



**TEK EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ RÜZGAR KUVVETİ
DAYANIMININ SAYISAL ÇÖZÜMLERİ**

Fatih YÜRÜK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2019

Fatih YÜRÜK tarafından hazırlanan “TEK EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ RÜZGAR KUVVETİ DAYANIMININ SAYISAL ÇÖZÜMLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 27/09/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih YÜRÜK

27/09/2019

TEK EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ RÜZGAR KUVVETİ DAYANIMININ SAYISAL ÇÖZÜMLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih YÜRÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2019

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi sistemleri çoğunlukla açık arazi ortamlarında kurulmaktadır ve kar, rüzgâr yükü gibi çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu yüzden güneş enerjisi sistemlerini oluşturan yapıların, bu tür yüklere karşı yeterli mukavemete sahip olacak şekilde tasarlanması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, açık arazi ortamına yerleştirilmiş olan tek eksenli bir güneş takip sistemi model olarak ele alınarak, sisteme etki eden en önemli yük olan rüzgâr yüklerinin güneş panelleri ve destek yapıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Rüzgâr akış analizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile gerçekleştirilmiştir ve temel akış denklemleri Ansys Fluent paket programı ile çözülmüştür. Sonlu hacimler metodu ve sürekli durumlu SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak güneş panellerine etkiyen rüzgâr yükleri hesaplanmıştır. Bu yükler altındaki destek yapılarının von-mises gerilim değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir ve temel denklemler Ansys Structure paket programı ile çözülmüştür. Akış analizi sonucunda güneş panelleri üzerinde oluşan rüzgâr basınç dağılımlarını sonlu elemanlar modeline aktarmak için Ansys akışkan-yapı etkileşim paket programı kullanılmıştır. Akış ve yapısal analiz çalışmaları sonucunda güneş takip sistemi konstrüksiyonu üzerinde elde edilen gerilim değerleri, malzemelerin akma sınır değerleri ile kıyaslanıp sistem üzerinde kalıcı hasar oluşumunun engellenmesi amaçlanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak güneş panellerinin eğim açısı, rüzgârın hücum açısı ve şiddeti ile, kolonların zemine olan yüksekliği de değişken olarak dikkate alınmış ve parametrik analizler yürütülmüştür. Ayrıca sayısal çalışmalar için oluşturulan yöntemler kullanılarak deneysel ve literatür doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : Güneş takip sistemleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, rüzgâr yükleri, sonlu elemanlar yöntemi, türbülans modelleri

Sayfa Adedi : 126

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN

NUMERICAL SOLUTIONS OF WIND FORCE ON A SINGLE AXIS SOLAR
TRACKER SYSTEM

(M. Sc. Thesis)

Fatih YÜRÜK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2019

ABSTRACT

Solar energy systems that are one of the leading sources of renewable energy, are mostly installed outdoors and they are exposed to environmental conditions such as snow and wind loads. Therefore, the structures of these systems should be designed to have enough strength against such loads. In this study, the single axis solar tracker system placed in open terrain, has been considered as a model and the effects of wind loads, which are the most critical loads affecting the system, on solar panels and support structures have been investigated. The flow analysis and governing equations are solved using Ansys Fluent solver. Finite volume method and steady state SST $k-\omega$ turbulence model are used to calculate wind loads on solar panels. The von-mises stress values of the support structure under these loads are examined by finite element method and governing equations are solved using Ansys Structure package program. Wind pressure distributions on solar panels obtained by flow analysis are transferred to finite element model using Ansys fluid-structure interaction package program. Stress values on the construction of solar tracker system obtained by numerical analysis are compared with the yield strength values of materials to prevent permanent failure on the system. Unlike other studies, inclination angle of solar panels, wind direction and velocity, as well as height of the piers are also considered as variables and parametric analysis are carried out. Also, experimental and literature validation are performed by using the methods created for numerical studies.

Science Code : 91411

Key Words : Solar tracker systems, computational fluid dynamics, wind loads, finite element method, turbulent models

Page Number : 126

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Nihat GEMALMAYAN

TEŞEKKÜR

Tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup bana yardımcı olan, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nihat GEMALMAYAN'a, çalışma esnasında değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Dr. Öğr. Üyesi Nureddin DİNLER'e, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve bu hayattaki en büyük şansım olan çok değerli eşim Burcu YÜRÜK'e, beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve hayatımın her evresinde bana destek olan ailem Kadriye YÜRÜK, Cengiz YÜRÜK, Seda YÜRÜK, Hüseyin YÜRÜK'e, çalışmada kullanılan ilk örnek modelin oluşturulmasında katkıda bulunan, model tasarım ve analizlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli ihtiyaçları sağlayan ve engin bilgilerinden yararlandığım "Başarıarge Enerji Teknolojileri A.Ş." genel müdürü Ümüt Nuri ŞEN'e, motivasyonumu sürekli yüksekte tutmamı sağlayan çalışma arkadaşlarım Süleyman ÇETİNKAYA, Hüsnü AVŞAR ve Osman ARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. TEMEL KAVRAMLAR VE PROTOTİP MODEL.....	9
3.1. Güneş Enerjisi Santralleri Hakkında Genel Bilgiler.....	9
3.2. Güneş Takip Sistemi Model Geometrisi.....	13
4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN HAD YAKLAŞIMI	17
4.1. Geometri.....	18
4.2. Ağ	20
4.3. Akış Modeli	22
4.4. Sınır Şartları.....	27
4.5. Çözüm	29
5. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN SEY YAKLAŞIMI.....	33
5.1. Geometri ve Ağ	34
5.2. Temas İlişkileri ve Sınır Şartları.....	36
5.3. Çözüm	37

	Sayfa
6. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI	45
6.1. Deneysel Doğrulama	45
6.2. Literatür Doğrulaması	53
7. PARAMETRİK ÇALIŞMA.....	57
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	91
EK-1. Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri	92
EK-2. Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları	108
ÖZGEÇMİŞ.....	124
DİZİN	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı konfigürasyonlar için W ve C parametrelerin değerleri.....	15
Çizelge 3.2. Prototip modelde kullanılan parçaların malzemeleri.....	15
Çizelge 4.1. Relaksasyon kriterleri.....	32
Çizelge 4.2. Diskritizasyon özellikleri.....	32
Çizelge 5.1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	35
Çizelge 6.1. Paralel akış durumu için sayısal analiz sonucunda elde edilen katsayı değerleri	49
Çizelge 6.2. Dik akış durumu için sayısal analiz sonucunda elde edilen katsayı değerleri	51
Çizelge 6.3. Aerodinamik katsayı değerlerinin karşılaştırılması	56
Çizelge 7.1. Güneş panellerinin en boy oranına bağlı olarak direnç katsayı değerleri..	64
Çizelge 7.2. Güneş panellerinin en boy oranına bağlı olarak kaldırma katsayı değerleri	65
Çizelge 7.3. Güneş panelleri yüzeyine etki eden aerodinamik kuvvetler.....	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Rüzgâr yüküne maruz kalan güneş takip sisteminde hasar oluşumu	1
Şekil 1.2. TS498 standardında rüzgâr yönüne göre rüzgâr yüklerinin hesabı.....	2
Şekil 2.1. Güneş panellerinin tek başına veya arka arkaya sıralı dizili olması durumlarında ortalama hız konturları	5
Şekil 2.2. Güneş panellerinin destek kolonları ile veya tek başına olması durumlarında hız vektörleri.....	6
Şekil 3.1. Takip ve sabit sistem enerji üretimi karşılaştırılması	10
Şekil 3.2. Yatay tek eksenli güneş takip sistemi.....	11
Şekil 3.3. Dikey tek eksenli güneş takip sistemi.....	11
Şekil 3.4. Yatay birincil çift eksenli güneş takip sistemi	12
Şekil 3.5. Dikey birincil çift eksenli güneş takip sistemi	12
Şekil 3.6. Prototip modelin genel görünümü.....	13
Şekil 3.7. Prototip modelin genel boyutları.....	14
Şekil 3.8. Prototip modeli oluşturulan güneş takip sisteminin saha görünümleri.....	16
Şekil 4.1. a. Akış alanı modeli: tam model, izometri görünüm	19
Şekil 4.1. b. Akış alanı modeli: tam model, yan görünüm	19
Şekil 4.2. Akış alanı modeli: simetrik model	20
Şekil 4.3. Rüzgâr hücum açıları.....	20
Şekil 4.4. Akış alanı geometrisinin ağ ile kaplanmış hali	21
Şekil 4.5. Bir cismin üzerine etki eden basınç ve kayma kuvvetleri	29
Şekil 4.6. Güneş panelleri üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetler.....	30
Şekil 5.1. Güneş takip sisteminin sonlu elemanlar modeli.....	34
Şekil 5.2. Sonlu elemanlar modeli için oluşturulan ağ yapısı	36
Şekil 5.3. Gerilim gerinim grafiği.....	38

Şekil	Sayfa
Şekil 5.4. Kübik hacmin yüzeyindeki 6 bağımsız serbestlik gerilme bileşenleri	40
Şekil 6.1. Düz plaka üzerinde paralel akış durumu	46
Şekil 6.2. Paralel akış durumu için oluşturulan akış alanı geometrisi	47
Şekil 6.3. Paralel akış durumu için oluşturulan ağ yapısı	48
Şekil 6.4. Paralel akış durumu için direnç katsayısı yakınsama grafiği	48
Şekil 6.5. Düz plaka üzerinde dik akış durumu	49
Şekil 6.6. Direnç katsayısının plaka genişliğinin yüksekliğe oranıyla değişimi	50
Şekil 6.7. Dik akış durumu doğrulama çalışması için oluşturulan akış alanı geometrisi.....	51
Şekil 6.8. Dik akış durumu doğrulama çalışması için oluşturulan ağ yapısı.....	51
Şekil 6.9. Dik akış durumu doğrulama çalışması için elde edilen akış çizgileri	52
Şekil 6.10. Dik akış durumu doğrulama çalışması için elde edilen basınç konturu	52
Şekil 6.11. Literatür doğrulamasında kullanılan geometrik model.....	54
Şekil 6.12. Literatür doğrulaması için oluşturulan akış alanı	54
Şekil 6.13. Literatür doğrulaması için oluşturulan ağ yapısı.....	55
Şekil 6.14. 0° rüzgâr yönü için panel yüzeylerinin orta çizgisi boyunca ortalama C_p grafiği.....	56
Şekil 7.1. 0° rüzgâr hücum açısı için direnç katsayı değerleri	59
Şekil 7.2. 180° rüzgâr hücum açısı için direnç katsayı değerleri.....	59
Şekil 7.3. 0° rüzgâr hücum açısı için kaldırma katsayı değerleri	60
Şekil 7.4. 180° rüzgâr hücum açısı için kaldırma katsayı değerleri.....	61
Şekil 7.5. 0° rüzgâr hücum açısı için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği.....	63
Şekil 7.6. 180° rüzgâr hücum açısı için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği.....	63
Şekil 7.7. En boy oranı ve eğim açısı değişkenlerine bağlı olarak direnç katsayı değerleri	65

Şekil	Sayfa
Şekil 7.8. En boy oranı ve eğim açısı değişkenlerine bağlı olarak kaldırma katsayı değerleri	66
Şekil 7.9. En boy oranları için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği	66
Şekil 7.10. 0° rüzgâr hücum açısı için direnç kuvvetleri	67
Şekil 7.11. 0° rüzgâr hücum açısı için kaldırma kuvvetleri	67
Şekil 7.12. Eğim açısına bağlı olarak 18 m/s ve 15 m/s rüzgâr hızlarındaki aerodinamik kuvvetlerin oranları.....	69
Şekil 7.13. $H_k=1,1m$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey	70
Şekil 7.14. $H_k=1,1m$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey	70
Şekil 7.15. 15° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız	72
Şekil 7.16. 30° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız	72
Şekil 7.17. 45° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız	73
Şekil 7.18. 60° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız	73
Şekil 7.19. Arka arkaya sıralı güneş panellerinin rüzgâr hızı dağılımı	74
Şekil 7.20. 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum deplasman değerleri.....	75
Şekil 7.21. 180° rüzgâr hücum açısı için maksimum deplasman değerleri.....	76
Şekil 7.22. 0° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası.....	77
Şekil 7.23. 180° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası....	77
Şekil 7.24. 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum von-mises gerilim değerleri.....	78
Şekil 7.25. 180° rüzgâr hücum açısı için maksimum von-mises gerilim değerleri	79
Şekil 7.26. $H_k=1,3m$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için güneş takip sisteminin gerilim haritası	79
Şekil 7.27. $H_k=1,3m$, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için güneş takip sisteminin gerilim haritası	80
Şekil 7.28. Mukavemeti güçlendirilmiş motor bağlantı parçası	80
Şekil 7.29. Motor bağlantı parçasındaki iyileştirme sonucunda oluşan gerilim haritası	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Alan (m^2)
b	Düz plakanın genişliği (m)
B	Güneş panelinin boyu (m)
C	Sistemin tepe yüksekliği (m)
C_D	Boyutsuz direnç katsayısı
C_f	Boyutsuz kayma gerilme katsayısı
C_K	Kord uzunluğu (m)
C_L	Boyutsuz kaldırma katsayısı
C_p	Boyutsuz basınç katsayısı
C_s	Pürüzlülük sabiti
dA	Cisim yüzeyindeki diferansiyel alan (m^2)
D_w, D_w^+	Difüzyon katsayıları (kg/m.s)
E	Entegrasyon sabiti
E'	Esneklik katsayısı (GPa)
\vec{F}	Dış kuvvet vektörü (N)
$\vec{F}_{\text{basınç}}$	Basınç kuvvet vektörü (N)
F_D	Direnç kuvveti (N)
\vec{F}_{kayma}	Kayma kuvvet vektörü (N)
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
F_R	Net kuvvet (N)
F_1, F_2	Karışım fonksiyonları
G	Türbülans kinetik enerji üretimi (W/m^3)
G'	Kesme esneklik katsayısı (GPa)
h	Düz plakanın yüksekliği (m)
H_k	Kolonların zeminden yüksekliği (m)
I	Türbülans yoğunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

k	Türbülans kinetik enerji (m^2/s^2)
K	Eleman direngenlik katsayısı
k_s	Pürüzlülük yüksekliği (m)
L	Sistemin toplam eni (m)
N	Şekil fonksiyonu
P	Basınç (Pa)
R_e	Reynolds sayısı
S	Kaynak terimi
u_i	Anlık hız bileşenleri (m/s)
u_1	Anlık hız x bileşeni (m/s)
u_2	Anlık hız y bileşeni (m/s)
u_3	Anlık hız z bileşeni (m/s)
\bar{u}_i	Ortalama hız bileşenleri (m/s)
\bar{u}_1	Ortalama hız x bileşeni (m/s)
\bar{u}_2	Ortalama hız y bileşeni (m/s)
\bar{u}_3	Ortalama hız z bileşeni (m/s)
u'_i	Çalkantı hız bileşenleri (m/s)
u'_1	Çalkantı hız x bileşeni (m/s)
u'_2	Çalkantı hız y bileşeni (m/s)
u'_3	Çalkantı hız z bileşeni (m/s)
\vec{v}	Anlık hız vektörü (m/s)
V	Hacim (m^3)
V_{ref}	Serbest akım hızı (m/s)
W	Sistemin toplam boyu (m)
y_o	Yüzey pürüzlülük uzunluğu (m)
y_p	Alt yüzeyden ilk hücre merkezine olan uzaklık (m)
Y	Yutulma
$\alpha_1, \alpha^*, \alpha_{\infty}^*, \alpha_{k,1}, \alpha_{k,2}, \sigma_k, \sigma_{\omega}$	Türbülans model sabitleri
$\alpha_{\omega,1}, \alpha_{\omega,2}, \beta_{i,1}, \beta_{i,2}, \beta_{\infty}^*$	Türbülans model sabitleri
α_p	Panel eğim açısı ($^{\circ}$)
α_r	Rüzgâr hücum açısı ($^{\circ}$)

Simgeler**Açıklamalar**

δ_{\max}	Maksimum deplasman (mm)
ε	Gerinim
ε_x	Normal gerinim x bileşeni
ε_y	Normal gerinim y bileşeni
ε_z	Normal gerinim z bileşeni
ϕ	Genel diferansiyel denklemde herhangi bir değişken
κ	von Karman sabiti (m)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
μ_t	Türbülans viskozite (Pa.s)
$\sigma_{eş}$	Eşdeğer gerilme (MPa)
σ_{\max}	Maksimum von-mises gerilmesi (MPa)
σ_x	Normal gerilmenin x bileşeni (MPa)
σ_y	Normal gerilmenin y bileşeni (MPa)
σ_z	Normal gerilmenin z bileşeni (MPa)
τ_ω	Kayma gerilmesi (MPa)
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Kayma gerilme bileşenleri (MPa)
ω	Türbülans kinetik enerji yutulması (s^{-1})
ν	Poisson oranı
$\Lambda^{(e)}$	Gerinim enerjisi (Nm)
Γ	Difüzyon katsayısı (kg/m. s)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABL	Atmosferik sınır tabaka
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
RANS	Reynolds ortalamalı Navier-Stokes
RNG	Normalize edilmiş grup (Re-Normalization Group)
SEA	Sonlu elemanlar analizi
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
SST	Kesme gerilme aktarımı (Shear stress transport)

1. GİRİŞ

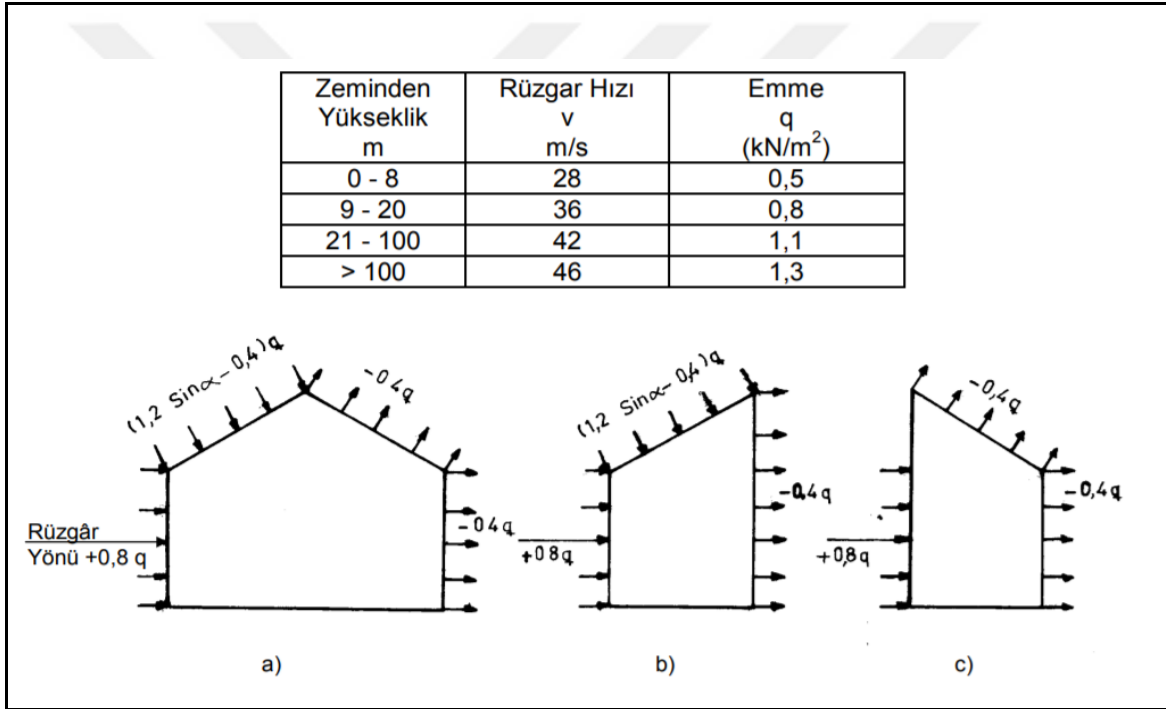
Karbondiyoksit emisyonlarının neden olduğu artan çevre kirliliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenebilir olması ve enerji ihtiyaçlarının giderek artması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri ise çevre kirliliği yaratmaması, işletim maliyetinin çok düşük olması ve depolamasının kolaylığı nedeniyle günümüzde tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Son yıllarda güneş enerjisi santrallerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerdeki verimliliğe de büyük önem verilmektedir. Güneş takip sistemleri, yıllık enerji üretiminin artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Genele baktığımızda güneş takip sistemleri açık arazi ortamlarında çalışmaktadır ve bu nedenle güneş panelleri ile metal taşıyıcı sistemler rüzgâr yüküne maruz kalmaktadır. Ayrıca metal taşıyıcı sistemler üzerine yatayda ve dikeyde sıralı diziler halinde güneş panelleri yerleştirilerek istenilen gerilim ve güç seviyelerine ulaşabilmektedir ve bu durum panel yüzey alanında artışa neden olmaktadır. Bu paneller üzerinde eş zamanlı olarak hareket eden rüzgâr yükleri, geniş yüzey alanı nedeniyle takip sistemi konstrüksiyonlarında zorlanmalara ve buna bağlı olarak ciddi mekanik problemlere neden olabilmektedir. Örneğin, Kuzey Vermont'ta kurulan bir güneş takip sisteminde fırtına ile meydana gelen hasar Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Rüzgâr yüküne maruz kalan güneş takip sisteminde hasar oluşumu [1]

Güneş takip sistemi yapılarında meydana gelebilecek hasarları engellemek için rüzgâr yüklerinin doğru hesaplanması ve yapılarda kullanılan profillerde akma dayanım ile deplasman sınırlarının aşılması durumu dikkate alınmalıdır.

Türkiye’deki endüstriyel uygulamalarda güneş enerjisi santrallerinde kullanılan yapıların rüzgâr yüklerini belirleyebilmek için TS498 standardı [2] kullanılmaktadır. Bu standarda göre yapılan rüzgâr yükü hesapları çok kaba kabullere dayanmaktadır. Ayrıca güneş enerjisi santrallerinde kullanılan eğimli ve arkası açık sistemlere ithafen hiçbir bilgi bulunmamaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. TS 498 standardında rüzgâr yönüne göre rüzgâr yüklerinin hesabı [2]

Bu yüzden rüzgâr yüklerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile belirlenmesi, bu eksikliklerin ve yetersizliklerin giderilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca bu rüzgâr yükleri altında çalışacak olan güneş takip sisteminde, hasar oluşumunu engellemek amacıyla güneş panellerinin ve taşıyıcı sistemlerin rüzgâr yükü altındaki yapısal analizinin yapılması oldukça önemlidir. Böylece açık arazi ortamlarında kurulması planlanan güneş enerjisi santrallerinin uzun yıllar boyunca sorunsuz bir şekilde çalışması sağlanabilmektedir. Ayrıca güneş enerjisi tesislerinde panelden sonra en önemli maliyet kalemini oluşturan metal taşıyıcıların kesitlerinde iyileştirmelere gidilerek yatırım maliyetleri düşürülebilmektedir.

