



## HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

### **Bir Fotovoltaik Panel Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin Aerodinamik Kuvvetler Üzerine Etkisinin Araştırılması**

*Investigation of the Effects of Flow Characteristics on a Photovoltaic Panel on Aerodynamic Forces*

**Yazar(lar) (Author(s)):** Zeynel A. FIRATOĞLU<sup>1</sup>, Seher İZOL<sup>2</sup>, Yusuf İŞİKER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID ID: 0000-0002-2791-6663

<sup>2</sup> ORCID ID: 0000-0002-8419-9859

<sup>3</sup> ORCID ID: 0000-0002-6777-0080

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Fıratoğlu Z.A., İzol S., İşiker Y., "Bir Fotovoltaik Panel Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin Aerodinamik Kuvvetler Üzerine Etkisinin Araştırılması", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(2): 94-108, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>



## Bir Fotovoltaik Panel Etrafındaki Akış Karakteristiklerinin Aerodinamik Kuvvetler Üzerine Etkisinin Araştırılması

Zeynel A. FIRATOĞLU<sup>1\*</sup>, Seher İZOL<sup>1</sup>, Yusuf İŞIKER<sup>1</sup>

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Osmanbey Kampüsü, Haliliye/ŞANLIURFA

### Öz

Güneş enerjisi uygulamalarında büyük çoğunlukla sistemlerde en büyük alan ve hacim işgal eden bileşenler toplayıcılarıdır. Dolayısıyla toplayıcıların rüzgâr yükünün belirlenip kurulum açısından optimal tasarım parametrelerinin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Güneş enerji uygulamalarında helyostat, parabolik, düz v.b. birçok geometride toplayıcı kullanılmaktadır. Bu geometrilerden en yaygın özellikle fotovoltaik uygulamalardaki düz toplayıcılarıdır. Bu çalışmada 30° eğimli endüstriyel bir panelin rüzgâr yükü CFD simülasyonlarıyla araştırılmıştır. Simülasyonlar 5 ve 10 m/s serbest akış hızında gerçekleştirilmiştir. Yürütülen simülasyonlar sonucunda her iki akış hızı için panel etrafındaki akış alanı tanımlanmış ve tanımlanan bu akış alanından aerodinamik kuvvet ve momentler hesaplanmıştır. Yürütülen simülasyonlar sonucunda, sürüklenme ve kaldırma katsayıları birlikte değerlendirildiğinde, 30° eğimli ve 0° rüzgâr atak açısında seçilen PV panele için kaldırma kuvveti sürüklenme kuvvetinden yaklaşık olarak % 73 daha büyük olduğu saptanmıştır.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 06/07/2020  
Düzeltilme: 04/08/2020  
Kabul: 10/08/2020

### Anahtar Kelimeler

PV panel,  
Akış karakteristikleri,  
Aerodinamik kuvvetler,  
CFD, Rüzgâr yükü,  
**Keywords**

PV panel,  
Flow characteristics,  
Aerodynamic forces,  
CFD, Wind load,

### Investigation of the Effects of Flow Characteristics on a Photovoltaic Panel on Aerodynamic Forces

#### Abstract

In solar applications, the components that occupy the largest area and volume are mostly collectors. Therefore, determining the wind load of the collectors and determining the optimal design parameters in terms of installation is critical. In solar energy applications, heliostat, parabolic, flat etc. collectors are used in many geometries. The most common of these geometries are flat collectors, especially in photovoltaic applications. In this study, the wind load of an industrial 300 inclined panel was investigated by CFD simulations. Simulations were carried out at a free flow rate of 5 and 10 m / s. As a result of the simulations carried out, the flow area around the panel was defined for both flow rates and aerodynamic forces and moments were calculated from this defined flow area. As a result of the simulations carried out, when the drag and lift coefficients are evaluated together, it was determined that the lift force for the selected PV panel with 300 inclination and 00 wind attack angle was approximately 73% greater than the drag force.

## 1. GİRİŞ

Günümüzdeki tüm endüstriyel sektörlerin ana girdisinin enerji olması ve enerjideki darboğaz, kaçınılmaz olarak endüstriyel sektörleri alternatif enerji arayışlarına yönlendirmektedir. Ayrıca günümüzde alternatif enerji kaynakları arasında öne çıkan uygulama, çevre dostu yenilenebilir enerjidir. Konuyla ilgili son yıllarda artan çalışmalara bağlı olarak çok çeşitli yenilenebilir enerji uygulaması geliştirilmiştir. Uygulamadaki basitliği nedeniyle ticari alanda öne çıkan yenilenebilir enerji uygulaması güneş enerjisidir. Güneş enerjisi uygulamalarında, sistemlerin temel bileşeni güneş enerjisini toplayan helyostat, parabolik veya düz geometrideki toplayıcılarıdır. Gerek termal ve gerekse fotovoltaik uygulamalarda çoğunlukla düz toplayıcılar kullanılmaktadır. Fotovoltaik paneller veya diğer düz toplayıcılar işletme sırasında yağmur, kar, rüzgâr v.b. tüm atmosferik koşullara direkt maruzdur. Bu koşullar arasında sistem konstrüksiyonu için en kritik parametre rüzgâr yüküdür. Rüzgâr, etraftaki coğrafi veya yapay yapılara bağlı, lokal olarak en çok değişkenlik gösteren bileşendir. Bundan dolayı konu ile ilgili yürütülmüş birçok çalışma

\*İletişim yazarı, e-mail: firatoglu@harran.edu.tr

bulunmaktadır. Bu çalışmalarda çoğunlukla farklı akış alanları için sistem rüzgâr yükünü tespit etmeye yöneliktir. Panel etrafındaki akış karakteristiklerinin panele gelen aerodinamik kuvvetler ile ilişkisini inceleyen çalışma ise yok denecek kadar azdır. Bundan dolayı sistem rüzgâr yükünü azaltmaya yönelik pasif veya aktif yöntem ve araçlar geliştirmeye yönelik yürütülecek çalışmalar için literatürde yeterince veri bulunmamaktadır.

Geometrik açıdan bir güneş panelinin etrafındaki akış karakteristiğini dramatik olarak değiştiren iki parametre; rüzgâr atak açısı ve panel eğim açısıdır. Söz konusu iki büyüklüğün optimal koşulları her bölgeye göre değişiklik gösterdiğinden konu ile ilgili literatürde yürütülmüş birçok çalışma bulunmaktadır. Aşağıda söz konusu konu ile ilgili literatürde, öne çıkan çalışmaların özeti sunulmuştur. Abiola-Ogedengbe ve ark.(2015), 24 panelden meydana gelen bir PV panel modülünün üst ve altındaki basınç alanlarını dört farklı rüzgâr yönü için deneysel olarak ölçmüşlerdir. Ölçümlerde  $0^0$  ve  $180^0$  rüzgâr atak açılarında basınç dağılımının simetrik olduğunu diğer yönler için ise asimetric olduğunu saptamışlardır [1]. Velicu ve ark. (2010), rüzgâr tüneline PV modülünün etrafındaki akış alanını deneysel olarak araştırmışlardır. PV panel üzerindeki sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerini kuvvet transdüserlerini kullanarak ölçmüşlerdir ve sonuç olarak, panel eğim açısı  $0^0$  den  $90^0$  ye çıktığında rüzgâr arttıkça kuvvet katsayıların da arttığını gözlemlemişlerdir [2]. Shademan ve ark. (2014), CFD simülasyonları kullanarak PV panel modülleri üzerine gelen rüzgâr yükü araştırmalarıdır. Çalışmalarını çeşitli panel konfigürasyonları ve farklı rüzgâr atak açıları çerçevesinde yürütmüşlerdir. Bağımsız sistemlerdeki panellerde maksimum rüzgâr yükünün  $0^0$  ve  $180^0$  rüzgar atak açılarında meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Araştırma sonucunda paneller arası boşluk, zemin boşluğu ve yükü, rüzgâr yönünün rüzgâr yükünü belirleyen temel parametreler olduğunu saptamışlardır [3]. Meroney (2010), PV modülleri etrafındaki akış alanını farklı türbülans modelleri araştırmıştır. Yaptığı bu çalışmada güneş panelleri destek sistemler üzerinde sürüklenme, kaldırma ve devrilme momentlerini saptamıştır.  $0^0$  ve  $180^0$  rüzgar atak açılarıyla statik basınç sonuçlarında; ön sıradaki panellerde arka sıradaki panellere nazaran daha yüksek basınç olduğunu belirlemiştir [4]. Jubayer ve Hangan (2016), kararlı giriş koşullarına sahip kararsız bir çözücü kullanan 3D Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) simülasyonları, rüzgâr yükünü ve akış alanını, üzerine monte edilmiş 25 panelli eğim açısı ile yere monte edilmiş bağımsız bir fotovoltaik (PV) sistemi etrafındaki akış yapısını nümerik araştırmışlardır. Bu nümerik araştırma sonucunda, detaylı yüzey basıncı dağılımları ve güneş paneline gelen aerodinamik kuvvetleri hesaplamışlardır [5]. Bitsuamlak ve ark., 2010, Güneş panellerine gelen rüzgâr yüklerini deneysel ve CFD simülasyonlarıyla araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmalarında; CFD simülasyonlarında elde edilen sayısal sonuçlar, tam ölçekli ölçümlerle karşılaştırıldığında benzer basınç katsayısı dağılım modellerini gösterdiğini saptamışlardır. Ancak basınç katsayılarının büyüklüğü, genellikle deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, sayısal hesaplamalarla ile küçülttüğü vardıkları diğer bir sonuçtur [6].

