

Osmangazi Köprüsüne etkiyen rüzgâr yüklerinin sayısal modelleme ile incelenmesi

Investigation of wind loads on the Osmangazi Bridge with numerical modeling

Ahmet Ozan ÇELİK^{1*}, Volkan KİRİÇÇİ¹

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
aocelik@anadolu.edu.tr, vkiricci@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.11.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 19.04.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.82160

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Rüzgâr yükleri, çeşitli yapıların tasarımında önemli dinamik yüklerdir. Özellikle, ulaştırma, yapı ve akışkanlar mekaniği gibi farklı disiplinlerin bir arada değerlendirilmesini gerektirdiği için özel bir mühendislik problemi olarak gösterilebilir. Gelişen teknikler ile birlikte, artan ihtiyaçlara cevap vermek adına köprü ve köprüyol tasarımları daha geniş ve daha yüksek açıklıkları aşmak için sınırları zorlamaktadır. Bu özelliklerdeki yapıların aerodinamik açıdan değerlendirilebilmesi için hazırlanmış yöntemler ve rüzgâr tüneli testleri kullanılmaktadır. Ancak, söz konusu yöntemlerin içerdiği kısıtlamalar ve dezavantajlar, sayısal model çalışmalarını daha önemli bir hale getirmiştir. Geliştirilen sonlu elemanlar uygulamaları, başarılı sınır koşulu ve türbülans modelleri ile birlikte yüksek performanslı bilgisayarlar kullanılarak her türlü geometrik yapı için yüksek hassasiyette hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapabilmek mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, Osmangazi Köprüsü tablyesinin, farklı rüzgâr hızları ve farklı türbülans modelleri için aerodinamik analizi sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Köprüye etki eden rüzgâr yükleri, aerodinamik kuvvetler olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, köprü tablyesinin geometrik olarak akıma uyumlu bir yapıda tasarlandığı ve bu nedenle oluşan rüzgâr direncinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: HAD, Aerodinamik analiz, Köprü tasarımı

Abstract

Wind loads are crucial dynamic load for various structures. It is a unique engineering problem particularly because it requires the combined expertise of transportation, structure and fluid mechanics engineers. With the advancing techniques and technologies, also to answer the increasing demand, the design of bridges and bridge-ways tends to move towards wider structures with longer spans. Typically, standards and wind tunnel tests are used to evaluate the design of structures with such characteristics aerodynamically. However, the limitations and disadvantages of these methods make numerical modeling efforts more important. The developed finite element methods, applications of successful boundary conditions and turbulence models together with high performance computing power makes it possible to analyze structures with various geometries with computational fluid dynamics method. In this study, aerodynamic analysis of The Osmangazi Bridge deck slab under a number of wind speeds and turbulence models were performed numerically. The wind loads acting on the bridge were evaluated as the aerodynamic loads. The results show that the deck slab cross section is well streamlined and the wind resistance of the structure is quite low.

Keywords: CFD, Aerodynamic analysis, Bridge design

1 Giriş

Gelişen mühendislik teknikleri ve teknolojinin yanında artan taleplere cevap vermek adına köprü ve köprüyol tasarımları daha geniş ve daha yüksek açıklıkları aşmak için sınırları zorlamaktadır. 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.

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. 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 giriş 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 [1],[2].

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 rüzgâr sebebiyle oluşan hareketli yüklerin tanımlanması amacıyla bir takım analitik, ampirik ve nümerik çalışmalar yapılmıştır [3],[4].

Mühendislik problemlerinin çözümünde genellikle analitik yöntem, deneysel yöntem ve nümerik yöntem olmak üzere üç temel yaklaşım uygulanmaktadır. Birçok mühendislik probleminin çözülmesi 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. Köprü ve köprüyol gibi büyük ölçekli yapıların rüzgâr yükleri açısından tasarımının yapılabilmesi için çoğunlukla rüzgâr tüneli testleri uygulanmaktadır. 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 tabakasının, tamimiyle olmasa bile mümkün olduğunca gerçeğe yakın biçimde modellenmesi gerekmektedir. Ayrıca rüzgâr doğrultusunda modelin izdüşümü alanı deney odası kesit alanının %8'inde fazla olmamalı ve oluşabilecek tüm ölçeklerdeki türbülans uzunluklarının sağlanması gerekmektedir [5],[6].

Analitik ve deneysel metotların yanı sıra bir diğer çözüm metodu ise nümerik yöntemler ve sayısal modelledir. Nümerik yöntemlerde, probleme uygun matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlar uygulanarak yakınsak bir çözüm elde edilmesi amaçlanmaktadır. Nümerik çözüm, içerisinde kullanılan yöntemim hassasiyeti oranında belirli bir hata barındırmakla birlikte karmaşık mühendislik analizlerinde oldukça pratik ve yeterli ölçüde isabetli sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Bu bağlamda, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu, i) istenilen geometrik yapı etrafındaki akım alanı içerisinde sayısal bir ağ oluşturulması ii) sonsuz küçük ifadelerden oluşan diferansiyel denklemlerin (akım denklemleri) hesaplanabilir sonlu küçük parçalar içeren cebrik ifadelerle dönüştürülerek bu ağ üzerinde merite olarak uyuşması, ve iii) uzayda ve zamanda bilgisayar hesaplama gücü yardımıyla ayrılaştırılmış denklemlerin iteratif olarak çözülmesi prensibine dayanan nümerik bir 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 [7].

