





İki Farklı Kabuk Geometrisine Sahip Stadyum Modeli Etrafındaki Akış Alanlarının Sayısal İncelenmesi

Numerical Investigation of Flow Fields Around Stadium Model Having Two Different Shell Geometry

Haluk KELEŞ¹ , Yücel ÖZMEN^{2,*} 

¹ Enerji Sistemleri Mühendisliği, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-6562-8902

² Makine Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-1127-1060

Araştırma Makalesi

Gönderilme Tarihi : 14/01/2020

Kabul Tarihi : 23/05/2020

Anahtar Kelimeler

Basınç Katsayısı
Rüzgar Etkisi
Stadyum Çatısı
Türbülans Modeli

Research Paper

Received Date : 14/01/2020

Accepted Date : 23/05/2020

Keywords

Pressure Coefficient
Wind Effect
Stadium Roof
Turbulence Model

Özet

Günümüzde stadyumlar, futbol müsabakalarının yanı sıra konser, şenlik ve konferans gibi etkinlikler için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Stadyumlarda seyirci ve sporcu konforunu olumsuz yönde etkileyen en önemli faktörlerden biri stadyum etrafındaki rüzgar etkileridir. Farklı geometrilerdeki çatı sistemleri ile kapalı hale getirilen tribünler ile rüzgarın özellikle seyirci konforu üzerindeki olumsuz etkisi azaltılmaktadır. Stadyum çatılarındaki geometrik farklılık (kabuk geometrisindeki farklılık) yüzey basınç dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Çatı yüzeylerinde akış ayrılmasına ve girdap bölgelerinin oluşumuna yol açacak geometrik düzenlemeler çatıları hasara uğratabilmektedir. Bu durum farklı geometrilerde sahip stadyum çatıları üzerindeki akış alanlarının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, düz geometrideki çatı sistemi ile üçgen prizmatik bakkalı geometrik bileşenlere sahip çatı sistemi üzerindeki rüzgar etkileri karşılaştırma amaçlı sayısal incelenmektedir. İki farklı kabuk geometrisine sahip stadyum modeli etrafındaki akış alanlarının üç boyutlu olarak sürekli rejimde incelendiği çalışmada, ticari bir yazılım olan ANSYS – FLUENT paket programı bünyesindeki Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Farklı rüzgar geliş açıları için çeşitlendirilen çalışmada, kabuklar etrafındaki hız alanları ve kabuk yüzeylerindeki basınç dağılımları ayrıntılı olarak elde edilmiştir. Bakkalı çatı sistemine sahip modelin rüzgar kaynaklı hasarlar açısından daha riskli olduğu görülmüştür.

Abstract

Stadiums are generally used for events such as concerts, festivals and conferences as well as soccer competitions. One of the most important factors affecting the comfort of spectators and athletes in the stadiums is the wind effect around the stadium. Negative effect of the wind on the comfort of the audience is reduced by covering the roofs in different geometries. The geometric difference in the stadium roof (difference in shell geometry) significantly affects the surface pressure distributions. The geometric arrangements that lead to the flow separation on the roof surfaces and the formation of swirl zones may damage the roofs. This requires an examination of the flow fields on the stadium roof in different geometries. For the comparison purpose, the wind effects on the roof with flat geometry and the roof with triangular prismatic linked geometric components are numerically investigated in this study. Realizable k – ε turbulence model in the commercial software ANSYS – FLUENT package program is used in the study of three - dimensionally steady flow fields around the stadium model having two different shell geometries. In this diversified study for different wind angle of attacks, the pressure distributions around the shells and crust surfaces are taken into consideration in detail. It has been observed that the model with linked geometric roof system has higher risk for wind-borne damages.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): yozmen@ktu.edu.tr



1. Giriş

İlk stadyumun antik Yunanistan'daki inşasından günümüze spor stadyumları her dönem inşaat mühendisliğinin önemli uygulama alanlarından biri olmuştur [1]. Çağdaş stadyum tasarımlarında, seyirci konforu önemli bir tasarım parametresi olarak dikkate alınmaktadır. Stadyumlarda seyirci konforu için rüzgar ve yağmur gibi hava etkilerinden korunmak son derece önemlidir.

Günümüzde, birçok yeni stadyum inşaatının yapılıyor olması nedeniyle, seyirci konforu üzerine araştırmalar artmaya başlamıştır. Szücs ve arkadaşları [2], çatı eğim açısının sahadaki gün ışığı dağılımı üzerindeki etkisini, bir günışığı programı kullanarak sayısal simülasyonlarla değerlendirmişlerdir. Szücs ve arkadaşları [2] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, rüzgar akışının termal konfor üzerindeki etkisi rüzgar tüneli ölçümleri ile incelenmiştir. Cephe gözenekliliği ve tavan eğim açısının stadyum içindeki rüzgar akışı üzerindeki etkisinin incelendiği bir başka çalışmada, stadyum cepheleri ve çatılardaki tasarım değişiklikleri ile stadyumdaki rüzgar hızının önemli ölçüde değiştiği görülmüştür [4]. Bouyer ve arkadaşları [5], İstanbul'daki Atatürk Stadyumu ve Paris'teki Stade de France'daki termal konfor seviyesini belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla sıcaklık, hava akımı ve ısı radyasyon etkilerinin sonuçlarını birlikte değerlendirmişlerdir. Yüksek ısı radyasyon etkisinin olduğu stadyumlarda, rüzgar hızındaki artışın özellikle termal konfor üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. van Hooff ve Blocken [6], Hollanda'daki Amsterdam ArenA stadyumu etrafındaki rüzgar etkilerini farklı havalandırma açıklıklarına sahip konfigürasyonlar üzerinden sayısal incelemişlerdir. Büyük, yarı kapalı bir stadyumda iç ortam koşullarının ve doğal havalandırmanın tam ölçekli ölçümlerinin yapıldığı bir çalışmada [8] gerçek stadyum ölçümleri ile hesaplamalı akışkanlar mekaniği örtüşmesi koşulları incelenmiş, CO₂ (karbondioksit), sıcaklık ve nem ölçümleri yapılmıştır. Stadyumun konstrüktif yapısının güçlendirme tasarımını değerlendirmek için HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) kullanarak West Lafayette India/Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bir futbol stadyumu için rüzgar analizi sürecinin çalışıldığı bir makalede [9], farklı stadium çevresi yapılanma konfigürasyonları için Reynolds ortalama Navier Stokes modelleri ile Ansys-Fluent kullanılarak inceleme yapılmış ve çoğu durumda, yüksek hızların ve girdap alanlarının, açıklıktan kaynaklanan tasarım konseptine kıyasla çok daha küçük olduğunu gösterdiği belirtilmiştir. Shi ve An'ın yaptıkları bir çalışmada [10], Çin Halk Cumhuriyeti'ndeki 30.000 seyirci kapasiteli bir stadyum için, saha içi rüzgar etkileri

