.1 üzerinde verilen örnekler incelendiğinde köprü tabliyesinin çözüm alanı içerisinde giriş (inlet) kısmından tabliye genişliğinin (w_d) 3,5 ile 15 katı uzaklıkta (L_1), çıkıştan (outlet) ise tabliye genişliğinin 10 ila 30 katı uzaklıkta (L_2) konumlandırıldığı görülmektedir. Aynı şekilde üst (H_1) ve alt (H_2) sınır bölgeleri minimum 3 tabliye yüksekliği (h_d), maksimum 15 tabliye genişliğinde konumlandırılmıştır. Bu çalışmada ise, her çözüm için tek yönlü rüzgâr uygulanacağı ve hesaplama yükü dikkate alınarak L_1 , L_2 , H_1 ve H_2 boyutları sırasıyla $5w_d$, $10w_d$, $5h_d$ ve $5h_d$ olacak şekilde uygulanmıştır. Bu şekilde rüzgârın köprü tabliyesi üzerindeki etkilerinin, giriş ve çıkış sınır bölgelerinin etkisi altında kalmadan çözümlenmesi amaçlanmıştır. Tabliye üzerinde meydana gelmesi muhtemel akım yapılarının, akımın ayrılması ve tekrar tabliye yüzeyine oturması, ayrıca tabliye arkasında oluşacak ters akım ve vorteks yapılarının gözlemlenebilmesi için gerekli mesafenin çözüm alanında uygulanması gerekmektedir.

6.3 Köprü Modeline ait Sayısal Ağın Oluşturulması

Çözüm alanı geometrisi belirlendikten sonra iki boyutlu tabliye modeli için sayısal ağın oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Bu noktada, yapılandırılmış bir sayısal ağ yapısı kullanılarak, ağ elemanlarının kontrollü ve hesaplama yükü açısından verimli bir biçimde yerleştirilmesi sağlanmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere çözüm ağının oluşturulması aşaması bir HAD çözümünün en kritik ve çözümün sonuçlarına doğrudan etki eden aşamalarından biridir. Ağ elemanlarının boyut ve sayısal anlamda kontrolü kullanılan sayısal ağın kalitesi ve yeterliliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle çözüm alanı belirli bölgelere ayrılmış ve hexahedral (altı yüzlü) elemanlar kullanılarak her bölge için farklı eleman boyutları ve sıklaştırma faktörleri uygulanmıştır (**Şekil 6.6**).



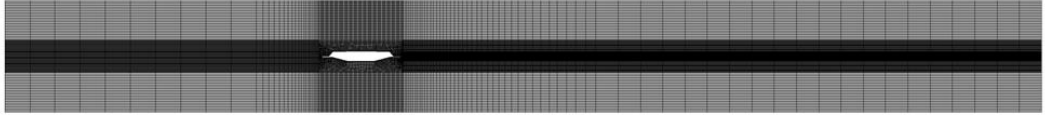
Şekil 6.6. Osman Gazi Köprüsü tabliyesi sayısal ağ bölgeleri

Uygulanan HAD çözümünün oluşturulan sayısal ağ yapılandırmasından bağımsız çözüm vermesi amacıyla farklı sayısal ağlar için ardışık çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözümler büyük boyutlu sayısal ağ elemanlarından küçük boyutlu sayısal ağ elemanlarına doğru kademeli olarak gerçekleştirilerek (**Şekil 6.7 a,b,c,d**) en uygun eleman boyutu belirlenmeye çalışılmıştır. En uygun eleman boyutunun belirlenmesinde kontrol parametresi olarak köprü tabliyesi üzerindeki alansal ortalama basınç seçilmiştir. **Çizelge 6.2** üzerinde dört farklı sayısal ağ için ayrılmış ağ bölgelerinin boyutları, ağ yapılandırılması ve sıklaştırma faktörleri gösterilmektedir. Köprü tabliyesinin içerisinde bulunduğu dörtgen “c” alanında ise genel hücre boyutu dikte edilerek tabliye çevresindeki akım için yeterince küçük boyutlu bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Ayrıca ağ bölgeleri incelendiğinde tabliyeden uzak kısımlarda daha kaba tabliye çevresindeki alanlarda ise belirli sıklaştırma faktörleri kullanılarak daha ince ağ yapısı uygulanmıştır.

Çizelge 6.2. Tabliye analizlerinde kullanılmış olan geometri ve sayısal ağ detayları

Kısım	Boyut (m)	Sıklaştırma	Sıklaştırma Faktörü	Ağ 4	Ağ 3	Ağ 2	Ağ 1
				Kenar Eleman Sayısı	Kenar Eleman Sayısı	Kenar Eleman Sayısı	Kenar Eleman Sayısı
a_1	31,6			10	20	40	60
a_2	15	-----	6	20	40	80	100
a_3	31,6			110	220	440	450
a_4	45,15	- - - - -	6	40	80	160	180
a_5	58,7			20	40	80	120
b_1	52			15	30	60	75
b_2	16,3			30	60	120	200
b_3	52			15	30	60	75
c	31,6x16,3	<i>eleman boyutu</i>		0,2	0,1	0,1	0,04
Toplam Eleman Sayısı				48346	227430	424738	768760

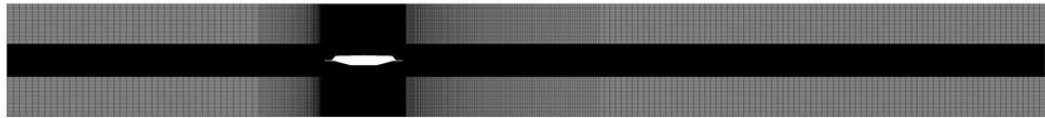
a)



b)



c)



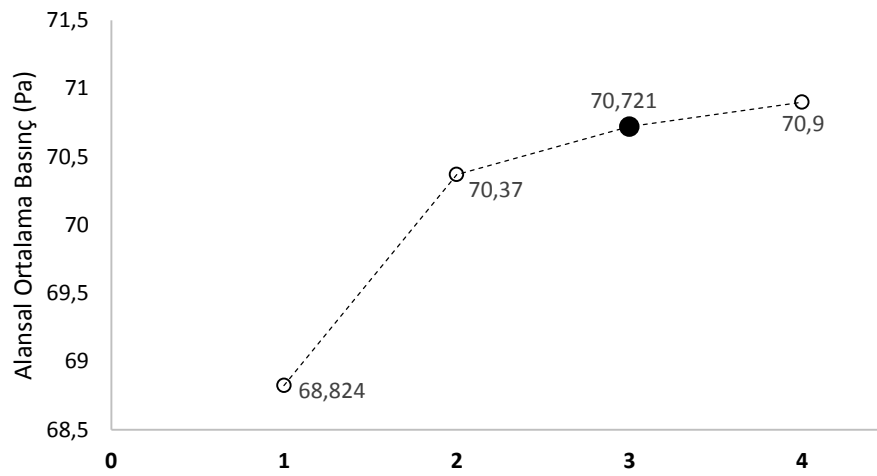
d)



Şekil 6.7. Köprü tabliyesi sayısal ağ

a) Ağ 1 b) Ağ 2 c) Ağ 3 d) Ağ 4

Şekil 6.8 üzerinde dört farklı ağ yapılandırması için gerçekleştirilen çözümler ve kontrol parametresinin değişimi görülmektedir. Kabadan inceye giden ağ yapısı kullanılarak yapılan çözümlerde tabliye üzerindeki alansal ortalama basınç parametresinin 3 numaralı ağdan 4 numaralı ağ çözümüne geçerken oldukça küçük mertebelerde (% 0,253) değişim gösterdiği belirlenmiştir (**Çizelge 6.3**). Buradan da anlaşılacağı üzere 3 numaralı ağdan daha küçük boyutlu elemanlara sahip ağ yapıları kullanmak çözümde anlamlı değişikliklere yol açmayacağı için en uygun ağ yapılandırması bu durumda 3 numaralı ağ olmaktadır.



Şekil 6.8. Dört farklı ağ yapılandırması için kontrol parametresinin değişimi

Çizelge 6.3. Dört farklı ağ yapılandırması için kontrol parametresinin değişimi

Sayısal Ağ	Alansal Ortalama Basınç (Pa)	ΔP (%)
1	68,824	
2	70,370	2,246
3	70,721	0,498
4	70,900	0,253

3 numaralı sayısal ağın eleman boyutları ve sıklaştırma bölgeleri açısından yeterli olduğu belirlenmesine karşın bu çalışmada çözümlere daha yüksek hassasiyet elde etmek ve güvenli tarafta kalmak amacıyla 4 numaralı ağ yapısı ile devam edilmiştir. Aşağıda (**Şekil 6.10**) 4 numaralı sayısal ağda köprü tabliyesi çevresinde ve tabliye çerperindeki sıklaştırma bölgesindeki (inflation) ağ yapısı

gösterilmiştir. Çeperdeki sıklaştırma bölgesi boyutlandırılırken akımın yapısı ve kullanılan türbülans modelinin dikkate alınması gerekmektedir. Çepere komşu olan elemanın kalınlığı 0,002 m olarak belirlenmiş ve “c” alanındaki elemanlar ile yumuşak bir geçiş sağlayabilmek için eleman kalınlığı 1,2 oranında artacak biçimde toplam 12 katman bulunan bir sıklaştırma bölgesi uygulanmıştır. Bilindiği üzere çepere komşu elemanların boyutları viskoz alt tabakanın çözülebilmesi için yeterli incelikte olması gerekmektedir. Söz konusu mesafe ise Reynolds sayısı, karakteristik uzunluk, türbülans modeli ve akışkan parametreleri kullanılarak belirlenmektedir. Her durumda viskoz alt tabakanın çözülmesine problemin yapısı nedeniyle ihtiyaç olmayabilir ancak bu gibi aerodinamik analizlerde ihmal edilmemesi gerekmektedir. Uygun sıklaştırma ve çepere komşu eleman boyutunun belirlenmesinde Von Karman tarafından 1930’larda ortaya atılan Evrensel Duvar Kanununa bağlı boyutsuz hız (u_+) ve boyutsuz mesafe (y_+) parametreleri kullanılmaktadır. Söz konusu boyutsuz parametreler aşağıdaki gibi belirlenir;

$$u_+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (6.1)$$

$$y_+ = \frac{y u_\tau}{\vartheta} \quad (6.2)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6.3)$$

Burada;

u : çepere paralel akışkan hızı

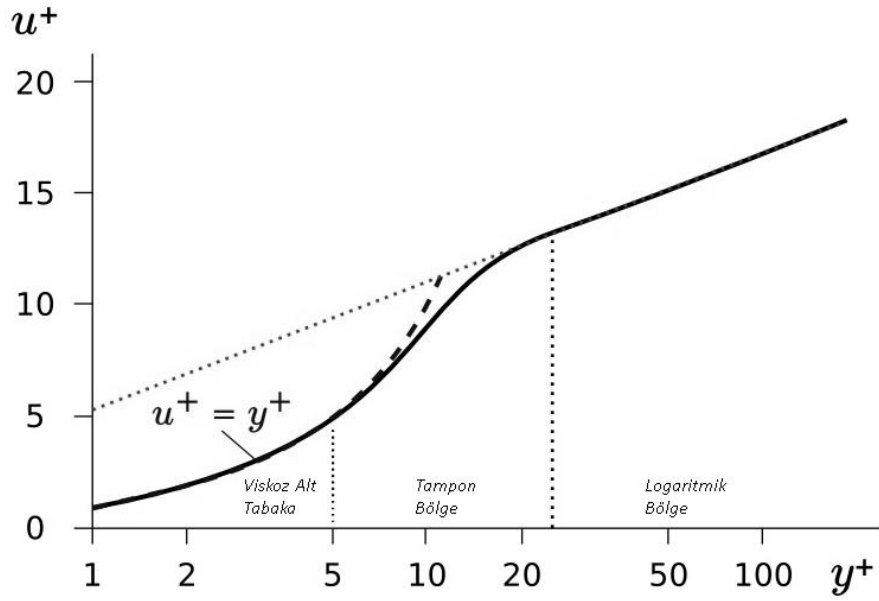
y : çepere dik mesafe

u_τ : kayma hızı

τ_w : çeper kayma gerilmesi

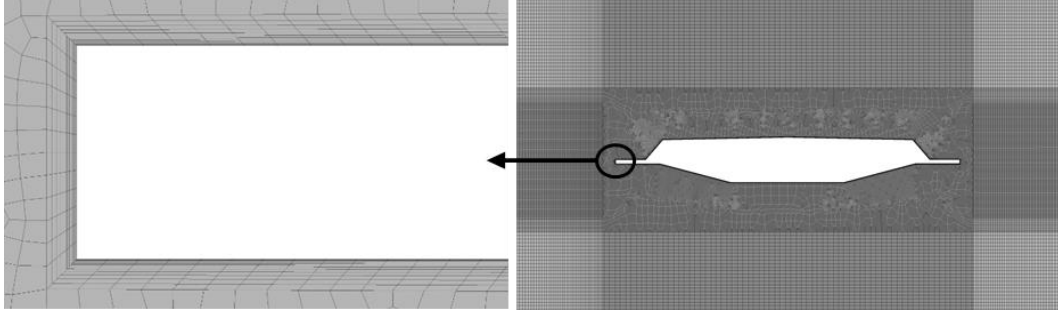
ρ : akışkan yoğunluğu

Yukarıda gösterilen boyutsuz hız ve mesafe (logaritmik) parametreleri kullanılarak çizilen (**Şekil 6.9**) profil, türbülanslı akımlarda sınır tabakanın %20’sini ve toplam hız gradyanının %80’ini oluşturan viskoz bölge hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 6.9. Evrensel Duvar Kanunu

Çeper yakınında akım profili Şekil 6.9'da da görüleceği üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Çepere doğrudan komşu olan viskoz alt tabaka olarak adlandırılan bölge hız çalkantılarının çeper nedeniyle sönmüldüğü ve laminar bir akışın gözlemlendiği oldukça ince bir tabakadır. Viskoz alt tabakada y_+ ve u_+ değerleri eşit olmakla birlikte bu bölge $y_+ < 5$ ile sınırlıdır. Viskoz alt tabaka ile tam türbülanslı logaritmik bölge arasında tampon bölge olarak adlandırılan bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgenin sınırları akım koşullarına göre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak $5 < y_+ < 30$ aralığında ifade edilebilir. Ayrıca u_+ fonksiyonu lineer davranıştan logaritmik davranışa, akım ise laminar rejimden türbülanslı rejime bu bölgede geçmektedir. Sonuç itibarıyla HAD çözümü yapılacak durumun şartlarına bağlı olarak çeper yakınındaki sayısal ağ uygun biçimde boyutlandırılması (eğer çözümde ilave bir çeper fonksiyonu tanımlanmayacaksa) gerekmektedir. Buradaki gibi yüksek basınç gradyanlarının beklendiği aerodinamik çözümlerde y_+ değerinin mümkün olduğunca küçük seçilmesi ve çepere uygun sıklaştırma tabakasının yerleştirilmesi gerekmektedir.