Yüksek yapıların aerodinamik açıdan HAD metodu ile incelenmesi tasarım öncesi ve tasarım sonrası problemlerin belirlenip çözülmesi 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 burgaçlara neden olan köşeli yapı kesitleri yerine yumuşatılmış ya da daha farklı geometrik şekiller uygulanmış kesit analizleri, yapıya etkiyen sürüklenme kuvvetleri ve burgaç etkileri gibi aerodinamik kuvvetlerin azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür [8],[9].

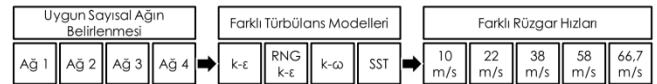
Köprü tasarımında, rüzgâr tüneli testleri ile birlikte rüzgâr yükünün etkisi ve hesap yöntemleri çeşitli yönetmeliklerde

ortaya konulmuştur. Bu anlamda dünyada önde gelen ve bu sebeple ülkemizde de referans alınmakta olan başlıca yönetmelikler AASHTO LRFD, ASCE 7-02, EN 1991, ve ülkemizde yürürlükte olan TS EN 1991, TS 498 ve İstanbul Büyükşehir Belediyesi Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliğidir. Söz konusu yönetmelikler, tasarımda kullanılan yüklerin hesabı ile alakalı olup rüzgâr yüklerinin hesaba katılması noktasında arazi tipi, yüzey pürüzlülüğü ve topoğrafya gibi etkenler dâhilinde ortalama rüzgâr hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak hesap detaylarında yönetmelikler arasında bazı farklılıklar da bulunabilmektedir. Örneğin, ortalama rüzgâr hızı tayini için ASCE 7-02 yönetmeliği ve EN 1991 yönetmeliğinde farklı zaman aralıkları tercih edilmektedir. Türkiye'de ulaştırma yapılarının tasarımında, ilgili yüklerin hesabı için rüzgâr tüneli testleri ile birlikte ASSTHO LRFD Türkçe sürümü kullanılmaktadır [10]-[15].

Bu çalışmada, bir ulaştırma yapısı olan Osmangazi Köprüsü, bir sayısal modelleme yöntemi olan HAD metodu kullanılarak çözümlenmiş, yapıya etki eden dinamik rüzgâr kuvvetlerinin benzetimi yapılarak yapının bu dinamik yükler altındaki performansını incelenmiştir. Bunu yaparken de, daha önce bu yapı için hiç uygulanmamış olan türbülans modelleri ve bu modellerin ağ bağımsızlığı incelenmiştir. Ayrıca bu çalışma, bir yüksek lisans tezinin, [16], 1-7 kısımlarının bir özeti niteliğinde olup, bu özgün tez çalışmasının bilim camiası ile paylaşılması amaçlanmaktadır.

2 Osmangazi köprüsüne etki eden rüzgâr yüklerinin HAD metodu ile belirlenmesi

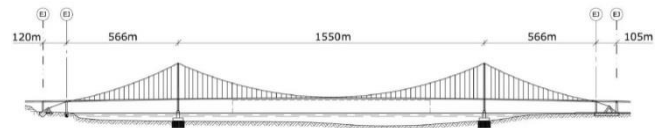
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, hareket halindeki akışkanın davranışını, matematiksel yaklaşımlar kullanılarak (sonlu elemanlar), bilgisayar destekli hesaplama gücü yardımı ile inceleyen bir yöntemdir. Bu çalışmada HAD simülasyonları iki boyutlu köprü tabliyesi modelinde Şekil 1'de gösterildiği üzere farklı sayısal ağ, türbülans modeli ve rüzgâr hızları için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1: HAD modelinde kullanılan farklı sayısal ağ, Türbülans modeli ve rüzgâr hızı şeması.

2.1 Osmangazi köprüsü genel bilgiler

Osmangazi 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 bulunan ve 2016 yılında açılmış asma köprüdür. Dünyanın en uzun açıklıklı dördüncü asma köprüsü olan Osmangazi Köprüsünün orta açıklığı 1550 m ve toplam uzunluğu ise 2682 m'dir (Şekil 2).

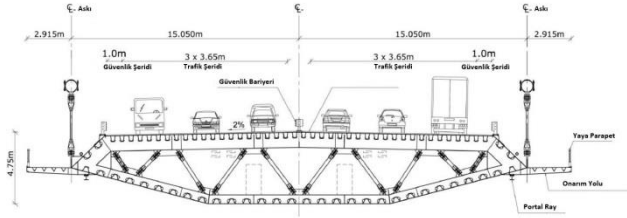


Şekil 2: Osmangazi Köprüsünün genel yerleşim planı ve boyuna uzunluklar [17].

Köprüün 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 3).

Tasarım ömrü 100 yıl olarak belirlenen köprü, Eurocode şartnamelerine uygun olarak inşa edilmiştir [12].