Güneş enerjisi uygulamalarında büyük çoğunlukla sistemlerde en büyük alan ve hacim işgal eden bileşenler, toplayıcılarıdır. Dolayısıyla toplayıcıların rüzgâr yükünün belirlenip kurulum açısından optimal tasarım parametrelerinin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Yukarıda konu ile ilgili sunulan başlıca literatür bilgilerinden görüleceği üzere bir sistemin rüzgâr yükü; panellerin eğim açısı, rüzgar atak açısı, panellerin yerden yüksekliği, panellerin birbirine göre konumu şeklindeki başlıca dört parametreye bağlı olarak dramatik sapmalar göstermektedir. Bu çalışmada seçilen endüstriyel bir panelin etrafındaki akış alanının aerodinamik kuvvetler ile ilişkisi CFD simülasyonları ile araştırılmıştır.

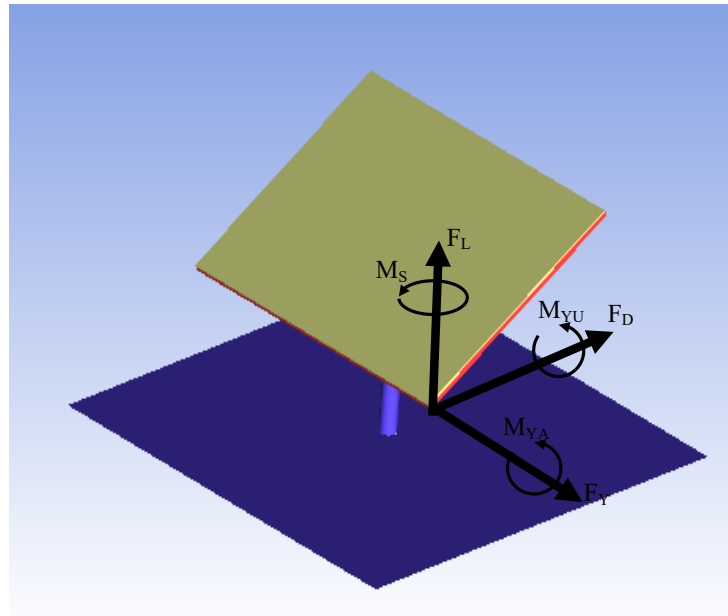
## 2. MATERYAL VE METOT

CFD simülasyonları için seçilen endüstriyel PV panelin katı model tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Seçilen PV panel  $990 \times 1290$  mm<sup>2</sup> ebatlarında olup akış alanına  $30^0$  eğimle yerleştirilmiştir. Panelin yerden yüksekliği eğimli panelin yüksekliği kadar olup 495 mm seçilmiştir. Yürütülen çalışmada temel hedef 5 ve 10 m/s serbest akış hızlarında panele etki eden aerodinamik kuvvetler (sürüklenme ( $F_D$ ), kaldırma ( $F_L$ )) ve

momentleri (Yunuslama ( $M_{YU}$ ), Sapma ( $M_S$ ) ve yalpalama ( $M_{YA}$ ) tanımlamaktır. Söz konusu aerodinamik kuvvet ve momentlerin yönleri Şekil 1'den görülebilir.

## 2.1. Nümerik Metodoloji

Herhangi bir akış alanının tanımlanmasındaki en önemli zorluk geometriye nazaran ihmal edilebilecek büyüklükteki bir geometrik farkın hesaplama alanı üzerindeki dramatik etkisidir. Bu nedenler herhangi bir akış alanının deneysel yöntemler ile optimal tasarımı için çok sayıda tekrarlanabilen ölçüm süreçlerin yürütülmesi gereklidir. Deneysel süreçlerin yürütülmesi, maliyet açısından özellikle küçük ve orta ölçekli firmalar için neredeyse imkansızdır. Günümüzdeki akış uygulamaları için optimal tasarım parametrelerinin saptanmasında izlenen genel trend CFD simülasyonlarıyla akış alanının tanımlanmasıdır. Bu çalışmada da optimal tasarım için söz konusu strateji izlenmiştir. Akış alanını nümerik tanımlayan Fluent, OpenFoam, CFX v.b. birçok ticari veya açık kodlu paket CFD programları bulunmaktadır. Bu programlar



**Şekil 1.** Seçilen PV panelin katı model tasarımı.

esasen herhangi bir akışı tanımlayan süreklilik, momentum ve enerji denklemleri nümerik yöntemler ile çözüme prensibine dayanırlar. Bu çalışmada akış alanının simülasyonunda Fluent paket programı kullanılmıştır. Bu bölümde sırasıyla nümerik simülasyonları tanımlayan temel matematiksel modeller, simülasyonlarda izlenen strateji yönelik yapılan çalışmalar sunulacaktır.

Herhangi bir akış alanı için kütle korunumu prensibine dayanan süreklilik denklemi (Türbülans akış);

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

şekindedir. Momentum korunumuna dayanan momentum denklemi ise (x-yönünde);

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = X_f - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

şekindedir. Denklemdaki  $X_f$ , x yönündeki birim hacme düşen kuvvetleri göstermektedir. Bu denklemlerin akış alanını tanımlayan sınırlar çerçevesinde çözümü hesaplanacak akış alanının tanımlanması ile mümkündür. Söz konusu nümerik çözümlerdeki karşılaşılabilecek en büyük zorluk özellikle momentum denkleminin ikinci dereceden kısmı diferansiyel denklem karakterinde olmasıdır. Denklem (2) verilen

momentum denkleminin çalkantı hızlarını tanımlayan terimdeki reynolds gerilmeleri tek boyutlu bir akış için yaygın olarak;