Rüzgâr yükleri güneş panellerinin boyutuna ve eğim açısına, rüzgârın akış yönüne, rüzgâr hızına ve kolonların zeminden olan mesafesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Güneş panellerini ve metal taşıyıcı sistemlerini doğrudan etkileyen bu yükleri sayısal analizlerle incelemek amacıyla literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk çalışmalarda genellikle çatı üstüne kurulmuş güneş panellerine etki eden rüzgâr yükleri incelenmiştir. Güneş panelleri üzerindeki aerodinamik yükleri hesaplamak için akış analizleri gerçekleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, zemine monteli güneş enerjisi sistemlerinde rüzgâr yüklerinin etkileri üzerinde durulmuştur. Bu amaçla HAD yaklaşımı ile sistem üzerindeki aerodinamik katsayılar belirlenmiştir. Son zamanlarda ise daha çok atmosferik ortamlara kurulan güneş takip sistemleri üzerindeki rüzgâr yüklerinin etkileri incelenmiştir. Akış analizleri ile güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları elde edilmiş ve yapısal analizler ile konstrüksiyon üzerinde meydana gelen gerilimler incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda güneş panellerinin eğim açısı, rüzgâr hızı ve rüzgârın hücum açısı değişken olarak dikkate alınmış ve rüzgâr yüklerine etkileri incelenmiştir. Mevcut çalışmada ise bu değişkenlerin yanında kolonların zeminden yüksekliği de değişken olarak düşünülmüş ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu tezde, rüzgâr yüklerini etkileyen değişken parametreler ile güneş takip sistemi modelinin dış akış incelemesini sayısal çalışmalarla gerçekleştirerek, güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımlarının, aerodinamik kuvvetlerin ve katsayılarının tespit edilmesi ve sistemin temelini oluşturan destek yapılarında kalıcı hasar oluşumunu engellemek amacıyla model geometrisinde akışa uygun olmayan kısımların belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda ikinci bölümde mevcut çalışma ile ilgili kapsamlı literatür taramasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde problemin fiziğini anlamak için bazı temel kavramlardan bahsedilmiştir. Güneş enerjisi santralleri hakkında genel bilgiler ve sayısal analizi yapılacak olan güneş takip sisteminin prototip modeli ile ilgili detaylı açıklamalar yer almaktadır.

Dördüncü bölümde akışkanlar mekaniği sayısal simülasyonu için gereken temel kavramların mevcut çalışma için gerekli olan kısımları açıklanmıştır. Gerekli kavramlar açıklandıktan sonra, HAD yaklaşımı ile güneş takip sisteminin akış analizini gerçekleştirmek için gerekli olan geometrinin oluşturulması, ağ yapısı, akış türünün ve modelinin belirlenmesi, sınır koşullarının oluşturulması ve çözüm yöntemlerinin belirlenmesi gibi çalışmalardan bahsedilmiştir.

Beşinci bölümde sonlu elemanlar analizi (SEA) için gereken temel kavramların mevcut çalışma için gerekli olan kısımları açıklanmıştır. Gerekli kavramlar açıklandıktan sonra, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilecek olan SEA için gerekli olan geometrinin oluşturulması, ağ yapısı, kullanılan materyallerin belirlenmesi, sınır şartlarının ve temas ilişkilerinin belirlenmesi gibi çalışmalardan bahsedilmiştir.

Altıncı bölümde, önceki bölümlerde sunulan sayısal analiz metotları kullanılarak deneysel ve literatür doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kısmında güneş panelleri üzerindeki rüzgâr akışı, düz bir plaka üzerindeki dış akışlara benzetilmiştir. İnce, düz plakaların akış hareketi yönüne paralel ve dik yerleştirilmesi ile oluşan 2 farklı özel durum için geliştirilmiş deneysel bağıntılar, sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca Jubayer ve Hangan (2014) tarafından güneş panelleri üzerindeki rüzgâr akışının sayısal analizi üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmasının doğruluğunu desteklemek amacıyla literatür çalışmasında elde edilen aerodinamik katsayı değerleri, mevcut sayısal analizlerle kıyaslanmıştır.

Yedinci bölümde rüzgâr yüklerini etkileyen temel faktörlerin başında gelen güneş panellerinin boyutları ve eğim açısı, rüzgâr hücum açısı, rüzgâr hızı ve kolonların zeminden olan yüksekliği (güneş panellerinin zeminden olan yükseklik mesafesi) değişken parametreler olarak ele alınmış ve rüzgâr yüklerinin güneş panelleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca değişken parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilen akış analizleri sonucunda güneş panelleri üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetlerin güneş takip sistemi yapılarındaki etkilerini incelemek amacıyla yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

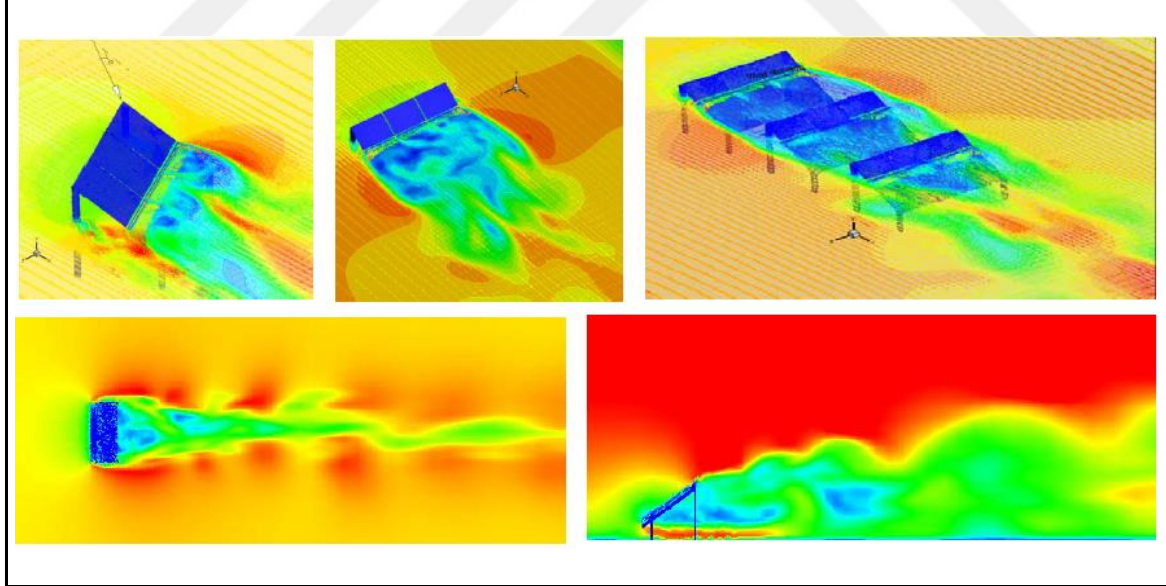
Sekizinci bölümde ise tez kapsamında yürütülen çalışmaların kısa bir özeti sunulmuş ve parametrik sayısal çalışma sonucunda elde edilen veriler detaylıca tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kaynaklar incelendiğinde sabit veya hareketli güneş enerjisi sistemlerindeki mühendislik araştırmalarının en önemli amaçlarından biri, güneş panelleri ve metal taşıyıcı sistemleri üzerinde etkili olan aerodinamik yüklerin analizidir.

Çatılara yerleştirilen güneş panelleri üzerine yapılan ilk çalışma Chevalier ve Norton (1979) tarafından gerçekleştirilmiştir. Chevalier ve Norton binaların çatısına yerleştirilmiş güneş panelleri üzerine çok sayıda rüzgâr tüneli testi gerçekleştirmişlerdir [3].

Bitsuamlak ve diğerleri (2010), HAD yaklaşımını kullanarak rüzgâr akışı altındaki zemine monteli güneş panellerinin aerodinamik özelliklerini incelemiştir (Şekil 2.1). Bu çalışmada, güneş panellerinin tek başına veya arka arkaya sıralı dizili olmaları durumlarında üç çeşit rüzgâr yönüne göre rüzgâr yükleri hesaplanmıştır ve birinci sıradaki panellerin diğer sıradaki panellere siper etkisi sağladığı gözlemlenmiştir [4].



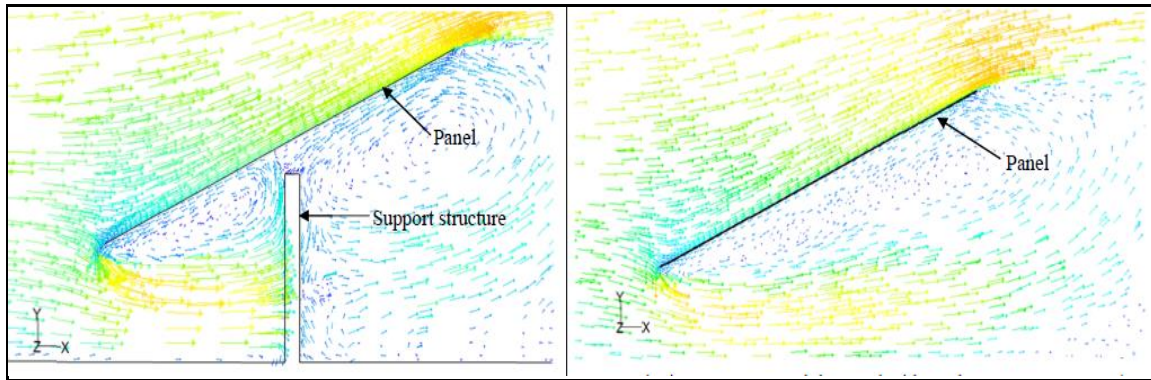
Şekil 2.1. Güneş panellerinin tek başına veya arka arkaya sıralı dizili olmaları durumlarında ortalama hız konturları [4]

Warsido ve diğerleri (2014), bir binanın düz çatısına monte edilmiş sıralı dizili güneş panelleri üzerindeki siper etkisinin önemini belirlemek amacıyla rüzgâr tüneli testlerini kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir ve en dıştaki güneş panellerinin içteki güneş panellere göre daha yüksek rüzgâr yüklerine maruz kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca

güneş panellerinin arasındaki mesafenin rüzgâr yüküne etkisini incelemiştir. Güneş panelleri arasındaki yanal boşluğun, aerodinamik katsayıları üzerindeki etkisinin çok düşük olduğunu belirlemiştir. Fakat güneş panellerinin arasındaki dikey boşlukların artmasıyla aerodinamik katsayılarında belirgin artışların olduğunu gözlemlemiştir [5].

Shademan ve diğerleri (2014), zemine monteli ve sıralı dizili güneş panellerinde sıra aralıklarının aerodinamik katsayılarına etkisini incelemiştir. 45° eğim açısı ve normal rüzgâr yönü için sürekli Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerini ve kesme gerilme aktarımı (SST) $k-\omega$ türbülans modelini kullanarak simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Rüzgâr akışının ilk ulaştığı güneş paneli diziliminde, sıra aralıklarının rüzgâr yükü için bir etkisinin olmadığı görülmüştür. İlk sıranın arkasında kalan diğer sıradaki güneş panelleri diziliminde ise sıra aralığının artmasıyla birlikte direnç ve kaldırma katsayılarının da arttığı görülmüştür [6].

Güneş panelleri üzerine etkiyen rüzgâr yüklerinin etkileri ile ilgili oldukça geniş bir çalışma Jubayer ve Hangan (2012, 2014, 2016) tarafından gerçekleştirilmiştir. Jubayer ve Hangan çalışmalarında, atmosferik ortama yerleştirilmiş 25° panel açılı zemin üstü monteli fotovoltaik sistemlerin rüzgâr yüklerini incelemek amacıyla üç boyutlu sürekli olmayan RANS metodunu ve SST $k-\omega$ türbülans sayısal modelini kullanmışlardır [7-9]. 2012 yılındaki çalışmalarında, 0° hücum açısındaki ve $17,5$ m/s hızındaki rüzgârın paneller üzerinde oluşturduğu yükleri incelemiştir. Analiz sonucunda panellerin altına destek kolonları konulması durumunda, panellerin arka kısmında 2 farklı bölgede girdapların oluştuğunu, sadece panellerin olması durumunda ise arka kısımda büyük tek bir girdap oluştuğunu belirlemiştir (Şekil 2.2) [7].



Şekil 2.2. Güneş panellerinin destek kolonları ile veya tek başına olması durumlarında hız vektörleri [7]

2014 yılındaki çalışmalarında bir önceki çalışmadan farklı olarak, rüzgârın hücum açısını 0° ile 180° arasında 45° artışlarla değişken olarak tanımlayıp, 26 m/s rüzgâr hızı için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca sayısal analizler sonucunda elde edilen basınç katsayısı değerleri deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Analizler sonucunda maksimum kaldırma katsayısının 180° 'deki rüzgâr yönünde olduğu, maksimum devrilme momentlerinin ise 45° ile 135° 'deki rüzgâr yönlerinde olduğu belirtilmiştir [8].

2016 yılındaki çalışmalarında ise tek sıra halindeki fotovoltaik sistemler yerine arka arkaya sıralı haldeki fotovoltaik sistemlerin üzerlerindeki rüzgâr yüklerini incelemişlerdir. Analiz sonucunda 0° ve 180° rüzgâr hücum açılarında arka sıralardaki sistemlerin, ilk sıradaki sisteme gelen rüzgârın oluşturduğu girdaplar altında kaldığı belirtilmiştir. 45° ve 135° rüzgâr yönlerinde ise tüm sıralardaki panellerin rüzgâr yönündeki kenarında köşe girdapları oluştuğu belirtilmiştir. Ayrıca tüm rüzgâr hücum açısı konfigürasyonlarında maksimum aerodinamik kuvvetlerinin ilk sıradaki sistemde oluştuğu belirtilmiştir [9].

Yemenici ve Aksoy (2018), farklı eğim açılarının rüzgâr yüküne etkilerini incelemek amacıyla HAD metodolojisini kullanarak sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Güneş panelleri üzerindeki akışın simülasyonu için 3 boyutlu, sürekli ve sıkıştırılmaz akışı seçmişlerdir. Sonlu hacimler metodu ve $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak temel akış denklemlerini çözmüşlerdir. Çalışmalarında, güneş paneli üzerindeki basıncın eğim açısı ile arttığını belirlemişlerdir [10].

Yemenici ve Aksoy'un yapmış olduğu araştırmanın bir benzeri Irtaza ve Agarwal (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Diğer çalışmadan farklı olarak sayısal analizler, sürekli olmayan normalize edilmiş grup (RNG) türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir [11].

HAD yaklaşımı ile güneş panellerine etki eden aerodinamik kuvvetlerin belirlenmesinin yanı sıra SEY kullanılarak güneş panellerini destekleyen metal taşıyıcı sistemlerinin bu yükler altındaki mekanik davranışları da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Lin ve diğerleri (2013) çalışmalarında, 2 kW'lık tek eksenli güneş takip sisteminin kendi ağırlığının ve rüzgâr yükünün yapı üzerinde oluşturduğu deplasmanları ve bu deplasmanların sonucunda oluşan güneş ışınlarındaki sapmaları SEY kullanarak

incelemişlerdir. HAD yaklaşımı ile rüzgâr yüklerini belirlemek amacıyla $k-\epsilon$ türbülans sayısal modelini kullanmışlardır. Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve güneş panellerinin eğim açısı değişken olarak dikkate alınmış ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca takip sisteminin kendi ağırlığından kaynaklı gerinim değişimleri deneysel olarak elde edilip, sonlu elemanlar modeliyle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır ve kullanılan metotların doğruluğu gösterilmiştir [12].

Li ve diğerleri (2015) ise çalışmalarında, yağ tankeri gemisinin güvertesinde sabit açılı güneş enerjisi santrali kurarak geminin enerji ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Bu amaçla güneş enerjisi konstrüksiyonun üzerine etki eden rüzgâr ve dalga yükünün, sistemdeki deplasmanlara ve mukavemete etkilerini yapısal analiz ile incelemişlerdir. HAD modeli ile üç farklı rüzgâr hızı için akış analizi yapılmış ve bir panel üzerindeki basınç dağılımları elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile yapılan yapısal analiz sonucunda kullanılan güneş panellerinin ve taşıyıcı metallerin mukavemet açısından dayanıklı olduğu belirlenmiştir [13].

Khelifi ve Ferroudji (2016) çift eksenli güneş takip sisteminin, kendi ağırlığı ve 36 m/s'deki kritik rüzgâr yükü altındaki yapısal gerilim ve yorulma analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yorulma ömrü, hasar dağılımları ve gerilim değerleri SEA ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre güneş takip sisteminin, statik mukavemet açısından tasarım gereksinimlerini karşıladığı ve hesaplanan yorulma ömrü içerisinde güvenli bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir [14].

Reina ve Stefano (2017) RANS denklemlerini ve sonlu hacme dayalı sayısal yöntemlerini kullanarak, güneş takip sistemi üzerindeki rüzgâr yüklerini hesaplamışlardır. 3 boyutlu tam model ve periyodik sınır koşullarına sahip indirgenmiş model olmak üzere iki farklı yaklaşım göz önüne alınarak güneş panelleri etrafındaki türbülans akışın simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Güneş takip sistemi sürekli dönme hareketi yaptığından akış simülasyonları sırasında diğer çalışmalardan farklı olarak, dinamik ağ tekniğini kullanmışlardır. Böylece statik hesaplamalar için gerekli olan hesaplama kaynaklarında daha fazla tasarruf edilmesini sağlamışlardır [15].

3. TEMEL KAVRAMLAR VE PROTOTİP MODEL

3.1. Güneş Enerjisi Santralleri Hakkında Genel Bilgiler

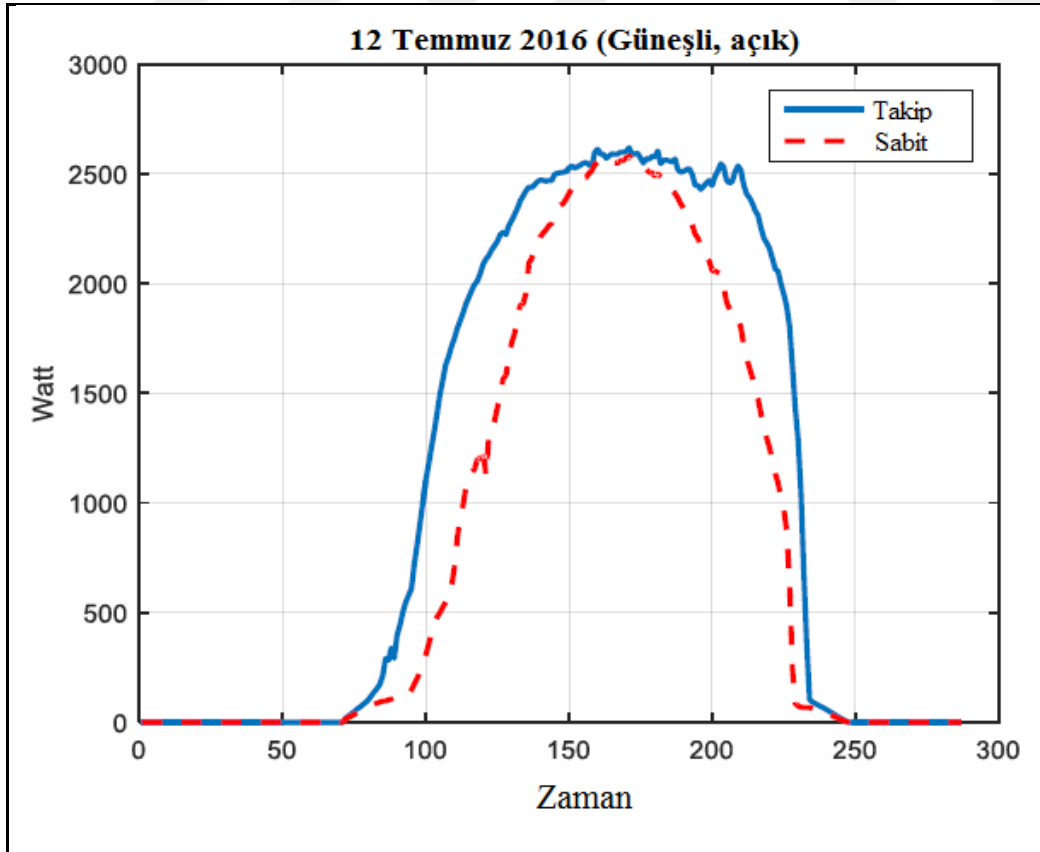
Güneş enerjisi santralleri güneşten gelen sonsuz enerjiyi güneş panellerinin ve bileşenlerinin kurulumu ile elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Güneş enerjisi santralleri temel olarak güneş panelleri, evirici ve taşıyıcı sistem ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Güneş enerjisinden gelen ışınlar, güneş panellerinin yüzeyine çarpar ve güneş pilleri doğru akım elektrik üretilmesini sağlar. Güneş panellerinin ürettiği doğru akım elektriği evirici sayesinde şebeke elektriğine dönüştürülür. Bu sayede günlük hayatta kullandığımız birçok cihazı güneş enerjisi ile kullanabiliriz. Taşıyıcı sistemler ise güneş panellerini destekleyen ve montaj aparatlarından oluşan destek yapılarıdır.

Türkiye'nin iklim şartlarının oldukça elverişli olması ve diğer enerji yatırımlarına oranla güneş enerjisi santrallerinin fiyat avantajının bulunması, güneş enerjisi yatırımlarına olan ilgiyi gün geçtikçe artırmaktadır. Kurulacağı konuma göre güneş enerjisi santralleri çatı veya zemin üstüne kurulu sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Çatı üzeri güneş enerjisi santralleri, kullanılmayan alanları değerlendirerek firmalara veya konutlara avantajlı kullanım alanları sunmaktadır. Fabrika, endüstriyel alanlar ve soğuk hava depolarının çatıları güneş enerjisi sistemlerinin kurulum alanları olarak işletmeler tarafından tercih edilmektedir. Ayrıca evlerin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla da çatı tipi güneş enerjisi santralleri tercih edilebilmektedir.