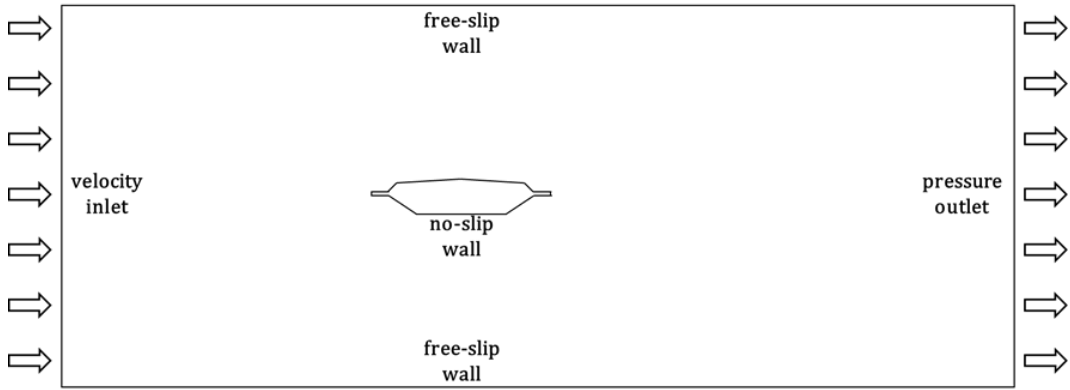
Şekil 6.10. Ağ 4 için köprü tabliyesi çevresinde ve tabliye çeperindeki sıklaştırma bölgesindeki ağ yapısı

6.4 Köprü Modeline ait Sınır ve Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

Uygun çözüm alanı ve çözüm ağı yapılandırılması oluşturulduktan sonra çözümlenecek durumun fiziksel koşullarının doğru biçimde yansıtılması gerekmektedir. Bu bağlamda, problemin başlangıç ve sınır koşullarının belirlenerek kullanılacak sayısal yöntemin detayları, akışkana ve akıma ait temel parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. İki boyutlu köprü tabliyesinin analizi için uygun çözüm ağı yapılandırmasının belirlenebilmesi amacıyla öncelikli olarak ardışık zamandan bağımsız (steady-state) çözümler sonrasında ise zamana bağlı (transient) çözüm gerçekleştirilmiştir. Zamandan bağımsız çözümler akım parametrelerinin ortalama değerlerini ya da diğer bir ifade ile parametrelerin belirli bir sanal zaman dilimi için durağan (kararlı) bir yapıya ulaştığı duruma ait sonuçları ortaya koymaktadır. Her ne kadar söz konusu aerodinamik analiz açıkça zamana bağlı yapıda bir problem olsa da zamandan bağımsız ortalama sonuçlar ön analizler için ve sayısal ağ etkisinin arındırılması aşamasında tatmin edici sonuçlar ortaya koymaktadır.

HAD analizi kapsamında akışkan olarak sadece havanın bulunduğu tek fazlı bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Çözüm alanının giriş kısmı (inlet) yatay doğrultuda sabit hızda ve orta derecede türbülans şiddetine sahip hava olarak tanımlanmıştır. Köprünün rüzgâr tasarım hızının belirlenmesi için Eurocode (EN 1991) referans alınmıştır. Buna göre 10 m yükseklikte 10 dakikalık ortalama rüzgâr hızı 0,05 m referans pürüzlülük değerine göre yüzyıllık tekrarlama periyodunda 25,4 m/s olarak

belirlenmiştir. Tabliyenin yerden yüksekliği 70 m olduğundan, 10 m yükseklik için belirlenmiş olan hız, tabliye seviyesinde 38 m/s olacak şekilde dönüştürülmüştür. Çıkış kısmı (outlet) ise doğrudan atmosfere açılarak ortalama statik basıncı 1 atm olacak şekilde tanımlanmıştır. Rüzgâr doğrultusuna dik (span-wise) yüzeylere simetri sınır koşulu uygulanarak bu yüzeylerde akım parametrelerinin gradyanlarının sıfır olması sağlanmıştır. Bu şekilde, söz konusu yüzeyde bir ayna varmışçasına akımın herhangi bir duvar etkileşimine girmeden (yansımadan) hareket etmesi sağlanmıştır. Çözüm alanının üst ve alt yüzeylerinde ise yüzeye dik hız bileşenlerinin sıfır olduğu ve yüzeyin üzerindeki düğüm noktasındaki yatay hız değerinin olduğu gibi korunduğu serbest kayan çeper sınır koşulu kullanılmıştır (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Çözüm alanı sınır koşulları

HAD çözümü, kullanılan diferansiyel akışkanlar dinamiği denklemlerin nümerik metotlar ile zamanda ve uzayda ayrıklaştırılarak cebrik ifadelere dönüştürülmesi temeline dayanmaktadır. Bu bağlamda ayrıklaştırma yöntemleri ve bu yöntemlerin hassasiyeti dikkate alınmak zorundadır. Yüksek mertebeden ayrıştırma yöntemleri uygulanması çözümün güvenilirliğini arttırdığı gibi yakınsamanın daha zor ve yavaş olmasına neden olabilmektedir. Burada adveksiyon şeması olarak yüksek çözünürlük seçeneği tercih edilmiştir. Yine aynı biçimde türbülans nümeriği için de küçük ölçekteki türbülans kaynaklı etkileri

yakalayabilen ve ikinci dereceden ayrıklaştırma şeması kullanan yüksek çözünürlük tercih edilmiştir.

HAD çözümleri için kullanılan ANSYS CFX yazılımı bir çok türbülans modelinin kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Burada köprü tabliyesi analizi için Shear Stress Türbülans (SST), k-epsilon (k- ϵ), Renormalization Group k-epsilon (RNG k- ϵ) ve k- ω türbülans modelleri kullanılarak tasarım hızı (38 m/s) için dört ayrı çözüm yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6.5 Kullanılan Türbülans Modelleri

Türbülans analitik olarak çözümlenmesi mümkün olmayan oldukça kaotik bir akım düzensizliğidir. Bir akışkan akımı içindeki türbülanslı akımın çözümü için üç temel türbülans yaklaşımı vardır [36]. Doğrudan Sayısal Benzetim (Direct Numerical Simulation, DNS), Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) Denklemleri ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation, LES) yaklaşımlarıdır.

DNS yaklaşımında Navier-Stokes denklemleri tüm türbülans ölçeklerinde yüksek çözünürlükte çözülür ve bir türbülans kapatma (turbulence closure) modeline ihtiyaç yoktur. Ancak, uzay ve zamanda bütün türbülans ölçeklerini çözebilmek çok büyük hesaplama kapasitesine ihtiyaç vardır ve bu da mühendislik problemlerinin günümüzdeki bilgisayar kapasitesinde DNS ile çözülmesini imkansızlaştırmaktadır.

Genellikle nümerik analizlerde türbülans etkisinin yaklaşık olarak çözümlenmesi için Navier-Stokes denklemlerine bir takım türbülans kapatma terimleri eklenmektedir. İstatistiksel bir yaklaşım olan RANS yaklaşımı türbülanslı akımların benzetiminde Navier-Stokes denklemlerindeki hız bileşenlerinin zamansal ortalamasını alarak hesaplama yapmaktadır. Ortalama değerlerden olan sapmalar, Navier-Stokes denklemlerine ek türbülans gerilmeleri eklenerek modele dahil edilmektedir. RANS yaklaşımlarının en önemli avantajları daha az bilgisayar kapasitesine ihtiyaç duyması ve mühendislik problemlerinin yüksek Reynolds

sayılarında sayısal benzetimini için uygun bir yaklaşım olmasıdır. Ayrıca RANS yaklaşımının rüzgâr analizlerinde tünel gerçekliğini yansıtabildiği tespit edilmiştir [37].

LES yönteminde DNS için gerekli bilgisayar kapasitesinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. LES yaklaşımında türbülanslı akımdaki çalkantıları iki bileşene ayırabilmek için filtreleyiciler kullanılır. Mevcut sayısal ağ yapılandırması ile yakalanamayan türbülans çalkantıları alt-ağ ölçekleri ile modellenir. LES yönetimi DNS ile RANS arasında bir yaklaşım olarak düşünülebilir. Ancak büyük boyutlardaki mühendislik problemlerinin LES ile günümüz hesaplama teknolojisi ile benzetimi hala oldukça hesaplama yükü gerektiren ve zaman alan bir uygulamadır.

Zamanla kullanılan türbülans modelleri geliştirilerek hem zamana bağlı hem de zamandan bağımsız koşullar altında verimli sonuçlar ortaya koyan hesaplama yükü açısından avantajlı farklı modeller türetilmiştir. Ancak her duruma uygun genel geçer kabul görmüş bir türbülans modeli yaklaşımından söz edilemez. Çözümlenecek durumun koşulları ve istenilen hassasiyet uygun modelin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bu analiz çerçevesinde, benzer çalışmalarda sıklıkla kullanılan k - ϵ türbülans modeli, Renormalization Group k -epsilon (RNG k - ϵ) türbülans modeli, k -omega (k - ω) türbülans modeli ve Shear Stress Transport (SST) türbülans modeli olmak üzere dört farklı türbülans modeli kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak en uygun modelin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Birçok mühendislik uygulaması türbülans çalkantılarının tümüyle çözümlenmesi gerektirmez. Bu nedenle k - ϵ türbülans modeli hem endüstriyel hem de mühendislik alanlarındaki uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir türbülans modelidir. Diğer modellere kıyasla daha düşük hesaplama yükü gerektirmesi ve oldukça kolay yakınsama sağlaması sahip olduğu diğer avantajlar olarak gösterilebilir. Ancak çevrıntili akımlarda, güçlü ayrışmaların olduğu akımlarda, dairesel olmayan kanallardaki tam gelişmiş akımlarda ve benzeri koşullar altında yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Temel olarak türbülans kinetik enerjisi “ k ” ve

enerji sönümlenme oranına “ ε ” ait iki adet transport denklemi kullanılarak türbülans gerilmelerinin elde edildiği iki denklemlilik bir modeldir.

RNG k- ε türbülans modeli, k- ε modelinin matematiksel teknikler (renormalization group teoris) kullanılarak geliştirilmiş bir versiyonu olarak ifade edilebilir. Standart k- ε modelinde çevrinti viskozitesinin hesabında tek bir türbülans uzunluk ölçeği kullanılırken RNG k- ε türbülans modelinde ε teriminde yapılan modifikasyon sayesinde türbülans difüzivitesi olması gerektiği gibi akımın tüm ölçekleri için hesaplanması amaçlanmıştır. Daha çok girdaplı akımların çözümlenmesi amacıyla türetilmiş iki denklemlilik bir türbülans modelidir [38]. Ayrıca ayrılmış akımların ve zamana bağılı büyük ölçekli akım hareketlerinin (kararsız vorteksler) çözümünde de etkili sonuçlar verebilmektedir.