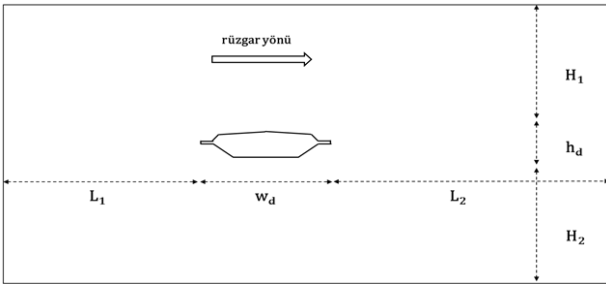
HAD modeli için öncelikle, köprü tabliesine ait iki boyutlu çözümler gerçekleştirilmiş ve ardından köprü üzerindeki araçlara etkiyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi amacıyla üç boyutlu çözümler uygulanmıştır.



Şekil 3: Osmangazi Köprüsü tabliesinin kesit boyutları ve detayları [17].

2.2 Köprü modelinin çözüm alanına ait CAD geometrisinin oluşturulması

Osmangazi 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 tabliesine ait iki boyutlu çözüm alanı oluşturulmuştur (Şekil 4). Köprü tabliesi genişliği (w_d) toplam 31,6 m ve yüksekliği (h_d) 4,75 m olarak birebir ölçülerinde oluşturulmuştur.



Şekil 4: Osmangazi Köprüsü tabliesi 2 boyutlu çözüm alanı.

Çözüm alanı sınır koşulları, köprü tabliesi çevresinde oluşacak akım yapısını etkilemeyecek mesafede bulunmalıdır. Bu kapsamda, literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalar çerçevesinde belirlenmiş kriterler bulunmaktadır [17],[18]. Bu çalışmada kullanılacak olan çözüm alanı boyutları ve köprü tabliesi konumu iki boyutlu tablie analizlerinde farklı çalışmalarda kullanılmış olan değerler, Tablo 1'de verildiği gibi, göz önüne alınarak belirlenmiştir [19]-[24]. 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 (Şekil 4.) sırasıyla $5w_d$, $10w_d$, $5h_d$ ve $5h_d$ olacak şekilde uygulanmıştır. Bu şekilde rüzgârın köprü tabliesi üzerindeki etkilerinin, giriş ve çıkış sınır bölgelerinin etkisi altında kalmadan çözümlenmesi amaçlanmıştır. Tablie üzerinde meydana gelmesi muhtemel akım yapılarının, akımın ayrılması ve tekrar tablie yüzeyine oturması, ayrıca tablie arkasında oluşacak ters akım ve burgaç yapılarının gözlemlenebilmesi için gerekli mesafenin çözüm alanında uygulanması gerekmektedir.

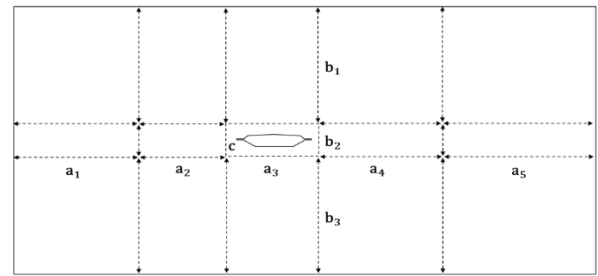
2.3 Köprü modeline ait sayısal ağın oluşturulması

Çözüm alanı geometrisi belirlendikten sonra iki boyutlu tablie 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 sıklıklandırma faktörleri uygulanmıştır (Şekil 5).

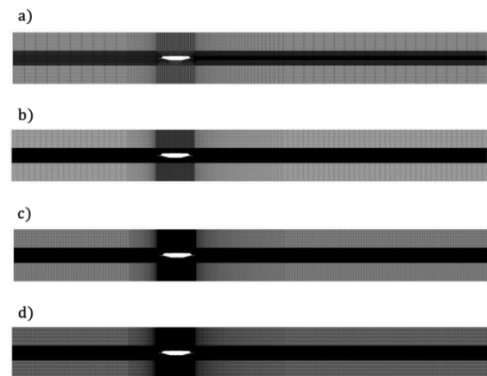
Tablo 1: İki boyutlu tablie analizlerinde kullanılmış olan tablie konum değerleri (Konumlar için Bkz Şekil 4).

L_1	L_2	H_1	H_2	Kaynak No
3.5 W	10.5 W	5 H	5 H	[19]
5 W	10 W	3 H	3 H	[20]
5 W	10 W	4.5 W	4.5 W	[21]
18 H	25 H	12 H	12 H	[22]
15 W	25 W	15 W	15 W	[23]
15 W	30 W	15 W	15 W	[24]
3.5-15 W	10-30 W	3 H-15 W	3 H-15 W	



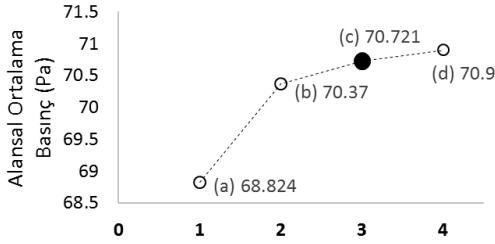
Şekil 5: Osmangazi Köprüsü tabliesi sayısal ağ bölgeleri.

Uygulanan HAD çözümünün sayısal ağ yapılandırmasından bağımsız çözüm (mesh independent) 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 a-d) en uygun eleman boyutu belirlenmeye çalışılmıştır. En uygun eleman boyutunun belirlenmesinde kontrol parametresi olarak köprü tabliesi üzerindeki alansal ortalama basınç seçilmiştir. Ayrıca ağ bölgeleri incelendiğinde tablieden uzak kısımlarda daha kaba tablie çevresindeki alanlarda ise belirli sıklıklandırma faktörleri kullanılarak daha ince ağ yapısı uygulanmıştır.