Zemin üstüne kurulu sistemler ise sabit ve hareketli sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır ve açık arazi ortamlarında karşımıza çıkmaktadır. Sabit sistemli güneş santrallerinin, güneş takip sistemlerine göre daha basit bir kurulumu olmaktadır ve bu sistemler daha az malzeme ihtiyacı ile arazi ortamına kurulabilmektedir. Bunun yanı sıra sabit sistemlerde elektrik üretimi için kullanılan güneş panelleri güney yönüne doğru sabit bir açı ile yerleştirildiği için gün içinde güneş açıları meydana gelen değişiklikleri takip edememektedir. Bu durum güneş panellerinin ortalama verimle çalışmasına ve santral gelirinin azalmasına sebep olmaktadır. Örneğin, ev çatılarında sıklıkla rastlanan ve suyu ısıtmak için kullanılan sabit sistem güneş panellerinden sadece öğlen saatlerinde, güneş ışınlarının panele dik düştüğü zamanlarda efektif olarak yararlanabilmektedir. Diğer

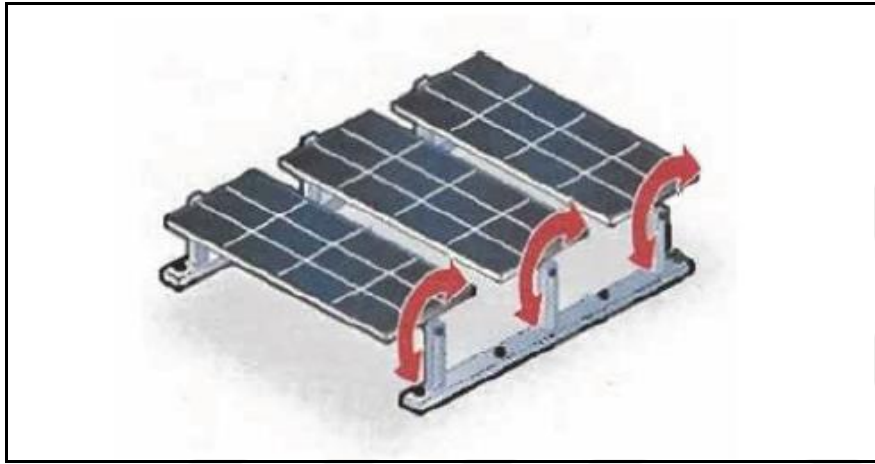
zamanlarda ise güneş ışınlarının güneş panellerine geliş açısı büyüdüğü için elde edilen performans daha düşüktür.

Güneş enerjisi santrallerinde, güneş ışınları güneş panellerine ne kadar dik gelirse üretilen enerji de o kadar yüksek olmaktadır. Güneş enerjisinden azami düzeyde yararlanmak için güneşin gün boyunca izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla güneşin gün ve yıl içindeki hareketlerini takip eden ve sürekli güneş panellerini güneşe dik olacak şekilde konumlandıran güneş takipli altyapı sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerin ilk yatırım maliyetleri sabit altyapılı sistemlere oranla daha yüksek olabilmektedir fakat yıllık enerji üretiminin artırılmasında önemli bir rol oynadığı birçok araştırmacı tarafından ortaya çıkarılmıştır. T. Filik ve Ü. Filik (2017) çalışmalarında, Eskişehir bölgesinde, sabit ve takip sistemlerinin enerji verim analizlerini kıyaslamışlardır. Güneş takip sistemlerinin ürettiği enerji oranının sabit açılı sistemlere göre her zaman yüksek olduğunu, ancak enerji oranı artışının hava koşullarına göre (güneşli veya bulutlu zamanlar) değiştiğini göstermişlerdir (Şekil 3.1). Ayrıca güneş takip sisteminin, aynı kapasitedeki sabit sisteme göre yaklaşık %33 daha yüksek enerji üretimi sağladığı belirlenmiştir [16].

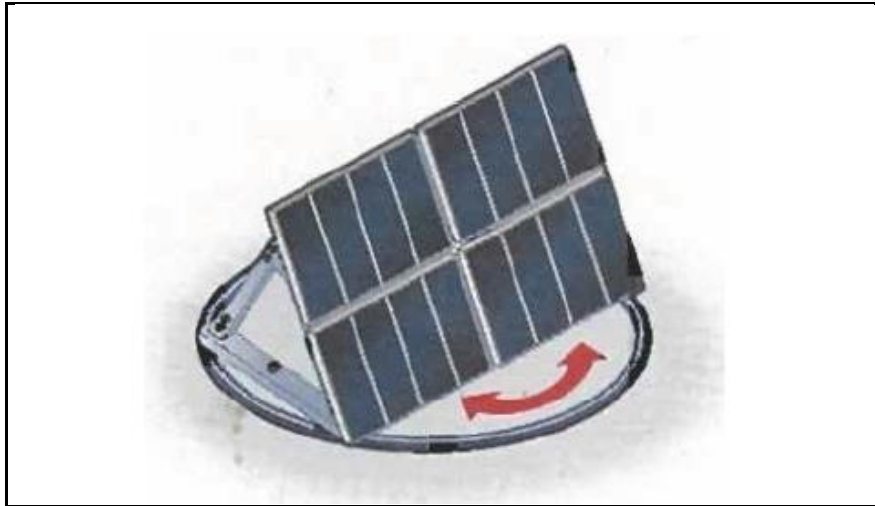


Şekil 3.1. Takip ve sabit sistem enerji üretimi karşılaştırılması [16]

Güneş takip sistemleri takip eksenine göre tek ve çift eksenli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek eksenli güneş takip sistemleri güneş panellerinin sadece tek eksende hareket ettiği sistemlerdir. Yatay ve dikey tek eksenli güneş takip sistemleri olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır. Yatay tek eksenli güneş takip sisteminde eksen doğu-batı hattı üzerinde olup güneş panelleri kuzey-güney doğrultusunda hareket etmektedir (Şekil 3.2). Dikey tek eksenli güneş takip sisteminde ise eksen kuzey-güney hattı üzerinde olup güneş panelleri doğu-batı doğrultusunda hareket etmektedir (Şekil 3.3).



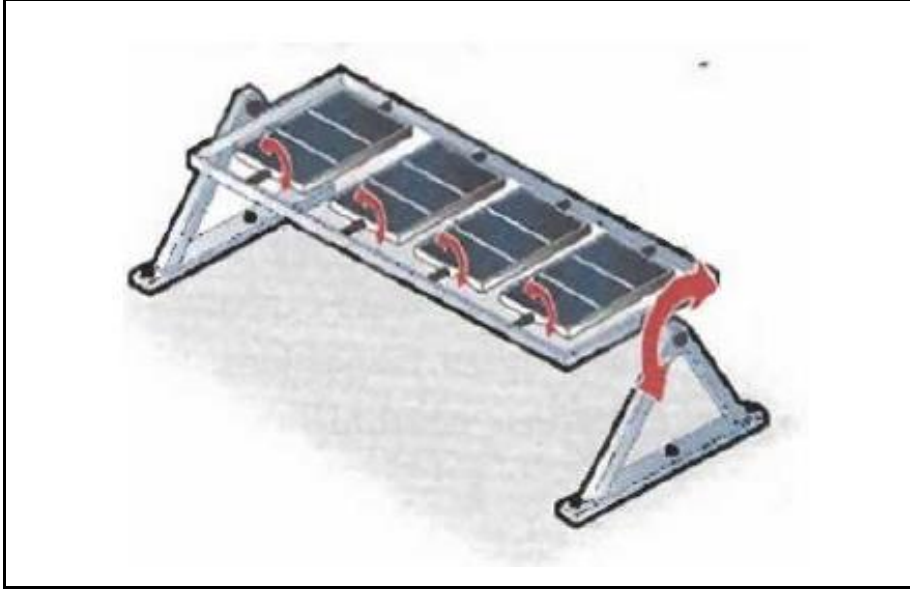
Şekil 3.2. Yatay tek eksenli güneş takip sistemi [17]



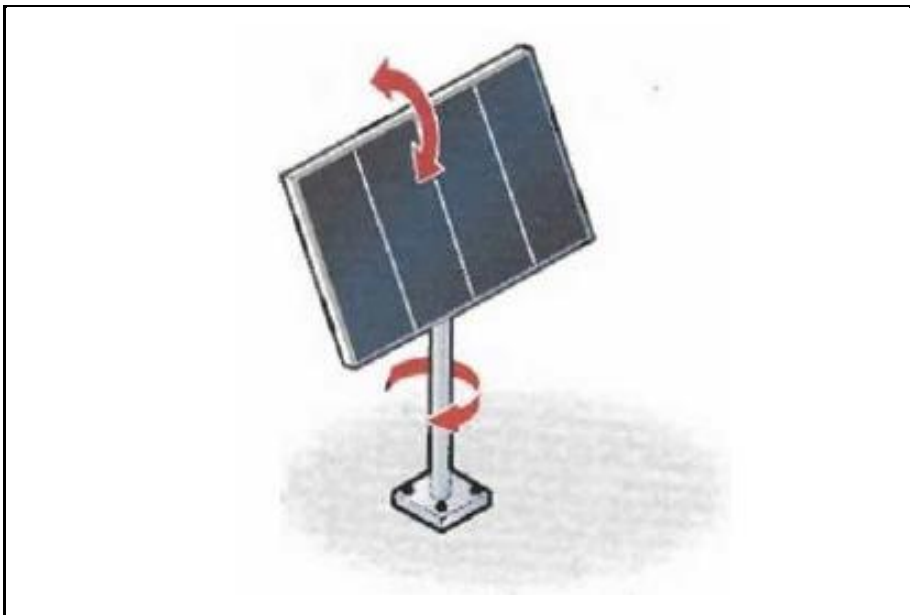
Şekil 3.3. Dikey tek eksenli güneş takip sistemi [17]

Çift eksenli güneş takip sistemleri güneş panellerinin iki eksende hareket ettiği sistemlerdir. Bu sistemlerde güneşin konumunu belirleyen iki açı değeri ile takip işlemi gerçekleştirilir. Bu açılar azimuth ve zenith olarak geçmektedir. Dolayısıyla bu sistemlerdeki eksenler azimuth ve zenith eksenleri olarak adlandırılmaktadır. Azimuth eksenini güneş panellerinin

doğu-batı hattındaki hareketinin, zenith eksenini ise güneş panellerinin yüksekliğinin ayarlandığı eksenlerdir. Bu sistemler, yatay ve dikey birincil çift eksenli güneş takip sistemleri olmak üzere temelde ikiye ayrılmaktadır ve birincil eksenin zemine göre dönme hareketi ile sınıflandırılmaktadır. Yatay birincil çift eksenli güneş takip sisteminde birincil eksen zemine yatay ve ikincil eksen ise birincil eksene diktir (Şekil 3.4). Dikey birincil çift eksenli güneş takip sisteminde birincil eksen zemine dik ve ikincil eksen ise birincil eksene diktir (Şekil 3.5).



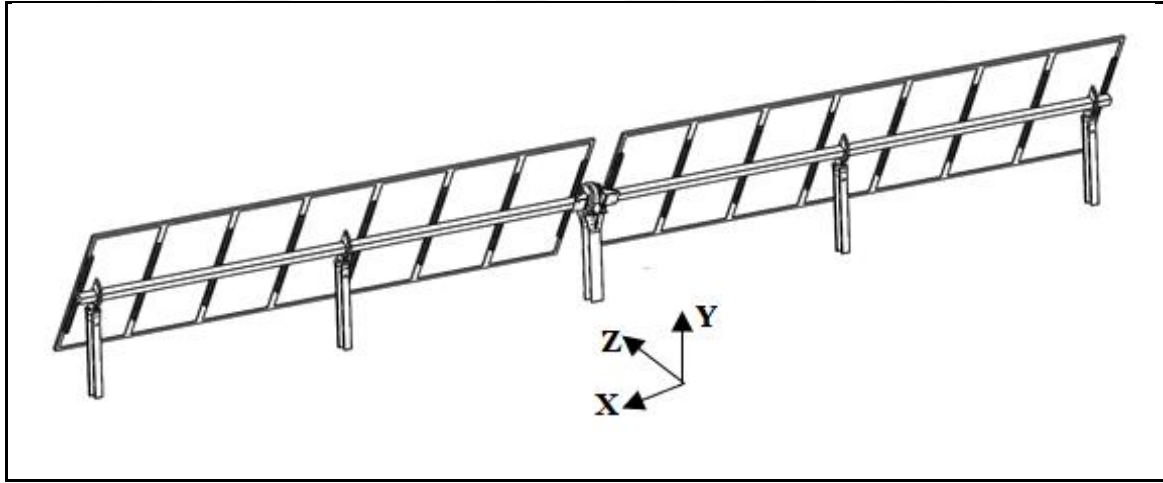
Şekil 3.4. Yatay birincil çift eksenli güneş takip sistemi [17]



Şekil 3.5. Dikey birincil çift eksenli güneş takip sistemi [17]

3.2. Güneş Takip Sistemi Model Geometrisi

Tasarlanan tek eksenli güneş takip sistemi gerçekte tek sıra halinde 72 panel diziliminden oluşmaktadır. Gerçek boyutlardaki güneş takip sisteminin sayısal analizinin gerçekleştirilebilmesi için çok fazla sayıda ağ eleman sayısına ihtiyaç vardır. Bu durum çözüm süresini uzatmaktadır ve çözüm esnasında veri depolama boyutu arttığı için daha yüksek bellekte bilgisayar kullanma ihtiyacı doğurmuştur. Bu yüzden mevcut çalışmada prototip model kullanılmıştır. Güneş takip sisteminin prototip modeli çalışmakta olduğum Başarıerge Enerji Teknolojileri A.Ş. firması bünyesinde, Solidworks paket programı ile oluşturulmuştur ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Prototip modelin genel görünümü

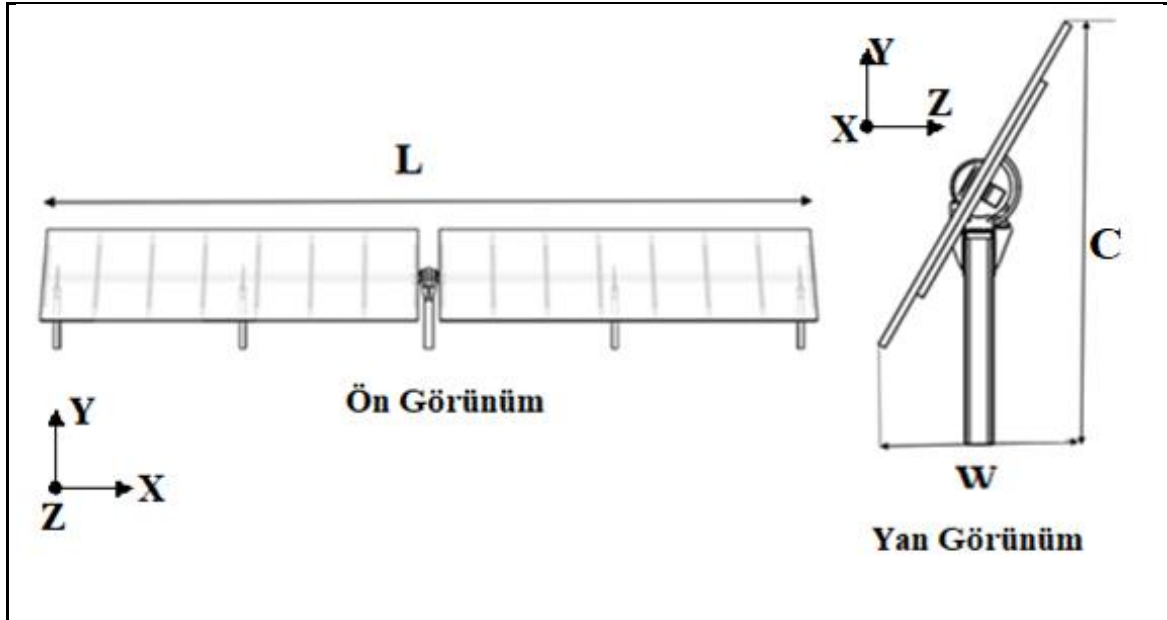
Prototip modeli oluşturulan tek eksenli güneş takip sistemi, en genel haliyle güneş panellerini tutan çelik aşıklardan, çelik aşıkları tutan çelik kirişlerden ve sistemin temelle bağlantısını sağlayan taşıyıcı kolonlardan oluşmaktadır. Çelik aşıklar için 36x40x22 mm kesit ölçülerinde ve 1,5 mm kalınlığında w profil, çelik kirişler için 100x100 mm kesit ölçülerinde ve 3 mm kalınlığında kare profil, çelik kolonlar için 140x100x20 mm kesit ölçülerinde ve 3 mm kalınlığında c profil kullanılmıştır. Prototip model tek sıra halinde toplamda 14 panel dizilimine sahiptir ve güneş panelleri 1987x992x35 mm boyutlarındadır. Güneş panelleri 3,45 m aralıklarla yerleştirilmiş olan 5 adet kolonla desteklenmiştir.

Açık arazide zemine monte olarak kurulmak üzere tasarlanmış olan yatay tek eksenli güneş takip sistemi, güneş ışınları gün boyunca güneş panellerine dik düşecek şekilde yatayda (x eksenine göre) $\pm 60^\circ$ dönme hareketi yapmaktadır. Takip sisteminin bu dönme hareketini

gerçekleştirmek için gerekli olan moment slew-drive motoru ile sağlanmaktadır. Motorun oluşturduğu momentin sisteme iletilmesi motor bağlantı parçası ve çelik kirişler ile sağlanmıştır. Güneş takip sisteminin dönme hareketi ise rulman yatağı üzerinde hareket edebilen rulman takımı parçaları ile sağlanmıştır. Rulman takımı parçası özel profil ölçülerine sahip olup 5 mm kalınlığındadır. Motor bağlantı ve rulman takımı parçalarının kolonlarla olan bağlantısı, bağlantı braketleri ile sağlanmıştır.

Sayısal çalışmalarda kullanılacak olan model geometri YZ düzlemine göre simetriktir. Parametrik çalışma esnasında çok fazla sayıda ağ eleman sayısından kaçınarak çözüm süresini azaltabilmek ve çözüm esnasında veri depolama boyutunu azaltabilmek için model geometrinin simetrik özelliğinden yararlanılmıştır. Bu yüzden sayısal analizler esnasında model geometri simetrik olarak çözdürülmüştür.

Prototip modelin toplam eni (L) 14,28 m'dir. Toplam yüksekliği (C) ve toplam boyu (W) ise güneş panellerinin eğim açısına ve kolonların zeminden olan yüksekliğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Güneş takip sisteminin toplam boyutları temsili olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Prototip modelin genel boyutları

Şekil 3.7'deki W ve C parametrelerinin farklı değişkenler için değerleri ise Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Farklı konfigürasyonlar için W ve C parametrelerin değerleri

Panel Eğim Açısı (°)	Kolon Yüksekliği (m)	W (m)	C (m)
15	1,1	1,93	1,673
15	1,3	1,93	1,873
30	1,1	1,74	1,908
30	1,3	1,74	2,108
45	1,1	1,434	2,1
45	1,3	1,434	2,3
60	1,1	1,028	2,25
60	1,3	1,028	2,45

Prototip modelde kullanılan parçaların malzeme bilgileri ise Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Prototip modelde kullanılan parçaların malzemeleri

Parça İsmi	Malzeme
Güneş Paneli Çerçevesi	Alüminyum 6063-T6
Güneş paneli hücresi	Cam
Aşık	St-52
Taşıyıcı kolon	St-52
Motor	Dökme demir
Bağlantı braketleri	St-37
Rulman takımı	St-52
Rulman yatağı	Delrin (POM)
Kiriş	St-52
Motor bağlantı parçası	St-52

Gerçek boyutlardaki tek eksenli güneş takip sisteminin saha uygulamasındaki görselleri Şekil 3.8 de gösterilmiştir. İlgili saha uygulaması, Konya ili Beyşehir ilçesinde 500 kW gücünde güneş enerjisi santrali kurulması üzerine gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Prototip modeli oluşturulan güneş takip sisteminin saha görünümüleri

4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN HAD YAKLAŞIMI

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği, akışkan, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi uzun süreler isteyen problemlerin, kütle, momentum ve enerji korunumu olmak üzere 3 temel korunum yasalarını kullanarak ve bilgisayar ortamında matrisler oluşturularak çözümlenmesidir. Kütle korunum denklemi, giren kütlenin çıkan kütleye eşit olmasıdır. Akışkanlar için giren debinin çıkan debiye eşit olmasıdır. Momentum korunumu Newton'un ikinci yasasını esas almaktadır. Newton'un ikinci kanununda, momentum değişim oranının uygulanan kuvvetle doğrudan orantılı olduğu ve momentumdaki değişikliğin uygulanan kuvvet yönünde gerçekleştiği belirtilmiştir. Enerji korunumu ise termodinamiğin birinci kanununu esas almaktadır ve en basit haliyle giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması durumudur. Sistemde enerji girişi ve çıkışı olmaması durumunda enerji korunum denklemi kullanılmayabilir.

Bu korunum denklemleri, HAD yazılımı olan Ansys Fluent paket programında integral formda kullanılmaktadır ve sonlu hacimler metodu yöntemi ile çözümlenmektedir. Sonlu hacimler metodu, bütün geometriyi küçük hücrelere ayırarak korunum denklemlerini hesaplama yöntemidir. Fluent yazılımı ile akış analizi ön işlem (preprocessing), çözüm (solving) ve son işlem (postprocessing) olmak üzere 3 adımda gerçekleştirilmektedir.

Ön işlem adımı, kullanıcı dostu bir arayüz sayesinde akış problemini oluşturan girdi datalarının Fluent programına girilmesi ve bu girdilerin çözücü tarafından kullanılması için uygun bir forma dönüştürülmesinden oluşmaktadır. Kullanıcı tarafından belirlenecek olan girdi dataları aşağıdaki gibidir [18];

- Çözüm yapılması istenen akış geometrisinin ve alanının oluşturulması
- Akış alanının ağ ile küçük elemanlara ayrılması
- Akışkan özelliklerinin tanımlanması
- Akış tipi ve modelinin belirlenmesi
- Sınır şartlarının belirlenmesi

Çözüm adımında, sayısal çözüm yöntemi olarak sonlu hacimler metodu kullanılmaktadır ve temelde aşağıdaki işlemler gerçekleşmektedir [18];

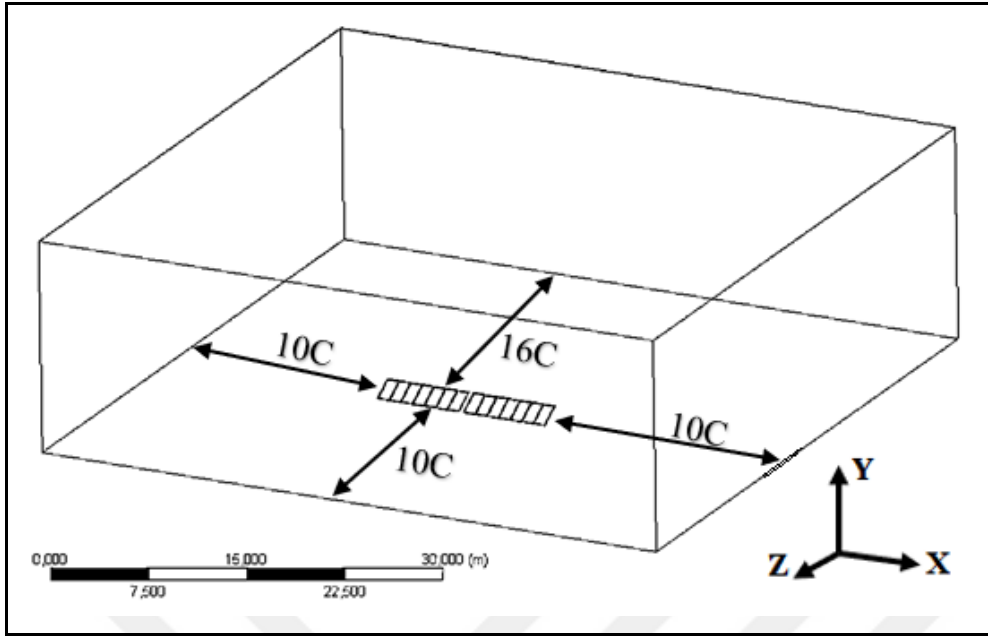
- Akış alanının tüm kontrol hacim üzerindeki akış denklemlerinin entegrasyonu
- Elde edilen integral denklemlerin bir cebirsel denklem sistemine dönüştürülmesi
- Cebirsel denklemlerin yinelemeli bir yöntemle çözümü

Son işlem adımı ise çözümde elde edilen sonuçların grafiksel ya da sayısal olarak değerlendirilmesinden oluşmaktadır.