K-omega, iki denklemlilik bir türbülans modeli olup türbülans gerilmelerinin hesabında türbülans kinetik enerjisi “k” ve spesifik enerji sönümlenme oranını “ ω ” (kinetik enerjinin birim hacim ve zamanda termal enerjiye dönüşme oranı) kullanmaktadır. Çeper yakınındaki akımın çözümlenmesinde oldukça etkili olan k- ω modeli, ters basınç gradyanlarının olduğu ve akımın ayrıştığı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Söz konusu durumlarda kayma gerilmesinin taşınımı ile ilgili bir terim içermemesinden dolayı, modelin olması gerekenden daha fazla kayma gerilmesi hesapladığı gözlemlenmiştir [39].

Shear stress transport türbülans modeli, k- ω modeli üzerinde ters basınç gradyanlarının oluştuğu akımlarda meydana gelen hatanın düzeltilmesi için türbülans viskozitesinin hesabında yapılan değişiklik sonucu ortaya konmuş bir modeldir [40]. Temel itibarıyla, SST modeli içerisinde barındırdığı harmanlama fonksiyonları sayesinde çepere yakın bölgelerde k- ω , serbest kayma akım bölgelerinde ise k- ε modelini kullanarak her iki modelinde güçlü noktalarını kullanarak görece daha etkili bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Birçok aerodinamik uygulamada başarılı sonuçlar ortaya koyan SST modelinin, diğer taraftan durağan basınç bölgeleri ve yüksek ivmelerin bulunduğu akım durumlarında olması gerekenden daha fazla türbülans seviyeleri ortaya çıkardığı görülmüştür.

6. İKİ BOYUTLU SAYISAL ÇÖZÜM SONUÇLARI VE YORUMLANMASI

Gerçekleştirilen HAD analizleri, köprü tabliyesi çevresindeki rüzgâr hızı akım çizgileri, basınç dağılımı ve türbülans kaynaklı yüksek enerjili girdap bölgelerini gösteren çevrinti (eddy) viskozitesi üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca köprü tabliyesinin rüzgâr karşısındaki performansını yansıtması açısından sürüklenme (c_d) ve kaldırma (c_l) gibi boyutsuz aerodinamik katsayıları karşılaştırılmıştır. Akışkan akımı içerisinde bulunan katı cisimler, akım hızı, akışkanın özellikleri ve cismin geometrisi ile bağıntılı olarak aerodinamik kuvvetler etkisi altındadır. Akım doğrultusu referans alındığında söz konusu kuvvetleri, akım doğrultusunda sürüklenme kuvveti (F_d) ve akıma dik doğrultuda kaldırma kuvveti (F_l) olarak ikiye ayırmak mümkündür. Sürüklenme kuvveti genel olarak bir cismin akıma karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir ve her zaman akım yönünde etki eder. Diğer taraftan kaldırma kuvveti isminden de anlaşılacağı üzere akışkanın cisme uyguladığı kaldırma kuvvetini göstermektedir ve iki yönde de etki edebilir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri kullanılarak cisme ait boyutsuz sürüklenme ve kaldırma katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$c_d = \frac{2F_d}{\rho u^2 A_r} \quad (7.1)$$

$$c_l = \frac{2F_l}{\rho u^2 A_r} \quad (7.2)$$

Burada;

F_d : sürüklenme kuvveti

F_l : kaldırma kuvveti

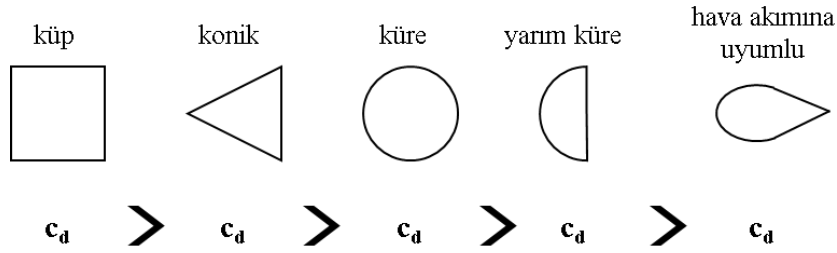
ρ : akışkan yoğunluğu

u : akım hızı

A_r : cismin kuvvet yönündeki iz düşüm alanı

Sürüklenme katsayısı bir sabit olmamakla birlikte akış hızına ve dolayısıyla Reynolds sayısına bağlı olan bir değişkendir. Aynı Reynolds sayısı için bazı temel

geometrik şekiller sürüklenme katsayıları açısından büyükten küçüğe **Şekil 7.1**'de sıralanmıştır. Buradan da anlaşılacağı üzere geniş kesit alanına ve sert köşelere sahip geometrik şekiller akıma daha fazla direnç göstermekte ve daha büyük sürüklenme katsayısı değerleri almaktadır.

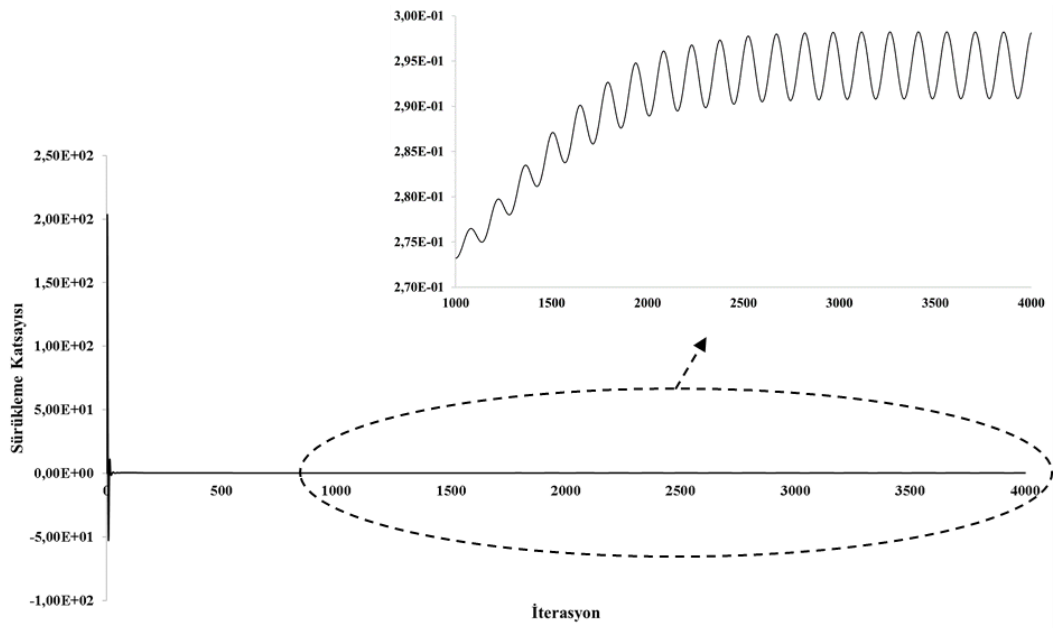


Şekil 7.1. Bazı temel geometrik şekillerin sürüklenme katsayıları

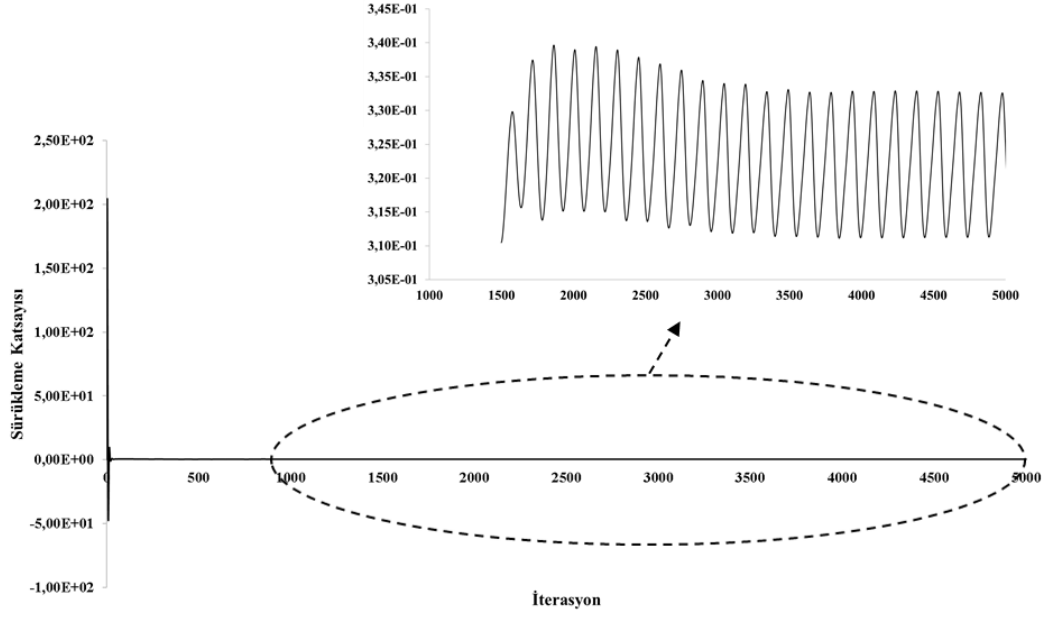
Bu anlamda oldukça geniş açıklıklı ve yüksek yapılar olan köprülerde tabliye geometrisi rüzgâr yüklerinden daha az etkilenmek amacıyla akıma karşı olabildiğince az direnç gösterecek şekilde tasarlanması beklenmektedir. Kullanılan türbülans modellerine göre elde edilen nümerik analiz sonuçları aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

Gerçekleştirilen HAD çözümlerinde yakınsama kriterinin yakalanması her zaman doğru çözümü elde edildiğini göstermez. Burada söz konusu olduğu gibi son derece zamana bağlı yapıdaki bir durumun steady-state koşullarında doğru bir biçimde çözümlenmesi için yakınsamanın yanı sıra, momentum, kütle korunumu ve belirlenen kontrol parametrelerinin iterasyon sayısına bağlı olarak değişmemesi veyahut belirli bir sabit salınım içerisinde olması gerekmektedir. Kontrol parametresi olarak köprü tabliyesi için sürüklenme katsayısı belirlenmiş olup **Şekil 7.1-5**'de görülebileceği üzere iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi her çözüm için ayrı ayrı gösterilmiştir. İterasyon sayısı değişmekle birlikte genel olarak 4000 ile 5000 arasında çözümler sürüklenme katsayısı değişimi açısından sabit yapıya ulaşmıştır. **Çizelge 7.1**'de sürüklenme katsayılarının salınımı, maksimum, minimum ve ortalama değerler üzerinden gösterilmiştir. Buna göre, $k-\epsilon$ modelinde en dar aralık gözlenirken, RNG $k-\epsilon$, $k-\omega$ ve SST modelleri için

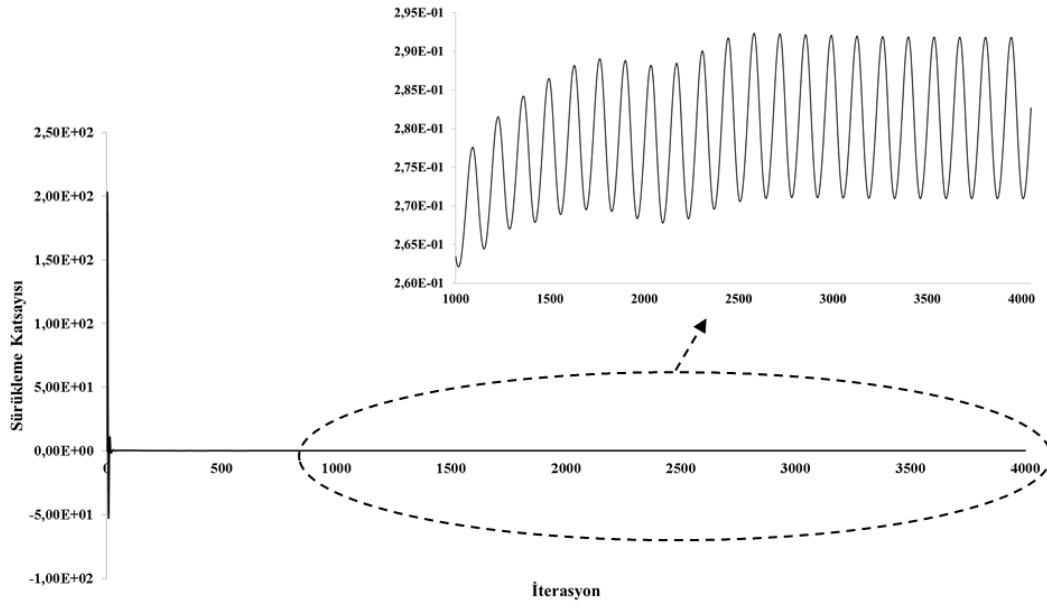
sürüklenme katsayısının aldığı değer yaklaşık 0,02 aralığında seyretmektedir. Ortalamalara bakıldığında ise, dört türbülans modeli için sürüklenme katsayısı 0,25 ile 0,30 arasında değerler almaktadır. Söz konusu köprü tabliyesinin yapı itibariyle akıma uyumlu (streamlined) bir geometriye sahip olduğu ve tabliye üzerindeki parapet ve trafik bariyerlerinin modelde yer almadığı düşünülürse bu değerlerin daha yüksek olacağı ancak buna rağmen rüzgâr akımı karşısında oldukça uyumlu bir tasarıma sahip olduğu söylenebilir.