ve akış alanlarının, stadyum gölgelik çatılar üzerine etkisi STAR-CCM + yazılımı kullanılarak, 5 m/s, 10 m/s ve 15 m/s lik rüzgar hızları için sayısal olarak çözümü gerçekleştirilmiş ve optimal tasarım stratejileri önerilmiştir. Hareketli (kapanıp-açılabilir) çatı mekanizmasına sahip stadyumlarda rüzgar etkilerinin değerlendirilmesi için rüzgar tüneli deneyi ve LES (Large Eddy Simulation) kullanılan başka bir çalışmada [11], farklı çatı durumları için net basınç katsayıları ve akış alanları açısından incelenmiştir. Chen ve Li'nin yaptıkları bir çalışmada [12], açılır-kapanır çatı sistemine sahip bir stadyum için 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° geliş açılarındaki rüzgar durumlarının saha içerisindeki sporcular üzerine etkisi incelenmiştir. Tüm yuvarlak tip stadyumlar için, en iyi giriş rüzgar açısının 75 derece ile 90 derece arasında değiştiğini ve bunun da yüksek rüzgar hızı etkilerini önleyeceği belirtilmiştir. Zhong ve arkadaşları [13], Katar'da yapılacak olan 2022 FIFA dünya kupası için stadyumlar üzerine, sıcak-nemli iklim altında sıcaklık dağılımlarını ve rüzgar ortamı sonuçlarını, optimize edilmiş soğutma jetleri senaryoları için incelemişlerdir. Farklı hızlardaki soğutucu hava jeti akışlarının tribün ve stadyum çevresindeki akış alanları üzerine etkisini incelemişlerdir. Kim ve Jong [14], Kuzey Kore'de 100.000 kişilik bir stadyum etrafındaki akış alanlarının gerçek zamanlı ölçümlerini 150 drone ile gerçekleştirmişlerdir. Mekansal ve zamansal mikro iklimi simüle eden ENVI-met yazılımı ile bina ölçeğinde ayrıntılı hava akışlarını sunan Fluent'i birleştirerek, gerçek ölçümler ile karşılaştırma yapılmıştır.

Son zamanlarda stadyumlar, futbol müsabakalarının yanı sıra konser, şenlik ve konferans gibi etkinlikler için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Stadyumlarda seyirci ve sporcu konforunu olumsuz yönde etkileyen en önemli faktörlerden biri stadyum etrafındaki rüzgar etkileridir. Farklı geometrilerdeki çatı sistemleri ile kapalı hale getirilen tribünler ile rüzgarın özellikle seyirci konforu üzerindeki olumsuz etkisi azaltılmaktadır. Stadyum çatılarındaki geometrik farklılık (kabuk geometrisindeki farklılık) yüzey basınç dağılımlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Çatı yüzeylerinde akış ayrılmasına ve girdap bölgelerinin oluşumuna yol açacak geometrik düzenlemeler çatıları hasara uğratabilmektedir. Bu durum farklı geometrilerde sahip stadyum çatıları üzerindeki akış alanlarının incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada, düz ve üçgen prizmatik baklalı olacak şekilde iki farklı kabuk geometrisine sahip stadyum modeli etrafındaki akış alanları sayısal olarak incelenmiştir. Ticari bir yazılımla gerçekleştirilen çalışmada, farklı rüzgar geliş açıları için sürekli rejimde üç boyutlu çözümler gerçekleştirilerek iki farklı kabuk geometrisi etrafındaki akış karakteristiklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sayısal sonuçlar, stadyum

modelleri etrafında akış çizgileri ve ortalama hız dağılımları ve model yüzeylerinde basınç dağılımları şeklinde değerlendirilmiştir.

2. Sayısal Çalışma

Sıkıştırılamaz bir akışkanın üç boyutlu sürekli rejimdeki hareketi kartezyen koordinatlarda

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

şeklinde süreklilik denklemi ve

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j') \quad (2)$$

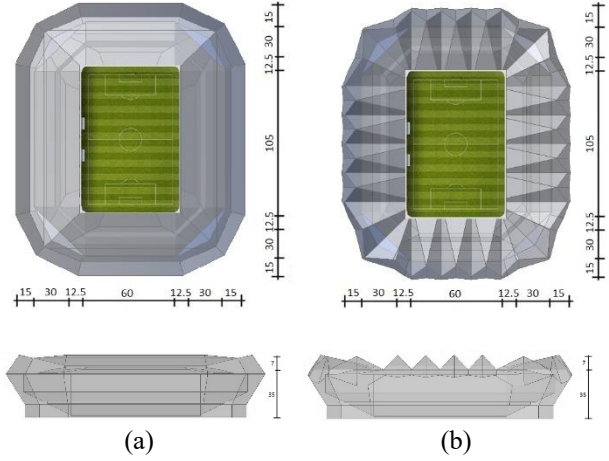
şeklinde momentum denklemi ile ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, akışkanlar mekaniği problemlerinde yaygın olarak kullanılan FLUENT ticari yazılımı kullanılmıştır. Sonlu hacim yaklaşımını esas alan paket programda yakınsamadaki avantajı nedeniyle Realizable k-epsilon türbülans modeli ile çözümler gerçekleştirilmiştir. k ve epsilon için modellenmiş transport denklemler

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

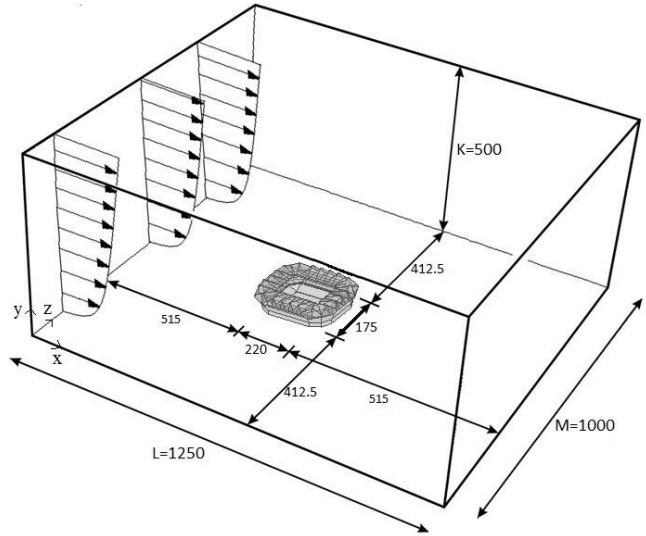
şeklinde. Bu denklemlerde, G_k , ortalama hız gradyenti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini; G_b , kaldırma kuvveti nedeniyle türbülanslı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir. σ_k ve σ_ε , türbülanslı Prandtl sayıları olup, S_k ve S_ε ise kaynak terimleridir. Türbülans modeli için sabitler, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_2=1.9$, $\sigma_k=1.0$ ve $\sigma_\varepsilon=1.2$ şeklindedir.