Şekil 6: Köprü tabliesi sayısal ağlar, yukarıdan aşağıya en büyükten en küçük elemanlı ağdan oluşan çözüm alanları.

Şekil 7 üzerinde dört farklı ağ için 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. 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.



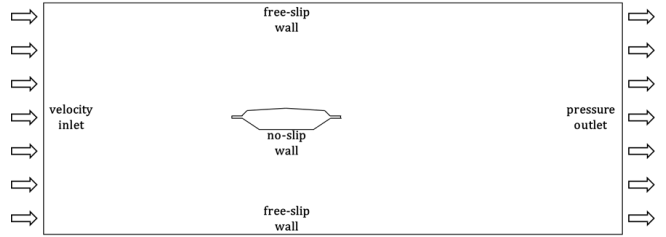
Şekil 7: Dört farklı ağ yapılandırması için kontrol parametresinin değişimi (Şekil içindeki sayılar ağ eleman sayılarını göstermektedir).

2.4 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 ardeşik 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. Köprü'nün 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 (u_x), 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 (no-slip wall) çeper sınır koşulu kullanılmıştır (Şekil 8).



Şekil 8: Çözüm alanı sınır koşulları.

HAD çözümü, kullanılan diferansiyel denklemlerin nümerik metotlar ile zamanda ve uzayda ayrıklaştırılarak cebrik ifadelerle 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.

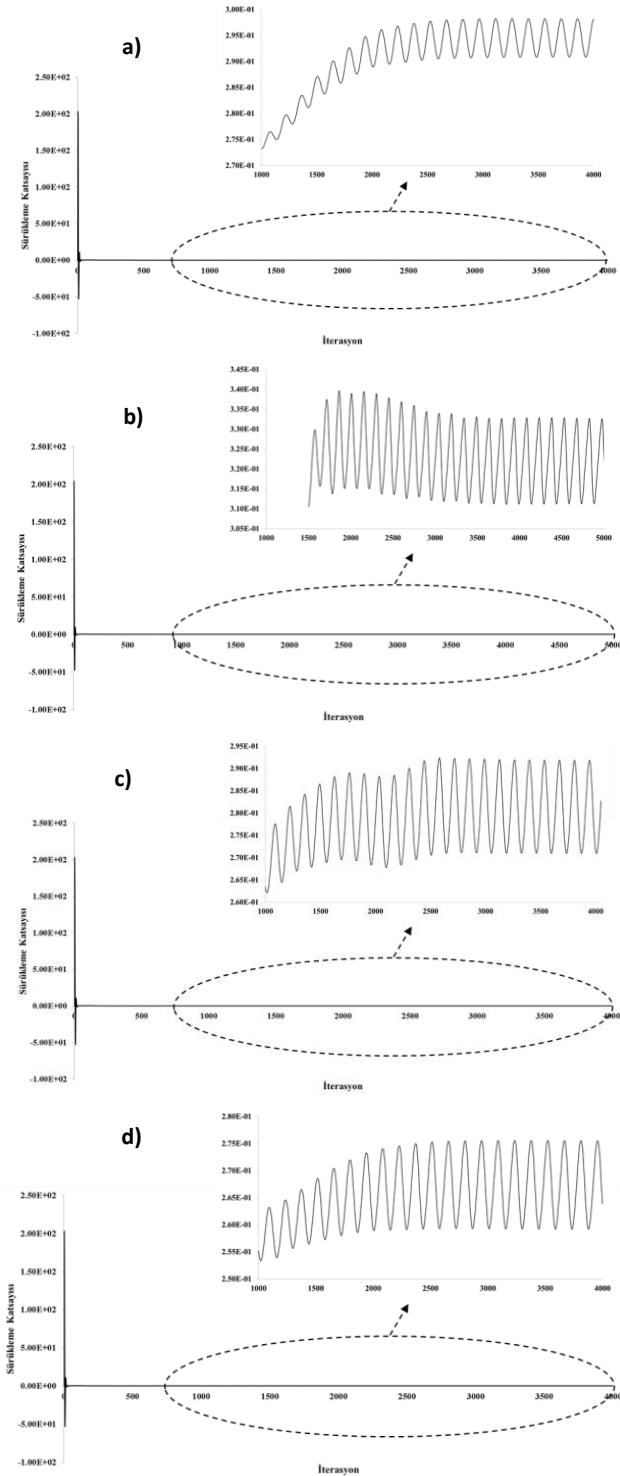
HAD çözümleri için kullanılan ANSYS CFX yazılımı bir çok türbülans modelinin kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Burada köprü tabliyesi analizi için Shear Stress Türbülans (SST), k-epsilon (k-ε), Renormalization Group k-epsilon (RNG k-ε) ve k-ω türbülans modelleri kullanılarak tasarım hızı (38 m/s)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

3 İki boyutlu sayısal çözüm sonuçları ve yorumlanması

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.