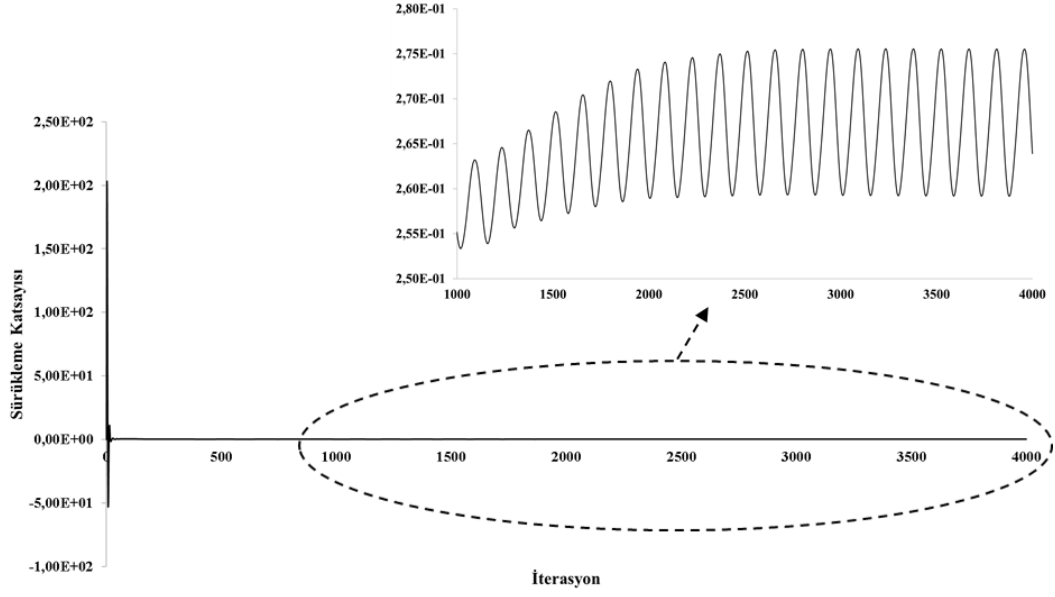
Şekil 7.2. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi ($k-\epsilon$ türbülans modeli)



Şekil 7.3. İterasyon sayısı ve sürükleme katsayısının değişimi (RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli)



Şekil 7.4. İterasyon sayısı ve sürükleme katsayısının değişimi ($k-\omega$ türbülans modeli)



Şekil 7.5. İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi (SST türbülans modeli)

Çizelge 7.1. Dört türbülans modeli için sürüklenme katsayıları ($u_x=38$ m/s)

Türbülans Modeli	Minimum Sürüklenme Katsayısı (C_{dmin})	Ortalama Sürüklenme Katsayısı (C_{dave})	Maksimum Sürüklenme Katsayısı (C_{dmax})	ΔC_d
k- ϵ	0,290	0,294	0,298	0,008
RNG k- ϵ	0,311	0,322	0,332	0,021
k- ω	0,271	0,281	0,291	0,020
SST	0,259	0,267	0,275	0,016

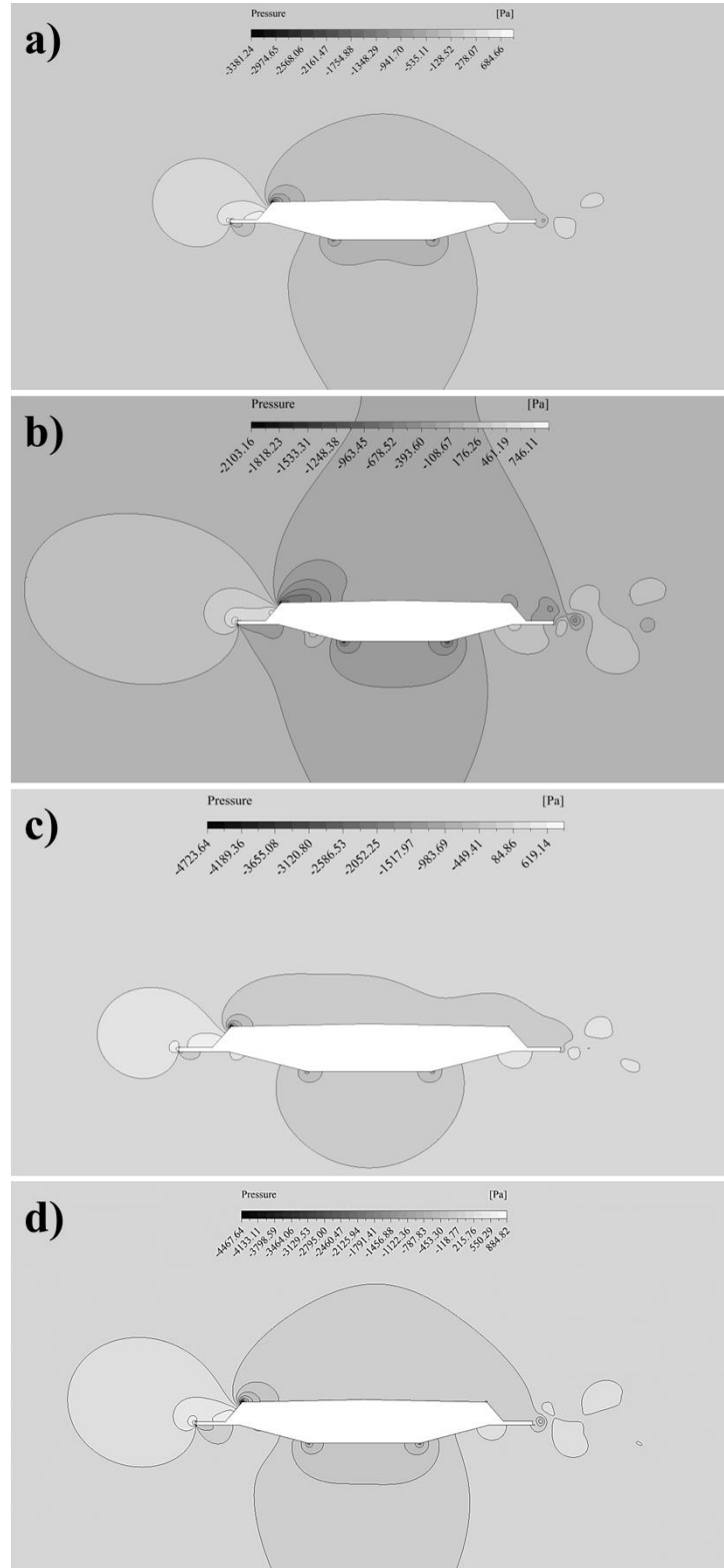
Çizelge 7.2. Dört türbülans modeli için kaldırma katsayıları ($u_x=38$ m/s)

Türbülans Modeli	k- ϵ	RNG k- ϵ	k- ω	SST
Kaldırma Katsayısı	-0,0738	0.0023	-0.0015	-0.0591

Kaldırma katsayıları dikkate alındığında ise (Çizelge 7.2) genel olarak yerçekimi yönünde (RNG k- ϵ modeli hariç) bir rüzgâr kuvveti etkisi görülebilmektedir. Türbülans modelleri karşılaştırıldığında k- ϵ ve SST modelleri yakın değerler üretirken, k- ω ve RNG k- ϵ modellerinin nispeten düşük kuvvetler

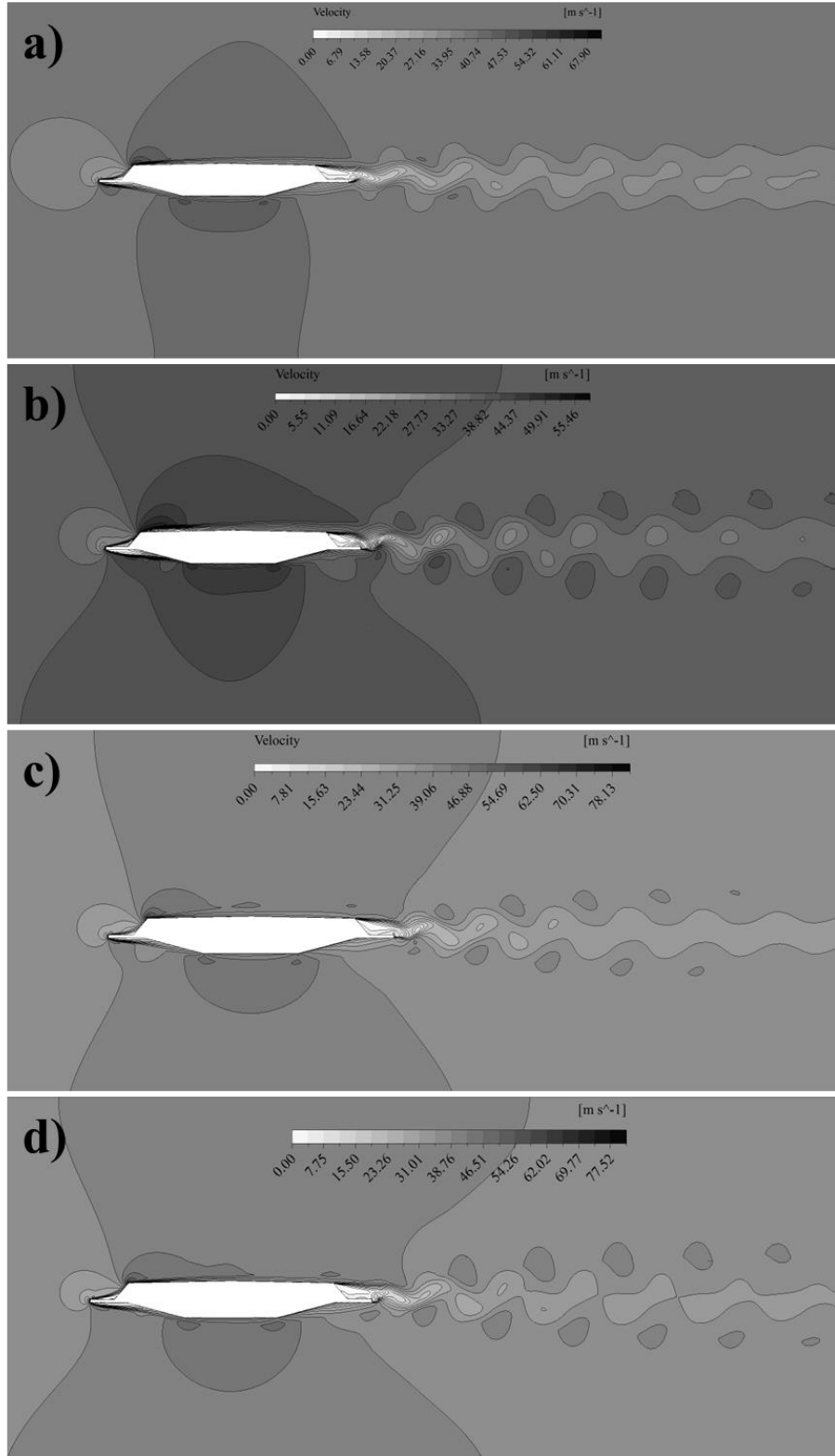
ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır. Yapılan çözümler steady-state analizler olduğu için burada gösterilen kaldırma kuvvetlerinin ortalama değerler olduğu unutulmamalıdır. Gerçekte beklenen durum aynı sürüklenme katsayısında olduğu gibi tabliye üzerinde meydana gelen kuvvetlerin özellikle akıma dik yönde etki eden kaldırma kuvvetinin pozitif ve negatif olmak üzere her iki yönde de (yerçekimi yönü ve tersi) zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu davranış bize rüzgâr yüklerinin sadece statik bir yük olmayıp dinamik etkilerinin de olduğunu açık bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Söz konusu durum daha açık bir biçimde bir sonraki bölümde gösterilecek olan zamana bağlı analiz üzerinden anlaşılabilir.

Köprü tabliyesi çevresindeki basınç dağılımı incelendiğinde (**Şekil 7.6**) $k-\omega$ ve SST modellerinde negatif basınç değerlerinin diğer iki modele oranla yüksek çıktığı görülmektedir. Diğer taraftan RNG $k-\epsilon$ modelinin basınç aralığı olarak daha küçük bir aralık ortaya koyduğu ve farklı bir basınç dağılımı yarattığı görülmektedir. **Şekil 7.7**'de gösterilen hız dağılım konturlarından da anlaşılacağı üzere RNG $k-\epsilon$ modelinin tabliye çevresinde daha düşük hızlar oluşturması da negatif basınç bölgelerinin daha düşük değerler almasına neden olduğu söylenebilir. Dört model için hız dağılımına bakıldığında her birinde tabliye kuyruk bölgesinde düşük hız bölgelerinin oluştuğu ve köprüden uzaklaştıkça bu bölgelerin şaşırtmalı olarak süregeldiği ve etkisinin azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu tür vorteks yapıları Karman girdap caddeleri (Karman vortex shedding) olarak adlandırılır [41]. Tabliye üst yüzeyinde $k-\epsilon$ modeli nispeten daha simetrik bir hız dağılım alanı oluştururken diğer üç modelde rüzgârın tabliye sol üst omzundaki kesit daralması ve akım ayrılması nedeniyle sol tarafta daha yüksek hızların oluştuğu asimetric bir dağılım oluşturduğu dikkat çekmektedir. Diğer taraftan **Şekil 7.8** üzerinde köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri gösterilmiştir. Burada doğrudan tabliyeye etki eden sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin yönü anlaşılabilir. Diğer üç modelde benzer bir dağılım gözlenirken yine RNG $k-\epsilon$ modelinde, özellikle tabliyenin sol kısmı olmak üzere oldukça yüksek kuvvet vektörlerinin oluştuğunu görebilmekteyiz.