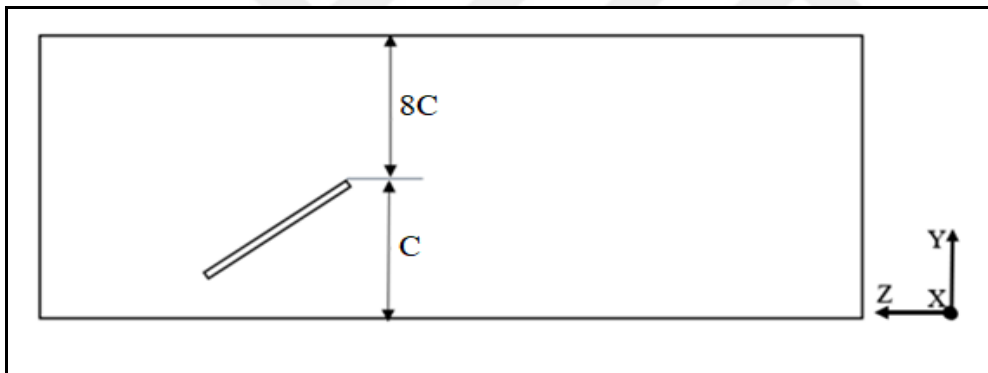
4.1. Geometri

Hava akışının güneş takip sistemi ile etkileşimi esnasında, hava en çok güneş panelleri ile temas halindedir ve yüzey temas alanını çoğunlukla güneş panellerinin yüzeyi oluşturmaktadır. Bu yüzden akış geometrisi oluşturulurken güneş takip sisteminin tüm bileşenleri yerine güneş panelleri düşünülerek geometride basitleştirilmeye gidilmiştir. Diğer geometri basitleştirilmesi ise Wu ve diğerlerinin (2010) yapmış olduğu çalışmadan yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Wu çalışmasında, güneş panelleri boşluk mesafesi ile güneş panellerinin en büyük boyutu arasındaki oranın %8,9'dan aşağı olması durumunda bu boşlukların rüzgâr yüklerine etkisinin göz ardı edilebilir olduğunu göstermiştir [19]. Mevcut çalışmadaki güneş panelleri arasındaki yatay boşluk mesafeleri (20 mm), güneş panellerinin toplam mesafesine (14,286 m) göre oldukça düşük olduğu için akış geometrisinin oluşturulmasında ihmal edilmiştir. Ayrıca güneş panelleri arasındaki boşlukların dikkate alınması durumunda boşluklardaki ağ kalitesinin çok hassas olması gerekir. Bu durum ağ eleman sayısında oldukça fazla artışa sebep olmaktadır ve analiz süresini oldukça fazla artırmaktadır.

Güneş panelleri etrafındaki havanın akışı için yeterli miktarda alan sağlayabilmek amacıyla akış alanı oluşturulmalıdır. Akış alanı boyutlarının oluşturulmasında Franke ve diğerlerinin (2007) yapmış olduğu çalışma takip edilmiştir [20]. Akış alanı üst yüzeyi ile güneş takip sisteminin tepe noktası arasındaki mesafe 8C, güneş panellerinin yan yüzeyleri ile akış alanı yan yüzeyleri arasındaki mesafe ise 10C olarak tanımlanmıştır. Ayrıca hava akışının giriş yaptığı akış alanı giriş yüzeyi ile güneş panellerinin ön kenarı arasındaki mesafe 10C ve çıkış yaptığı akış alanı çıkış yüzeyi ile güneş panellerinin arka kenarı arasındaki mesafe ise 16C alınmıştır (Şekil 4.1). Burada C değeri güneş takip sisteminin en üst noktasından zemine olan mesafe olarak tanımlanmıştır ve güneş panellerinin eğim açısı ile kolonların zeminden olan yüksekliklerine göre değişkenlik göstermektedir (Bkz. Şekil 3.7. ve Çizelge 3.1).



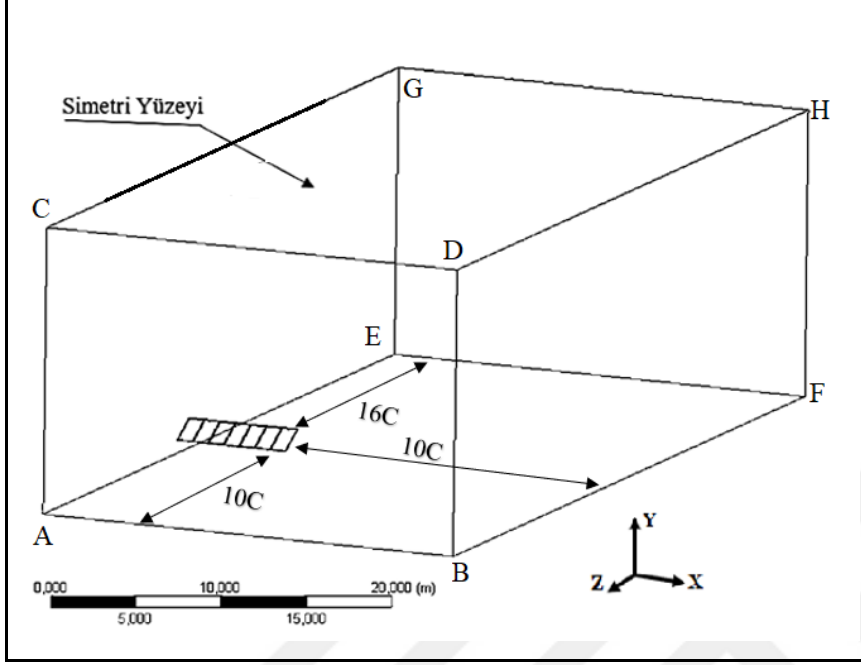
Şekil 4.1. a. Akış alanı modeli: tam model, izometri görünüm



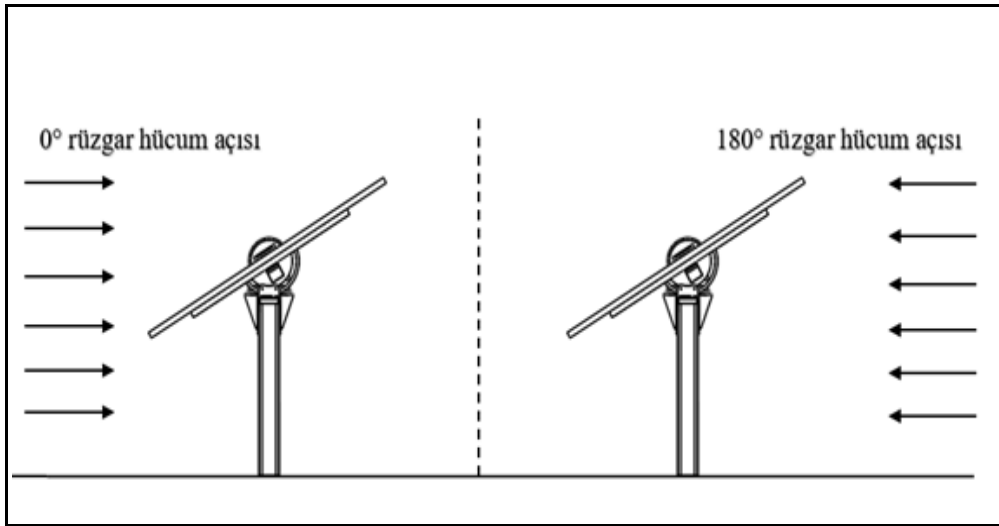
Şekil 4.1. b. Akış alanı modeli: tam model, yan görünüm

Sayısal analizler simetrik çözdürüldüğü için akış alanı geometrisi simetrik olarak oluşturulmuştur. Sayısal çalışmalarda kullanılan akış alanının örnek bir simetrik modeli ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen akış alanı modelinde üst (CDHG yüzeyi) ve yan (ACGE ve BFDH yüzeyleri) sınırlar simetri olarak tanımlanmıştır. Böylece, bu sınırların yakınındaki akış alanı genişletilmiş ve ağ iyileştirme ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Güneş panellerinin yüzeyleri kaymama koşulu ve pürüzsüz duvar (no-slip smooth wall) olarak belirlenmiştir. Akış alanı alt yüzeyi (ABEF yüzeyi) atmosferik ortamdaki zemini temsil ettiği için kaymama koşulu ve pürüzlü duvar (no-slip roughness wall) olarak modellenmiştir. Hava akışının giriş yaptığı sınır yüzeyi hız girişi ve çıkış yaptığı sınır yüzeyi ise basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Hız giriş ve basınç çıkış sınır yüzeyleri rüzgârın hücum açısına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin, Şekil 4.3’te gösterilen rüzgâr

hücum açılarından 0° için giriş sınır yüzeyi ABCD yüzeyi ve çıkış sınır yüzeyi ise EFGH yüzeyi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.2. Akış alanı modeli: simetrik model

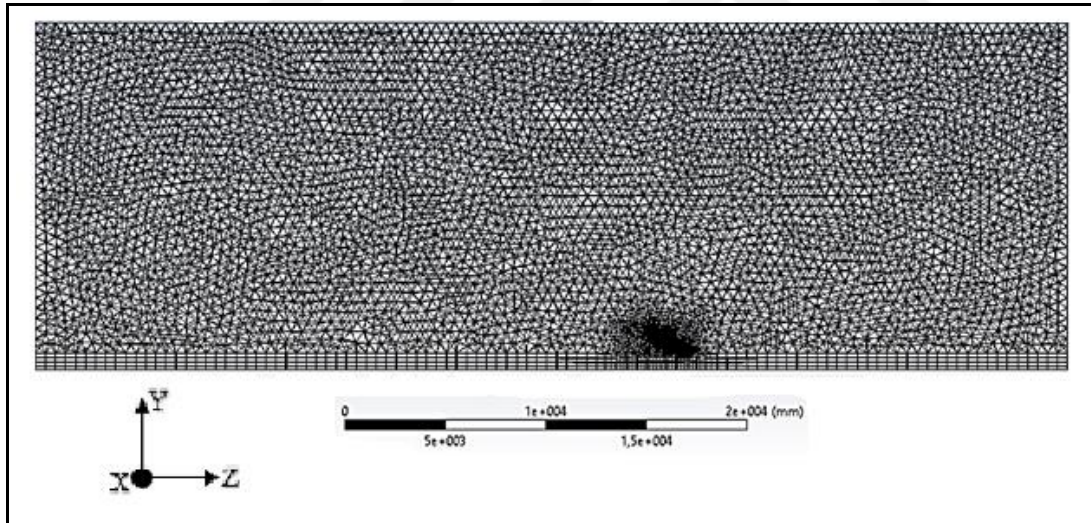


Şekil 4.3. Rüzgâr hücum açıları

4.2. Ağ

HAD çözümünde en önemli adımlardan birisi hesaplama bölgesindeki hız, basınç ve sıcaklık gibi akış değişkenlerinin hesaplanacağı hücreleri tanımlayacak bir ağ oluşturmaktır. Günümüzde kullanılan HAD yazılımları ise kendi ağ oluşturma yazılımlarına sahiptir. Bu

tezde, oluşturulan geometrinin ağ ile kaplanmasında Ansys Fluent paket programı içindeki ağ (mesh) modülünden yararlanılmıştır. Hava alanına yerleştirilmiş olan güneş panellerinin yakın bölgelerinde daha hassas çözüm ağı oluşturmak amacıyla güneş panellerini kapsayacak boyutlarda bir ağ alanı oluşturulmuştur. Bu ağ alanı nesne boyutlandırma (body sizing) ve etki gövdesi (body of influence) yöntemi kullanılarak tetrahedral elemanlar ile ağlanmış ve tanımlanan boyutlandırma fonksiyonunda 1,2 artım hızı (growth rate) baz alınmıştır. Ayrıca hava alanı boşluğunu oluşturan güneş panellerinde yüzey ve kenar boyutlandırma ile ağ iyileştirilmesi yapılmıştır. Duvar sınır koşulu olarak tanımlanmış bölgelerin yakınındaki havanın akışını doğru yakalayabilmek için akış alanı alt yüzeyi ve güneş panelleri yüzeylerinde inflation ağ yöntemi ile yüksek çözünürlükte ve hexahedral elemanlar ile oldukça yoğun bir ağ oluşturulmuştur. Inflation yöntemi duvar sınır yüzeylerinde hareketsiz bir hava yakalamak amacıyla katmanlar oluşturarak hassas ağ oluşturma yöntemidir. Sayısal çalışmalarda kullanılan örnek bir hücre yapısı Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Akış alanı geometrisinin ağ ile kaplanmış hali

Parametrik çalışmalar için kullanılan çözüm ağı eleman sayısı 3,9 ile 4,1 milyon arasında değişmektedir ve bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde maksimum çarpıklık faktörü yaklaşık 0,77 olarak görülmüştür. Ayrıca ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için kaba, orta ve hassas olmak üzere 3 farklı ağ iyileştirme seviyesi ile güneş panelleri üzerinde oluşan basınç değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farkın ihmal edilebilecek kadar az olduğu gözlemlenmiştir.

4.3. Akış Modeli

Akış modelini belirlemek için ilk olarak akış tipine karar vermek gerekir. Laminar ve türbülans olmak üzere 2 temel akış tipi mevcuttur. Laminar akış tipi çok düzenli akışkan hareketlerini temsil etmektedir ve çalkantısız akışkan tabakaları ile ifade edilmektedir. Türbülans akış tipi ise çok düzensiz akışkan hareketlerini temsil etmektedir ve genellikle yüksek hızlarda oluşan hız çalkantıları ile nitelendirilmektedir. Akış tipine karar verebilmek için öncelikli olarak Reynolds sayısına bakılmalıdır. Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranının bir ölçüsüdür. Düşük Reynolds sayılarında ($R_e \leq 2300$) akış laminar olarak adlandırılmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında ($R_e \geq 4000$) ise akışın tipi türbülans olarak adlandırılmaktadır. Reynolds sayısı boyutsuz bir parametre olup aşağıdaki gibi bulunmaktadır;

$$R_e = \frac{V_{ref}\rho C_K}{\mu} \quad (4.1)$$

Burada, V_{ref} serbest akım hızını (m/s), ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), μ dinamik viskoziteyi (Pa.s) ve C_K kord uzunluğunu (m) belirtir. Güneş panellerinin boyu kord uzunluğu olarak tanımlanmıştır ve 1,987 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca, parametrik analizler esnasında akışkan olarak hava seçildiği için $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ve $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ seçilmiştir. Parametrik çalışmalarda ele alınan 15 m/s ve 18 m/s rüzgâr hızlarındaki akışlar için sırasıyla $2,04 \times 10^6$ ve $2,45 \times 10^6$ Reynolds sayıları elde edilmiştir. Bu yüzden akış tipi için türbülans akış koşulları ele alınmıştır.

Ansys Fluent, tüm akış problemlerinde Navier-Stokes olarak adlandırılan kütle ve momentum korunum denklemlerini kullanmaktadır. Kütle korunumu denklemi vektör formda en genel haliyle aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [21];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.2)$$

Eşitliğin solundaki birinci terim yoğunluğun zaman içindeki değişim hızını, ikinci terim akışkan elemanın sınırlarından çıkan kütle net akışını ve S_m kaynak terimi ifade etmektedir. Momentum korunumu denklemi ise vektör formda en genel haliyle aşağıdaki

gibi tanımlanmaktadır [21];

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.3)$$

Burada p statik basıncı, $\overline{\tau}$ gerilme tensörünü, $\rho \vec{g}$ ve \vec{F} yerçekimi ve dış kuvvetleri ifade etmektedir. Gerilme tensörü

$$\overline{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir [21]. Burada μ dinamik viskoziteyi, I birim tensörü ve sağ taraftaki ikinci terim hacim genişlemesinin etkisini göstermektedir.

Türbülanslı akışlarda ise Navier-Stokes denklemlerinde kullanılan çözüm değişkenleri ortalama ve çalkantı olarak ayrışmaktadır. Örneğin hız bileşenleri için [21];

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (i = 1,2,3) \quad (4.5)$$

olarak yazılabilir. Burada \bar{u}_i ortalama hız bileşenlerini ve u'_i ise bu doğrultulardaki çalkantı hız bileşenlerini göstermektedir. Bu formdaki akış bileşenleri Eş. 4.2 ve Eş. 4.3'te yerine konular ve zaman ortalaması alınırsa ortalama kütle ve momentum korunum denklemleri elde edilir. Kartezyen tensör formunda aşağıdaki gibi yazılmaktadır [21];

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4.7)$$

Eş. 4.6 ve Eş. 4.7 RANS denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Navier-Stokes denklemleri ile aynı formda olup türbülans etkilerini gösteren $\overline{\rho u'_i u'_j}$ terimi ek olarak ortaya çıkmıştır. Bu terim Reynolds gerilimi olarak adlandırılmaktadır ve akışın ortalama özellikleri ile ifade edilmesi için türbülans modelleri geliştirilmiştir.

Endüstriyel alanlarda Spalart-Allmaras türbülans modeli gibi tek denklemlilik ve $k-\omega$, $k-\varepsilon$ modelleri gibi iki denklemlilik türbülans modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bu türbülans modelleri aktarım denklemlilik ile ifade edilmektedir. İki denklemlilik türbülans modellerinden $k-\omega$ modeli, $k-\varepsilon$ modeli gibi karmaşık lineer olmayan sönümlilik fonksiyonları içermez. Bu yüzden sayısal analizlerde daha doğru ve sağlıklı sonuç oluşturmaktadır. $k-\omega$ tabanlı olan SST $k-\omega$ modeli ise ters basınç farkları altında ayrılan akış durumlarında çok doğru tahminler verir [21].

Türbülanslı akış koşulları için ortalamalı akış özelliklerini simüle etmek amacıyla SST $k-\omega$ modeli seçilmiştir. Bu türbülans modelin kullanımı ile ilgili detaylı incelemeler Menter (1994) tarafından yapılmıştır. SST $k-\omega$ modeli, duvara yakın bölgede $k-\omega$ ve bölgenin dışında kalan kısımlarda ise $k-\varepsilon$ modellerinin birleşimidir. Burada k türbülans kinetik enerjisi olarak adlandırılır ve girdaplardan oluşmaktadır. Yani akış alanında ne kadar fazla girdap oluşursa o kadar fazla türbülans kinetik enerji bulunur. ω ise birim zamandaki yutulma oranı olarak ifade edilir ve girdapların ne kadar hızla sönümlenmesi ile ilgilidir.

Menter tarafından oluşturulan SST $k-\omega$ modeli için aktarım denklemlilik sırasıyla aşağıdaki gibidir [22];

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4.9)$$

Burada;

ρ : yoğunluğu,

G_k : türbülans kinetik enerji üretimini,

G_ω : üretilen birim zamandaki yutulma oranını,

Γ_k : türbülans kinetik enerjinin efektif difüzyonunu,

Γ_ω : birim zamandaki yutulma oranının efektif difüzyonunu,

Y_k : türbülans nedeniyle türbülans kinetik enerjinin yutulmasını,

Y_ω : türbülans nedeniyle birim zamandaki yutulma oranının yutulmasını,

D_ω : çapraz difüzyon terimini,

S_k ve S_ω : kaynak terimi ifade eder.

SST k- ω türbülans modeli için efektif difüzyonlar aşağıdaki gibidir [22];

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4.10)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (4.11)$$

Burada, σ_k ve σ_ω sırasıyla k ve ω için türbülans Prandtl sayılarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır [22];

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (4.12)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (4.13)$$

Eş. 4.10 ve Eş. 4.11’de geçen μ_t parametresi türbülans viskozitedir ve aşağıdaki gibi hesaplanır [22];

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (4.14)$$

Burada S şekil değiştirme hız büyüklüğünü göstermektedir. F_1 ve F_2 ise karışım fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır [22];

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (4.15)$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] \quad (4.16)$$

$$D_{\omega}^{+} = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (4.17)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (4.18)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (4.19)$$

Burada, y bir sonraki yüzeye olan uzaklığı ve D_{ω}^{+} çapraz difüzyon teriminin pozitif kısmını gösterir. Eş. 4.14'te belirtilen α^* katsayısı türbülans viskozitesini azaltır ve düşük Reynolds sayısı düzeltilmesine sebep olmaktadır. Yüksek Reynolds sayılarında ise $\alpha^* = \alpha_{\infty}^* = 1$ olarak kabul edilir [22].

G_k ve G_{ω} terimleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır [22];

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.20)$$

$$G_{\omega} = \frac{\alpha_{\infty}}{\nu_t} G_k \quad (4.21)$$

Eş. 4.21'deki α_{∞} terimi

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (4.22)$$

ifadesi ile belirlenir ve $\alpha_{\infty,1}$ ile $\alpha_{\infty,2}$ aşağıdaki gibi hesaplanır [22];

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{K^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (4.23)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{K^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (4.24)$$

Burada K katsayısı 0,41'dir.

Eşitliklerde geçen çözüm parametreleri için Ansys Fluent paket programındaki varsayılan değerler alınmıştır;

$$\sigma_{k,1} = 1,176, \sigma_{k,2} = 1, \sigma_{\omega,1} = 2, \sigma_{\omega,2} = 1,168, a_1 = 0,31, \beta_{i,1} = 0,075, \beta_{i,2} = 0,0828, \beta_{\infty}^* = 0,09, \alpha_{\infty}^* = 1 \text{ ve } \alpha_{\infty} = 0,52.$$

4.4. Sınır Şartları

Sınır şartları, akış alanı tarafından sınırlandırılmış olan çevrenin etkisini temsil etmektedir ve akış alanı içindeki çözümü büyük ölçüde etkilediği için doğru seçilmeleri oldukça önemlidir [20]. Ansys Fluent paket programı türbülanslı akışlarda hız girişi, basınç çıkışı ve duvar sınırları için türbülans modül seçeneğini sunmaktadır. Açık arazi ortamlarına kurulan güneş takip sistemlerinin atmosferik sınır koşullarını sağlaması için bu türbülans modül parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

Hız girişi türbülans modülü kısmında türbülans yoğunluğu (I) ve yüzey pürüzlülük uzunluğu (y_0) yöntemi seçilmiştir. Türbülans yoğunluğu, sürekli tekrarlanan veya en büyük girdabın ortalama hız veya serbest akım hızına oranı olarak ifade edilebilir. Türbülans yoğunluğu, türbülansın düzeyine göre temelde 3 farklı kategoride sınıflandırılabilir;

1. Yüksek türbülans düzeyi: kompresör, türbin veya ısı eşanjörleri gibi karmaşık geometrilerin içindeki yüksek hızlı akışlar için geçerli olan durumdur. Tipik olarak türbülans yoğunluğu %5 ile %20 arasındadır.
2. Orta türbülans düzeyi: Büyük borular gibi çok karmaşık olmayan geometrilerin içindeki düşük hızlı akışlar için geçerli olan durumdur. Tipik olarak türbülans yoğunluğu %1 ile %5 arasındadır.
3. Düşük türbülans düzeyi: Arabalar ve uçaklar gibi atmosferik ortamda oluşan akışlar için geçerli olan durumdur. Tipik olarak türbülans yoğunluğu %1 veya daha altındadır.