$$-\rho u'v' = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (3)$$

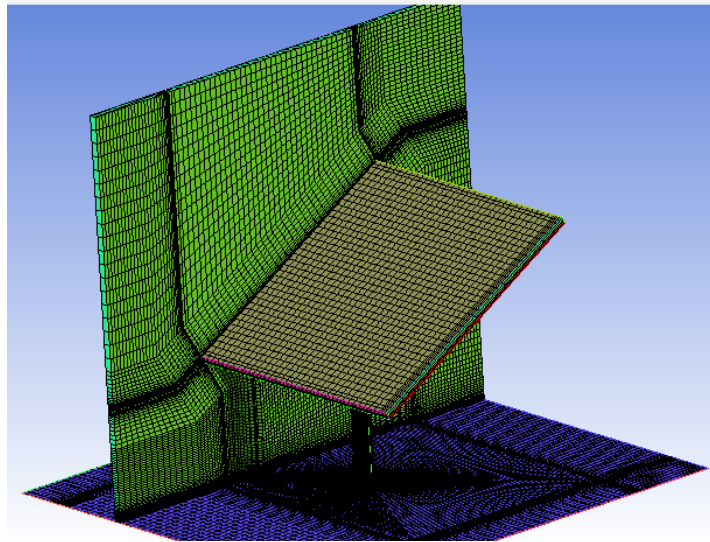
şeklinde tanımlanır (Boussinesq teoremi). Bu tanımlamanın sonucu olarak kayma gerilmesi;

$$\tau = (\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (4)$$

şeklinde olur. Denklemlerdeki  $\mu_t$  dinamik eddy viskoziteyi ve  $\nu_t$  kinematik eddy viskozitesini göstermektedir. Eddy viskozitesinin akışın değil akış alanının bir özelliği olması CFD simülasyonları için en temel zorluktur. Eddy viskozitesinin tanımlanmasındaki söz konusu zorluğu aşmak amacıyla literatürde geliştirilmiş birçok türbülans modeli bulunmaktadır. Herhangi bir CFD simülasyonu için en kritik süreç akış alanına en uygun türbülans modelinin seçilmesidir. Bu çalışmada simülasyonların hesaplama süreçlerinde seçilen türbülans modelin detayları aşağıda verilmiştir.

### Mesh yapısı

Tüm nümerik analizler 4334080, 5454400, 6568000 olmak üzere üç farklı mesh sıklığında yürütülmüştür. Akış alanı farklı rüzgâr atak açıları simülasyonlar gerçekleştirmek amacıyla panel yakın çevresi ve akış alanı şeklinde iki alt bileşen şeklinde tasarlanmıştır. Simülasyon programında bu alt bileşenler birleştirme işlemiyle integre edilmiştir. Üç farklı mesh sıklığında analizlerin yürütülmesi meshten bağımsız çözümlere olanak tanımıştır. 4334080 mesh sıklığında panelin yüzey üzerine yerleştiği akış alanının panel çevresinin mesh yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere tüm akış alanı için hexa mesh geometrisi ile tasarlanmıştır.



Şekil 2. Panel yakın çevresinin mesh tasarımı.

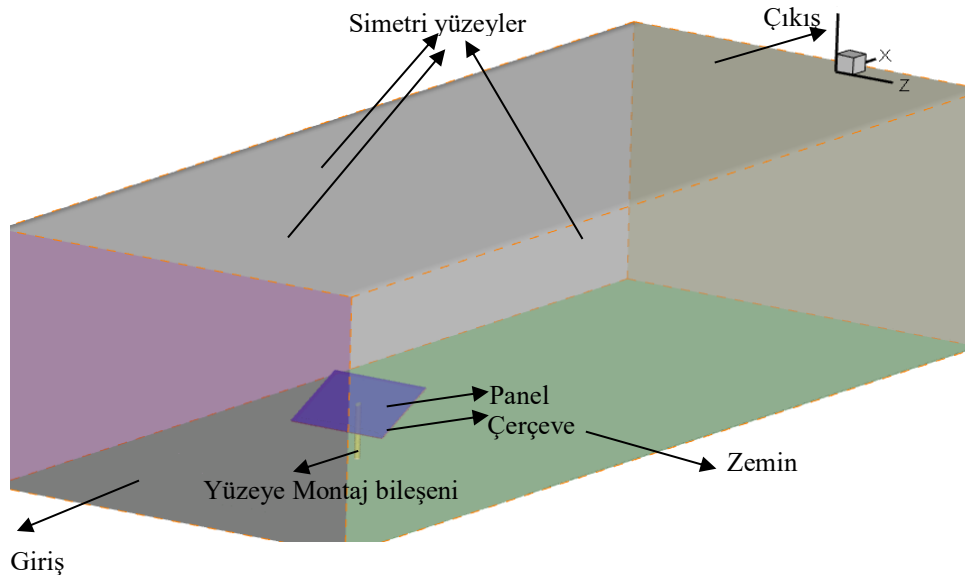
### Sınır şartları

Nümerik analizler için İcemCFD programında tasarlanan  $2.375 \times 1 \times 0.6 \text{ m}^3$  boyutlarındaki akış alanına yatay yüzeye dikey konumda yerleştirilmiştir. Tasarlanan akış alanı ve sınırları Şekil 3’de gösterilmiştir. Giriş panel merkezinde panel üstten bakış alanının yatay mesafesinden 3 kat önde iken çıkış 7 kat geridedir. Girişte v, w hız bileşenleri sıfır, u hızı ise deneylerde panelin konulacağı noktada yapılan hız ölçümlerinde tespit edilen sınır tabakaya uygun olarak tam gelişmiş türbülans akış hız profili şeklinde alınmıştır. Bu hız

profilin tespiti giriş ile aynı mesh yapısına sahip düz levha üzerinde yapılan nümerik simülasyonlar ile tespit edilmiştir. Çıkış sınır şartı olarak ise sıfır gradyan ( $\frac{\partial}{\partial x_i} = 0$ ) alınmıştır. Akış alanında tüm katı

yüzeyler (panel, çerçeve zemin, panelin yüzeye montaj bileşeni duvar (kaymama ( $\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ )) sınır şartı

alındı. Bu yüzey iki parça şeklinde tasarlanmıştır. Akış alanının üst ve yan yüzeyleri simetri sınır şartı alınmıştır. Simetri sınır şartında sınırda herhangi bir akış yoktur. Bu yüzeyde yüzeye dik herhangi bir bileşenin gradyanı sıfırdır. Dolayısıyla yüzeylerin akış alanına herhangi bir etki söz konusu değildir.



Şekil 3. Tasarımı gerçekleştirilen katı model.

### Türbülans model

Ters basınç gradyanının olduğu sınır tabaka akışlarında en iyi performansı  $k-\omega$  türbülans modeli gösterir (Wilcox (1994), Roulund ve ark 2005) [7, 8]. Literatürde  $k-\omega$  modelinin üç versiyonu vardır; (i) orijinal  $k-\omega$  model, (ii)  $k-\omega$ , BSL (baseline) model ve (iii)  $k-\omega$  SST (shear-stress transport) model. Wilcox'un orijinal modelinden türetilen son iki model, Menter(1993) ters basınç gradyanına maruz akışlar için yüksek hassasiyettedir [7,8]. Menter (bkz (Roulund ve ark 2005), (1993), (i) klasik  $k-\varepsilon$  modeli, (ii) orijinal  $k-\omega$ , (ii)  $k-\omega$ , BSL, ve  $k-\omega$ , SST modelleri arasında çok geniş bir alanda karşılaştırma yapmıştır. Karşılaştırma için seçtiği geriye adım akışı ve maksimuma yakın hücum açısındaki Naca 4412 kanat profili üzerinden akış uygulamalarında ters basınç gradyanları son derece yüksektir. Yapılan bu karşılaştırmalarda  $k-\omega$ , SST modeli en doğru sonuçları vermiştir. Bu çalışmada da CFD simülasyonları  $k-\omega$  SST türbülans modeli seçilmiştir. Türbülans modeli için seçilen model katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Giriş ve çıkış bölgesindeki model sabitleri.