Gerçekleştirilen HAD çözümlerinde yakınsama kriterinin yakalanması her zaman doğru çözümü elde edildiğini göstermez. 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 ya da belirli bir sabit salınım içerisinde olması gerekmektedir. Kontrol parametresi olarak köprü tabliyesi için sürüklenme katsayısı belirlenmiş olup Şekil 9a-d'de görülebileceği üzere iterasyon sayısına bağlı olarak değişimi her çözüm için ayrı ayrı gösterilmiştir. İterasyon sayısı değişimle birlikte genel olarak 4000 ile 5000 arasında çözümler sürüklenme katsayısı değişimi açısından sabit yapıya ulaşmıştır. Tablo 2'de sürüklenme katsayılarının salınımı, maksimum, minimum ve ortalama değerler üzerinden gösterilmiştir. Buna göre, k-ε modelinde en dar aralık gözlenirken, RNG k-ε, k-ω ve SST modelleri için sürüklenme katsayısının aldığı değer yaklaşık 0.02 aralığında seyretmektedir. Ortalamalara bakıldığında ise, dört türbülans

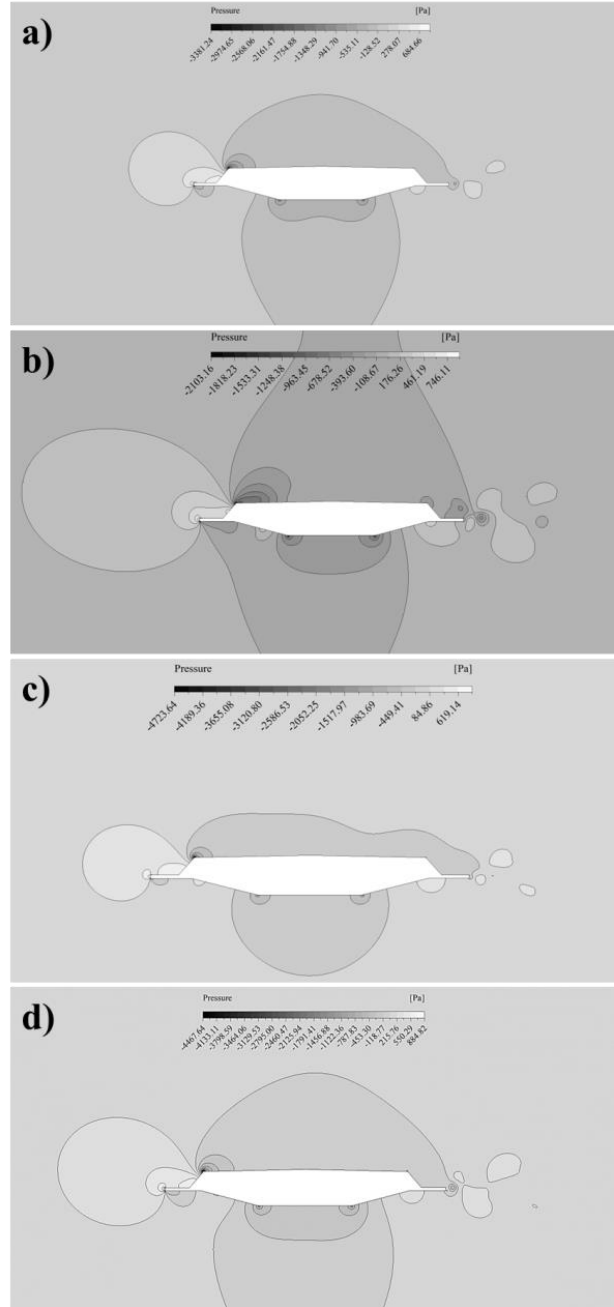
modeli için sürüklenme katsayısı 0.25 ile 0.30 arasında değerler almaktadır. Söz konusu köprü tabliyesinin yapı itibariyle akıma uyumlu (streamlined) bir geometriye sahip olduğu ve tabliye üzerindeki parapet ve trafik bariyerlerinin modelde yer almadığı düşünülürse bu değerlerin daha yüksek olacağı ancak buna rağmen rüzgâr akımı karşısında oldukça uyumlu bir tasarıma sahip olduğu söylenebilir.



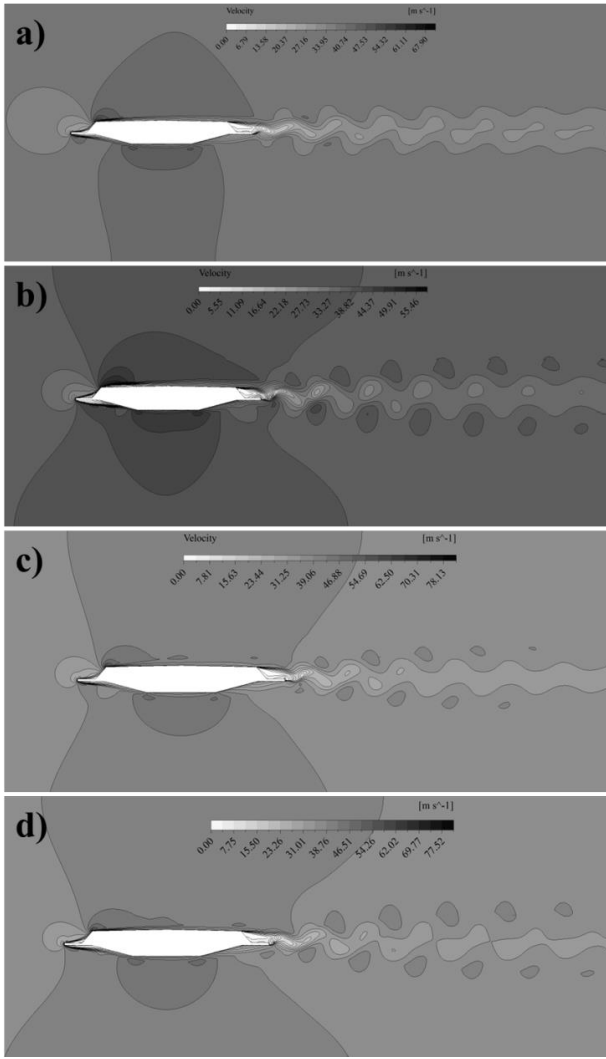
Şekil 9: İterasyon sayısı ve sürüklenme katsayısının değişimi. Yukarıdan aşağıya (a-d) sırası ile k-ε, RNG k-ε, k- ω, ve SST türbülans modelleri.