Çalışmada kullanılan stadyum modelleri, düz kabuk ve üçgen prizmatik baklalı kabuk şeklinde iki farklı çatı geometrisine sahiptir. Şekil 1'de genel görünümü verilen stadyum modellerinin boyutları $220 \times 175 \times 42$ mm³ şeklindedir. Bu boyutlar, Trabzon'da bulunan Akyazı stadyumunun 1/1000 ölçekli modelinin boyutlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 1. İki farklı kabuk geometrisine sahip stadyum modellerinin genel görünümü; (a) düz kabuklu model, (b) üçgen prizmatik baklalı model.

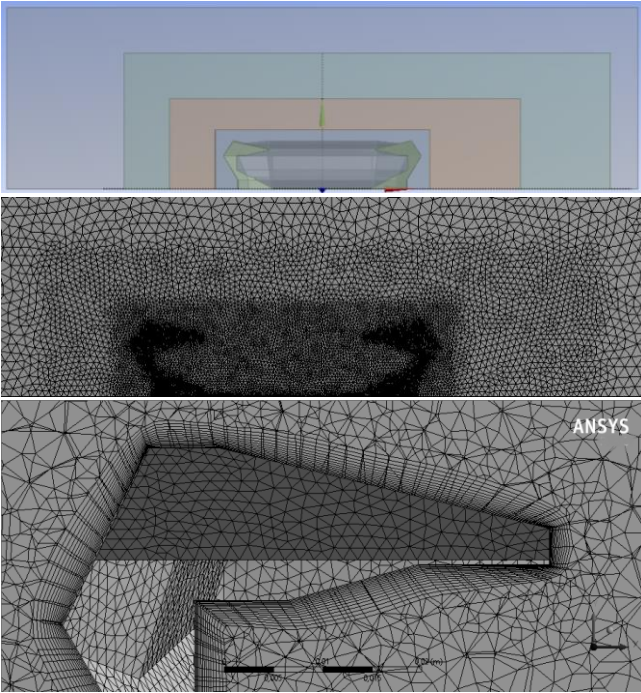
Stadyum modellerinin üç boyutlu akış alanındaki yerleşim düzeni Şekil 2'de görülmektedir. Hesaplama hacmi $1250 \times 1000 \times 500$ mm³ boyutlarında oluşmuştur. Bu boyutlara göre blokaj oranı % 0.22 olarak gerçekleşmiştir. Girişteki serbest akış hızı 10 m/s olarak dikkate alınmıştır. Her iki model etrafındaki akış alanları için aynı olan sınır şartları, girişte "VELOCITY INLET", çıkışta "PRESSURE OUTLET" ve duvarlarda "WALL" olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Akış alanına yerleştirilen $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında üçgen prizmatik baklalara sahip kabuklu stadyumun genel görünümü

ANSYS FLUENT 18.1 ticari yazılımı ile gerçekleştirilen çözümlerde, bu özel geometric durum için literatürde tercih edilen [7] Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Duvar yaklaşımı olarak, daha kısa sürede yakınsama sağlaması nedeniyle genişletilmiş duvar ifadesi (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır. İteratif çözücü olarak SIMPLE algoritması esas alınmıştır. Çözümlerde

daha hassas sonuçlar verdiği için, değişkenlerin ağ noktaları arasındaki değişimine yönelik Second Order Upwind yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm alanındaki ağ yapısı Şekil 3'de görüldüğü gibi stadyum modelleri etrafında yoğunluğu artan bir düzende oluşturulmuştur. Model yüzeylerinde hexahedral, diğer bölgelerde tetrahedral ağ yapısının kullanıldığı akış alanlarında ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı sayıdaki ağ yapıları ile denemeler yapılmıştır. 8,825,179 hücreli (kaba ağ), 12,717,306 hücreli (orta ağ) ve 15,422,538 hücreli (ince ağ) şeklinde üç farklı ağ yoğunluğu için tekrarlanan çözüm sonuçları, orta ağ yoğunluğunun ağdan bağımsız çözümler için yeterli olduğunu göstermiştir. Bu şekilde oluşturulan ağ düzeni ile hesap alanında ağdan bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 3.8 milyon ağ kullanılmıştır. Model katı yüzeyleri boyunca $y^+ < 2$ olmaktadır. Normalize edilmemiş artıkların 10^{-6} 'dan küçük olması koşulu, çözüm yakınsama kriteri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Akış alanına içerisine yerleştirilen stadyum modeli etrafındaki ağ yapısının genel görünümü

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, düz ve üçgen prizmatik baklalı iki farklı çatı sistemine sahip stadyum modeli etrafındaki akış alanları, rüzgar geliş açısının $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° değerleri için sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, stadyum modelleri etrafında akış çizgileri ve ortalama hız dağılımları ve model yüzeylerinde basınç dağılımları şeklinde değerlendirilmiştir. Şekil 4'de, düz çatılı stadyum modeli üzerinde $y=50$ mm seviyesinde yatay