$\beta_1$	$\beta^*$	$\gamma_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega1}$
0.075	0.09	0.567	0.85	0.5
$\beta_2$	$\beta^*$	$\gamma_2$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega2}$
0.0828	0.09	0.463	1.0	0.856

## 2.2. CFD simülasyonların güvenilirliği

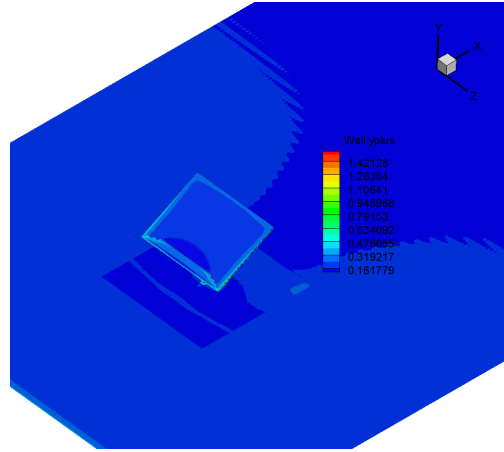
CFD simülasyonların güvenilirliğini sonuçların mesh sayısından bağımsız olması ve mesh yapısının seçilen türbülans modeline uygun olması şeklinde iki parametre belirler. Bu çalışmada her simülasyon üç farklı mesh sayısı için yürütülmüş ve sonuçlardan bağımsızlığı sorgulanmıştır. Bu bölümde simülasyon güvenilirliğine dair 5m/s ve 10 m/s serbest akış hızında yürütülen çalışma sonuçları sunulacaktır. Söz konusu simülasyonlarda seçilecek türbülans modeli dikkate alınarak yapılan mesh tasarımı sonucu mesh sayısı sırasıyla 6825626 ve 7825986 şeklinde olmuştur. Bu mesh sayılarında mesh büyüklüklerinin maksimum ve minimum skalaları Tablo 2’de verilmiştir. Daha sonra bu mesh sayıları %20 artırma ve azaltma yapılarak simülasyonlar tekrarlanmıştır. Yürütülen simülasyonlar sonucunda panel yüzeyindeki ortalama basınç katsayısı Tablo 3’te verilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere farklı mesh sayılarında basınç katsayısı referans olmak üzere sapmalar %2’nin altında kalmaktadır. Bu bulgu simülasyonların meshten bağımsız olduğunu göstermektedir. 5m/s serbest akış hızında yürütülen simülasyonda yüzey boyunca y plus katsayısının dağılımı Şekil 4’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere Tüm yüzeylerde y plus katsayısı 10 altında kalmaktadır. Bu sonuç yapılan mesh tasarımının seçilen türbülans modeline uygun olduğunu göstermektedir

**Tablo 2.** Deneme CFD simülasyonlarında mesh tasarımının minimum ve maksimum mesh skalaları.

$U_{\infty}$	Deneme CFD simülasyonunda mesh tasarımının minimum ve maksimum mesh skalaları
5m/s	<pre> Domain Extents: x-coordinate: min (m) = -5.947173e-01, max (m) = 1.728717e+00 y-coordinate: min (m) = -6.043291e-09, max (m) = 6.000000e-01 z-coordinate: min (m) = -6.590000e-01, max (m) = 6.590000e-01 Volume statistics: minimum volume (m3): 1.726929e-13 maximum volume (m3): 4.177994e-06 total volume (m3): 1.837268e+00 Face area statistics: minimum face area (m2): 2.205259e-09 maximum face area (m2): 3.826758e-04 Checking mesh..... Done. </pre>
10m/s	<pre> Domain Extents: x-coordinate: min (m) = -5.947173e-01, max (m) = 1.728717e+00 y-coordinate: min (m) = -6.043291e-09, max (m) = 6.000000e-01 z-coordinate: min (m) = -6.590000e-01, max (m) = 6.590000e-01 Volume statistics: minimum volume (m3): 1.726929e-13 maximum volume (m3): 4.177994e-06 total volume (m3): 1.837268e+00 Face area statistics: minimum face area (m2): 2.205259e-09 maximum face area (m2): 3.826758e-04 Checking mesh..... Done. </pre>

**Tablo 3.** Farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda paneli yüzeyinin ortalama basınç katsayısı

$U_{\infty}$	Mesh sayısı	$C_p$
5m/s	6825626	-0.70030743
	8190800	-0.707310502
	5.688.021	-0.710383609
10m/s	7825986	-0,36111015
	9391100	-0,365443471
	6521500	-0,292354777

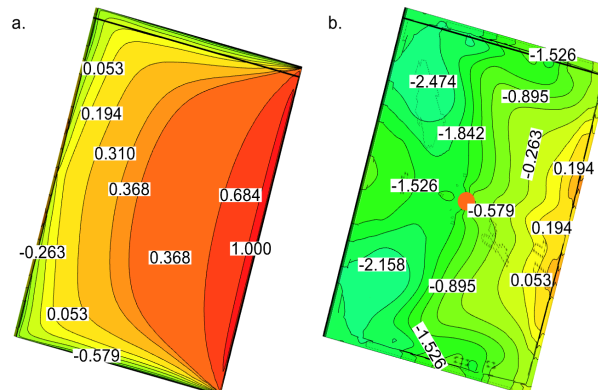


Şekil 4.  $U_{\infty}=5$  m/s serbest akış hızında yüzeylerdeki  $y^+$  katsayısının dağılımı.

### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu çalışmada seçilen  $30^{\circ}$  eğimli endüstriyel bir panelin rüzgâr yükü CFD simülasyonlarıyla araştırılmıştır. Simülasyonlar 5 ve 10 m/s serbest akış hızında gerçekleştirilmiştir. Yürütülen simülasyonlar sonucunda her iki akış hızı için panel etrafındaki akış alanı tanımlanmış ve tanımlanan bu akış alanından aerodinamik kuvvet ve momentler hesaplanmıştır. Aşağıda her iki akış hızı için tanımlanan akış alanları detaylı sunulacaktır.

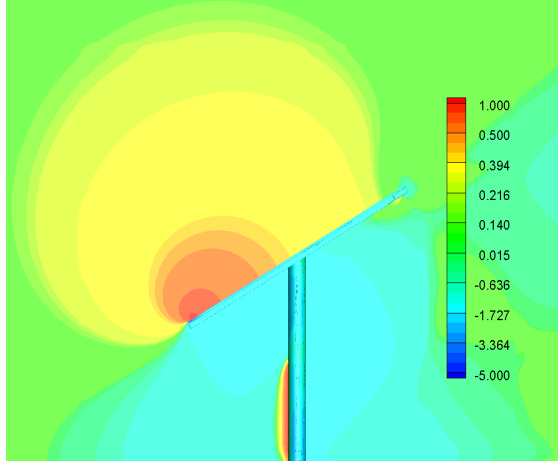
5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında panel ön ve arka yüzeyi boyunca basınç katsayısının dağılımı Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere panel ön yüzeyinde akışa maruz ilk kısımda basınç katsayısının değeri bir olmaktadır. Daha sonra basınç katsayısı kademeli olarak düşmekte ve uç bölgelerde sıfırın altında değerlere ulaşmaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere panel akışa göre ön uç bölgesi hariç diğer uç bölgelerde basınç katsayısı sıfırın üstünde değerler almaktadır. Panel ön yüzeyinde akışa göre ön yüzeyin ucunda basınç katsayısı değeri bir iken panel ön boyunca hemen dramatik olarak yaklaşık olarak %33 düşmektedir. Söz konusu dramatik düşüş panel boyunca devam etmektedir. Panelin arka yüzeyinde akışa göre ön uç bölgesinin küçük bir bölgesinde basınç katsayısı maksimum 0.194 ile sıfırın üstündedir. Geriye kalan panel arka yüzeyinde ise basınç katsayısı sıfırın altında olmaktadır. Gerek panel ön ve gerekse panel ön yüzeyinde basınç katsayısı minimum -2.474 değerini almaktadır. Bu değere panel arka yüzeyinde panel arka ucuna yakın  $Z=0$  eksenine göre simetrik iki bölgede ulaşılmaktadır. Dolayısıyla panel yüzeyine dik panelden dışarıya doğru en büyük basınç kuvvetleri bu bölgede meydana gelmektedir. Gerek panel ön yüzeyinde ve gerekse panel arka yüzeyinde ön uçlar hariç diğer uçlarda basınç katsayısı sıfırdan daha küçüktür. Ancak arka yüzeydeki uç bölgelerdeki negatif basınç katsayısı değeri ön yüzeyin yaklaşık üç katıdır.