Tablo 2: Dört türbülans modeli için sürüklenme katsayıları ($u_x=38$ m/s).

Model	(C_{D_min})	(C_{D_ave})	(C_{D_max})	ΔC_D	C_L
k-ε	0.290	0.294	0.298	0.008	-0.074
RNG k-ε	0.311	0.322	0.332	0.021	0.0023
k- ω	0.271	0.281	0.291	0.020	-0.0015
SST	0.259	0.267	0.275	0.016	-0.0591



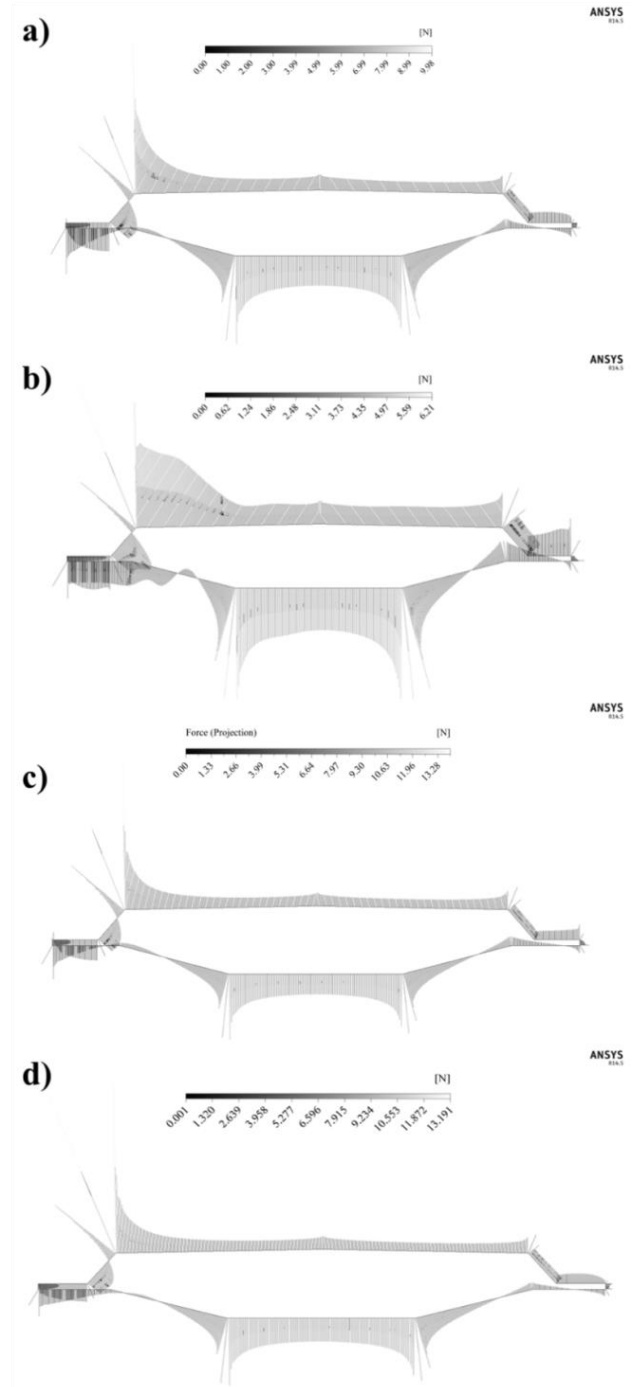
Şekil 10: Köprü tabliyesi etrafındaki basınç dağılım kontürleri. Yukarıdan aşağıya (a-d) sırası ile k-ε, RNG k-ε, k- ω, ve SST türbülans modelleri.



Şekil 11: Köprü tabliyesi etrafındaki hız dağılım kontürleri. Yukarıdan aşağıya (a-d) sırası ile k-ε, RNG k-ε, k-ω, ve SST türbülans modelleri.

Kaldırma katsayıları (C_L) dikkate alındığında ise (Tablo 2-en sağdaki sütun) 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.

Köprü tabliyesi çevresindeki basınç dağılımı incelendiğinde (Şekil 10) k-ω ve SST modellerinde negatif basınç değerlerinin diğer iki modele oranla yüksek çıktığı görülmektedir. Diğer taraftan RNG k-ε modelinin basınç anlamında daha küçük bir aralık ortaya koyduğu ve farklı bir basınç dağılımı yarattığı görülmektedir.