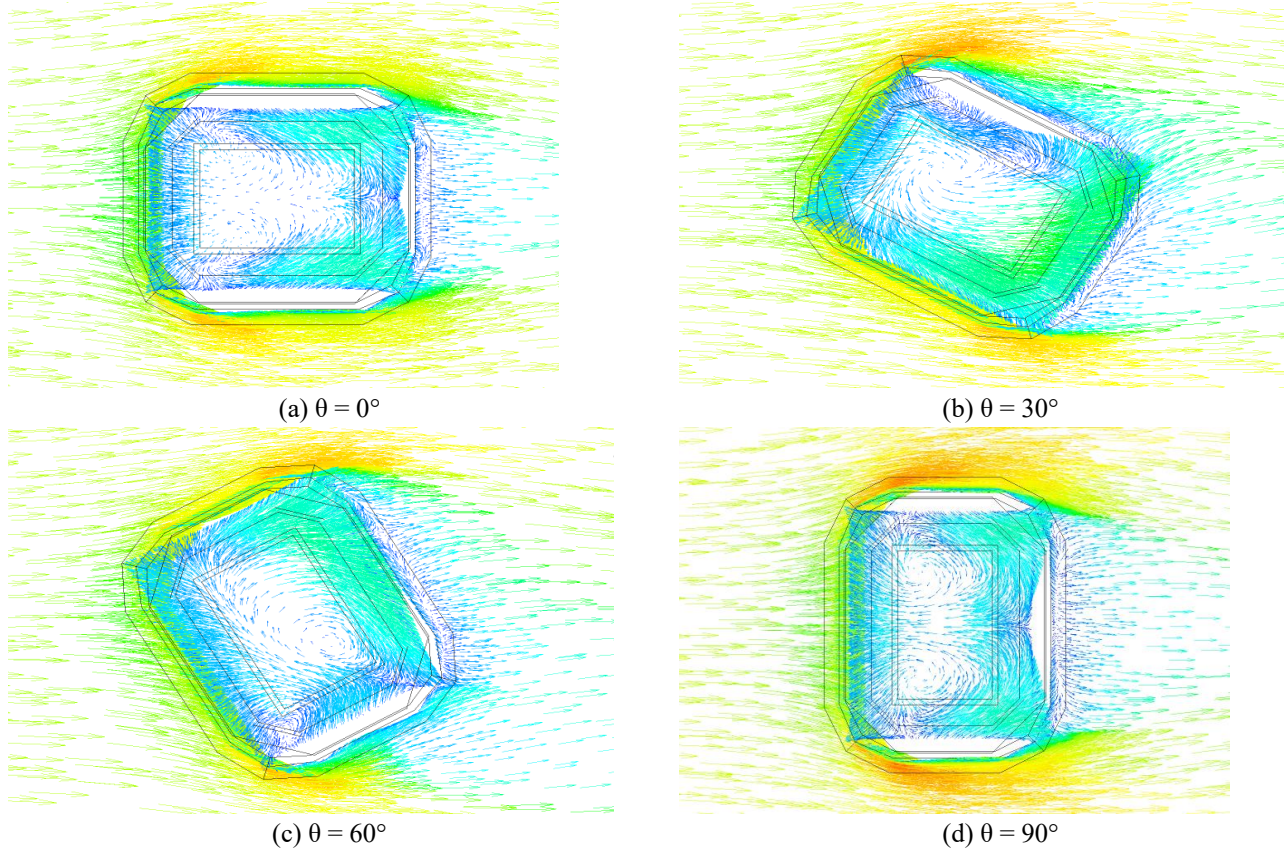
kesitte rüzgar geliş açısının $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° değerleri için elde edilmiş akış çizgileri görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, rüzgara doğrudan maruz kalan model ön yüzünün kenarlarından itibaren akışın yönlendiği ve modelin ön üst kısmında yatay düzlemde birbirine göre ters yönde dönen girdap çiftinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4a). $\theta = 30^\circ$ rüzgar geliş açısında, model üst bölgesinde farklı büyüklükte üç adet ters akış bölgesi oluşmaktadır (Şekil 4b). $\theta = 60^\circ$ rüzgar geliş açısında ise, model üzerinde biri daha büyük boyutlu olmak üzere iki adet girdap bölgesinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 4c). Modelin uzun kenarının karşıladığı $\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında, model üst kısmının tamamına yayılan boyutta özdeş iki girdap oluşmaktadır (Şekil 4d).

Üçgen prizmatik baklalı çatı sistemine sahip stadyum modeli üzerinde $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° değerleri için elde edilmiş akış çizgileri Şekil 5'de verilmiştir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, aynı açıdaki düz çatılı model sonuçlarına benzer şekilde model üzerinde model ön kısmına yakın bölgede daha küçük boyutlu olmak üzere birbirine göre ters yönde dönen girdap çiftinin oluştuğu görülmektedir. Ancak düz çatılı durumdan farklı olarak, çatı sistemini oluşturan baklaların varlığı nedeniyle baklalar arasında küçük ölçekli girdap yapıları ortaya çıkmaktadır (Şekil 5a). $\theta = 30^\circ$ rüzgar geliş açısında, model üzerindeki girdap bölgeleri azalmakta, baklalar arasındaki küçük ölçekli girdaplar ise etkisini sürdürmektedir (Şekil 5b). $\theta = 60^\circ$ rüzgar geliş açısında ise, model üzerinde oluşan ters akış bölgeleri baklalar arasındaki girdap yapılarını etkilemektedir (Şekil 5c). $\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında, baklalar arasında oluşan girdapların yanı sıra model üzerinde saha bölgesinin tamamını kapsayan iki adet girdap ortaya çıkmaktadır.

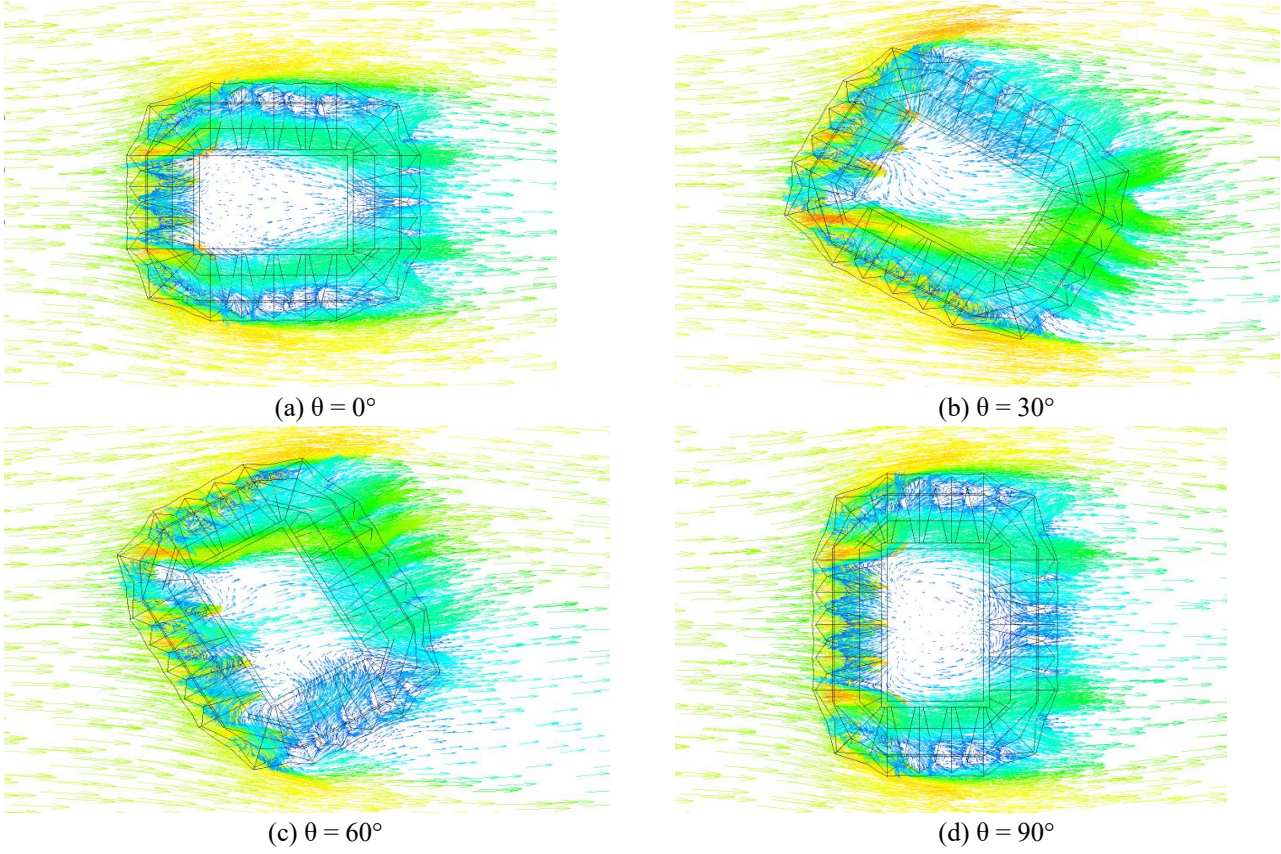
Düz çatılı ve baklalı çatılı modeller üzerindeki akış yapıları karşılaştırıldığında, baklaların varlığının akış çizgilerinde önemli değişikliğe neden olduğu görülmektedir. Şekil 6'da, düz çatılı stadyum modeli üzerinde $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° değerleri için elde edilmiş hız konturları görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, model ön yüzünün her iki kenarından itibaren akış yönlenecek hız kazanmaktadır. Model üst yüzünün büyük bölümünde ve model arkasında hız değerleri azalmaktadır (Şekil 6a). $\theta = 30^\circ$ ve $\theta = 60^\circ$ rüzgar geliş açılarındaki model üst yüzeylerinin yanı sıra, ayrılmış akış bölgelerinde de hız değerleri azalmaktadır (Şekil 6b-c). $\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısında ise, $\theta = 0^\circ$ 'deki duruma benzer şekilde model üst yüzünün büyük bölümünde ve model arkasında hız değerleri azalmaktadır. Üçgen prizmatik baklalı çatı sistemine sahip stadyum modeli üzerinde $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar geliş açısının $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ ve 90° değerleri için elde edilmiş hız konturları Şekil 7'de verilmiştir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, rüzgara doğrudan