Şekil 5.  $U_{\infty}=5$  m/s,  $0^{\circ}$  atak açısında panel (a) ön ve (b) arka yüzeyinde basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

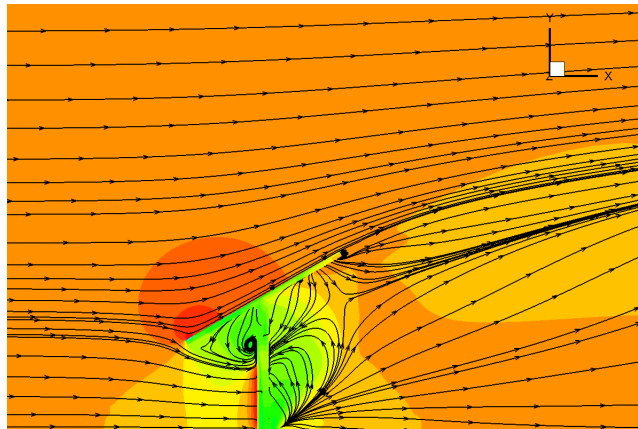


5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca basınç katsayısının dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere söz konusu düzlemdeki akış alanında panel ön kısmında pozitif basınç katsayısı hâkim iken arka kısmında negatif basınç katsayısı hakimdir. Akış yönüne göre panelin ön yüzeyinin üstünde küçük bir bölgede basınç katsayısı bir iken panel ön kısmında basınç katsayısı dramatik olarak kademeli düşmektedir. Yine Şekil 6'dan görüleceği üzere panelin arka kısmında akış yönüne göre arkada küçük bir bölgede sıfıra yakın pozitif bir basınç katsayısı değeri söz konusudur. Bu bölge dışında panel arka bölgesinde basınç katsayısı sıfırın altındadır. Panelin arka bölgesinde basıncındaki kademeli değişimi ön kısmına nazaran daha küçük adımlarda meydana gelmektedir.



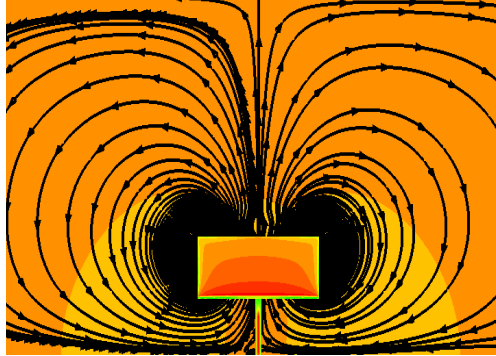
**Şekil 6.**  $U_\infty = 5\text{ m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısı,  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere panel üst kısmında panelin hemen üst kısmında sınır tabaka meydana gelmekte ve panel boyunca ki basınç gradyanından dolayı sınır tabaka incelmekte yanı stabilizesi artmaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere panel üst kısmında herhangi bir sınır tabaka ayrılması meydana gelmemektedir. Panelin alt kısmında ise düşük basınçtan dolayı herhangi bir sınır tabaka oluşumu gözlemlenememektedir. Akış alt kısmında hemen uçta ayrılmakta paneli yüzeye bağlayan dairesel silindirin hemen önünde akış yönde ters bir vorteks sistemi meydana gelmektedir. Şekil 7'den açıkça gözlemlenebilecek diğer bir saptama panel alt bölgesindeki akış alanının yapısını belirleyen ana bileşen dairesel bağlantı borusudur. Akış çizgilerinden kolayca görülebileceği üzere söz konusu dairesel borunun ön ve arka kısmındaki akış alanının yapısı birbirinden tamamen farklıdır.



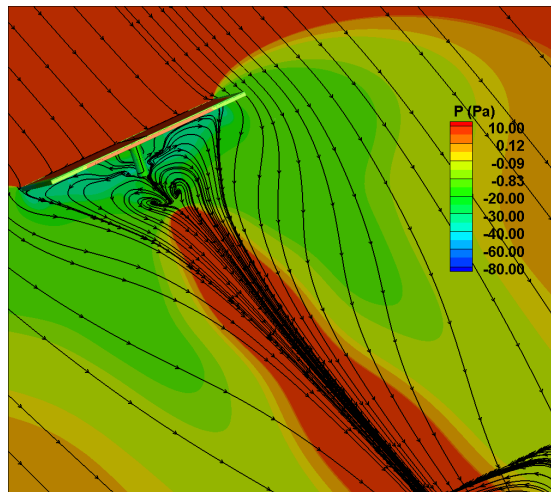
**Şekil 7.**  $U_\infty = 5\text{ m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısı,  $Z/L=0$  noktası  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $x=300$  noktasında yz düzleminde, akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu grafiksel gösterimde amaç akış boyunca panel gerisinde meydana gelen akış alanını gözlemlemektir. Şekilden görüleceği üzere panel gerisinde yz düzleminde akış alanının merkez ekseninden dışarı yönde hareket eden iki tane simetrik vorteks sistemi meydana gelmektedir. Söz konusu vorteks sistemleri tüm akış alanını kapsamaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere vorteks sistemlerinin merkezi yaklaşık olarak panel kenarlarına denk gelmektedir. Yürütülen simülasyon sonucunda söz konusu vorteks sistemlerinin akış yönüne göre akışa ilk maruz kalan alt kenar uçlarında akışın yüzeyden ayrılması sonucu meydana gelen düşük basınç bölgesinden dolayı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan diğer bir gözlemde vorteks sistemlerinin akış alanı boyunca devam ettiği ve panelden uzaklaştıkça merkezlerinin yukarı doğru kaydığıdır.



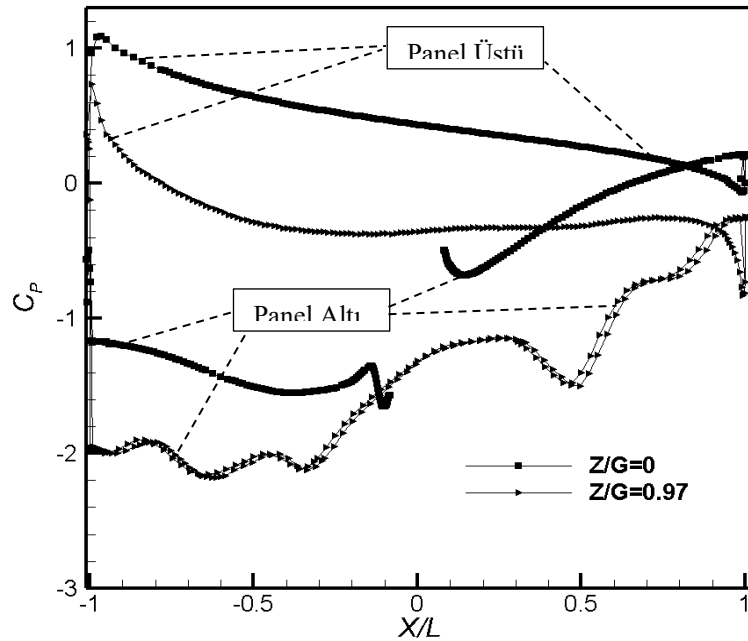
**Şekil 8.**  $U_{\infty} = 5 \text{ m/s}$ ,  $0^{\circ}$  atak açısı,  $x=300 \text{ mm}$ , yz düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $y=100 \text{ mm}$  noktasında xz düzleminde, akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 9'de gösterilmiştir.  $y=100 \text{ mm}$  noktası panelin akışa ilk maruz kalan alt uc noktasıdır. Şekilden görüleceği üzere panel arka kısmında iki simetrik düşük basınç bölgesi meydana gelmektedir. Bu düşük basınç bölgelerinden dolayı akış çizgileri panelin merkez eksenine doğru hareket etmektedir. Söz konusu iki düşük basınç bölgesinin etkisi akış boyunca kademeli zayıflarken etki ettikleri alanda küçülmektedir. Yine şekilden görüleceği üzere panelin gerisinde belli bir mesafe sonra akış boyunca düşük basınç bölgelerini birbirinden ayıran bir yüksek basınç bölgesi meydana gelmektedir. Bu bölge yukarıda yz eksenini boyunca ki akış çizgilerini sunumunda değinilen iki vorteks sisteminin dışı doğru hareket etmesinin nedenidir. Tüm bu gözlemlerin yanı sıra Şekil 4.5'den görüleceği üzere bağlantı borusunun hemen arkasında birbirine simetrik iki vorteks sistemi daha meydana gelmektedir. Ancak bu vorteks sistemlerinin etkisi, panel gerisinde merkez eksenini etrafında meydana gelen ve yukarıda değinilen yüksek basınç bölgesinden dolayı küçük olmaktadır.