Rüzgâr akışının açık arazide gerçekleşmesi ve rüzgâr şiddetinin düşük olmasından dolayı türbülans yoğunluğu %1 seçilmiştir. Yüzey pürüzlülük uzunluğu ise açık arazi için 0,03 m'dir. Ayrıca basınç çıkış türbülans modülü kısmında ise çıkış basıncı olarak atmosfer basıncı kabul edilerek ölçülen fark basınç sıfır olarak tanımlanmıştır.

Duvar sınır şartları için sunulan pürüzlülük yüksekliği (k_s) ve sabiti (C_s) türbülans parametrelerinin ise doğru belirlenmesi, denge atmosferik sınır tabaka (ABL) şartlarının sağlanarak hava akışının simülasyonunu doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek için önem arz etmektedir. Denge ABL, akış alanı içerisindeki havanın akışı esnasında, giriş yüzeyinde oluşturulan hız ve türbülans profillerinin akış yönündeki değişimlerinin engele gelesiye kadar sabit kalması olarak ifade edilir [23]. Denge ABL akış şartlarını sağlayabilmek için Blocken ve diğerleri (2007) tarafından yapılan çalışmada belirtilen 3 temel gereklilik düşünülmüştür. Bu gereklilikler sırasıyla aşağıdaki gibidir;

1. Yüksek ağ çözünürlüğü yakalayarak doğru simülasyon sonuçları elde etmek için akış alanındaki alt duvara en yakındaki ağ hücresi yüksekliğinin 1 m'den küçük olması gerekmektedir.
2. Pürüzlülük yükseklik değerinin, alt duvara en yakındaki ağ hücresinin merkez uzaklığından (y_p) küçük olması gerekmektedir ($k_s < y_p$).
3. Pürüzlülük yüksekliği ile yüzey pürüzlülük uzunluğu arasındaki ilişkinin sağlanması gerekmektedir. Bu ilişki Ansys Fluent paket programı için aşağıdaki gibi ifade edilir [23];

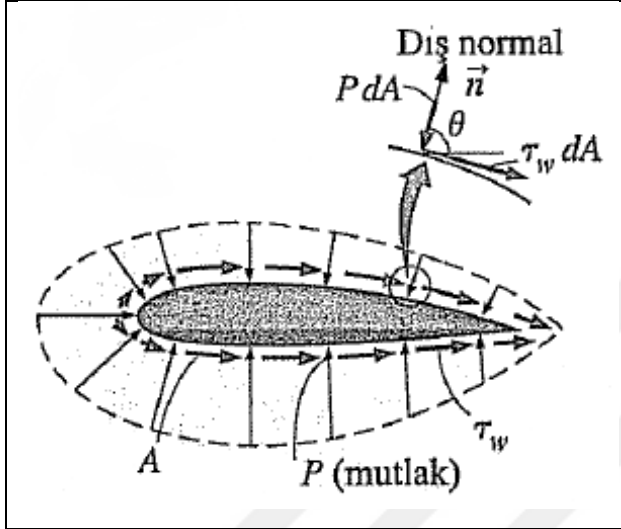
$$k_s = \frac{Ey_0}{C_s} \quad (4.25)$$

Burada E entegrasyon sabitidir ve değeri sabit olup yaklaşık 9,793'tür.

Alt duvara en yakındaki ağ hücresi yüksekliğinin 0,04 m'den küçük olması durumunda, akış alanı çıkış yüzeyinde girdapların etkisinin olduğu ve çıkan havanın bir miktarının çıkış yüzeyinden tekrar giriş yaptığı belirlenmiştir. Bu durumda, kütle korunumu sağlanamamaktadır. Yüksekliğin 0,1 m'den büyük olması durumunda ise ağ çözünürlüğü hassas bir şekilde yakalanmadığı için doğru simülasyon çözümünden uzaklaşmıştır. Bu yüzden alt duvara en yakındaki ağ hücresi yüksekliği 0,064 m olarak belirlenmiştir (Bkz. Şekil 4.4). Yükseklik değerinin belirlenmesi ile ilk gereklilik sağlanmıştır ve bu durumda y_p değeri 0,032 m alınmıştır. İkinci gerekliliğin ($k_s < y_p$) sağlanabilmesi için k_s değeri 0,031 m olarak tanımlanmıştır. Üçüncü gerekliliğin sağlanması için k_s değeri Eş. 4.25'te yerine konulmuştur ve C_s değeri 9,477 gelmiştir. Böylece sınır tabakası profili ile tutarlı olması için $k_s = 0,031$ m ve $C_s = 9,477$ olarak tanımlanmıştır.

4.5. Çözüm

Bir akışkanın kati bir cisim üzerindeki hareketi esnasında, cisim yüzeyine dik yönde basınç kuvvetleri ve cismin dış yüzeyi boyunca yüzeye paralel kayma kuvvetleri meydana gelmektedir (Şekil 4.5) [24].



Şekil 4.5. Bir cismin üzerine etki eden basınç ve kayma kuvvetleri [24]

Cisim yüzeyindeki dA diferansiyel alanına etki eden basınç ve kayma kuvvetleri sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [24];

$$d\vec{F}_{\text{kayma}} = \vec{\tau}_w dA \quad (4.26)$$

$$d\vec{F}_{\text{basınç}} = Pd\vec{A} \quad (4.27)$$

Basınç ve kayma kuvvetlerinin bileşkesi ile oluşan net kuvvetin (F_R), akış yönündeki bileşenine direnç kuvveti (F_D), akış yönüne dik yönde etki eden bileşenine kaldırma kuvveti (F_L) denmektedir. Cisim üzerindeki net kuvvet ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [24];

$$\vec{F}_R = \int_A d\vec{F}_R = \int_A d\vec{F}_{\text{kayma}} + \int_A d\vec{F}_{\text{basınç}} \quad (4.28)$$

Cisim yüzeyindeki dA diferansiyel alanına etki eden direnç ve kaldırma kuvvetleri ise sırasıyla aşağıdaki gibidir [24];

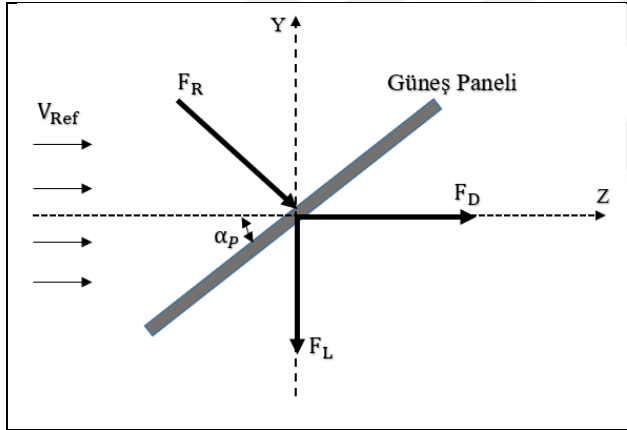
$$dF_D = -PdA\cos\theta + \tau_w dA\sin\theta \quad (4.29)$$

$$dF_L = -PdA\sin\theta - \tau_w dA\cos\theta \quad (4.30)$$

Burada θ , dA 'nın dış normalinin pozitif akış yönü ile yaptığı açığı göstermektedir. Eş. 4.29 ve Eş. 4.30'un cismin tüm yüzeyi boyunca integrali alınırsa, cisim üzerine etki eden toplam direnç ve kaldırma kuvvetleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [24];

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P\cos\theta + \tau_w\sin\theta)dA \quad (4.31)$$

$$F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P\sin\theta + \tau_w\cos\theta)dA \quad (4.32)$$



Şekil 4.6. Güneş panelleri üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetler

Atmosferik ortama yerleştirilmiş güneş takip sisteminin akış problemi de bir akışkan içerisine daldırılan cismin üzerindeki akış olarak karakterize edilebilir. Belirli bir açıdaki güneş panellerinin hava ile etkileşimi sonucunda panel yüzeyinde basınç ve buna bağlı olarak aerodinamik kuvvetler oluşur. Panel yüzeyindeki basınç, boyutsuz parametre olan basınç katsayısı (C_p) ile ifade edilir. Aerodinamik kuvvetler ise rüzgâr yönüne paralel ve dik olmak üzere iki farklı kuvvetten oluşur. Rüzgâr yönü doğrultusunda oluşan kuvvete direnç kuvveti (F_D), rüzgâr yönünün dikey doğrultusunda oluşan kuvvete ise kaldırma kuvveti (F_L) denir (Şekil 4.6) ve sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_D = F_R \sin\alpha_p \quad (4.33)$$

$$F_L = F_R \cos\alpha_p \quad (4.34)$$

Basınç (C_p), direnç (C_D) ve kaldırma (C_L) katsayıları ise sırasıyla aşağıdaki denklemler ile hesaplanır;

$$C_p = \frac{P}{0,5\rho V_{ref}^2} \quad (4.35)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho V_{ref}^2 A} \quad (4.36)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0,5\rho V_{ref}^2 A} \quad (4.37)$$

Burada

P: panel yüzeyindeki basıncı (Pa),

ρ : akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3),

V_{ref} : serbest akım hızını (m/s),

F_D : direnç kuvvetini (N),

F_L : kaldırma kuvvetini (N),

A: akış yönüne normal olan düzleme yansıtılmış alanı (m^2) ifade eder.

Güneş panelleri üzerinde oluşan bu katsayı değerleri Ansys Fluent paket programındaki çeşitli sayısal analiz metotlarıyla çözümlenerek elde edilebilmektedir. Fluent çözümlerinde basınç temelli ya da yoğunluk temelli olmak üzere 2 temel algoritma vardır. Düşük rüzgâr hızları ve sıkıştırılamaz akışlar için basınç temelli, yüksek rüzgâr hızları ve sıkıştırılabilir akışlar için ise yoğunluk temelli algoritmalar uygundur. Yoğunluk tabanlı çözüm, kapalı ve açık olmak üzere iki farklı çözüm yöntemi sunar. Basınç tabanlı çözüm ise ayrık (segregated) ve birleşik (coupled) olmak üzere 2 ayrı mantığa dayanan çözümler içerir. Ayrık çözümler, korunum denklemlerini ayrı ayrı çözerken, birleşik çözümler korunum denklemlerini aynı anda çözmektedir. Birleşik ve ayrık yöntemler için toplam 5 adet farklı çözüm metodu vardır. Bunlar Simple, Simplec, PISO, Coupled ve Fractional Step'dir. Sürekli akışlar için Simple, Simplec veya Coupled kullanılır. Sürekli olmayan akışlarda ise PISO veya FSM kullanılır. Basınç tabanlı çözümlerde relaksasyon kriterleri karşımıza

çıkılmaktadır. Relaksasyon kriterleri, Fluent'in her iterasyonda hız, momentum ve basınç değerlerini güncellerken kullandığı yumuşatma faktörüdür. Bütün korunum denklemleri çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiği zaman simülasyonda yakınsama gerçekleşmektedir. Çözümün yakınsaması için bütün değişkenlerdeki genelleştirilmiş artıkların monoton bir azalma göstermesi gerekmektedir. Sayısal çalışmalara başlamadan önce bu genelleştirilmiş artıkların miktarları programa tanıtılarak istenilen hata oranına ulaşana kadar çözümün gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir.

Yapılan sayısal çalışmalarda akışın sıkıştırılamaz olarak kabulünden dolayı çözücü olarak basınç temelli algoritmadan yararlanılmıştır ve hız formülasyonu mutlak olarak seçilmiştir. Çözüm işlemlerini iki kez kontrol etmek amacıyla çift hassasiyet (double precision) seçeneği seçilmiştir. Çözüm metodu olarak korunum denklemlerini aynı anda çözen ve çözüm süresini azaltan basınç-hız birleşik şeması tercih edilmiştir. Tüm genelleştirilmiş artıklar için 10^{-6} yakınsama toleransı kullanılmıştır. Nümerik difüzyon hatalarını en az düzeye indirmek amacıyla momentum denklemleri ikinci dereceden interpolasyon şeması ile ayrıklaştırılmıştır. Ayrıca tezde kullanılan relaksasyon kriterleri Çizelge 4.1'de ve diskritizasyon özellikleri ise Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Relaksasyon kriterleri

Momentum	0,25
Basınç	0,25
Yoğunluk	1
Gövde kuvvetleri	1
Türbülans kinetik enerji	0,8
Spesifik yayılım oranı	0,8
Türbülans viskozite	0,95

Çizelge 4.2. Diskritizasyon özellikleri

Basınç	İkinci derece
Momentum	İkinci derece
Türbülans kinetik enerji	İkinci derece
Spesifik yayılım oranı	İkinci derece

5. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİNİN SEY YAKLAŞIMI

Sonlu elemanlar analizi, SEY adı verilen sayısal tekniğin kullanıldığı herhangi bir fiziksel olgunun simülasyonudur. SEY genel haliyle, belirli koşullar altında ve farklı yükleme şartlarına maruz kalan bir yapının nasıl davrandığını tahmin etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir ve mühendislerin tasarımlarında zayıf noktaların bulunmasında yardımcı olmaktadır. Mühendislik uygulamalarında tasarımı oluşturulan bir yapının olası yüklere karşı mekanik davranışını inlemek için deney koşullarını oluşturmak çoğu zaman mümkün olmayabilir. Bilgisayar teknolojilerinin artması ile birlikte bu tür davranışların incelenmesi sayısal yöntemlerle sağlanabilmektedir. Günümüzde ise SEY en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. SEY ile yapısal analizlerin incelenmesinde birçok yazılım programları geliştirilmiştir. Bu tezde, Ansys Structure paket programı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin temel yaklaşımı, karmaşık geometriye sahip yapıların yer değiştirme ve sıcaklık gibi herhangi bir sürekli büyüklüğün küçük parçaların birleşmesi ile oluşan bir modele dönüştürülmesidir. SEY ile parça modellenirken yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan küçük parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılır. Fiziksel ortamın elemanlara bölünmesi ile her elemanın köşelerinde düğümler (node) oluşur. Düğüm noktaları, alan probleminin bilinmeyenlerinin indirgendiği sonlu sayıda bilinmeyen sayısal olarak çözüldüğü fiziksel noktalardır [25]. Yani sayısal hesaplamalar bu düğüm noktaları üzerinden gerçekleşmektedir. SEY yaklaşımının temel adımları genel haliyle aşağıdaki gibi özetlenebilir;

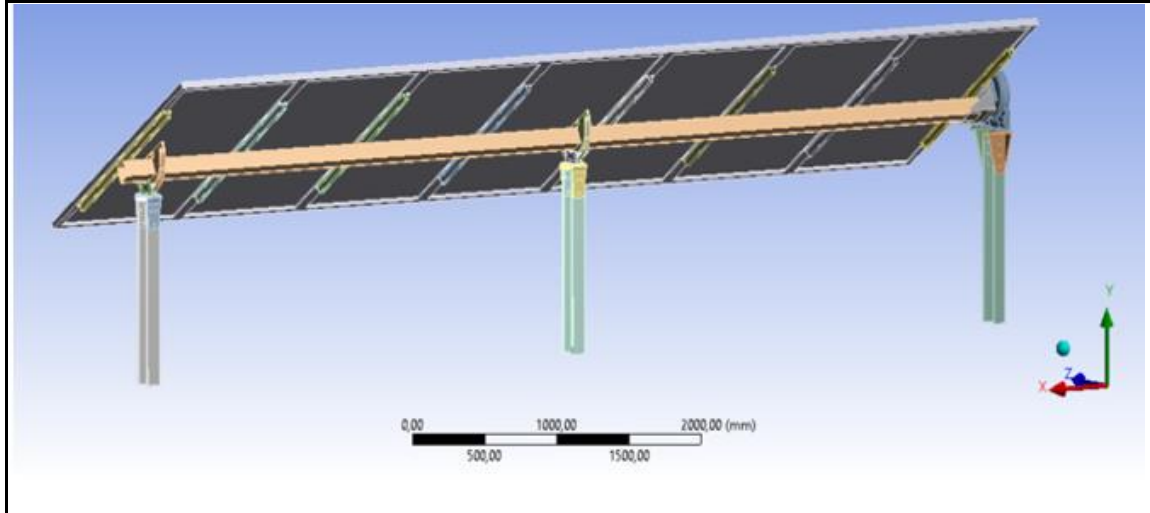
1. Fiziksel problemin elemanlara ve düğüm noktalarına ayrılması.
2. Elemanların fiziksel davranışını temsil etmek amacıyla şekil fonksiyonunun belirlenmesi.
3. Elemanlar için denklemlerin oluşturulması.
4. Fiziksel problemin tamamını temsil edebilmek için denklemleri oluşturulan elemanların birleştirilmesi.
5. Sınır koşulları ve yüklemelerin tanımlanması.
6. Düğüm noktaları üzerindeki yer değiştirme ve sıcaklık gibi büyüklük değerlerini elde edebilmek için cebirsel denklem kümesinin çözülmesi.
7. Düğüm noktaları üzerindeki sonuçların elde edilmesi ile gerilme ve basınç gibi diğer özelliklerin belirlenmesi.

SEY yaklaşımındaki temel adımlardan ilk 5 maddesi ön işlem aşaması, 6. madde çözüm aşaması ve 7. Madde son işlem aşaması olarak geçmektedir [26-27].

Ansys Structure ile yapısal analiz gerçekleştirmek için öncelikli olarak çözümü yapılması istenen modelin geometrisi oluşturulmalıdır ve geometride kullanılan malzemelerin özellikleri belirlenmelidir. Oluşturulan model geometri ağ ile küçük elemanlara ayrılmalıdır. Temas ilişkileri ve sınır koşullarının belirlenmesinin ardından uygulanacak olan analiz türünün belirlenmesi gerekmektedir.

5.1. Geometri ve Ağ

Prototip modelin (Bkz. Şekil 3.6) sonlu elemanlar modeli, yapısal analiz esnasında fazla ağ eleman sayısından kaçınarak çözüm süresini azaltmak amacıyla basitleştirilmiştir. Bu kapsamda, parçalar üzerindeki pahlar ihmal edilmiştir ve yuvalar delik olarak düzenlenmiştir. Ayrıca sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar modelinin yapısal analizi simetrik olarak çözdürülmüştür. Güneş takip sisteminin sonlu elemanlar modeli Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Güneş takip sisteminin sonlu elemanlar modeli

Yapısal analiz öncesinde, ilk olarak sonlu elemanlar modelindeki parçalara malzeme atanması yapılmalıdır. Güneş paneli çerçevesine ve panel hücrelerine kullanılacak olan malzeme sırasıyla alüminyum 6063-T6 ve cam olarak belirlenmiştir. Güneş panellerini tutan aşıklara ve sistemin temelle bağlantısını sağlayan taşıyıcı kolonlara St-52 (S355JR)

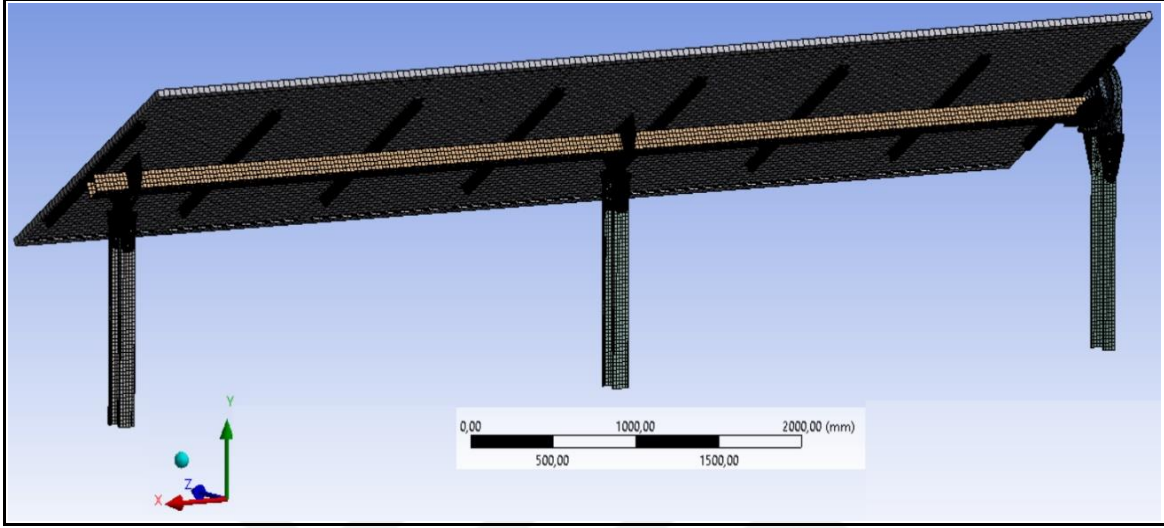
malzeme olarak atanmıştır. Sistemin dönmesi için gerekli olan momenti sağlayan motor için kullanılacak olan malzeme dökme demir ve kirişlerin rulman takımı parçalarına bağlantılarında kullanılan bağlantı braketleri için kullanılacak olan malzeme St-37 (S235JR) olarak belirlenmiştir. Ayrıca güneş takip sisteminin dönme hareketini gerçekleştiren rulman takımı parçalarına St-52 (S355JR) ve rulman yatak parçalarına delrin (POM) malzeme olarak atanmıştır. Motorun oluşturduğu momentin takip sistemine iletilmesini sağlayan kare kesitli kirişler ile motor bağlantı parçasına ise St-52 (S355JR) malzeme olarak atanmıştır. Atanan malzemeler ve özellikleri Çizelge 5.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Akma Gerilmesi (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³)
Solar cam	70	0,22	-	2500
A6063-T6	68,9	0,33	214	2700
Delrin (POM)	3	0,44	64	1410
St-37 (S235JR)	210	0,28	235	7800
St-52 (S355JR)	210	0,28	355	7800

Yapısal analizlerin çözümlenmesindeki en önemli aşamalardan bir tanesi ağ oluşturma işlemidir. Oluşturulan sonlu elemanlar modelin ağ ile kaplanmasında Ansys Structure paket programı içerisindeki ağ modülünden yararlanılmıştır. Motor bağlantı parçası ve rulman takımı parçaları dışındaki tüm parçalar hexahedral eleman türü ile ağlanmıştır. Motor bağlantı parçası ve rulman takımı parçaları ise daha karmaşık yapılardan oluştukları için tetrahedral eleman türü ile ağlanmıştır. Yapıdaki tüm parçalarda nesne boyutlandırma ile ağ iyileştirilmesi yapılmıştır. Ağdan bağımsız çözümler elde edebilmek için her bir parçada bölümlenme oranları (mesh size) sırasıyla küçültülerek, belirli bir yük altındaki güneş takip sisteminin üzerinde meydana gelen maksimum gerilim değerlerindeki değişiklikler incelenmiştir. Gerilim değerlerindeki farkın %1’e inmesi ile bölümlenme oranları belirlenmiştir. Belirlenen bölümlenme oranları ise sırasıyla güneş panelleri için 40 mm, güneş panellerini tutan aşıklar için 10 mm, kare kesitli kirişler için 25 mm, rulman takımları ve braketler için 5 mm, taşıyıcı kolonlar için 20 mm olarak alınmıştır. Parametrik çalışmalar için kullanılan sonlu elemanlar modelleri yaklaşık olarak toplamda 1 050 000 düğüm noktası ve 510 000 eleman çözüm ağından oluşmaktadır.