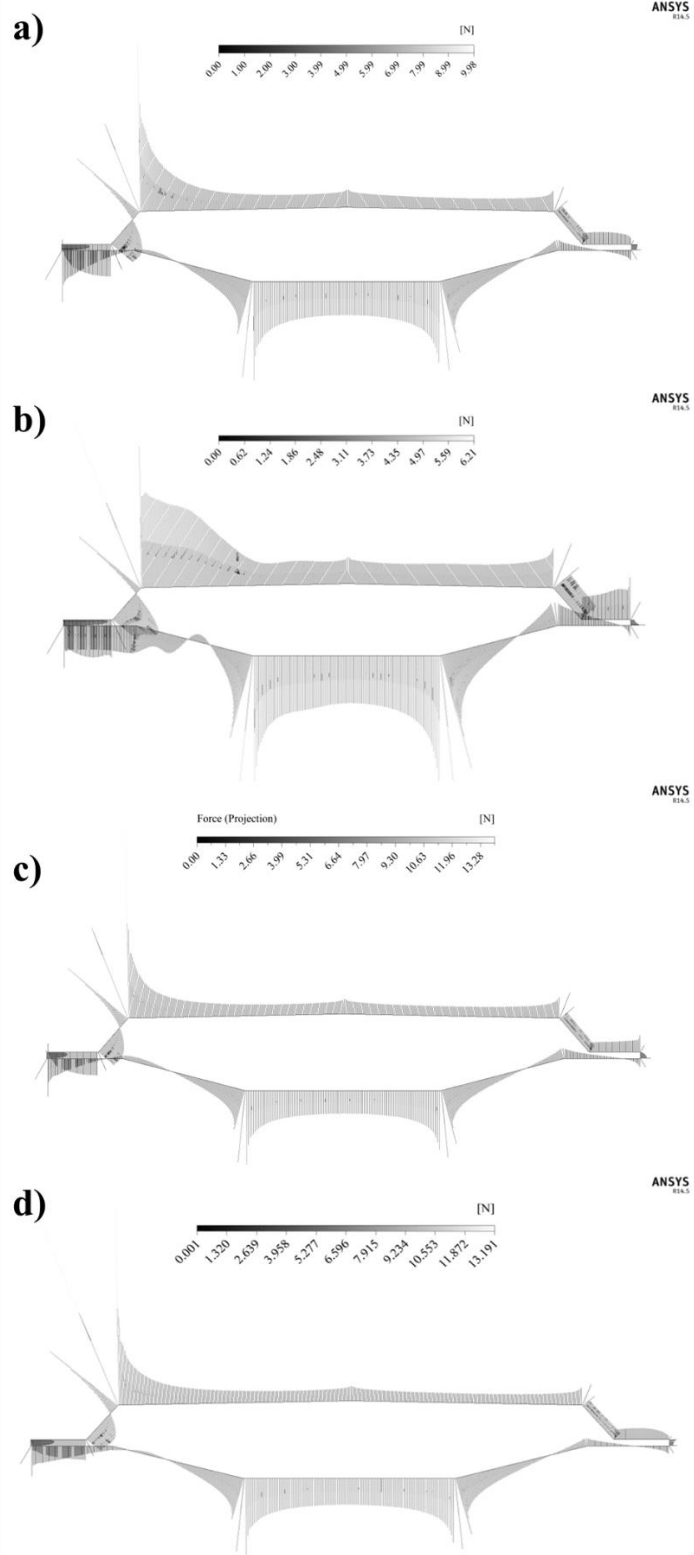
Şekil 7.6. Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri

- a)** k-ε türbülans modeli
- b)** RNG k-ε türbülans modeli
- c)** k-ω türbülans modeli
- d)** SST türbülans modeli



Şekil 7.7. Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri

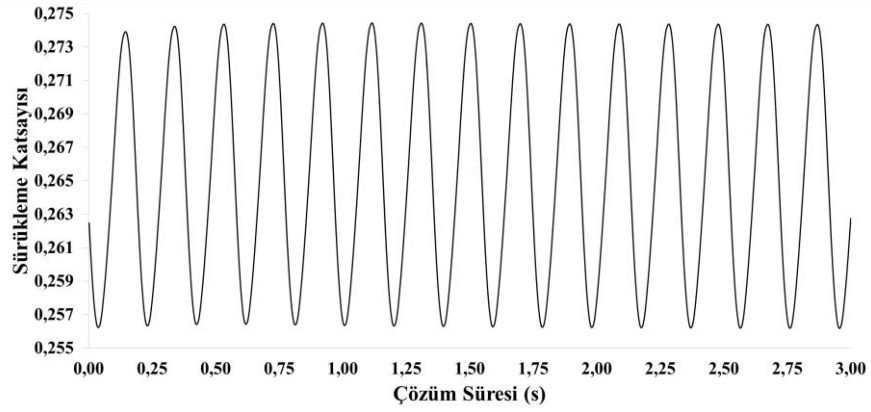
- a)** k-ε türbülans modeli
- b)** RNG k-ε türbülans modeli
- c)** k-ω türbülans modeli
- d)** SST türbülans modeli



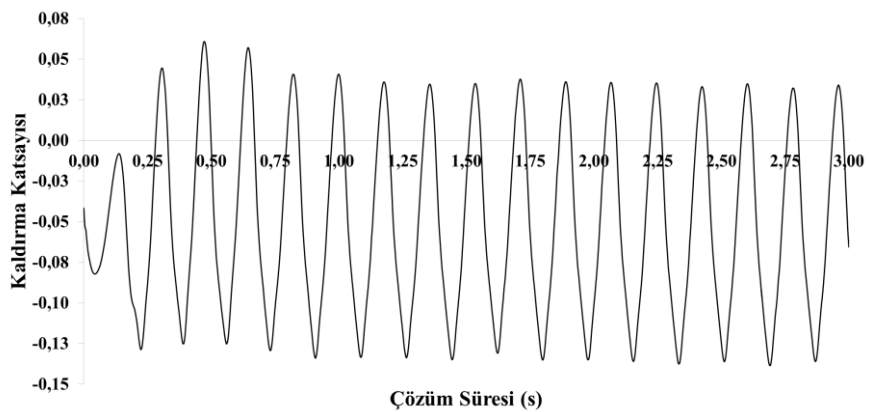
Şekil 7.8. Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri

- a)** k- ϵ türbülans modeli
- b)** RNG k- ϵ türbülans modeli
- c)** k- ω türbülans modeli
- d)** SST türbülans modeli

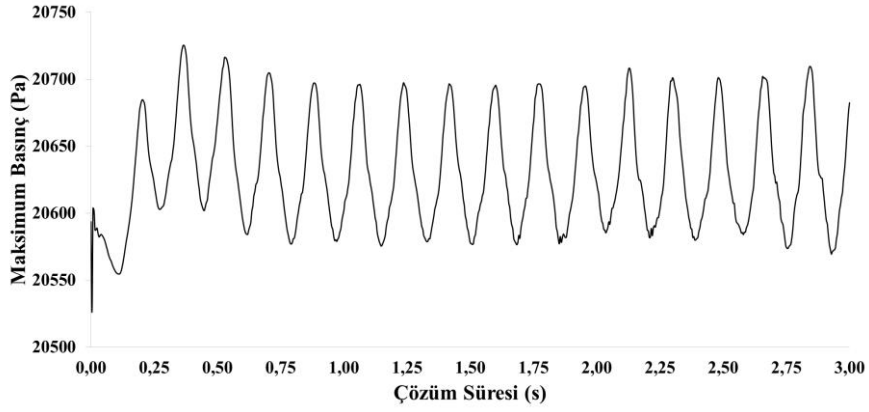
Sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri ve dolayısıyla katsayıları akım hızına bağlı parametrelerdir. Bu nedenle, tabliye kotundaki ortalama 38 m/s hız için farklı türbülans modelleri çerçevesinde gerçekleştirilen analizler yanı sıra kritik rüzgar hızı olan 58 m/s ve kritik rüzgar hızının %15 fazlası olan 66,7 m/s için de HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde türbülans modeli olarak burada kullanılan diğer modellere nazaran daha gelişmiş bir model olan SST modeli tercih edilmiştir. Kritik rüzgâr hızı (58 m/s) için yapılan analiz, steady-state analizlerde gözlemlenen aerodinamik kuvvetlerin salınımı nedeniyle ve karasız vorteks oluşumları beklendiği için zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar **Şekil 7.9-11** üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.9 Çözüm süresi ve sürüklenme katsayısının değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s)



Şekil 7.10. Çözüm süresi ve kaldırma katsayısının değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s)



Şekil 7.11. Çözüm süresi ve maksimum basınç değerinin değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s)

Gerçekleştirilen toplam 3 saniyelik çözüm sırasında zaman adımları 0,002 olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı HAD çözümlerinde uygun zaman adımının belirlenmesi en az uygun sayısal ağın belirlenmesi kadar önemlidir. Seçilen zaman aralıklarının gözlemlenecek parametre değişikliklerini yeterli hassasiyette yakalaması gerekmektedir. Bu nedenle bu tür analizlerde çözümün stabilitesini sağlamak için Courant sayısı (C_r) olarak tanımlanan boyutsuz sayısının 1'e eşit veya daha küçük olması şartı sağlanmalıdır. Courant sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$C_r = \frac{\bar{v} \Delta t}{\Delta l} \leq 1 \quad (7.1)$$

Burada;

C_r : Courant sayısı

\bar{v} : ortalama doğrusal hız

Δt : zaman aralığı

Δl : sayısal ağ eleman boyutu

Her durumda Courant sayısının bu derece küçük olmasını sağlamak mümkün olmayabilmektedir ve çözüm alanı boyunca farklı hücre boyutu ve hız değerleri oluşacağı için değişkenlik gösterebilmektedir. Ancak mümkün olduğunca küçük olması çözümün doğruluğu ve hassasiyeti açısından gereklidir. Bu çözümde

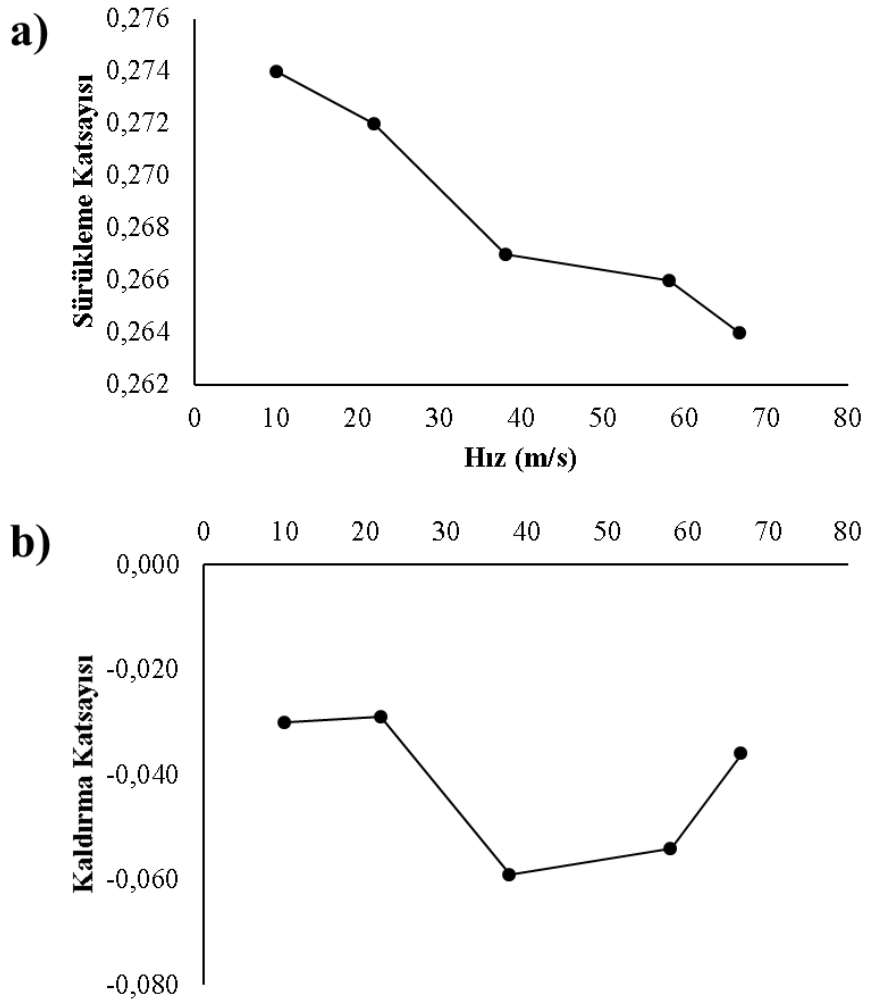
Courant sayısı değişken olmakla birlikte ortalama 1,10 civarında değerler almaktadır.