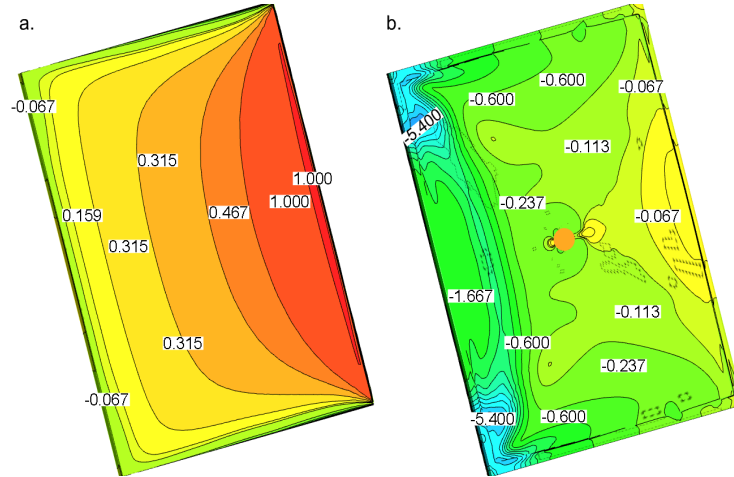
**Şekil 9.**  $U_{\infty} = 5 \text{ m/s}$ ,  $0^{\circ}$  atak açısı  $y=100 \text{ mm}$ , xz düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

5 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  ve  $Z/G=0.97$  eksenlerinde panel yüzeyi boyunca ki basınç katsayısının dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere panel merkez eksenini boyunca yani  $Z/G=0$ 'da panel üzerinde akışa ilk maruz uç da basınç katsayısı 1.08 iken panel boyunca kademeli düşerek -0.086 düşmektedir. Bu trend panel üstünde herhangi bir sınır tabaka ayrılmasının meydana gelmediğini gösteren en önemli bulgudur.  $Z/G=0$  ekseninde panel alt kısmında akışa maruz ilk alt uçta panel altında akışın hemen ayrılmasının bir sonucu olarak basınç katsayısı -0.085 olmakta ve daha sonra panel boyunca -0.036 düşmekte silindirik bağlantı borusuna doğru bir miktar artarken ve hemen borunun önünde dramatik olarak düşmektedir. Şekil 10'dan görüleceği üzere panelin yan ucuna yakın  $Z/G=0.97$  ekseninde panel üzerinde akışa ilk maruz uç da basınç katsayısı 0.723 iken panel boyunca kademeli düşerek -0.272 düşmektedir. Söz konusu düşüş trendi merkez eksene yani  $Z/G=0$  göre çok daha dramatik olmaktadır.  $Z/G=0.97$  noktasında panel arka kısmında basınç katsayısı şekilden görüleceği üzere uçta yaklaşık -2 olmakta ve panel boyunca çeşitli skalada salınımlar göstererek yükselmektedir. Ancak panel arkasında söz konusu eksen boyunca basınç katsayısı sıfırın altında kalmaktadır.



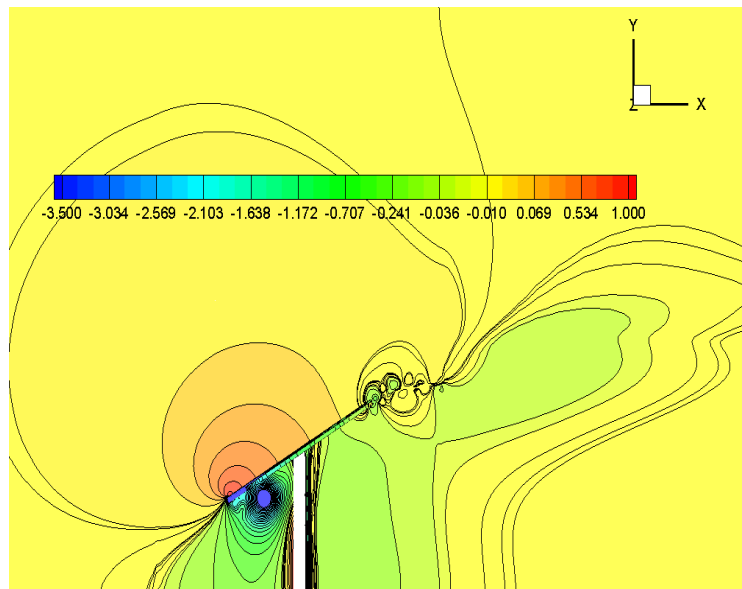
Şekil 10.  $U_{\infty} = 5m/s$ ,  $0^{\circ}$  atak açısı panel yüzeyi boyunca basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında panel ön ve arka yüzeyi boyunca basınç katsayısının dağılımı Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekilde görüleceği üzere panel ön yüzeyinde akışa maruz ilk kısımda basınç katsayısının değeri bir olmaktadır. Daha sonra basınç katsayısı kademeli olarak düşmekte ve uç bölgelerde sıfırın altında değerlere ulaşmaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere panel akışa göre ön uç bölgesi hariç diğer uç bölgelerde basınç katsayısı sıfırın üstünde değerler almaktadır. Panel ön yüzeyinde akışa göre ön yüzeyin ucunda basınç katsayısı değeri bir iken panel ön boyunca hemen dramatik olarak yaklaşık olarak %50 düşmektedir. Söz konusu dramatik düşüş panel boyunca devam etmektedir. Panel ön yüzeyinde basınç katsayısının 1 olduğu bölge  $U_{\infty} = 5m/s$  serbest akıştaki simülasyona nazaran yaklaşık beş kat daha fazladır. Panelin arka yüzeyinde akışa göre ön uç bölgesinde basınç katsayısı sıfıra yakın -0.067'dir. Geriye kalan panel arka yüzeyinde ise basınç katsayısında dramatik değişimler söz konusudur. Gerek panel ön ve gerekse panel ön yüzeyinde basınç katsayısı minimum -5.4 değerini almaktadır. Bu değere panel arka yüzeyinde panel arka ucuna yakın  $Z=0$  eksenine göre simetrik iki bölgede ulaşılmaktadır. Dolayısıyla panel yüzeyine dik panelden dışarıya doğru en büyük basınç kuvvetleri bu bölgede meydana gelmektedir. Gerek panel ön yüzeyinde ve gerekse panel arka yüzeyinde ön uçlar hariç diğer uçlarda basınç katsayısı sıfırdan daha küçüktür. Ancak arka yüzeydeki uç bölgelerdeki negatif basınç katsayısı değeri ön yüzeyin yaklaşık beş katıdır.