maruz kalan baklaların arasındaki boşluklarda akış hızlanmaktadır. Bu doğrultularda model boyunca hız değerlerinde artış olmaktadır (Şekil 7a). Akıştaki ivmelenme nedeniyle sağlanan bölgesel hız artışı, rüzgar geliş açısının $\theta = 30^\circ$, 60° ve 90° durumlarında da ortaya çıkmaktadır. Şekil 8'de, düz çatılı stadyum modeli üzerinde rüzgar geliş açısının 0° , 30° , 60° ve 90° değerleri için elde edilmiş basınç katsayısı konturları görülmektedir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, rüzgara doğrudan maruz kalan model ön yüzeyi üzerinde basınç katsayısı pozitif olmaktadır. Model ön yüzeyinin kenarlarından ayrılan akış nedeniyle model yan, arka ve üst yüzeylerinde basınç katsayısı negatif olmaktadır. (Şekil 8a). Doğrudan rüzgara maruz kalan model yüzeyleri dışındaki diğer tüm yüzeylerde basınç katsayısının negatif değerler alması, rüzgar geliş açısının $\theta = 30^\circ$, 60° ve 90° olduğu durumlarda da ortaya çıkmaktadır. En kritik negatif basınç katsayısı değeri, rüzgara doğrudan maruz kalan yüzeyin kenarlarından ayrılan akış bölgelerinde ortaya çıkmakta ve -2.21 değeriyle $\theta = 60^\circ$ 'lik rüzgar geliş açısında gerçekleşmektedir. Üçgen prizmatik baklalı çatı sistemine sahip stadyum modeli üzerinde rüzgar geliş açısının 0° , 30° , 60° ve 90° değerleri için elde edilmiş basınç katsayısı

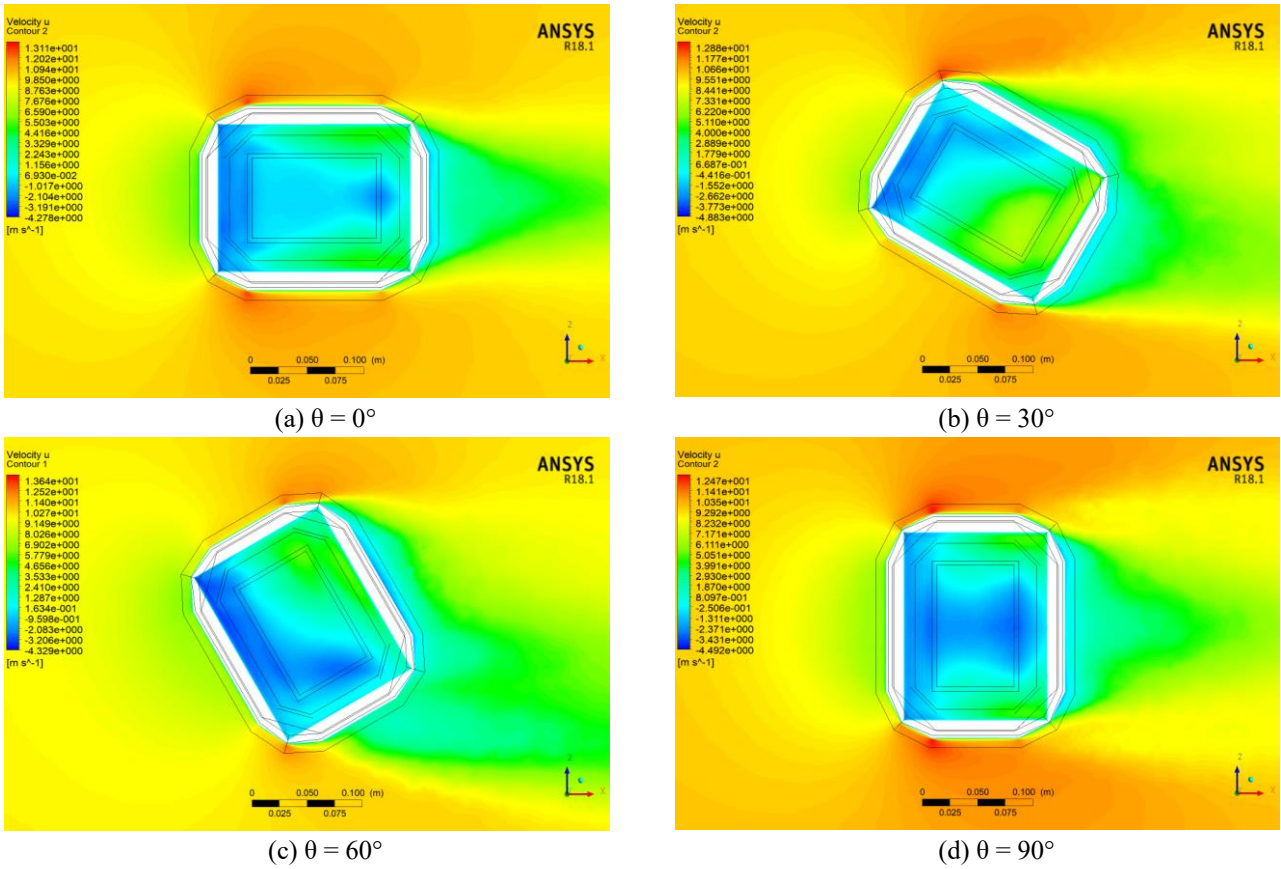
konturları Şekil 9'da verilmiştir. $\theta = 0^\circ$ rüzgar geliş açısında, rüzgara doğrudan maruz kalan model ön yüzeyi ve ön kısımdaki bakla yüzeylerinde basınç katsayısı itme etkisi nedeniyle pozitif olmaktadır. Modelin diğer tüm yüzeylerinde ise basınç katsayısı negatif değerler almaktadır. En kritik negatif basınç katsayısı değerleri akış ayrılma bölgelerinde ve rüzgarı doğrudan alan baklaların yan yüzeylerinde oluşmaktadır. Bu durum rüzgar geliş açısının $\theta = 30^\circ$, 60° ve 90° değerlerinde de ortaya çıkmaktadır. En kritik negatif basınç katsayısı -2.83 değeriyle $\theta = 60^\circ$ 'lik rüzgar geliş açısında gerçekleşmektedir. $\theta = 90^\circ$ rüzgar geliş açısı için akış doğrultusunda orta düşey düzlemde model yüzeyleri boyunca basınç katsayısı değişimleri düz kabuklu ve baklalı kabuklu model durumları için bir arada Şekil 10'da verilmiştir. Boyutsuz mesafelere göre bir arada verilen iki değişim değerlendirildiğinde, özellikle akış ayrılmasının ortaya çıktığı model ön yüzey kenarı yakınında, negatif basınç katsayılarının kritik olduğu ve baklalı kabuklu modelde daha büyük negatif pik değerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum, baklalı çatı sistemine sahip modelin rüzgar kaynaklı hasarlar açısından daha riskli olduğunu göstermektedir.