Şekil 32 ve 33’de sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin zamana bağlı salınımı açıkça görülebilmektedir. Kaldırma kuvveti beklenildiği gibi negatif ve pozitif yönlere yaklaşık 0,10 büyüklüğünde bir aralıkta ve yaklaşık 0,15 saniyelik bir periyotta salınım göstererek ortalama -0,054 gibi bir değer alırken, sürüklenme kuvveti 0,18 büyüklüğünde bir aralıkta yaklaşık olarak 0,20 saniyelik bir periyotta değişim göstermekte ve ortalama 0,266 gibi bir değer almaktadır. Şekil 34’te ise tabliye üzerine etkiyen maksimum basınç değeri bir metre tabliye kalınlığı için gösterilmiştir. Buna göre tabliye ye etkiyen maksimum basıncın 20,55 MPa ile 20,75 MPa arasında değerler aldığı görülmektedir.

Kritik rüzgâr hızı olan 58 m/s için zamana bağlı analizler yapıldıktan sonra, söz konusu rüzgâr hızının üstündeki ve altındaki durumların benzetiminin yapılabilmesi için ilave steady-state çözümler yapılmıştır. Toplamda farklı hızlar için SST türbülans modeli kullanılarak yapılan çözümler ve sonuçları **Çizelge 7.3** ve **Şekil 7.12**’de ortalama değerler üzerinden gösterilmiştir.

Çizelge 7.3. Farklı rüzgâr hızlarına karşılık sürüklenme ve kaldırma katsayıları

Rüzgâr hızı (m/s)	10	22	38	58	66,7
Sürüklenme Katsayısı (C_a)	0.278	0,262	0,267	0,266	0,265
Kaldırma Katsayısı (C_i)	-0.033	-0.029	-0,059	-0,054	-0,036



Şekil 7.12. a) Farklı rüzgâr hızlarına karşılık sürüklenme katsayısının değişimi (SST türbülans modeli)

b) Farklı rüzgâr hızlarına karşılık kaldırma katsayısının değişimi (SST türbülans modeli)

8. RÜZGÂR YÜKLERİNİN TRAFİK GÜVENLİĞİNE ETKİSİ

8.1 Üç Boyutlu Köprü ve Tır Sayısal Modelinin Hazırlanması

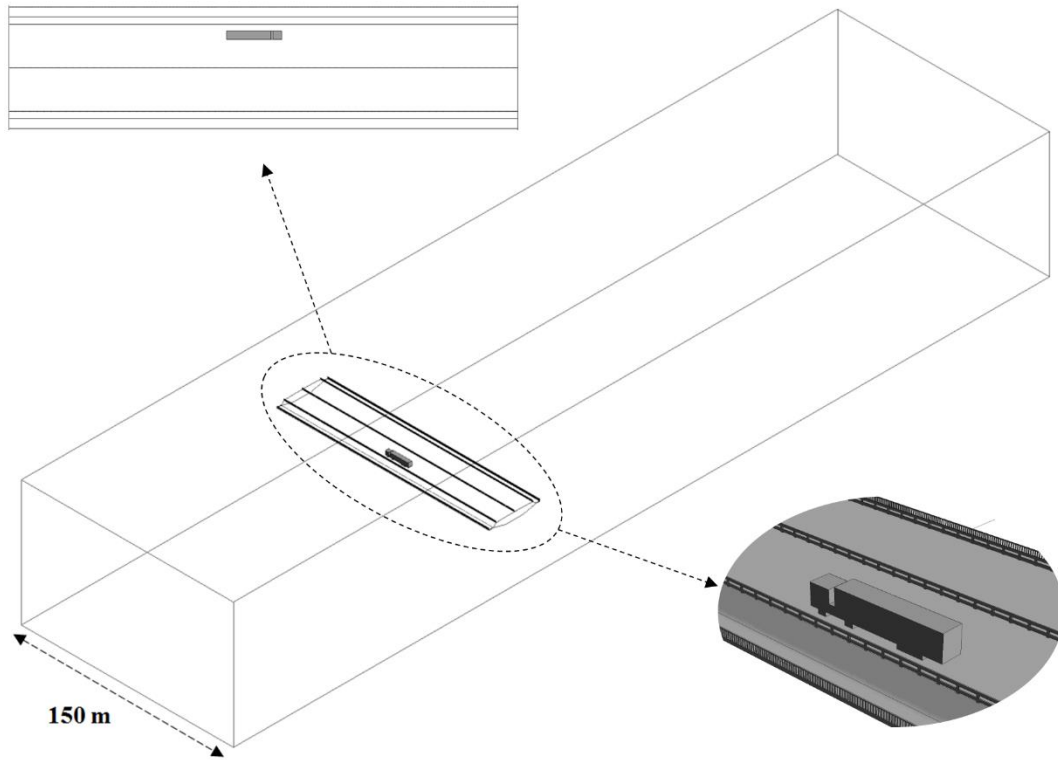
Yüksek ve geniş açıklıklı köprülerin rüzgâr yükleri karşısında yapısal anlamda güvenli olmasının yanı sıra üzerindeki araç trafiği konforu ve güvenliği açısından da değerlendirilmelidir. Özellikle kamyon, tır, otobüs gibi geniş ve uzun araçlar, köprü üzerinde gerekli önlemler (rüzgâr bariyerleri, tabliye tasarımı) alınmadığı takdirde rüzgâr yükleri karşısında aerodinamik açıdan daha fazla risk altındadır. Yüksek hızlı anlık rüzgâr kuvvetleri, araçların sürüklenmesine ve hatta devrilmesine neden olarak trafik için büyük tehlike yaratabilmektedir (**Şekil 8.1**). Yapılan çalışmalarda 3 saniyeden daha kısa yüksek rüzgâr hızlarının dahi aracın etkilenmesi için yeterli olabildiği görülmüştür [42]. Bu nedenle daha önce 2 boyutlu aerodinamik analizleri yapılan Osman Gazi Köprüsü tabliyesinin 3 boyutlu modeli hazırlanarak üzerindeki temsili tır geometrisine etki eden rüzgâr yükleri belirlenmiştir.



Şekil 8.1. Rion Antirion Köprüsü üzerinde rüzgar nedeniyle devrilmek üzere olan tır

Kaynak: (Courtesy of GEFYRA S.A. (Rion – Antirion Bridge, Greece))

Çözüm alanının geometrisi oluşturulurken yine 1:1 ölçek kullanılmış ve 2 boyutlu analizlerde kullanılan sınır koşulu konumlarına sadık kalınmıştır. Ancak 3 boyutlu bir analiz yapılacağı için tabliye uzunluğu olarak köprünün yalnızca 150 m'lik bir kısmı ile birlikte gerçekçi koşulların oluşturulabilmesi için yaya parapetleri ve trafik bariyerleri gibi detaylarda çözüm alanına dâhil edilmiştir (**Şekil 8.2**). Temsili tır geometrisi köprünün 150 m'lik kısmında yol doğrultusunda tam ortaya konumlandırılmıştır. Köprü üç gidiş üç geliş olmak üzere altı şeritten oluşmaktadır. Tır ile ilgili HAD çözümleri için tabliye rüzgârın geliş yönü olan memba kısmı ve mansap kısmı iki parça olarak değerlendirilmiş ve **Şekil 8.3**'te gösterildiği gibi memba sol (u_l), memba sağ (u_r), mansap sol (d_l) ve mansap (d_r) olmak üzere dört parça olarak tanımlanmıştır.

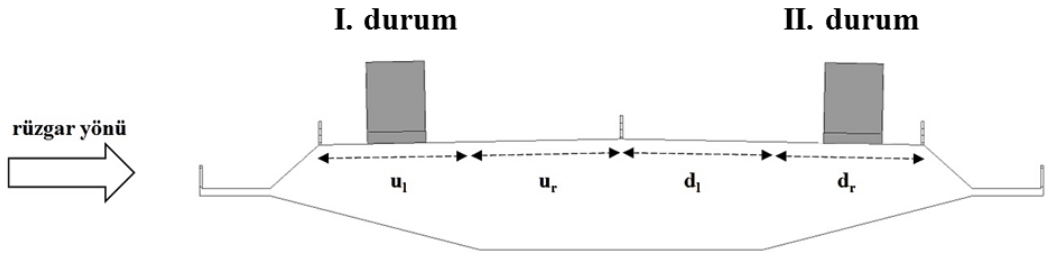


Şekil 8.2. Üç boyutlu çözüm alanı geometrisi izometrik görünümü ve tabliye üstten görünümü

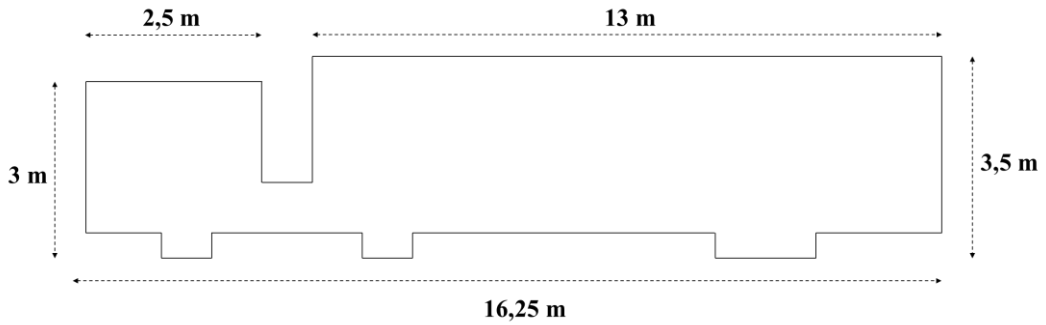
Birçok çalışmada, rüzgâr yüklerinin etkileri farklı araç tipleri, farklı rüzgâr koşulları ve araçların köprü üzerinde bulunduğu konum açısından rüzgâr tüneli

testleri ile deneysel olarak incelenmiştir. Rüzgâr etkisinin her ne kadar sürücü tarafından hissedilmesi zor olsa da beklenildiği gibi memba yönüne en yakın şeritte ve rüzgâr akımının tabliyeye paralel olduğu durumda kritik olduğu tespit edilmiştir [43,44]. Ayrıca rüzgâr hızlarına karşılık farklı araç tipleri ile yapılan çalışmada aracın devrilmesi için gerekli yandan dik doğrultuda gelen rüzgâr hızları, 5,5 m uzunluğundaki karavanlar için 24 m/s, 13,5 tonluk yarı römorklu araçlar için 33 m/s ve kamp minibüsleri için 45 m/s olarak bulunmuştur [45].

Bu çerçevede Osman Gazi Köprüsü üzerindeki bir temsili tır üzerine etkileyen rüzgâr yüklerinin analizi için, tırın memba sol şeritte ve mansap sağ şeritte bulunduğu iki durum için (Şekil 8.3) HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan temsili tır geometrisine ait detaylar Şekil 8.4'te gösterilmiştir.



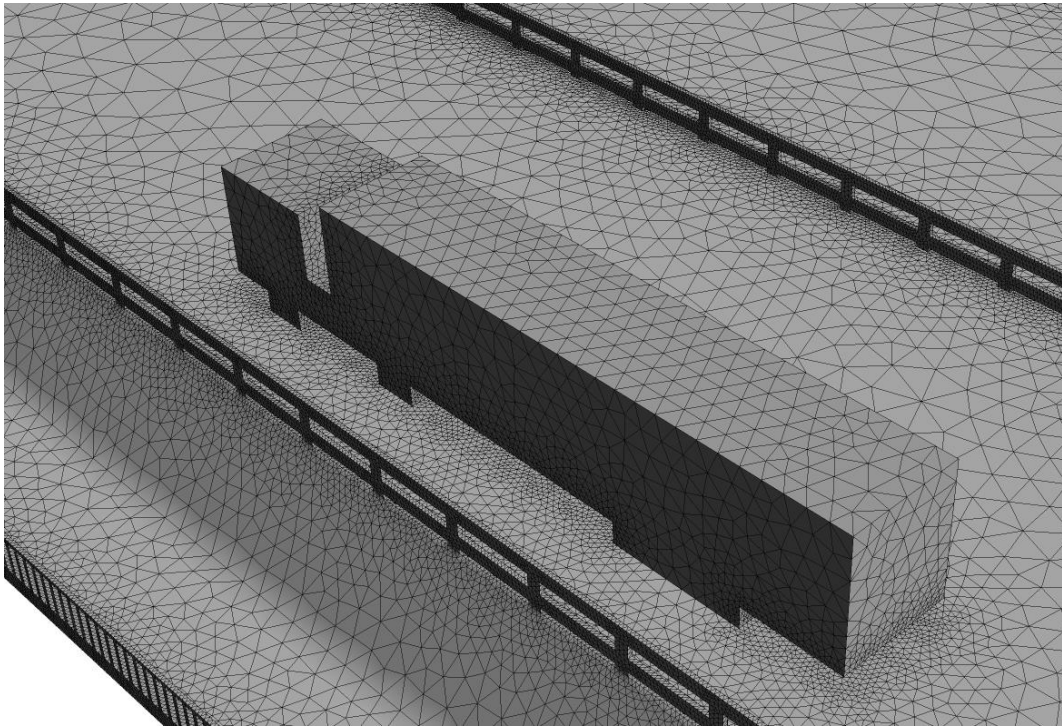
Şekil 8.3. Rüzgâr yönüne göre tırın tabliye üzerindeki farklı konumları



Şekil 8.4. Temsili tır geometrisi

Model geometrisi hazırlandıktan sonra çözüm alanına uygun sayısal ağ oluşturulmuştur. Modeldeki detayların fazlalığı ve de çözüm alanının büyüklüğü

nedeniyle yapılandırılmış bir ağ konfigürasyonu yerine yapılandırılmamış üçgen prizma ve dört yüzlü elemanlardan oluşan bir konfigürasyon kullanılmıştır (**Şekil 8.5**). Tabliyeye ve tıra yakın bölgelerde ağ yapısı sıklaştırılarak gereken hassasiyetin yakalanabilmesi için yaklaşık 16 milyon eleman kullanılmıştır. Köprü ve tır çeperinde ise y_+ değerinin 1 değerine yakın olabilmesi için çepere komşu eleman boyutu olarak 1 mm seviyesinden başlayan ve kademeli olarak artan 10 katmanlı bir sıklaştırma bölgesi uygulanmıştır.