Oluşturulan çözüm ağıları bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde ise maksimum çarpıklık faktörü 0,81 olarak görülmüştür. Sayısal çalışmalarda kullanılmak üzere oluşturulan örnek bir hücre yapısı Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Sonlu elemanlar modeli için oluşturulan ağ yapısı

5.2. Temas İlişkileri ve Sınır Şartları

Güneş takip sistemini oluşturan parçaların birbiriyle olan temas yüzeylerinde uyumsuz ağ oluşması durumunda gerçek olmayan yüksek gerilimler meydana gelebilmektedir. Bu yüzden temas yüzeyleri arasında kontaklar (contacts) oluşturulmalıdır. Kontak, iki tane birbirinden ayrı parça arasında analiz esnasında yük transferini sağlayan elemandır. Kontaklar ile yükün hangi sınır koşulları altında nasıl aktarılacağını tanımlamış oluruz. Kuvvetin aktarılacağı unsur kontak nesnesi (contact body) olarak tanımlanır, kuvvetin aktarıldığı unsur ise hedef nesnesi (target body) olarak tanımlanır.

Ansys Structure paket programında bonded ve no separation olmak üzere iki farklı lineer kontak türü vardır. Bonded kontak türünde parçaların birbirlerine göre göreceli hareketi yoktur. Yani, parçalar birbirinden ayrılmazlar ve aynı şekilde kalırlar. No separation kontak türünde ise parçalar birbirlerinin normali doğrultusunda ayrılmazlar ve boşluk oluşmasına da izin vermezler fakat birbiri üzerinde kayabilirler.

Bu tezde, yapısal analiz esnasında tanımlanan başlangıçtaki şartların analiz sonuçlanasıya kadar aynı kalması beklendiği için lineer kontak türleri kullanılmıştır. Birbiri ile kaynaklı

olan parçaların temas yüzeyleri arasında tüm serbestlik derecesini kısıtlamak amacıyla kontak türü olarak bonded seçilmiştir. Cıvata ile birbirine bağlı olan parçaların temas yüzeyleri arasında ise kontak türü olarak no seperation seçilmiştir.

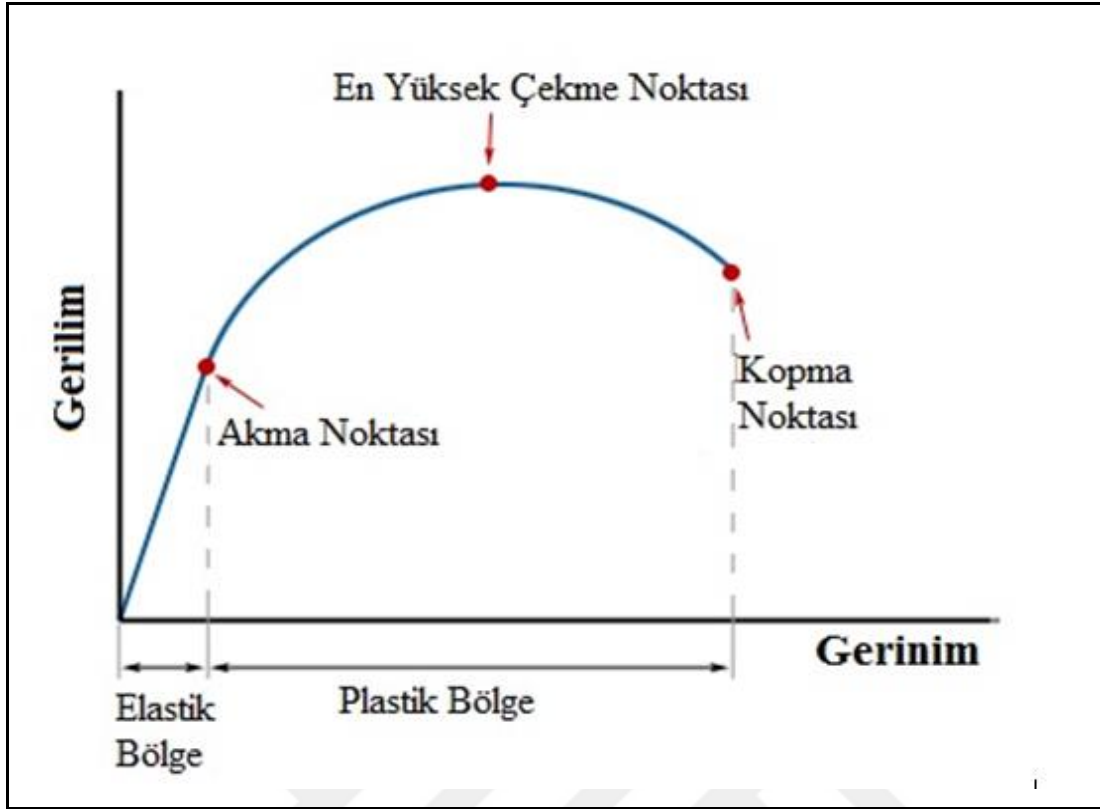
Yapısal analiz simülasyonlarının doğru bir şekilde yapılması için sonlu elemanlar modelinde sınır şartlarının doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Modelde bilinmeyen sayısının azaltılması ve çözümüleme süresinin en aza indirilmesi için sınır şartlarının tam olarak tanımlanması gerekmektedir [28].

Sayısal çalışmalarda sınır şartları olarak sabit mesnet ve yük tanımlamaları yapılmıştır. Taşıyıcı kolonların alt yüzeyleri sabit mesnet olarak tanımlanmıştır. Böylece güneş takip sisteminin temel destek yapısını oluşturan kolonların zemine göre öteleme ve dönme hareketleri kısıtlanmıştır ve güneş takip sistemi statik, sabit pozisyonda gibi düşünülmüştür. Akış analizi sonucunda güneş panelleri yüzeyi üzerinde elde edilen basınç dağılımları, Ansys akışkan-yapı etkileşimi paket programı kullanılarak sonlu elemanlar modeline aktarılmıştır ve güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır.

5.3. Çözüm

Oluşturulan sonlu elemanlar modelinin yapısal analizi öncesinde hangi analiz türü ile çözümüleme yapılacağı belirlenmelidir. SEA türleri yük-zamana göre değişim ve yapıların yüke verdiği reaksiyon türüne göre değişim olmak üzere iki temel kategoride sınıflandırılabilir [28].

Yük-zamana göre değişim statik, dinamik ve harmonik olmak üzere 3 temel analiz türünden oluşmaktadır. Tanımlanan yük ve sınır şartlarının zamana göre değişmediği analiz türü statik analiz, zamana göre değiştiği analiz türü ise dinamik analiz olarak adlandırılır. Harmonik analiz ise tanımlanan yük ve sınır şartlarının frekansa bağlı olarak değişmesi durumunda yapılan analiz türüdür. Yapıların yüke verdiği reaksiyon türüne göre lineer ve lineer olmayan olmak üzere 2 temel analiz türü vardır. Tanımlanan yük altında malzemelerin elastik sınır içinde kaldığı durumlar lineer analiz türü olarak adlandırılır. Elastik sınır dışına çıkıp plastik deformasyon oluşması durumunda ise lineer olmayan analiz türü olarak adlandırılır.



Şekil 5.3. Gerilim gerinim grafiği

Bütün malzemeler belirli bir yük altında elastik veya plastik şekil değiştirmeye uğrarlar. Şekil 5.3'te gerilim ve gerinim değerlerinin, akma noktasına kadar doğrusal bir ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Bu bölgeye elastik bölge adı verilir. Elastik şekil değiştirmede yük durumu ortadan kaldırıldığında malzeme tekrar eski halini alır ve malzemedeki şekil değişimi geçicidir. Gerilim değeri akma noktasının üzerine çıktığında ise gerilim ve gerinim arasındaki doğrusal ilişki ortadan kalkmaktadır ve malzeme içindeki kristal bloklar birbirleri üzerinde kaymaya başlayarak kalıcı şekil değişimi meydana gelir. Bu bölgeye ise plastik bölge adı verilir. Plastik şekil değiştirmede ise yük durumu ortadan kaldırıldığında malzeme eski halini alamaz ve malzemedeki şekil değişimi kalıcıdır.

Tanımlanan yük altındaki yapıların hasara uğrayıp uğramadığını incelemek için akma ve kırılma kriterleri kullanılmaktadır. Esnek (ductile) malzemeler kopmadan önce uzarken, gevrek (brittle) malzemeler hiç uzamadan aniden kırılır. Bu yüzden esnek ve gevrek malzemelerin analizlerinde farklı hasar kriterleri geliştirilmiştir. Güneş takip sisteminde kullanılan yapılar esnek malzemelerdir. Bu yüzden, sayısal çalışmalarda esnek malzemelerde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan von-mises hasar kriteri ele alınmıştır.

Von-mises kriterinde, malzemeye uygulanan çok eksenli gerilmeler eşdeğer bir tek gerilme ($\sigma_{eş}$) ile değerlendirilir ve uygulanan yükleme sonucunda elde edilen maksimum eşdeğer gerilme değeri malzemenin akma gerilmesinin üstünde bir değer ise malzeme kalıcı şekil değiştirmiş demektir [28].

Von-mises kriterinde uygulanan eşdeğer gerilme denklemi ise aşağıdaki gibidir [28];

$$\sigma_{eş} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)]} \quad (5.1)$$

Bu tezde, yapısal analiz esnasında uygulanan yük ve sınır şartlarının zamana bağlı olarak değişmediği ve yükün elastik sınırlar içerisinde kaldığı düşünülerek, statik ve lineer analiz türleri ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Güneş takip sisteminin uygulanan yük altında davranışını belirlemek amacıyla von-mises kriterinden yararlanılmıştır.

Statik problemlerin SEY ile çözümünde sistem en genel haliyle aşağıdaki matris formuna dönüştürülmektedir.

$$[K] [u] = [f] \quad (5.2)$$

Burada $[K]$ eleman direngenlik matrisi, $[u]$ büyüklük değerinin (yer değiştirme vb.) düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerleri temsil eden vektör, $[f]$ düğüm noktalarındaki bilinen yük vektörüdür. Daha basite indirgersek $[K]$ yapının fiziksel özelliklerini, $[f]$ sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler vb.) temsil etmektedir. $[u]$ ise düğüm noktalarındaki bulunması istenen büyüklük değerleridir (yer değiştirme, gerilme vb.) [25]. Bu durumda, katı cisimlerin sonlu elemanlar modelini oluşturmak için direngenlik matrisinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

3 boyutlu katı cisimlerin direngenlik matrisini belirlemek için öncelikli olarak bu cisimlerin elastikiyet teorisi bilinmesi gerekmektedir. 3 boyutlu katı bir cismin herhangi bir noktasında küçük bir kübik hacim alındığında, yüzeydeki gerilme bileşenleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Her yüzeyde, normal gerilme bileşenleri ile iki tane kayma gerilmesi bileşenleri oluşmaktadır. Kuvvetlerin merkez eksene göre oluşturduğu momentler denge durumunda olduğu için,

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} ; \sigma_{xz} = \sigma_{zx} ; \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \quad (5.3)$$

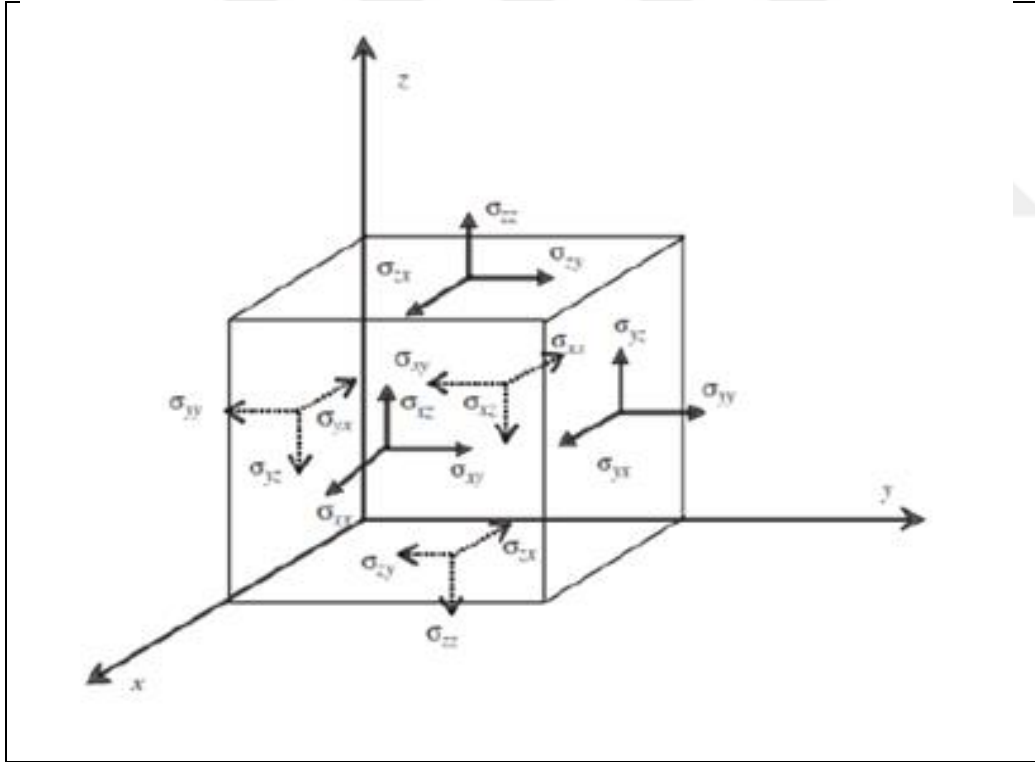
şeklinde ifade edilebilmektedir [25]. Bu durumda yapıdaki herhangi bir noktada 6 adet bağımsız gerilim ve gerinim bileşenleri oluşmaktadır. Bunlar vektör formda gerilmeler için;

$$[\sigma]^T = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (5.4)$$

gerinimler için;

$$[\varepsilon]^T = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}] \quad (5.5)$$

şeklindedir.



Şekil 5.4. Kübik hacmin yüzeyindeki 6 bağımsız serbestlik gerilme bileşenleri [25]

Genelleştirilmiş hooke yasasına göre gerinim ile gerilme arasındaki ilişkiyi ifade edecek olursak [25];

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E'} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E'} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E'} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \quad (5.8)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G'} \tau_{xy} \quad (5.9)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G'} \tau_{yz} \quad (5.10)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G'} \tau_{xz} \quad (5.11)$$

Burada E' esneklik katsayısını, ν poisson oranını ve G' ise kesme esneklik katsayısını göstermektedir.

Gerinim ile gerilme arasındaki ilişkiyi gösteren denklemler matris formunda yazıldığında aşağıdaki şekli almaktadır;

$$[\sigma] = [E'][\varepsilon] \quad (5.12)$$

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}, \quad [E'] = \frac{E'}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

Küçük gerinim ve yer değiştirmeler için gerinim bileşenleri yer değiştirmelerin türevi ile ifade edilmektedir [25-27].

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.14)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5.15)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5.16)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.17)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (5.18)$$

Gerinim yer değiştirme ilişkisi ile oluşturulan denklemler matris formunda yazıldığında aşağıdaki şekli alır [25-27];

$$[\varepsilon] = [L'] [u] \quad (5.19)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}, \quad [L'] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}, \quad [u] = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Katı bir cisme dış y¼k uygulandığında yapıda deformasyonlar meydana gelir. 3 boyutlu katı cisimler i¼in deformasyon sırasında depolanan gerinim enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [27];

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx}\epsilon_{xx} + \sigma_{yy}\epsilon_{yy} + \sigma_{zz}\epsilon_{zz} + \tau_{xy}\gamma_{xy} + \tau_{xz}\gamma_{xz} + \tau_{yz}\gamma_{yz}) dV \quad (5.20)$$

Burada V katı cismin hacmini göstermektedir.

Eş.5.20 matris formunda yazıldığında aşağıdaki şekli alır [27];

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V [\sigma]^T [\epsilon] dV \quad (5.21)$$

Eş. 5.12, Eş. 5.21'de yerine konulursa;

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V [\epsilon]^T [E'] [\epsilon] dV \quad (5.22)$$

elde edilir.

Düzlem elemanlar içinde meydana gelen yer değiştirmeler (u, v), şekil fonksiyonları (N_i) kullanılarak düğüm noktalarının yer değiştirmelerin (u_i, v_i) enterpolasyonu ile hesaplanmaktadır [25-27].

$$[u] = [N][U] \quad (5.23)$$

$$[u] = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \quad [N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots \end{bmatrix}, \quad [U] = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Burada N şekil fonksiyon matrisini, u yer değiştirme vektörünü, U ise düğüm noktası yer değiştirme vektörünü göstermektedir.

Yer değiştirme şekil fonksiyonu arasındaki ilişki ile elde edilen denklem (Eş. 5.23), gerinim ile yer değiştirme arasındaki ilişki ile elde edilen denklemde (Eş. 5.19) yerine konulursa aşağıdaki denklem elde edilir [27].

$$[\varepsilon] = [L'] [N] [U] = [B'] [U] \quad (5.24)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}, [L'] [N] = [B'] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots \end{bmatrix}, [U] = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Eş. 5.24'te gerinim için elde edilen denklem Eş. 5.22'de yerine konulursa, gerinim enerjisi denklemi aşağıdaki şekli alır [27];

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon]^T [E'] [\varepsilon] dV = \frac{1}{2} \int_V [U]^T [B']^T [E'] [B'] [U] dV \quad (5.25)$$

Eş. 5.25'in düğüm noktasındaki yer değiştirmeye göre kısmi türevi alınırsa aşağıdaki denklem elde edilmektedir [27];

$$\frac{\partial \Lambda^{(e)}}{\partial U_k} = \frac{\partial}{\partial U_k} \left(\frac{1}{2} \int_V [U]^T [B']^T [E'] [B'] [U] dV \right) \quad (5.26)$$

Eş. 5.26 ile elde edilen sonuç $[K]^e [U]$ ifadesi ile tanımlanmaktadır. Bu durumda, 3 boyutlu katı cisimlerin eleman direngenlik matrisi için genel formülü aşağıdaki gibi gelmektedir ve belirlenen malzeme özelliklerine bağlı olarak B' matrisine bağlı olmaktadır [27];

$$[K^{(e)}] = \int_V [B']^T [E'] [B'] dV = V [B']^T [E'] [B'] \quad (5.27)$$

6. DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

Mevcut çalışmanın parametrik analizlerine geçmeden önce, önceki bölümlerde sunulan sayısal modelleme ve analiz araçlarının doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda Bölüm 4'te sunulan HAD yaklaşımı için oluşturulmuş sayısal analiz metotları kullanılarak deneysel ve literatür doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

6.1. Deneysel Doğrulama

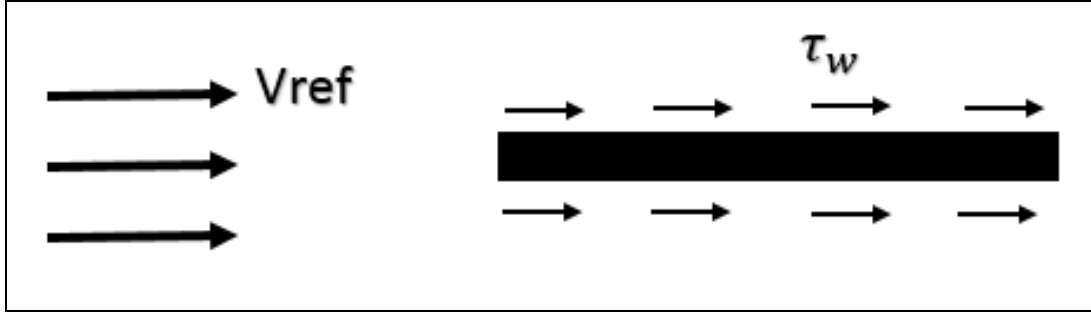
Dış akış problemlerinde akış ayrımlarının oluşmasından dolayı direnç ve kaldırma katsayılarının analitik olarak belirlenmesi oldukça zordur. Güneş panellerinin üzerindeki hava akışı, düz bir plaka üzerindeki akış ile benzerlik göstermektedir. Düz plakalar üzerindeki laminar akışın aerodinamik katsayıları, kütle ve momentum korunumu denklemlerini sayısal olarak çözmek suretiyle teorik olarak bulunabilmektedir. Fakat türbülanslı akışta ise aerodinamik katsayıların deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Düz bir plaka üzerinde paralel ve dik akış olmak üzere iki farklı durum için aerodinamik katsayıların belirlenmesinde deneysel olarak bağıntılar geliştirilmiştir. Bu yüzden doğrulama çalışmasında, bu bağıntılardan elde edilen aerodinamik katsayı değerleri, HAD yaklaşımı için oluşturulmuş sayısal analiz metotları kullanılarak elde edilen katsayı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Düz plaka üzerinde paralel akış

Akışkanın hareket yönüne paralel yerleştirilmiş ince düz bir plaka üzerindeki akışta basınç kuvveti sıfırdır. Bu yüzden plaka üzerinde oluşan toplam kuvvet sadece kayma kuvvetinden gelmektedir (Şekil 6.1). Ayrıca plaka akışkanın hareket yönüne paralel yerleştirildiği için plaka üzerinde sadece direnç kuvvetleri oluşur ve kaldırma kuvveti sıfırdır. Bu durumda plaka üzerindeki toplam direnç kuvveti ve katsayısı aşağıdaki gibidir [29-30];

$$F_D = F_R = \int_A \tau_w dA \quad (6.1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0,5\rho V_{ref}^2 A} = \frac{\int_A \tau_w dA}{0,5\rho V_{ref}^2 A} = \frac{1}{A} \int_A C_f dA \quad (6.2)$$



Şekil 6.1. Düz plaka üzerinde paralel akış durumu

Düz bir plaka üzerindeki türbülanslı akış durumları için kayma gerilme katsayısı (C_f) aşağıdaki gibidir [29-30];

$$C_f = \frac{\tau_w}{0,5\rho V_{ref}^2} = \frac{0,0594}{R_{ex}^{0,2}} \Rightarrow \tau_w = \frac{0,0594(0,5\rho V_{ref}^2)}{R_{ex}^{0,2}} \quad (6.3)$$

Bu durumda direnç katsayısı (C_D) aşağıdaki gibi bulunabilmektedir [29-30];

$$C_D = \frac{\int_A \frac{0,0594(0,5\rho V_{ref}^2)}{R_{ex}^{0,2}} dA}{0,5\rho V_{ref}^2 A} = \frac{1}{A} \int_A 0,0594 R_{ex}^{-0,2} dA \quad (6.4)$$

$$C_D = \frac{1}{bL} \int_0^L 0,0594 \left(\frac{V_{ref}}{u}\right)^{-0,2} x^{-0,2} b dx = \frac{0,0594}{L} \left(\frac{u}{V_{ref}}\right)^{0,2} \left[\frac{x^{0,8}}{0,8}\right]_0^L \quad (6.5)$$

$$C_D = 0,0742 \left(\frac{u}{V_{ref}L}\right)^{0,2} = \frac{0,0742}{R_{eL}^{0,2}} \quad (6.6)$$

Reynolds sayısının $5 \times 10^5 < R_{eL} < 10^7$ arasında olması durumunda, akışkanın hareket yönüne paralel yerleştirilmiş ince düz bir plaka üzerindeki akışlar için direnç katsayısı Eş. 6.6 ile bulunabilmektedir.