**Şekil 11.**  $U_\infty = 10\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısında panel (a) ön ve (b) arka yüzeyinde basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

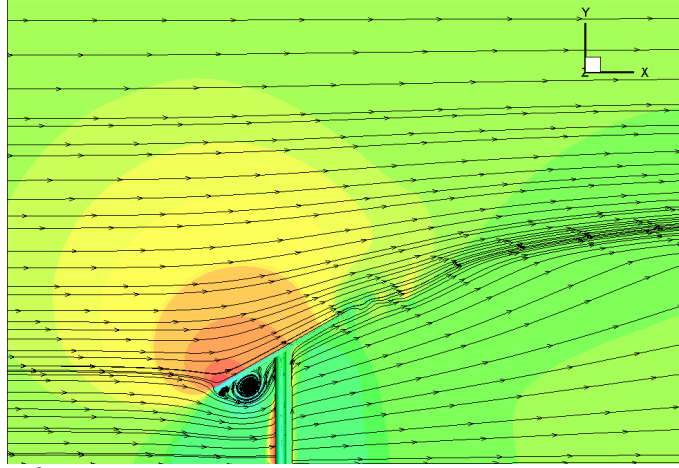
10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca basınç katsayısının dağılımı Şekil 12’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere söz konusu düzlemdeki akış alanında panel ön kısmında pozitif basınç katsayısı hâkim iken arka kısmında negatif basınç katsayısı hakimdir. Akış yönüne göre panelin ön yüzeyinin üstünde küçük bir bölgede basınç katsayısı bir iken panel ön kısmında basınç katsayısı dramatik olarak kademeli düşmektedir. Yine Şekil 12’den görüleceği üzere panelin arka kısmında panele yüzeyinin terk eden akış alanında önemli derecede salınımlar meydana gelmektedir. Yine gözlemlenen diğer bir bulgu panel arkasında hemen ön ucunda basınç katsayısının önemli skalada düşmesidir.



**Şekil 12.**  $U_\infty = 10\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısı,  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

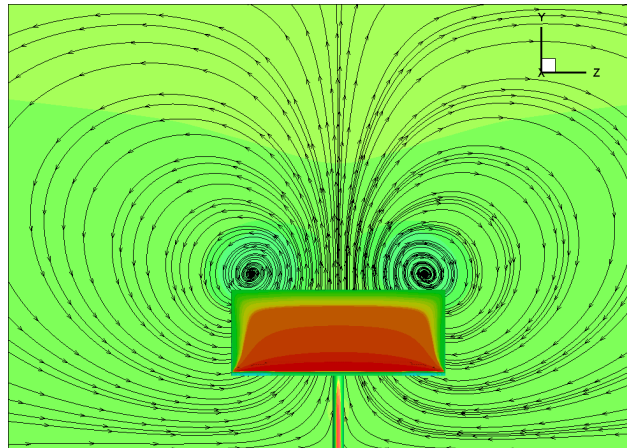
10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  noktasında  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 13’de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere panel üst kısmında panelin hemen üst kısmında sınır tabaka meydana gelmekte ve panel boyunca ki basınç gradyanından dolayı sınır tabaka incelmekte yanı stabilize itesi artmaktadır. Ancak akışın paneli terk ettiği uçta sınır tabakadaki ayrılmadan dolayı akış da belli skalada salınımlar yaşanmaktadır. Panelin alt kısmında ise düşük basınçtan dolayı

herhangi bir sınır tabaka oluşumu gözlemlenmemektedir. Akış alt kısmında hemen uçta ayrılmakta ve iki küçük vorteks sistemi meydana gelmektedir. Bu iki küçük vorteks sistemine nazaran daha büyük bir vorteks sistemi paneli yüzeye bağlayan dairesel silindirin hemen önünde akış yönde ters bir vorteks sistemi daha meydana gelmektedir. Şekil 13'den açıkça gözlemlenebilecek diğer bir saptama panel alt bölgesindeki akış alanının yapısını belirleyen ana bileşen dairesel bağlantı borusudur. Akış çizgilerinden kolayca görülebileceği üzere söz konusu dairesel borunun ön ve arka kısmındaki akış alanının yapısı birbirinden tamamen farklıdır.



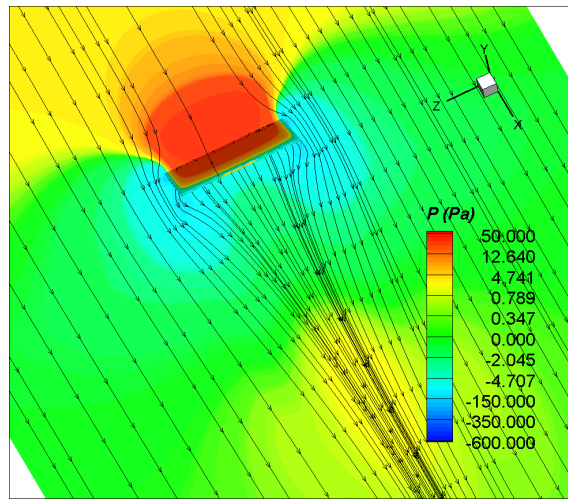
**Şekil 13.**  $U_{\infty} = 10\text{m/s}$ ,  $0^{\circ}$  atak açısı,  $Z/L=0$ , noktası  $xy$  düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $x=300$  noktasında  $yz$  düzleminde, akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 14'de gösterilmiştir. Bu grafiksel gösterimde amaç akış boyunca panel gerisinde meydana gelen akış alanını gözlemlemektir. Şekilden görüleceği üzere panel gerisinde  $yz$  düzleminde akış alanının merkez ekseninden dışarı yönde hareket eden iki tane simetrik vorteks sistemi meydana gelmektedir. Söz konusu vorteks sistemleri tüm akış alanını kapsamaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere vorteks sistemlerinin merkezi yaklaşık olarak panelin üst uç noktalarına yakın bir bölgeye denk gelmektedir. Yürütülen simülasyon sonucunda söz konusu vorteks sistemlerinin akış yönüne göre akışa ilk maruz kalan alt kenar uçlarında akışın yüzeyden ayrılması sonucu meydana gelen düşük basınç bölgesinden dolayı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan diğer bir gözlemde vorteks sistemlerinin akış alanı boyunca devam ettiği ve panelden uzaklaştıkça merkezlerinin yukarı doğru kaydığıdır. Söz konusu bu vorteks sistemlerinin benzeri  $U_{\infty}=5$  m/s serbest akış hızı için yürütülen simülasyonda da gözlemlenmiştir. Bu akış hızında vorteks sistemlerinin merkezleri %10 kadar birbirine daha yakınlaşmakta ve %12 kadar da yukarı kaymaktadır.