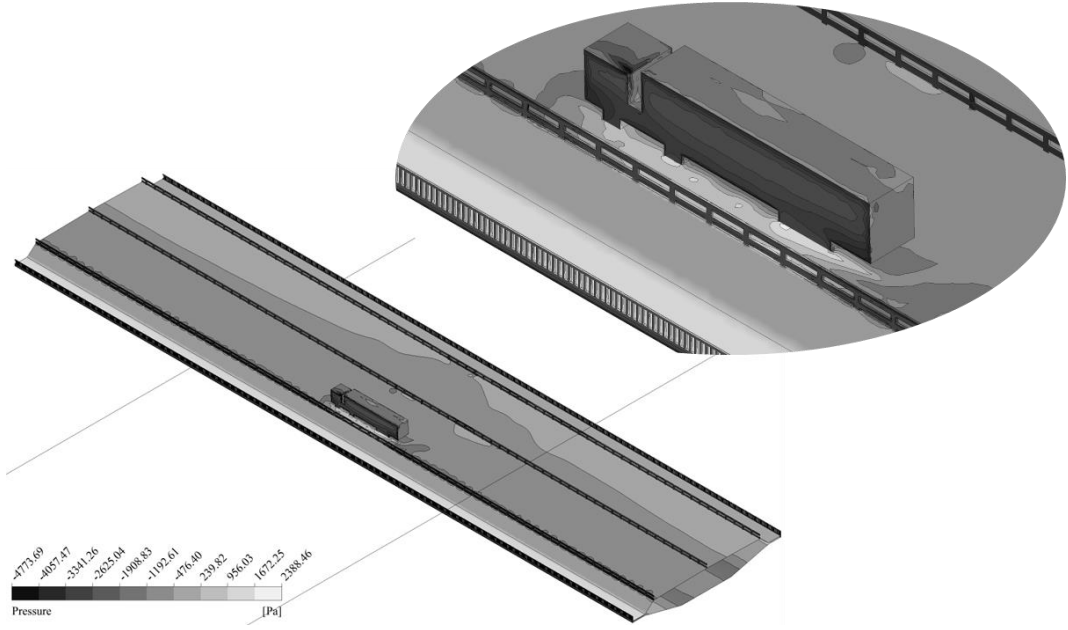
Şekil 8.5. Köprü tabliyesi ve tıra ait sayısal ağ

HAD çözümleri için daha önce yapılan iki boyutlu tabliye analizlerinde kullanılan sınır koşulları ve fiziksel parametreleri aynı şekilde kullanılmıştır. Zamandan bağımsız çözümler için kritik rüzgar hızı olan 58 m/s ve türbülans modeli olarak SST modeli tercih edilmiştir.

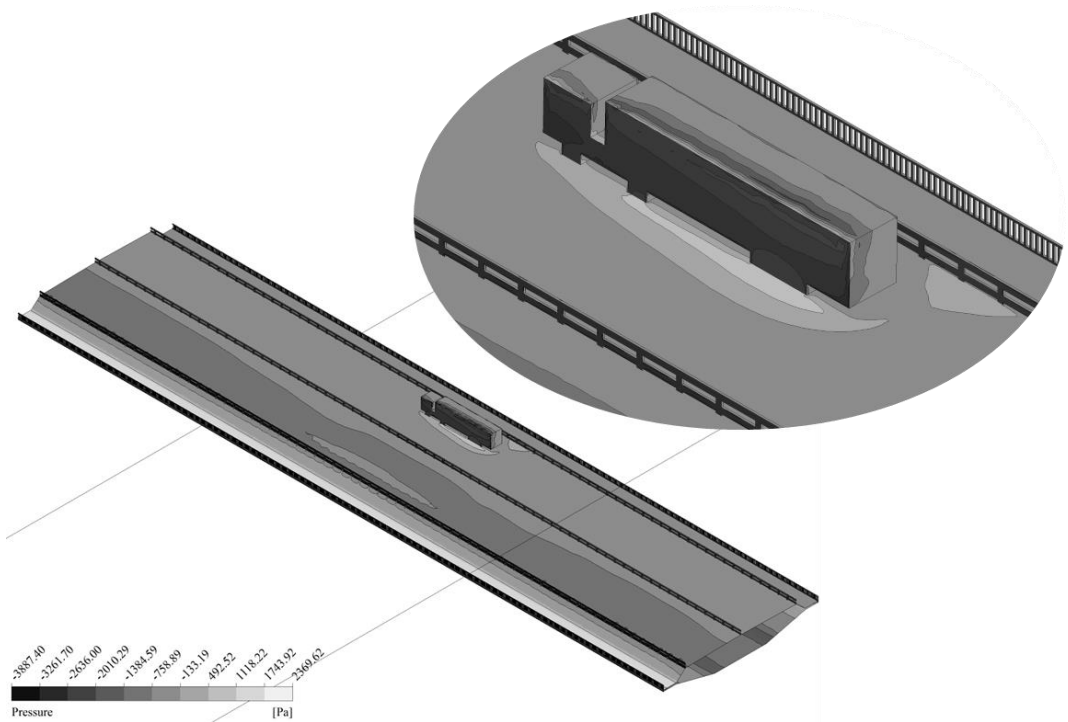
8.2 Üç Boyutlu Köprü ve Tır Sayısal Modeli Sonuçları ve Yorumlanması

Sayısal model sonuçlarının yorumlanması, köprü tabliyesi ve tır çeperinde oluşan basınç ve hız dağılımının incelenmesi ve tıra etkiyen rüzgâr kuvvetlerinin belirlenerek trafik konforu ve güvenliği açısından değerlendirilmesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6 ve 7 üzerinde tırın memba tarafına yakın şeritte ve uzak şeritte bulunduğu iki durum için basınç dağılım konturları gösterilmektedir. Her iki durumda da yolun memba tarafındaki şeridinde mansap tarafındaki şeride oranla daha düşük basınç dağılımı olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni olarak rüzgâr akımının tabliye geometrik yapısı ve yaya parapetleri ile karşılaştıktan sonra hız kazanması olarak gösterilebilir. Tırın membaya yakın olduğu durumda ise tır arkasında kalan düşük basınç bölgesinin diğer şeride kadar etki ettiği görülmektedir. **Şekil 8.8, 8.9 ve 8.10** da tabliye etrafında oluşan akım çizgileri ve hızlar üzerinden de söz konusu yüksek ve düşük basınç bölgeleri yorumlanabilmektedir. Tır olmadığı kesitteki akım çizgilerine göre memba tarafındaki yaya yolunun altında yer alan bölgede, memba tarafındaki şeritte, mansap tarafındaki şeridin orta bariyerler yakın kısmında ve yaya yolunun köprüünün kuyruk kısmına bağlandığı bölgelerde düşük hızlı çevrintili akım olduğu tespit edilebilmektedir. Buradan hareketle genel olarak tabliye üzerinde, araç ve yaya yollarındaki rüzgâr akım hızlarının parapet ve bariyerler sayesinde enerjisinin kırıldığı ve yavaşladığı görülmektedir. Diğer taraftan da tabliye üzerindeki basıncın tabliye altındaki basınca göre yüksek olduğu ve kaldırma kuvvetinin yerçekimi doğrultusunda etki ettiği ve akıma karşı direnç arttığı için sürüklenme kuvvetinin de aynı şekilde arttığı anlaşılabilir.

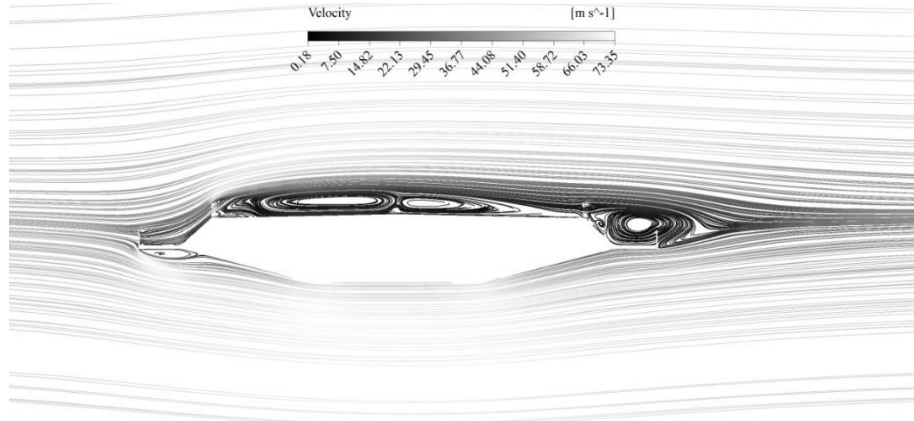


Şekil 8.6. Köprü tabliyesi ve tır yüzeyinde oluşan basınç dağılımı (I. Durum)

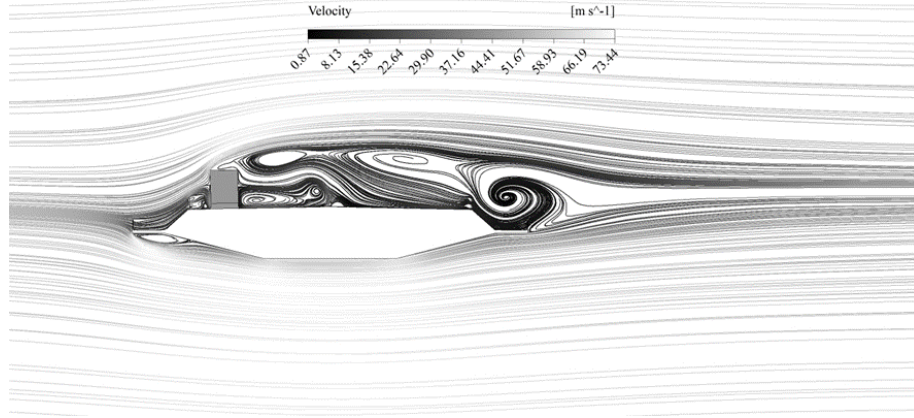


Şekil 8.7. Köprü tabliyesi ve tır yüzeyinde oluşan basınç dağılımı (II. Durum)

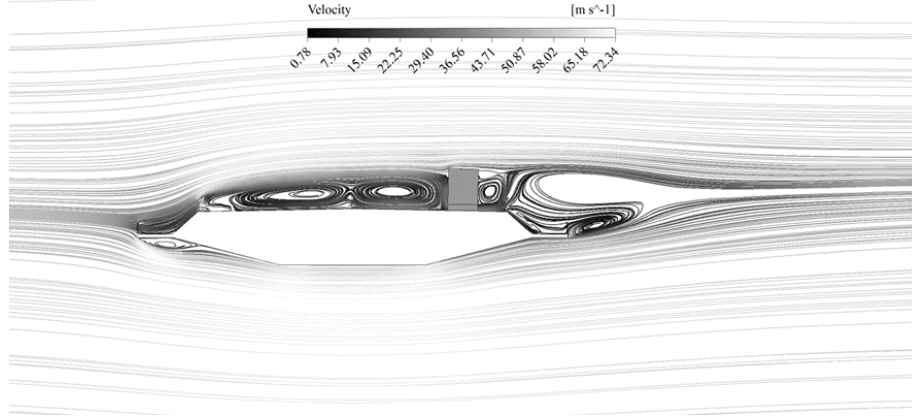
Tırın bulunduğu kesitte ise her iki durum içinde tabliye kuyruk bölgesindeki çevrıntili akım yapısının daha büyük bir alana etki ettiği, tabliye üzerinde ise I. durumda tır ile karşılaşan hızlı rüzgâr akımının tırın üzerinden yükselerek arkasında daha yüksek alana sahip bir düşük hız bölgesi oluşturduğu gözlemlenmektedir. Bu da tırın kendisi için daha fazla kuvvet alması anlamına gelirken diğer şeritte bulunan muhtemel bir araç için daha düşük kuvvet alması anlamına gelmektedir.