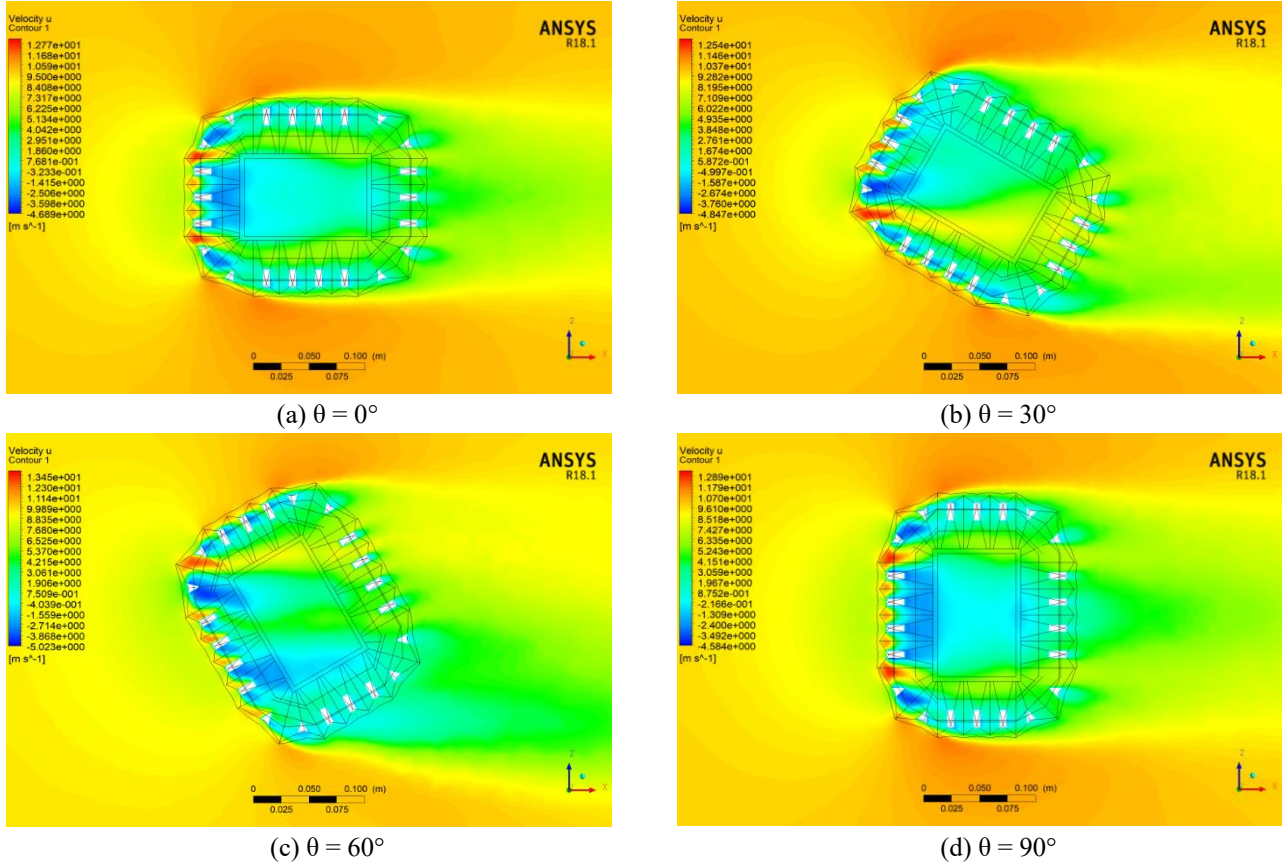
Şekil 4. Düz çatılı stadyum modeli için $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar akış çizgisi görüntüleri.