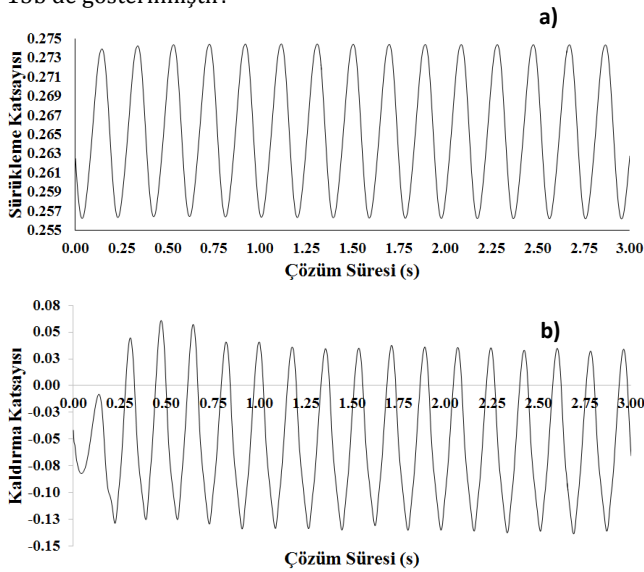


Şekil 12: Köprü tabliyesi etrafındaki kuvvet dağılım vektörleri. Yukarıdan aşağıya (a-d) sırası ile k-ε, RNG k-ε, k-ω, ve SST türbülans modelleri.

Şekil 11'de gösterilen hız dağılım kontürlerinden de anlaşılacağı üzere RNG k-ε modelinin tabliye çevresinde daha düşük hızlar oluşturması da negatif basınç bölgelerinin daha düşük değerler almasına neden olduğu söylenebilir. Dört model için hız dağılımı incelenince her birinde tabliye kuyruk bölgesinde düşük hız bölgelerinin olduğu ve köprüden uzaklaştıkça bu bölgelerin şaşırtmalı olarak süregeldiği ve etkisinin azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu tür burgaç yapıları Karman girdap caddeleri (Karman vortex shedding) olarak adlandırılır [25]. Tabliye üst yüzeyinde k-ε 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 12’de 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-ε modelinde, özellikle tabliyenin sol kısmı olmak üzere oldukça yüksek kuvvet vektörlerinin oluştuğu görülmektedir.

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 yapının rüzgar yönündeki genişliği, yapının rüzgara dik doğrultudaki frekansı ve Strouhal sayısına bağlı olarak belirlenen 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 kararsız burgaç oluşumları beklendiği için zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 13a ve 13b’de gösterilmiştir.

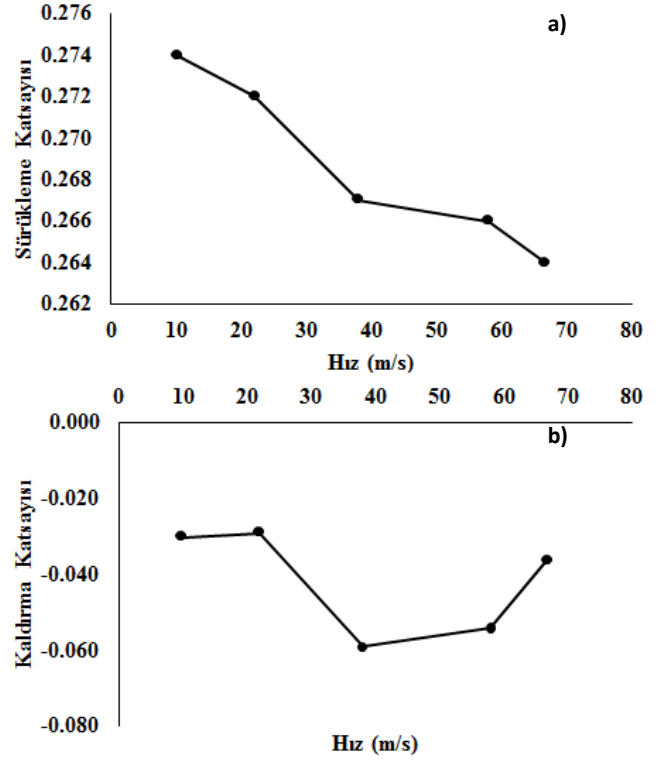


Şekil 13: Çözüm süresi ve (a): Sürüklenme katsayısının (C_D), (b): Kaldırma katsayısının (C_L) değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s).

Sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinin (katsayıların) zamana bağlı salınımı açıkça görülebilmektedir. Kaldırma katsayısı negatif ve pozitif yönlerde yaklaşık 0.10 büyüklüğünde bir aralıkta ve yaklaşık 0.15 sn.’lik bir periyotta salınım göstererek ortalama -0.054 gibi bir değer alırken, sürüklenme katsayısı ise 0.18 büyüklüğünde bir aralıkta yaklaşık olarak 0.20 sn.’lik bir periyotta değişim göstermekte ve ortalama 0.266 gibi bir değer almaktadır. 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 Tablo 3 ve Şekil 14’te ortalama değerler üzerinden gösterilmiştir.

Tablo 3: Farklı rüzgâr hızlarına karşılık sürüklenme ve kaldırma katsayıları.