Şekil 8.8. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (tırın olmadığı kesit)



Şekil 8.9. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (I. durum)



Şekil 8.10. Köprü tabliyesi etrafında oluşan akım çizgileri (II. durum)

Her iki durum genel olarak karşılaştırılırsa I. durumda tır yüzeyine etkiyen maksimum pozitif basınç değerinin 2011,45 Pa ve maksimum negatif basınç değerinin -4773,69 Pa olduğu hesaplanmıştır. II durumda ise tır yüzeyine etkiyen maksimum pozitif basınç değerinin ve maksimum negatif basınç değerinin daha düşük ve sırasıyla 1524,85 Pa -2576,61 Pa olduğu hesaplanmıştır. Doğrudan kuvvetler üzerinden (**Çizelge 8.1**) baktığımızda tüm doğrultularda rüzgar yüklerin I. durumda daha büyük olduğu görülmektedir. Kritik bölgeler olan rüzgârın araca dik geldiği yan yüzeylerde I. durumda memba yönünde yaklaşık 98 kN ikinci durumda ise 43 kN olarak tespit edilmiştir. Mevcut durumda tır mansaba yakinken, tırı devirmeye çalışan momentin yaklaşık olarak 90 mN.m olduğu ve buna göre söz konusu tırın devrilmeye karşı en az 7 ton ağırlığa sahip olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Daha kritik olan I. duruma baktığımızda tırı devirmeye çalışan rüzgar kaynaklı momentin yaklaşık 165 mN.m olduğu ve bu momenti karşılayabilmek için tırın ağırlığının en az 15 ton olması gerekmektedir.

Çizelge 8.1. Tıra etkiyen farklı doğrultulardaki toplam rüzgâr kuvvetleri

Kuvvet Doğrultusu	Kuvvet (N)	
	I. Durum	II. Durum
Rüzgâr akım doğrultusu	98029	42554
Yerçekimi doğrultusu	18437	14099
Yol doğrultusu	2227	65

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sayısal aerodinamik analizler literatürde karşılaşılan genel uygulamalarda olduğu gibi sadece köprü tabliyesi ve belirli bir kısmı için gerçekleştirilmiştir. Köprünün ayakları ve halatları gibi tüm detayları ile sayısal olarak modellenmesi her ne kadar daha gerçekçi bir yaklaşım olması beklense de söz konusu yapının karmaşık geometrisi ve büyük boyutları nedeniyle tümüyle çözümlenmesi oldukça güçlü (süper bilgisayarlar) bilgisayarlar gerektirmektedir. Sadece son bölümdeki köprünün 150 m'lik kısmı için yapılan üç boyutlu analizlerde, yaya parapetleri ve trafik bariyerlerinin de eklenmesiyle yaklaşık 15 milyon sayısal ağ elemanına ihtiyaç duyulmuştur. Kullanılan yüksek mertebeden çözüm ve türbülans şemaları da hesaba katıldığında bu tür analizlerin bilgisayar kapasitesini ne kadar zorladığı anlaşılacaktır. Bu şartlar altında köprünün tümüyle modellendiği ve LES türbülans modelinin kullanıldığı zamana bağlı bir analizin en gerçek koşulları yansıtacağı düşünülse de bu tür bir çözüm için çok üst düzey bilgisayar performansı ve tek bir çözüm için dahi uzun çözüm süreleri gerekebilmektedir.

Diğer taraftan, trafik güvenliğinin incelenmesi için yapılan analizlerde tırın hareket etmediği ve söz konusu kuvvetlere tırın hareketi nedeniyle yol doğrultusunda oluşacak göreceli bir rüzgâr kuvvetinin de ilave edileceği unutulmamalıdır. Ancak bu durumda oluşacak ek kuvvetler, moment yönü ve devrilme eksenini üzerinden değerlendirildiğinde tırın devrilmesi açısından etkili olmayacağı söylenebilir. Sonuç olarak, kritik rüzgâr hızı olan 58 m/s için dahi köprü üzerindeki tır gibi uzun araçlar için bir devrilme riski bulunmadığı ve burada tabliye kenarlarındaki yaya parapetlerinin önemli etkisi olduğu anlaşılmaktadır (burada anlık yüksek rüzgâr hızlarının neden olacağı etkilerin, daha yüksek hızların ve farklı akım açılarının ayrıca değerlendirilmesi gerekebilir).

Özetlemek gerekirse, sayısal analizi yapılan Osman Gazi Köprüsünün aerodinamik kuvvetler açısından rüzgâr akıma uyumlu bir şekilde tasarlandığı ve köprü tabliyesinin oldukça düşük bir sürüklenme katsayısına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı türbülans modelleri için yapılan çözümler birbirine yakın hız ve

basınç dağılım özellikleri gösterse de bu tür çevrıntili akım yapılarının ve negatif basınç gradyanlarının bulunduğu dış aerodinamik analizlerde daha etkili bir model olan SST türbülans modelinin daha uygun ve doğru sonuçlar vereceği kabul edilebilir. Kaldırma ve sürüklenme kuvveti bakımından ise yer çekimi ve rüzgâr akım doğrultusunda değişken bir rüzgâr kuvveti altında olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak tabliye mansap tarafından oluşan girdap yapılarının zamana bağlı değişimi gösterilebilir. Bu tür karasız vorteks yapıları, tabliye üzerinde titreşime neden olmakta ve bu titreşimler yapının doğal frekansına eşit olması durumunda ise yapının rezonansa girerek zarar görmesi mümkün hale gelebilmektedir.

Trafik güvenliği ve sürüş konforu açısından yapılan analizlerde ise rüzgâr doğrultusunda geniş yüzey alanına sahip tır ve otobüs benzeri araçlar için yüksek akım hızlarında dahi devrilme momentlerinin kritik büyüklüklere ulaşmadığı, bunda da tabliye geometrisi, tabliye etrafındaki parapet ve trafik bariyeri gibi yapıların etkili olduğu anlaşılmıştır. Ancak söz konusu çözüm farklı rüzgar yönleri için tekrarlanarak farklı hücum açıları için durum tekrar değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Roache, P.J. (1997), “Quantification of uncertainty in computational fluid Dynamics”, *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 29. 123–60
- [2] Filonovich, M.S., Azevedo, R., Rojas-Solórzano, L.R. ve Leal, J.B. (2013), “Credibility analysis of computational fluid dynamic simulations for compound channel flow”, *Journal of Hydroinformatics.* 15.3, 926-938
- [3] ANSYS CFX-Solver Theory Guide (2006), ANSYS Inc, Canonsburg, PA
- [4] Millia Viyadüğü resmi web sayfası, <http://www.leviaducdemillau.com/>, Son ziyaret; 20.04.2015, 14:00
- [5] Billah, K.Y. ve Scanlan, R.H. (1991), “Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks”, *Am. J. Phys.*, 59:2, 118-124
- [6] Larsen, A. (2000), “Aerodynamics of the Tacoma Narrows Bridge - 60 Years Later”, *Structural Engineering International*, 10:4, 243-248
- [7] Scanlan, R.H. ve Sabzevari, A. (1967), “Suspension bridge flutter revised”, Preprint No. 468, Amer. Soc. Civil Eng., National Meeting on Structural Engineering
- [8] Airong, C., Rujin, M. ve Dalei, W. (2009), “Aerodynamic problems of cable-stayed bridges spanning over one thousand meters”, *Engineering*, 7:3, 16-22
- [9] Scruton, C. (1952), “Experimental investigation of aerodynamic stability of suspension bridges with specialreference to proposed Severn bridge”, *Inst. Civil Eng.*, 1:2
- [10] Hirai, A. ve Okauchi, I. (1960), “Experimental study on aerodynamic stability of suspension bridges with specialreference to the Wakato Bridge”, *Bridge Engineering Laboratory, University of Tokyo*
- [11] TÜBİTAK-SAGE web sayfası, <http://www.sage.tubitak.gov.tr/tr/hizmetlerimiz/ruzgar-tuneli-test-hizmetleri-0>, son ziyaret 21.07.2015, 15:30

- [12] STRUCTURE dergisi web sayfası, <http://www.structuremag.org/?p=3607>, son ziyaret 22.07.2015, 10:00
- [13] Kurç, Ö., Kayışoğlu, B., Shojaee, S. M. N. ve Uzol, O. (2012), “Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleleriyle Tespiti”, İMO Teknik Dergi, 6163-6186, Yazı 389
- [14] Şafak, E. (2012), “Yüksek Yapılardaki Rüzgar Yüklerinin Hesabı”, Türkiye Mühendislik Haberleri, 471,57/1
- [15] Nozawa, K. ve Tamura, T. (2002), “Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90: (10), 1151-1162.
- [16] Dayang, W., Yun, Z., Qingxiang, L., Xuesong, D. ve Yong Z. (2012), “Numerical study on wind-pressure characteristics of a high-rise building in group of buildings”, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China
- [17] Zheng, D., Zhang, A. ve Gu, M. (2012), “Improvement of inflow boundary condition in large eddy simulation of flow around tall building”, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 6:4, 633–647
- [18] Dagnev, A. K. ve Bitsuamlak G.T. (2014), “Computational evaluation of wind loads on a standard tall building using LES”, Wind and Structures, 18:5, 567-598
- [19] Elshaer, A., Bitsuamlak, G. ve Damatty A.E. (2015), “Aerodynamic shape optimization for corners of tall buildings using CFD”, 14th International Conference on Wind Engineering, Porto Alegre, Brazil
- [20] Irwin, P.A. (2008), “Bluff body aerodynamics in wind engineering”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 701–712
- [21] Lopes, A.V., Cunha, A. ve Simões, L.M.C. (2005), “CFD based evaluation of the serviceability conditions of a cable stayed bridge under wind load” Eurodyn Conference

- [22] Szabó, G. ve Györgyi, J. (2009), “Three-dimensional Fluid-Structure Interaction Analysis for Bridge Aeroelasticity”, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science
- [23] TS 498 (1997) Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri
- [24] ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures
- [25] AASTHO LRFD (2012) Bridge Design Specifications
- [26] EN 1991 (1991) (Eurocode) Actions on Bridges
- [27] TS EN 1991-1-4 (2007) Yapılar Üzerindeki Etkiler
- [28] Kelkar, K.M. ve Patankar, S.V. (1992), “Numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 14, 327–341
- [29] Sohankar, A., Davidson, L., Norberg, C. (1998), “Low- Reynolds- number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 26, 39–56
- [30] Wang Z. (2015), “Experimental and CFD investigations of the Megane multi-box bridge deck aerodynamic characteristics”, Master Thesis, University of Ottawa, Canada
- [31] Shirai S. ve Ueda T. (2003), "Aerodynamic Simulation by CFD on Flat Box Girder of super-long-span Suspension Bridge", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, 279-290
- [32] Abdel-Aziz, A. ve Attia, W.A. (2015), “Aeroelastic Investigation of Different Deck Sections for Suspension Bridges by Numerical Analysis” International Journal of Engineering and Innovative Technology, 4:12, 49-57
- [33] Haque, M.N., Katsuchi, H., Yamada, H. ve Nishio, M. (2016), “Flow field analysis of a pentagonal-shaped bridge deck by unsteady RANS”, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 10:1, 1-16

- [34] Keerthana, M. ve Harikrishna, P. (2013), “Application of CFD for assessment of galloping stability of rectangular and H-sections”, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72, 419-427
- [35] Fransos, D. (2008), “Stochastic Numerical Models for Wind Engineering”, Ph.D. Thesis, Politecnico di Torino, Italy
- [36] Pope, S.B. (2000), “Turbulent Flows”, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- [37] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. ve Carissimo, B. (2007), “Best Practise Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment”, COST Office, Brussels
- [38] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. ve Speziale, C.G. (1992), "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids A*, 4:7, 1510-1520
- [39] Menter, F.R. (1992), “Performance for popular turbulence models for attached and separated adverse pressure gradient flows”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30:8, 2066-2072
- [40] Menter, F.R. (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 32: 8, 1598-1605
- [41] Wille, R. (1960), “Kármán Vortex Streets”, *Advances in Applied Mechanics*, 6, 273–287
- [42] Baker, C.J. ve Robinson, C.G. (1990), “The assessment of wind tunnel testing techniques for ground vehicles in cross winds”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 33:1–2, 429–438
- [43] Liu, X., Han, Y., Cai, C.S., Levitan, M. ve Nikitopoulos, D. (2016), “Wind tunnel tests for mean wind loads on road vehicles”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 150, 15–21

- [44] Kozmar, H., Butler, K., Kareem, A. ve Dist, M. (2015), “Downslope Gusty Wind Loading of Vehicles on Bridges”, *Journal of Bridge Engineering*, 20:11, 1-12
- [45] Saiidi, M. ve Maragakis, E. (1995), “Identification of trigger wind velocities to cause vehicle instability”, Final Report to the Nevada Department of Transportation, District II, Agreement No. P206-95-201, Reno, NV.