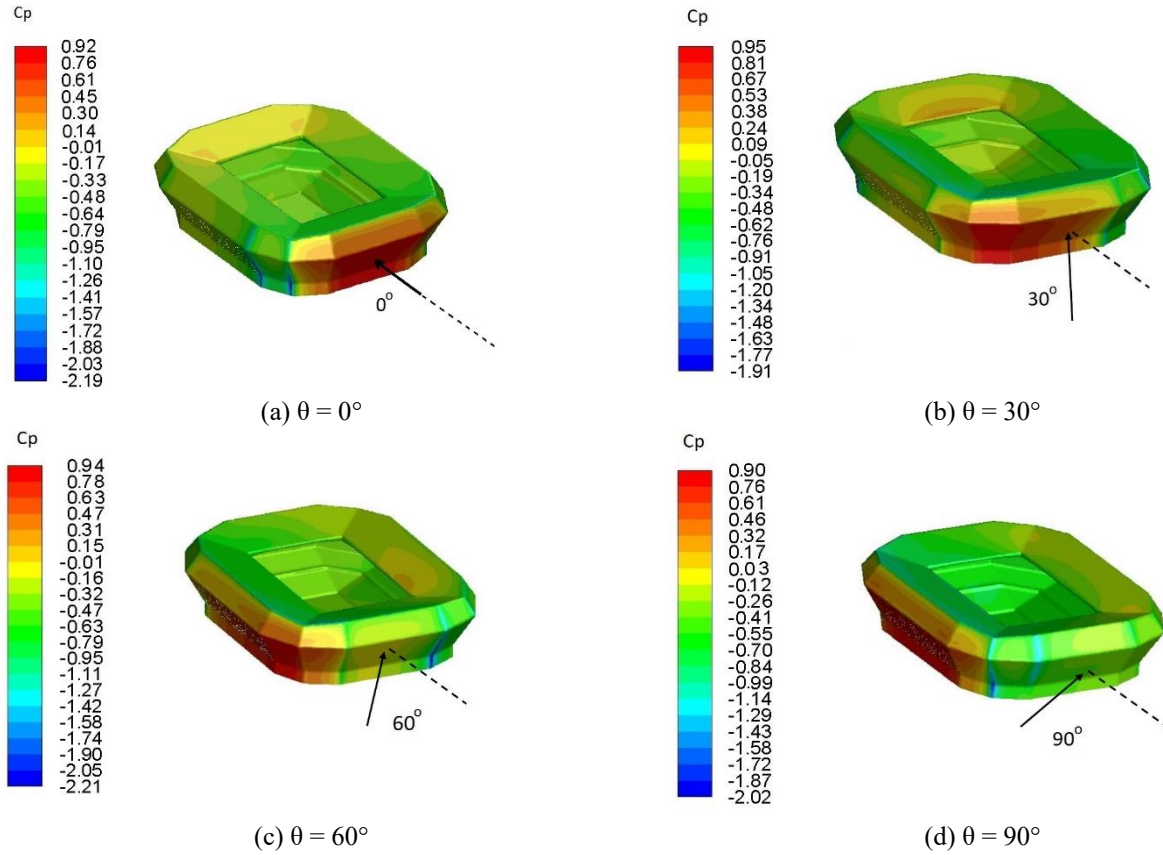
Şekil 5. Baklılı çatılı stadyum modeli için $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar akış çizgisi görüntüleri.



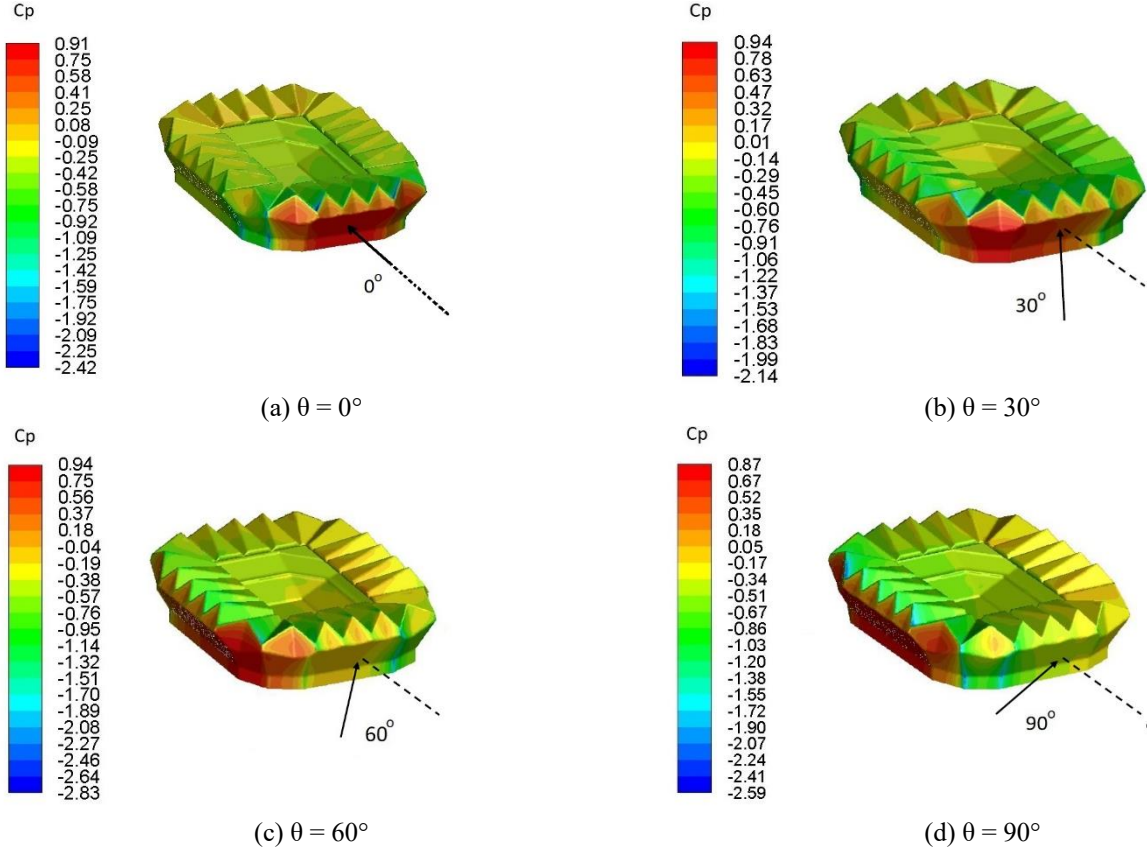
Şekil 6. Düz çatılı stadyum modeli için $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar hızı kontur görüntüleri.