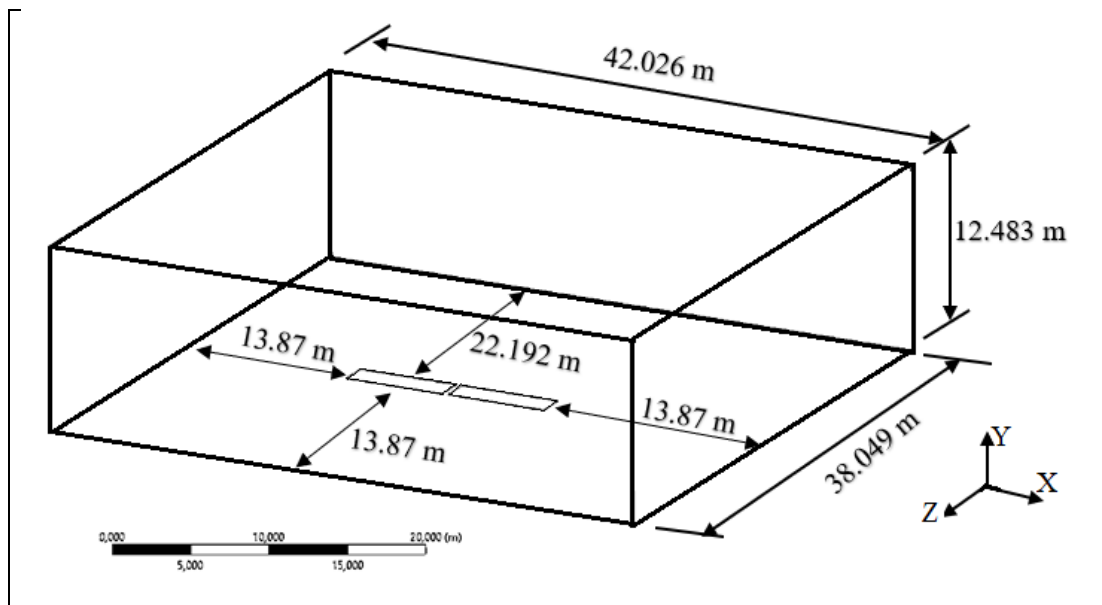
Bölüm 4.3'te 15 m/s ve 18 m/s rüzgâr hızları için sırasıyla $2,04 \times 10^6$ ve $2,45 \times 10^6$ Reynolds sayıları elde edilmiştir. 15 m/s ve 18 m/s rüzgâr hızlarında, rüzgârın esme yönüne paralel olarak yerleştirilmiş güneş panellerinde oluşan direnç katsayı değerleri ise Eş. 6.6 kullanılarak sırasıyla aşağıdaki gelmektedir;

$$C_D = \frac{0,0742}{(2,04 \times 10^6)^{0,2}} = 0,004 \quad (6.7)$$

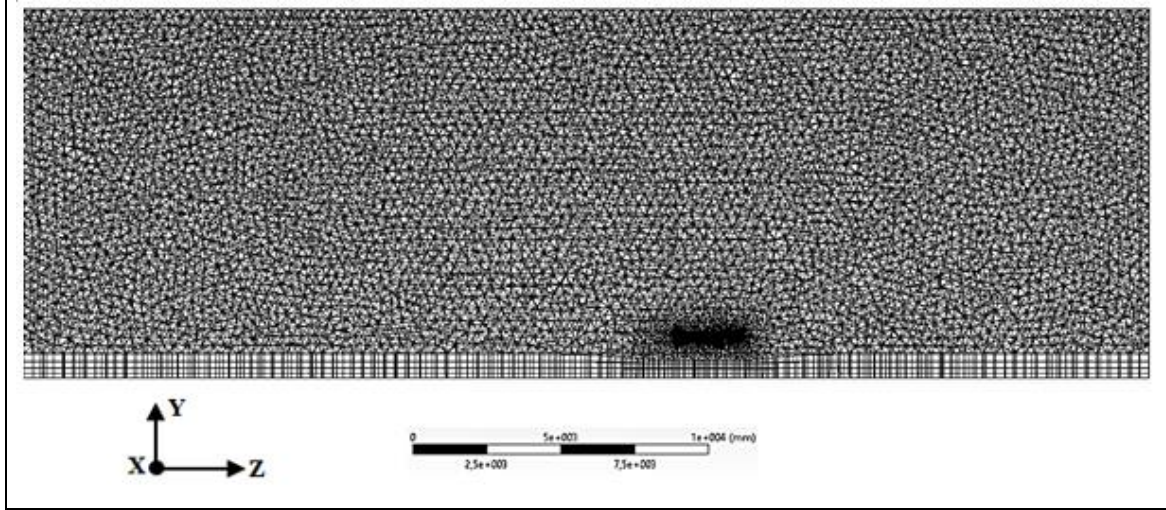
$$C_D = \frac{0,0742}{(2,45 \times 10^6)^{0,2}} = 0,0039 \quad (6.8)$$

Aynı şekilde Bölüm 4'te HAD yaklaşımı için oluşturulan sayısal analiz metotları kullanılarak, rüzgârın esme yönüne paralel olarak yerleştirilmiş güneş panellerinin (güneş takip sisteminin 0° konumunda tutulması durumu) Ansys Fluent yazılımı ile akış analizi gerçekleştirilmiş ve panellerde oluşan direnç katsayı değerleri 15 m/s ve 18 m/s rüzgâr hızları için elde edilmiştir.

Sayısal analiz esnasında oluşturulan akış alanı geometrisi ve ağ yapısı sırasıyla Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Akış alanı geometrisinde, güneş panellerinin en tepe noktasından zeminine olan uzaklık (C) 1,387 m'dir. Bu yüzden akış alanı üst yüzeyi ile güneş takip sisteminin tepe noktası arasındaki mesafe (8C) 11,096 m, güneş panellerinin yan yüzeyleri ile akış alanı yan yüzeyleri arasındaki mesafe (10C) 13,87 m, hava akışının giriş yaptığı akış alanı giriş yüzeyi ile güneş panelleri arasındaki mesafe (10C) 13,87 m ve hava akışının çıkış yaptığı akış alanı çıkış yüzeyi ile güneş panelleri arasındaki mesafe (16C) ise 22,192 m alınmıştır. Yaklaşık 3,5 milyon hücreli çözüm ağının kullanıldığı akış alanı, bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde ise maksimum çarpıklık faktörü yaklaşık 0,75 olarak görülmüştür.

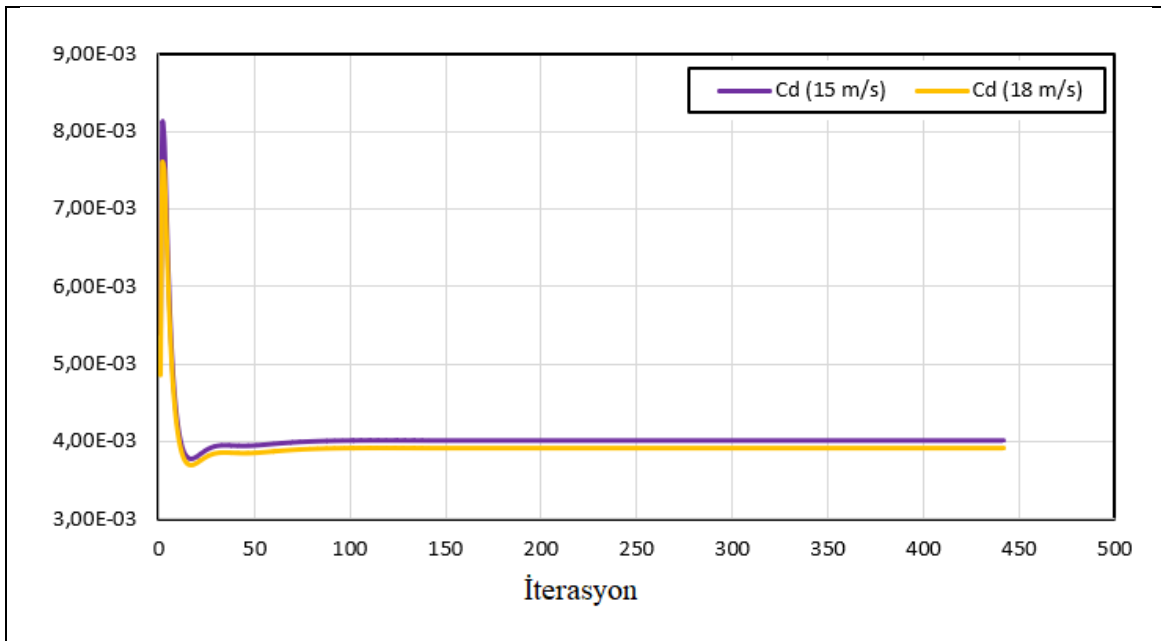


Şekil 6.2. Paralel akış durumu için oluşturulan akış alanı geometrisi



Şekil 6.3. Paralel akış durumu için oluşturulan ağ yapısı

Sayısal analiz sonucunda direnç katsayı değerleri 442 iterasyon sonucunda yakınsamıştır (Şekil 6.4). 15 m/s rüzgâr hızındaki sayısal analiz sonucunda toplam direnç katsayısı $4,0144 \times 10^{-3}$ gelmiştir ve deneysel bağıntılar ile elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında %0,36 hata oranı yakalanmıştır. 18 m/s rüzgâr hızındaki sayısal analiz sonucunda ise toplam direnç katsayısı $3,9083 \times 10^{-3}$ gelmiştir ve deneysel bağıntılar ile elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında %0,21 hata oranı yakalanmıştır. Ayrıca her iki rüzgâr hızındaki sayısal analiz sonucunda basınç katsayısının (basınç kuvveti etkisinin) toplam direnç katsayısına etkisinin oldukça düşük olduğu doğrulanmıştır (Çizelge 6.1).



Şekil 6.4. Paralel akış durumu için direnç katsayısı yakınsama grafiği

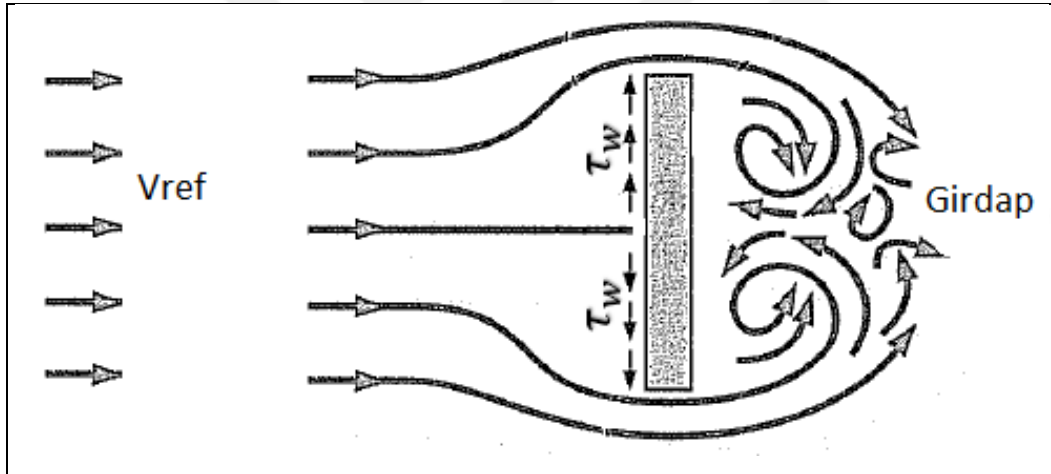
Çizelge 6.1. Paralel akış durumu için sayısal analiz sonucunda elde edilen katsayı değerleri

	Basınç Katsayısı	Kayma Katsayısı	Toplam Direnç Katsayısı
15 m/s	$3,0877 \times 10^{-9}$	$4,0144 \times 10^{-3}$	$4,0144 \times 10^{-3}$
18 m/s	$3,1094 \times 10^{-9}$	$3,9083 \times 10^{-3}$	$3,9083 \times 10^{-3}$

Düz plaka üzerinde dik akış

Akışkanın hareket yönüne dik yerleştirilmiş ince düz bir plaka üzerindeki akışta ise kayma kuvveti akışa dik yönde etki ettiği için sıfırdır. Bu yüzden toplam direnç kuvveti sadece basınç kuvvetinden oluşmaktadır (Şekil 6.5) [29-30].

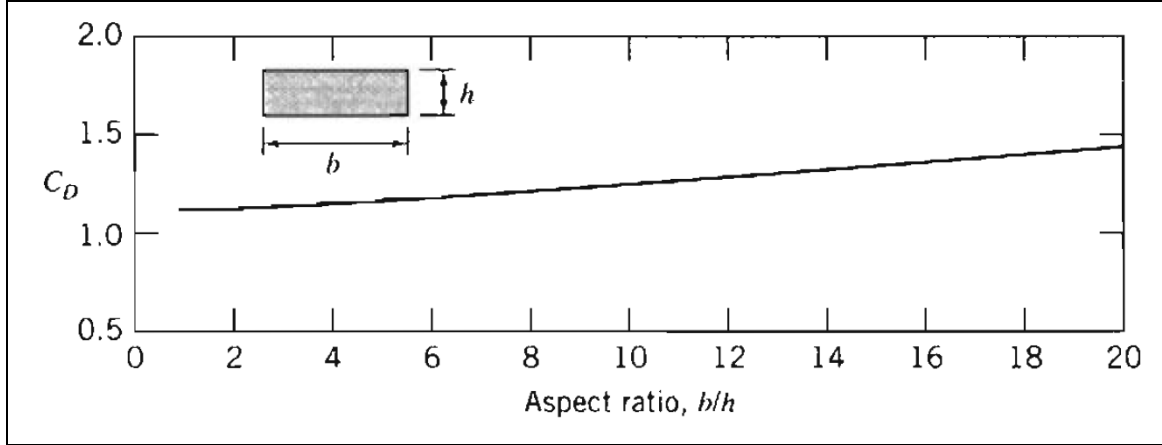
$$F_D = \int_A PdA \quad (6.9)$$



Şekil 6.5. Düz plaka üzerinde dik akış durumu

Akışkanın hareket yönüne dik yerleştirilmiş sonlu bir plaka için direnç katsayısı, plakanın genişliğinin yüksekliğe oranına ve Reynolds sayısına bağlıdır. Akış çizgilerinin ayrılma noktaları cismin geometrisi ile sabitlendiği için keskin kenarlara sahip cisimlerde ve Reynolds sayısı 1000'den büyük olması durumunda direnç katsayısı esasen Reynolds sayısından bağımsızdır. Bu durumda direnç katsayısı plaka genişliğinin yüksekliğine oranı ile ilişkilendirilebilmektedir [30].

Plaka genişliğinin yüksekliğe oranı (b/h) ile direnç katsayısı değişimi Şekil 6.6'da gösterilmiştir. b/h oranının 1 olması durumunda direnç katsayısı minimum değeri almaktadır ve oranın artması ile direnç katsayısı artış göstermektedir [30].

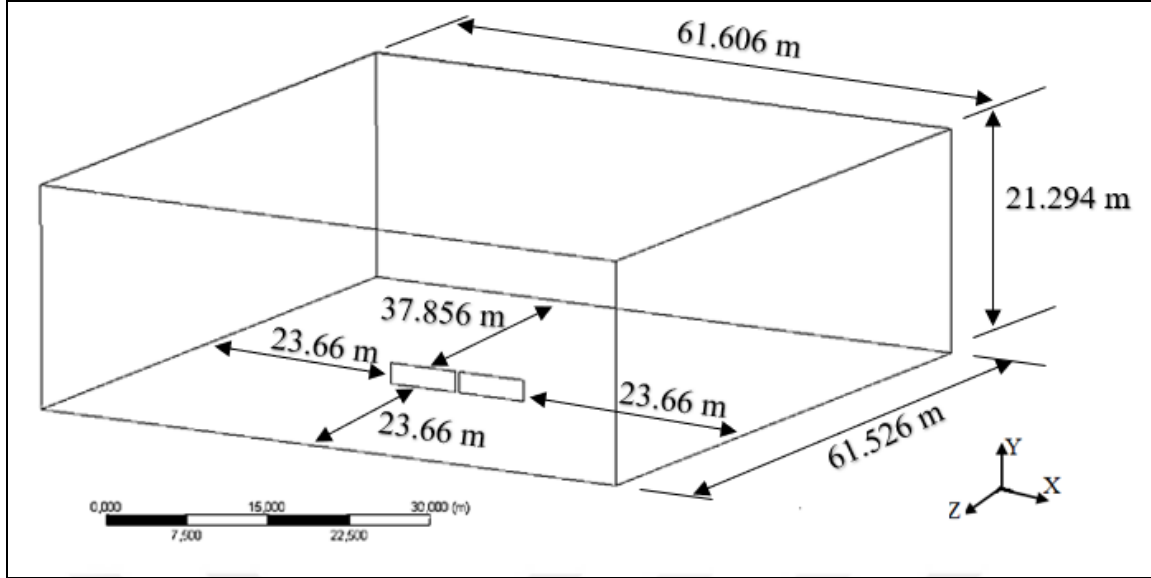


Şekil 6.6. Direnç katsayısının plaka genişliğinin yüksekliğe oranıyla değişimi [30]

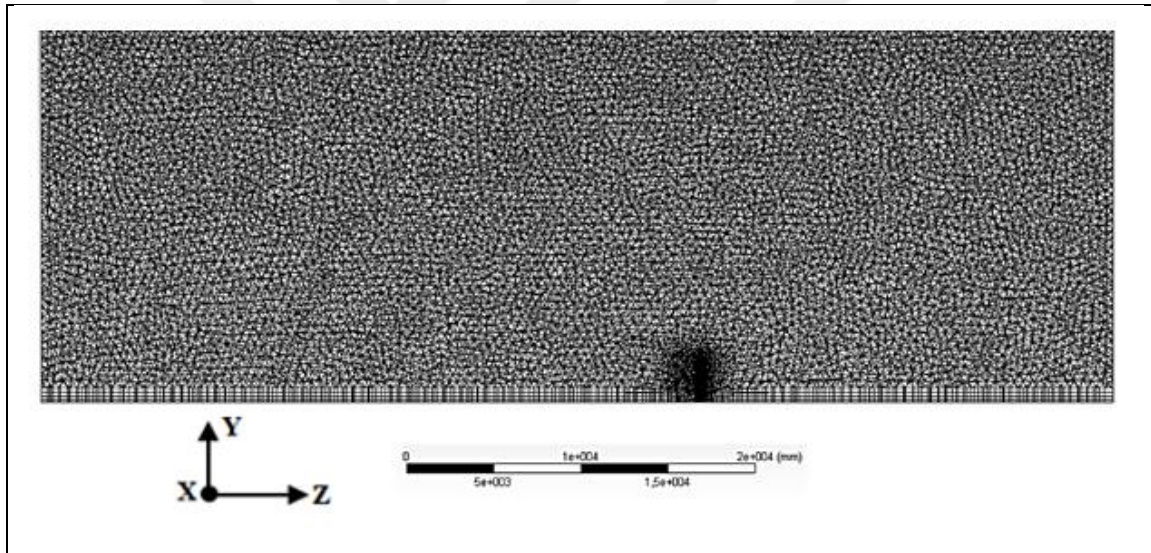
Güneş panellerini düz bir plaka olarak kabul edip, rüzgârın hareket yönüne dik olarak yerleşmesi durumunda oluşan direnç katsayısını b/h oranı ilişkisi ile elde edebiliriz. Güneş takip sistemini oluşturan güneş panellerinin toplam eni 14,286 m ve toplam boyu ise 1,987 m'dir. Bu durumda güneş panellerinin b/h oranı yaklaşık olarak 7,2 gelmektedir. Şekil 6.6'daki grafiğe bakıldığında, b/h oranının 7,2 olması durumunda direnç katsayısı değeri 1,226 olarak gelmektedir. Bu durumda her iki rüzgâr hızı (15 m/s ve 18 m/s) için direnç katsayısı değeri aynı olmalı ve 1,226 gelmelidir.

Aynı şekilde Bölüm 4'te HAD yaklaşımı için oluşturulan sayısal analiz metotları kullanılarak, rüzgârın esme yönüne dik olarak yerleştirilmiş güneş panellerinin (güneş takip sisteminin 90° konumunda tutulması durumu) Ansys Fluent yazılımı ile akış analizi gerçekleştirilmiş ve panellerde oluşan direnç katsayısı değerleri 15 m/s ve 18 m/s rüzgâr hızları için elde edilmiştir.

Sayısal analiz esnasında oluşturulan akış alanı geometrisi ve ağ yapısı sırasıyla Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Akış alanı geometrisinde, güneş panellerinin en tepe noktasından zeminine olan uzaklık (C) 2,366 m'dir. Bu yüzden akış alanı üst yüzeyi ile güneş takip sisteminin tepe noktası arasındaki mesafe (8C) 18,928 m, güneş panellerinin yan yüzeyleri ile akış alanı yan yüzeyleri arasındaki mesafe (10C) 23,66 m, hava akışının giriş yaptığı akış alanı giriş yüzeyi ile güneş panelleri arasındaki mesafe (10C) 23,66 m ve hava akışının çıkışı yaptığı akış alanı çıkış yüzeyi ile güneş panelleri arasındaki mesafe (16C) ise 37,856 m alınmıştır. Yaklaşık 3,8 milyon hücreli çözüm ağının kullanıldığı akış alanı, bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde ise maksimum çarpıklık faktörü yaklaşık 0,73 olarak görülmüştür.