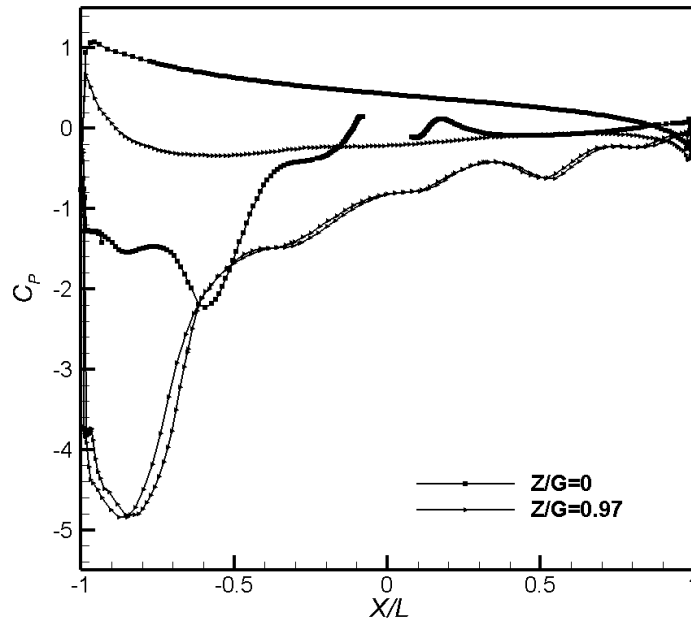
**Şekil 14.**  $U_{\infty} = 10\text{m/s}$ ,  $0^{\circ}$  atak açısı,  $x=300\text{mm}$ ,  $yz$  düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $y=148\text{mm}$  noktasında  $xz$  düzleminde, akış alanı boyunca ki akış çizgileri Şekil 14'de gösterilmiştir.  $y=148\text{mm}$  noktası panelin ile bağlantı borusunun birbirine bağlandığı noktadır. Şekilden görüleceği üzere panel ön yüzeyinde kademeli olarak artan bir basınç gradyanından sonra panelin arka kısmında iki simetrik düşük basınç bölgesi meydana gelmektedir. Bu düşük basınç bölgelerinden dolayı akış çizgileri panelin merkez eksenine doğru hareket etmektedir. Söz konusu iki düşük basınç bölgesinin etkisi akış boyunca kademeli zayıflarken etki ettikleri alanda küçülmektedir. Yine şekilden görüleceği üzere panelin gerisinde belli bir mesafe sonra akış boyunca düşük basınç bölgelerini birbirinden ayıran nispeten bir yüksek basınç bölgesi meydana gelmektedir. Bu bölge yukarıda  $yz$  eksenı boyunca ki akış çizgilerini sunumunda değinilen iki vorteks sisteminin dışı doğru hareket etmesinin nedenidir. Tüm bu gözlemlerin yanı sıra Şekil 15'den görüleceği üzere bağlantı borusunun hemen arkasında düşük basınç bölgesinden dolayı herhangi bir vorteks sistemi görülmemektedir.



Şekil 15.  $U_\infty = 5\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısı  $y=100\text{mm}$ ,  $xz$  düzleminde akış alanı boyunca akış çizgileri.

10 m/s serbest akış hızında ve sıfır atak açısında  $Z/G=0$  ve  $Z/G=0.97$  eksenlerinde panel yüzeyi boyunca ki basınç katsayısının dağılımı Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere panel merkez eksenı boyunca yanı  $Z/G=0$ 'da panel üzerinde akışa ilk maruz uç da basınç katsayısı 1.106 iken panel boyunca kademeli düşerek -0.237 düşmektedir. Panelin ön yüzeyinde basınç katsayısı kademeli



Şekil 16.  $U_\infty = 10\text{m/s}$ ,  $0^\circ$  atak açısı panel yüzeyi boyunca basınç katsayısının ( $C_p$ ) dağılımı.

düşerken uç noktasına yakın önceki düşüş trendine nazaran dramatik bir düşüş söz konusu olmaktadır. Bu trend akışın paneli terk ettiği uç noktaya yakın sınır tabaka ayrılması olduğu göstermektedir.  $Z/G=0$  ekseninde panel alt kısmında akışa maruz ilk alt uçta panel altında akışın hemen ayrılmasının bir sonucu olarak basınç katsayısı  $-0.429$  olmakta ve daha sonra dramatik olarak  $-2.274$  kadar düşmektedir. Bu dramatik düşüşten sonra bağlantı borusu panel bağlantı noktasına kadar yeniden dramatik olarak yükselmek ve  $0.146$  şeklinde sıfırın üstünde bir değere ulaşmaktadır. Söz konusu bu trendler bölgede bir vorteks sisteminin olduğunu göstermektedir. Şekil 4.6'dan görüleceği üzere panelin yan ucuna yakın  $Z/G=0.97$  ekseninde panel üzerinde akışa ilk maruz uç da basınç katsayısı  $0.641$  iken panel boyunca kademi düşerek  $-0.055$  düşmektedir. Söz konusu düşüş trendi merkez eksene yanı  $Z/G=0$  göre çok daha düşük oranda olmaktadır.  $Z/G=0.97$  noktasında panel arakasında basınç katsayısı şekilden görüleceği üzere uçta yaklaşık  $-3.79$  olmakta ve daha sonra dramatik olarak  $-4.79$  kadar düşmektedir. Bu düşüşten sonra daha büyük bir dramatik artış trendiyle panel botunca  $-0.065$  kadar çeşitli salınımlar göstererek yükselmektedir. Bu trendler  $Z/G=0$  eksenini için değinilen vorteks sisteminin panel ön ucu boyunca söz konusu olduğunu ve panel kenarına doğru vorteks merkezinin panele yaklaştığını göstermektedir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

CFD simülasyonları sonucunda hesaplanan aerodinamik kuvvetler ve momentler Tablo 4'te verilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere  $0$  atak açısında seçilen PV panelin sürüklenme katsayısı  $5$  m/s serbest akış hızında  $1.6$  iken  $10$  m/s serbest akış hızında  $1.317$  olmaktadır. Benzer düşüş trendi kaldırma katsayısı içinde söz konusudur. Sürüklenme ve kaldırma katsayıları birlikte değerlendirildiğinde  $30^\circ$  eğimli PV panele seçilen rüzgâr hızında ve dikey yönde gelen rüzgâr yükünün yatay yöndeki rüzgâr yüküne göre yaklaşık olarak %73 daha fazla olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak yunuslama moment ( $M_{yu}$ ) yalpalama ( $M_{YA}$ ) ve sapma ( $M_{SA}$ ) momentine göre çok daha büyük olmaktadır. Yunuslama momentine nazaran diğer iki momentin çok daha küçük olmasının en büyük nedeni akış yönüne göre panelin simetri konumda olmasındandır. Farklı atak açılarında diğer iki momentin de çok daha büyük olacağı olasıdır. Bu çalışmada sıfır atak açısı için simülasyonlar yürütülmüştür. Her bölgenin rüzgâr açısı çoğunlukla bölgeye ve etraftaki diğer yapılara bağlı olarak dramatik değişimler gösterdiğinden farklı atak açılarında yürütülecek çok sayıda çalışma ile ancak PV panellere gelen rüzgâr yükünü tespit etmeye yönelik yöntemler geliştirilebilir.

**Tablo 4.** Farklı serbest akış hızlarında yürütülen simülasyonlar sonucunda hesaplanan aerodinamik büyüklükler.

$U_\infty$	$C_D$	$C_L$	$M_{yu}$	$M_S$	$M_{YA}$
5m/s	1.6025	-2.7773	1.0143e-01	4.3624e-04	8.3800e-04
10m/s	1.3170	-2.3154	1.2396e-01	2.0028e-05	2.3694e-05

#### TEŞEKKÜR

Harran CFD grubu tarafından yürütülen çalışma GAPYENEV ve Harran HPC Merkezi tarafından desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Abiola-Ogedengbe, A., Hangan, H., Siddiqui, K. (2015) "Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) modüle." Renewable Energy, Vol 78 pp 657-665.

- [2] Velicu, R., Moldovean, G., Scaletchi, I., Butuc, B. R. (2014) “Wind loads on an azimuthal photovoltaic platform. Experimental study.” In: Proceeding of International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2014, Granada, Spain.
- [3] Shademan, M., Barron, R. M., Balachandar, R., Hangan, H. (2014) “Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations.” *Can J Civ Eng*, Vol 41(7), pp 28-38.
- [4] Meroney, R. N., Neff, D. E, (2010) “Wind effects on roof mounted solar photovoltaic arrays:CFD and wind-tunnel evaluation.” In: The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, May 23-27.
- [5] Jubayer, C. M., Hangan, H., (2019) “ A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, Vol 153, pp 60–70.
- [6] Bitsuamlak, G. T., Dagnew, A. K., Erwin, J., (2010) “Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD”, In: The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina; May 23-27.
- [7] WILCOX, D. C. 1993. Turbulence modelling for CFD. 2nd edn. DCW Industries.
- [8] Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J., Michelsen, J. (2005) “Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile” *Journal of Fluid Mechanics*, 534: 351-401.