Rüzgâr hızı, u_x (m/s)	10	22	38	58	66,7
C_D	0.278	0.262	0.267	0.266	0.265
C_L	-0.033	-0.029	-0.059	-0.054	-0.036



Şekil 14: Çözüm süresi ve kaldırma katsayısının değişimi (rüzgâr hızı 58 m/s).

4 Sonuçlar

Sayısal model analizi yapılan Osmangazi Köprüsünün aerodinamik kuvvetler açısından rüzgâr akımına 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 ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RONS) tabanlı bir model olan SST türbülans modelinin daha uygun ve doğru sonuçlar vereceği kabul edilebilir. Bu çıkarım, ticari yazılımlar ve RONS tabanlı modeller için geçerlidir. 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 kararsız burgaç yapıları, tabliye üzerinde titreşime neden olmakta ve bu titreşimler yapının doğal frekansına eşit olması durumunda ise yapının rezonansa girerek zarar görmesi mümkün hale gelebilmektedir.

Sayısal ve fiziksel modelleme metodlarının sahip olduğu kendine özgü avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu nedenle iki yöntemi birbirine alternatif olarak değil birbirini

tamamlayan araçlar olarak görmek daha doğru bir yaklaşımdır. Bu çalışmada sadece sayısal model sonuçlarına yer verilmiş olsa da, ilgili yapının rüzgâr tüneli test sonuçlarına dair kullanım iznine erişilmesi halinde karşılaştırma ve model doğrulama çalışması yapılacaktır. Bu ana kadar, tek fazlı ve ağ elemanından bağımsızlığı test edilmiş, yakınsaklık kriterleri hassasiyetle izlenmiş ve akım koşullarına en uygun türbülans modeli kullanılmış olan bir HAD modeli ile mevcut yapının performansının incelenmesi ve farklı bir köprü tasarımı ile ilgili olarak ön tasarım ve iyileştirme çalışmalarının, modelleme konusunda tecrübeli bir ekipçe yapılabilmesi mümkündür.

5 Kaynaklar

- [1] Billah KY, Scanlan RH. "Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks". *Am. J. Phys.*, 59(2), 118-124, 1991.
- [2] Larsen A. "Aerodynamics of the Tacoma Narrows Bridge-60 Years Later". *Structural Engineering International*. 10(4), 243-248, 2000.
- [3] Scanlan RH, Sabzevari A. "Suspension bridge flutter revised". Amer. Soc. Civil Eng., National Meeting on Structural Engineering, Preprint No. 468, 1967.
- [4] Airong C, Rujin M, Dalei W. "Aerodynamic problems of cable-stayed bridges spanning over one thousand meters". *Engineering Sciences*, 7(3), 16-22, 2009.
- [5] Şafak E. "Yüksek Yapılardaki Rüzgar Yüklerinin Hesabı". *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 471, 57(1), 2012.
- [6] Nozawa K, Tamura T. "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, 2002.
- [7] ANSYS CFX-Pre User's Guide, Canonsburg, PA US, Release 15, (2013).
- [8] Irwin PA. "Bluff body aerodynamics in wind engineering". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 701-712, 2008.
- [9] Lopes AV, Cunha A, Simões LMC. "CFD based evaluation of the serviceability conditions of a cable stayed bridge under wind load". *Eurodyn Conference*, Paris, France, 4-7 September 2005.
- [10] AASHTO LRFD 7th Ed. Bridge Design Specifications 2014.
- [11] ASCE 7-02. Second Edition. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures 2013.
- [12] EN 1991-1-1 Eurocode 1: "Actions on Structures", 2002.
- [13] TS EN 1991-1-3. "Yapılar Üzerindeki Etkiler", 2007
- [14] TS 498. "Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri" 1997.
- [15] İstanbul Büyükşehir Belediyesi. "Yüksek Binalar Rüzgâr Yönetmeliği". İstanbul, Türkiye, Versiyon 5, 2009.
- [16] Kiriççi V. Osman Gazi Köprüsüne Etkiyen Rüzgâr Yüklerinin HAD Metodu ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2016.
- [17] OTOYOL Yatırım ve İşletme AŞ. Web sitesi: http://yapim.otoyolas.com.tr/?page_id=5328.
- [18] Kelkar KM, Patankar SV. "Numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 14, 327-341, 1992.
- [19] Sohankar A, Davidson L, Norberg C. "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, 1998.
- [20] Wang Z. Experimental and CFD Investigations of the Megane Multi-Box Bridge Deck Aerodynamic Characteristics. Master Thesis, University of Ottawa, Canada, 2015.
- [21] Shirai S, Ueda T. "Aerodynamic Simulation by CFD on Flat Box Girder of super-long-span Suspension Bridge". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 279-290, 2003.
- [22] Abdel-Aziz A, Attia WA "Aeroelastic Investigation of Different Deck Sections for Suspension Bridges by Numerical Analysis". *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 4(12), 49-57, 2015.
- [23] Haque MN, Katsuchi H, Yamada H, Nishio M. "Flow field analysis of a pentagonal-shaped bridge deck by unsteady RANS". *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1), 1-16, 2016.
- [24] Keerthana M, Harikrishna P. "Application of CFD for assessment of galloping stability of rectangular and H-sections". *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72, 419-427, 2013.
- [25] Fransos D. Stochastic Numerical Models for Wind Engineering. PhD Dissertation, Politecnico di Torino, Italy, 2008.