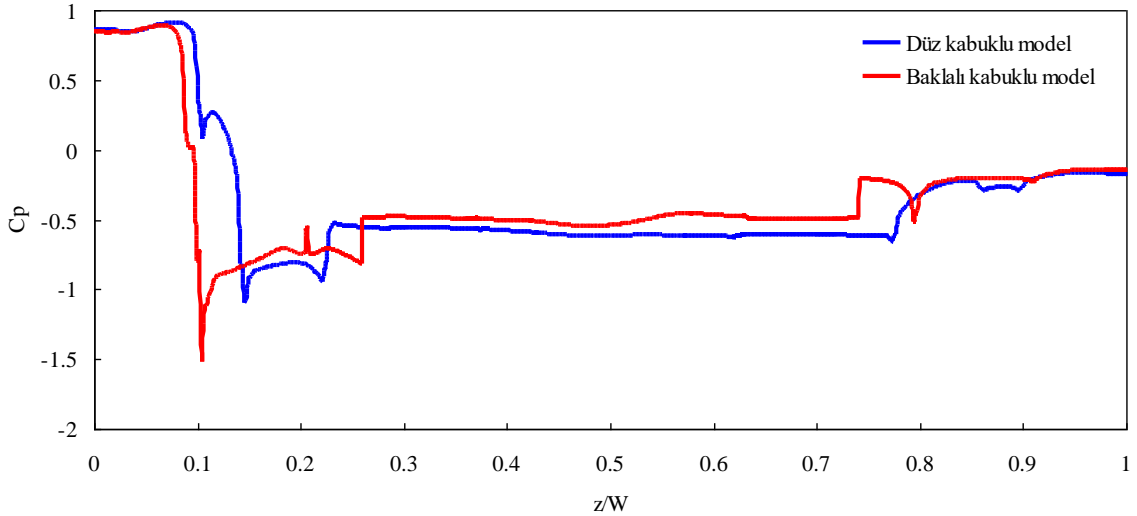
Şekil 7. Baklı çatılı stadyum modeli için $y=50$ mm seviyesinde yatay kesitte rüzgar hızı kontur görüntüleri.



Şekil 8. Düz çatılı stadyum modeli için basınç katsayısı kontur görüntüleri.



Şekil 9. Baklalı çatılı stadyum modeli için basınç katsayısı kontur görüntüleri.



Şekil 10. $\theta = 90^\circ$ için orta eksen - düşey doğrultuda model yüzeyleri boyunca basınç katsayısı değişimleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, düz ve üçgen prizmatik baklalı olacak şekilde iki farklı kabuk geometrisine sahip stadyum modeli etrafındaki akış alanları farklı rüzgar geliş açıları için sayısal olarak incelenmiştir. Rüzgar geliş açısının ve kabuk geometrisinin akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Düz çatılı modelde, $\theta = 0^\circ$ ve 90° rüzgar geliş

açıları, modelin üst kısmında yatay düzlemde birbirine göre ters yönde dönen bir girdap çifti oluşurken, $\theta = 30^\circ$ ve 60° rüzgar geliş açıları ise, model üst kısmında farklı büyüklüklerde girdaplar oluşmaktadır. Baklalı çatılı modelde, çatı sistemini oluşturan baklaların varlığı nedeniyle baklalar arasında küçük ölçekli girdap yapıları ortaya çıkmaktadır. Baklaların varlığının akış çizgilerinde önemli değişikliğe neden olduğu görülmektedir. Düz çatılı modelde, model üst yüzeyinin büyük bölümünde ve model

arkasında hız değerleri azalmaktadır. Baklı çatılı modelde, rüzgara doğrudan maruz kalan baklıların arasındaki boşluklarda akış ivmelenmekte ve bu doğrultularda model boyunca hız değerlerinde artış olmaktadır. Düz çatılı modelde, rüzgara doğrudan maruz kalan model ön yüzeyi üzerinde basınç katsayısı pozitif olmaktadır. Model ön yüzeyinin kenarlarından ayrılan akış nedeniyle model yan, arka ve üst yüzeylerinde ise basınç katsayısı negatif olmaktadır. Baklı çatılı modelde, rüzgara doğrudan maruz kalan model ön yüzeyi ve ön kısımdaki bakla yüzeylerinde basınç katsayısı itme etkisi nedeniyle pozitif olmaktadır. Modelin diğer tüm yüzeylerinde ise basınç katsayısı negatif değerler almaktadır. En kritik negatif basınç katsayısı değerleri akış ayrılma bölgelerinde ve rüzgarı doğrudan alan baklıların yan yüzeylerinde oluşmaktadır. Akış ayrılmasının ortaya çıktığı model ön yüzey kenarı yakınında, negatif basınç katsayıları kritik olmakta ve baklı kabuklu modelde daha büyük negatif pik değerler oluşmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan İş İstasyonları ve lisanslı ticari yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Bu hususta çalışmanın gerçekleştirilmesine verdikleri destek için K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Culley P., Pascoe J., 2009. Sports facilities and technologies, 1st ed. Routledge, New York, USA.
- [2] Szücs A., Perraudeau P., Allard F., 2006. Assessment of visual comfort of spectators in stadia, vol. II. Geneva, Switzerland: Proceedings of the 21st international conference of passive and low energy architecture (PLEA), Geneva,, Switzerland, 6-8 September, 609–612.
- [3] Szücs A., Moreau S., Allard F., 2007. Spectators' aerothermal comfort assessment method in stadia. Building and Environment, 42, 2227–2240.
- [4] Szücs A., Moreau S., Allard F., 2009. Aspects of stadium design for warm climates. Building and Environment, 44, 1206–1214.
- [5] Bouyer J., Vinet J., Delpech P., Carre S., 2007. Thermal comfort assessment in semi-outdoor environments: Application to comfort study in stadia. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, 963–976.
- [6] van Hooff T., Blocken B., 2010. Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. Environmental Modelling & Software, 25(1), 51–65.
- [7] van Hooff T., Blocken B., van Harten M., 2011. 3D CFD simulations of wind flow and wind-driven rain shelter in sports stadia: Influence of stadium geometry. Building and Environment, 46(1), 22–37
- [8] van Hooff T., Blocken B., 2012. Full-scale measurements of indoor environmental conditions and natural ventilation in a large semi-enclosed stadium: Possibilities and limitations for CFD validation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 104, 330–341.
- [9] Mei WJ., Qu M., 2016. Evaluation and Analysis of Wind Flow for a Football Stadium. International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction (ICSDEC), Arizona State Univ, Coll Avenue Commons, Tempe, AZ-USA, MAY 18-20, Vol:104, pp: 774–781.
- [10] Shi LG., An RR., 2017. An Optimization design Approach of Football Stadium Canopy Forms Based On Field Wind Environment Simulation. 9th International Conference on Sustainability and Energy in Buildings (SEB), Chania, GREECE, JUL 05-07, Vol:134, pp: 757–767.
- [11] Liu M., Li QS., Huang SH., Shi F., Chen FB., 2018. Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 179, 39–57.
- [12] Chen L., Li YLX., 2019. Effects of different auditorium forms on ventilation in a football stadium. Indoor and Built Environment, 1–17.
- [13] Zhong FL., Calautit JK., Hughes B., 2019. Analysis of the influence of cooling jets on the wind and thermal environment in football stadiums in hot climates. Building Services Engineering Research & Technology, 1–25.
- [14] Kim HU., Jong SI., 2020. Development of a system for evaluating the flow field around a massive stadium: Combining a microclimate model and a CFD model. Building and Environment, 172.