Şekil 6.7. Dik akış durumu doğrulama çalışması için oluşturulan akış alanı geometrisi



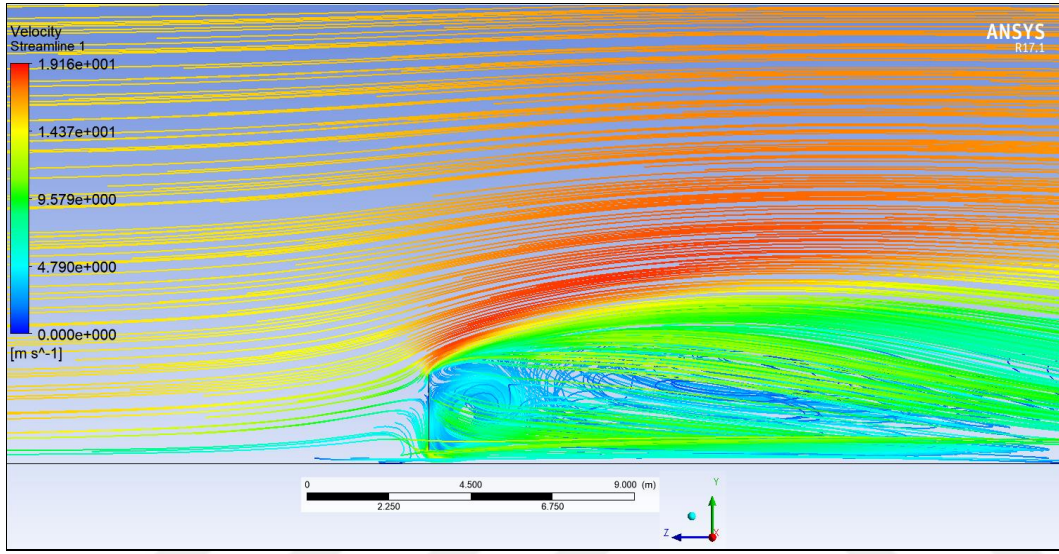
Şekil 6.8. Dik akış durumu doğrulama çalışması için oluşturulan ağ yapısı

Sayısal analiz sonucunda toplam direnç katsayı değerleri 632 iterasyon sonucunda yakınsama göstermiştir ve her iki rüzgâr hızında da 1,234 gelmiştir. Elde edilen toplam direnç katsayısı deneysel bağıntı ile elde edilen sonuç ile karşılaştırıldığında %0,65 hata oranı yakalanmıştır (Çizelge 6.2).

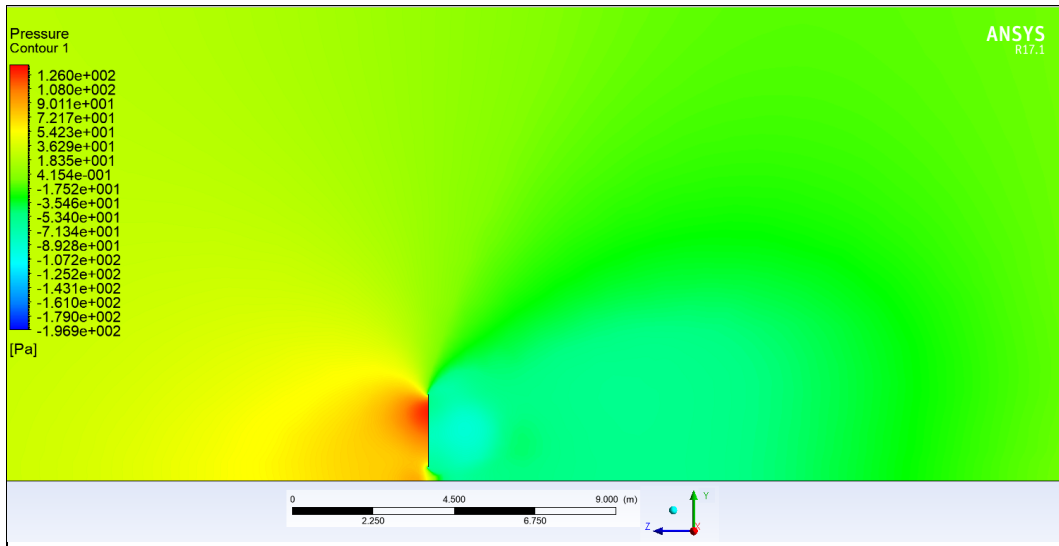
Çizelge 6.2. Dik akış durumu için sayısal analiz sonucunda elde edilen katsayı değerleri

	Basınç Katsayısı	Kayma Katsayısı	Toplam Direnç Katsayısı
15 m/s	1,234	$6,614 \times 10^{-5}$	1,234
18 m/s	1,234	$6,103 \times 10^{-5}$	1,234

Her iki rüzgâr hızında da aynı direnç katsayı değerinin gelmesi, akışkanın hareket yönüne dik olarak yerleştirilmiş akış problemlerinde direnç katsayısının Reynolds sayısına ve dolayısıyla rüzgâr hızına bağlı olmadığını, daha çok cismin geometrisine bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca analiz sonucunda kayma katsayısının toplam direnç katsayısına etkisinin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu ve toplam direnç katsayısının sadece basınç katsayısından oluştuğu doğrulanmıştır.



Şekil 6.9. Dik akış durumu doğrulama çalışması için elde edilen akış çizgileri



Şekil 6.10. Dik akış durumu doğrulama çalışması için elde edilen basınç konturu

Simülasyon sonucunda oluşturulan akış çizgileri ve basınç konturu ise sırasıyla Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Güneş panellerinin uç noktalarında havanın panelden ayrıldığı

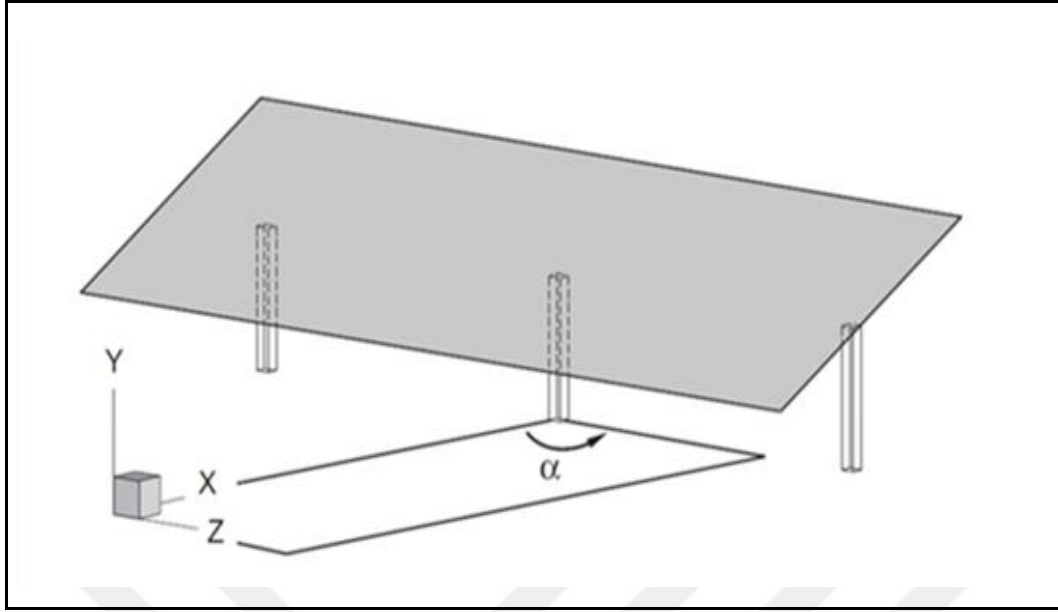
ve bu bölgelerde yüksek hızların oluştuğu görülmüştür. Güneş panellerinin ön tarafında basınç kuvvetinden kaynaklı yüksek direnç kuvvetlerinin oluştuğu, arka tarafında ise düşük basınçların meydana geldiği ve oluşan bu basınç farklılığından dolayı panellerin arka tarafında sürekli donanımlı ve geriye doğru akışların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Deneysel doğrulama çalışmasında basınç veya kayma kuvvetlerinin direnç katsayısı değerinde tek başına etkin olduğu iki özel akış durumuna bakılmıştır. Çalışma sonucunda maksimum hata oranı dik akış durumunda oluşmuştur ve %0,65 gelmiştir. Maksimum hata oranının ihmal edilebilecek kadar düşük gelmesi, oluşturulan akış alanının gerçeğe uygun olduğunu, oluşturulan ağ yapısının çözümde doğru yakınsama sağladığını ve kullanılan sayısal çözüm yönteminin doğruluğunu göstermektedir. Bu yüzden Bölüm 4'te sunulan sayısal metodoloji, parametrik sayısal analiz çalışmalarında kullanılabilir.

6.2. Literatür Doğrulaması

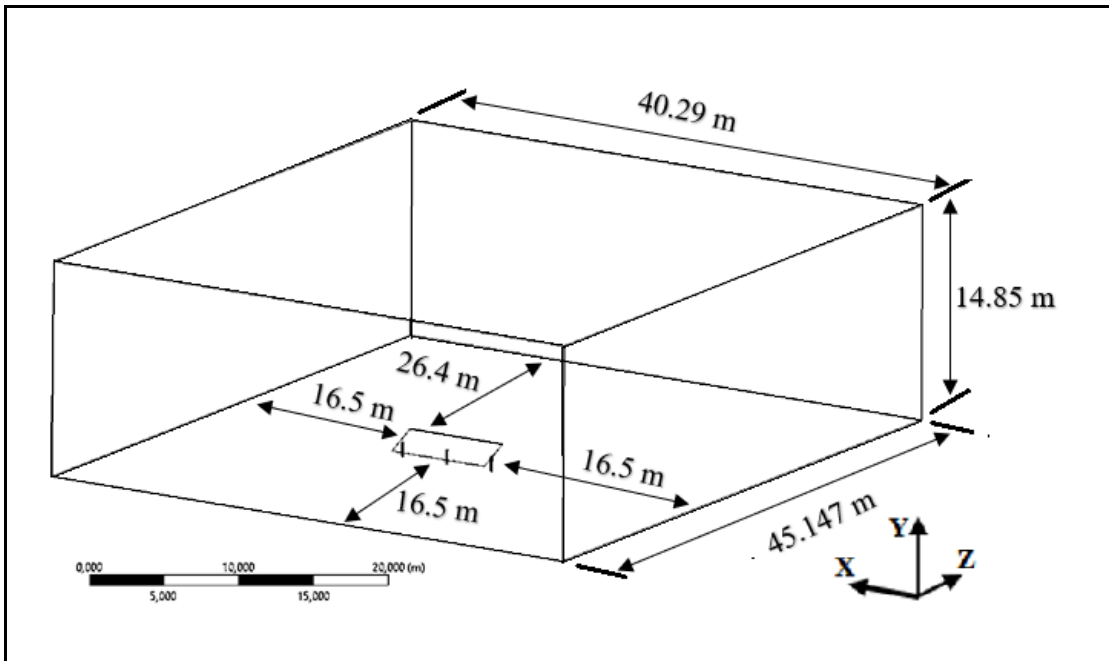
Literatür doğrulaması için mevcut çalışma ile benzerlik gösteren ve güneş panelleri üzerindeki rüzgâr akışının sayısal analizi üzerine yapılan çalışma ele alınmıştır. Bu amaçla Jubayer ve Hangan (2014) tarafından gerçekleştirilen sayısal analiz çalışması dikkate alınmış ve çalışmanın doğruluğunu desteklemek amaçlanmıştır. Jubayer ve Hangan'ın sayısal çalışmaları sonucunda elde etmiş olduğu aerodinamik ve basınç katsayı değerleri, HAD yaklaşımı için oluşturulmuş sayısal analiz metotları kullanılarak elde edilen katsayı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Jubayer ve Hangan, zemine monteli güneş panellerinin üzerindeki rüzgâr yüklerini incelemek amacıyla 26 m/s rüzgâr hızını ele alarak sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında ele aldığı güneş panelleri, yatayda 4 ve dikeyde 6 panel dizilimine sahip olmak üzere toplamda 24 panelden oluşmaktadır. Güneş panellerinin eğim açısı 25° ve panellerin en üst noktasından zemine olan mesafe 1,65 m olacak şekilde sabitlenmiştir. Toplamda 2,48 m x 7,29 m boyutlarındaki güneş panellerinin altına eşit aralıklarla 3 tane destek kolunu yerleştirilmiştir. Sayısal analizler 5 farklı rüzgâr hücum açısına göre gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hücum açıları 0° ile 180° arasında olup 45° aralıklarla değişmektedir [8]. Literatür çalışmasında kullanılan sayısal geometrinin ve rüzgâr hücum açısının temsili gösterimi Şekil 6.11'de verilmiştir.

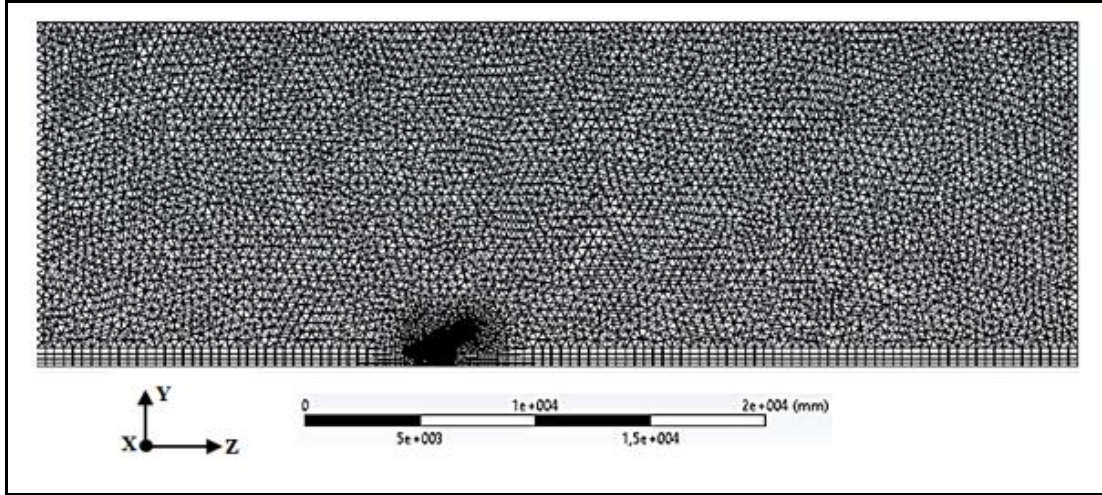


Şekil 6.11. Literatür doğrulamasında kullanılan geometrik model [8]

Jubayer ve Hangan'ın çalışmalarında oluşturdukları örnek geometri doğrudan alınmıştır ve Bölüm 4'te sunulan akış modeli, sınır şartları ve çözüm yöntemleri kullanılarak sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmasında akışkan olarak hava seçildiği için sayısal analiz esnasında, yoğunluk (ρ) $1,225 \text{ kg/m}^3$ olarak seçilmiştir. Sayısal analiz esnasında oluşturulan 0° rüzgâr hücum açısındaki akış alanı geometrisi ve ağ yapısı sırasıyla Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Literatür doğrulaması için oluşturulan akış alanı

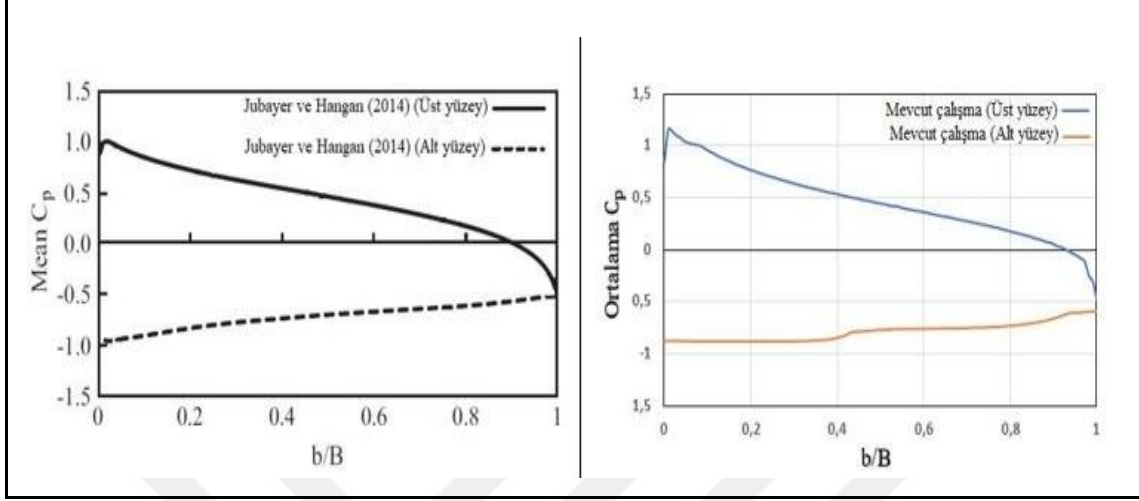


Şekil 6.13. Literatür doğrulaması için oluşturulan ağ yapısı

Akış alanı geometrisinde, güneş panellerinin en tepe noktasından zeminine olan uzaklık (C) 1,65 m'dir. Bu yüzden akış alanı üst yüzeyi ile güneş panellerinin tepe noktası arasındaki mesafe (8C) 13,2 m, güneş panellerinin yan yüzeyleri ile akış alanı yan yüzeyleri arasındaki mesafe (10C) 16,5 m, hava akışının giriş yaptığı akış alanı giriş yüzeyi ile güneş panellerinin ön kenarı arasındaki mesafe (10C) 16,5 m ve hava akışının çıkış yaptığı akış alanı çıkış yüzeyi ile güneş panellerinin arka kenarı arasındaki mesafe (16C) ise 26,4 m alınmıştır. Yaklaşık 4,6 milyon hücreli çözüm ağının kullanıldığı akış alanı, bozuk elemanlar yönünden incelendiğinde ise maksimum çarpıklık faktörü yaklaşık 0,80 olarak görülmüştür.

Sayısal analiz sonucunda öncelikli olarak güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları incelenmiştir. Bu amaçla 0° rüzgâr hücum açısı için panellerin üst ve alt yüzeylerinde meydana gelen ortalama basınç katsayı (C_p) değerleri, panellerin orta çizgisi boyunca elde edilmiş ve literatür çalışması ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.14). Şekil 6.14'te B parametresi güneş panelinin boyunu, b parametresi ise panelin ön kenarından arka kenarı boyunca olan mesafeyi ifade etmektedir. Şekil 6.14'e bakıldığında, maksimum basınç değerinin güneş panellerinin ön kenarında oluştuğu ve arka kenara doğru gidildikçe bu değer düşüğü görülmektedir. Ayrıca sayısal analiz sonucunda elde edilen ortalama basınç katsayı dağılım grafiğinin literatür çalışması ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Panel üst yüzeyleri için elde edilen dağılım değerlerinin literatür çalışması ile oldukça yakın olduğu, panel alt yüzeyleri için elde edilen dağılım değerlerinde ise literatür çalışmasına göre bir miktar sapma oluştuğu görülmektedir. Bu sapma miktarı kabul edilebilir bir boyutta olup, akış

denklemlerini çözmek için farklı araçların, parametre değerlerinin ve çözüm yöntemlerinin kullanılması nedeniyle ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 6.14. 0° rüzgâr yönü için panel yüzeylerinin orta çizgisi boyunca ortalama C_p grafiği

Sayısal analiz sonucunda 0° rüzgâr hücum açısı için direnç ve kaldırma katsayı değerleri sırasıyla 0,563 ve -1,22 gelmiştir. 180° rüzgâr hücum açısında elde edilen direnç ve kaldırma katsayı değerleri ise sırasıyla 0,645 ve 1,407 gelmiştir. Bu durumda maksimum %2,96 hata oranı ile literatür çalışmasının doğruluğu desteklenmiştir. Güneş panellerinin rüzgârın akış yönüne eğimli şekilde yerleştirilmesi durumunda direnç kuvvetinin yanında kaldırma kuvvetinin de etkin olduğu görülmüştür. Ayrıca rüzgârın arkadan esmesi durumunda elde edilen aerodinamik katsayı değerlerinin, rüzgârın önden esmesi durumunda elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Aerodinamik katsayı değerlerinin karşılaştırılması

	0° Rüzgâr hücum açısı		180° Rüzgâr hücum açısı	
	C_D	C_L	C_D	C_L
Jubayer ve Hangan (2014)	0,57	-1,24	0,66	1,45
Mevcut çalışma	0,563	-1,22	0,645	1,407
Hata oranı	-% 1,23	-% 1,6	-% 2,27	-% 2,96

7. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Bu bölümde, güneş panellerinin eğim açısı, rüzgârın hücum açısı, rüzgârın şiddeti ve kolonların zeminden olan yüksekliği değişken parametreler olarak ele alınmış ve rüzgâr yüklerinin güneş takip sistemi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Bölüm 3.2’de belirtilen güneş takip sistemi prototip modelin parametrik sayısal çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikli olarak güneş panelleri üzerindeki havanın akışı ince, düz bir plaka üzerindeki akış olarak karakterize edilmiş ve Bölüm 4’te HAD yaklaşımı için sunulan SST $k-\omega$ türbülans modeli ile sonlu hacimler metodu kullanılarak tüm değişkenler için güneş panelleri üzerindeki aerodinamik ve basınç katsayıları incelenmiştir. Sonrasında güneş panelleri üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin güneş takip sistemini oluşturan yapılara etkilerini incelemek amacıyla Bölüm 5’te SEY yaklaşımı için sunulan metodolojiler kullanılarak güneş takip sistemini oluşturan güneş panellerindeki ve metal taşıyıcılardaki gerilim ve deplasman değerleri incelenmiştir. Güneş panelleri üzerindeki basınç dağılım değerleri, Ansys akışkan-yapı etkileşimi paket programındaki sistem bağlantısı (system coupling) modülü kullanılarak sonlu elemanlar modeline aktarılmış ve güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır. Ayrıca sistem bağlantısı modülü sayesinde akış ve yapısal analizlerin eş zamanlı çözümleri gerçekleştirilmiştir.

Sayısal analizler, Intel Core i7 2,60 GHz işlemcili, 16 GB DDR4 donanım özelliğine sahip bilgisayar kullanılarak ANSYS Fluent R17,1 Windows 10 versiyonu ile gerçekleştirilmiştir ve sayısal çalışmalarda kullanılan değişkenler aşağıdaki gibidir;

Güneş panellerinin eğim açısı (α_p): 15°, 30°, 45° ve 60°

Rüzgâr hücum açısı (α_r): 0° ve 180°

Serbest akım hızı (V_{ref}): 15 m/s ve 18 m/s

Kolonların zemine olan yüksekliği (H_k): 1,1 m ve 1,3 m.

Parametrik çalışma esnasında akış ve yapısal analiz problemleri için aşağıdaki kabuller göz önünde bulundurulmuştur.

1. Atmosferik ortamı temsil etmek amacıyla akışkan türü olarak hava seçilmiştir.

2. Akış alanı içerisinde hareket eden havanın yoğunluğundaki değişimin ihmal edilebilir olduğu düşünülerek, akışkan sıkıştırılmaz olarak ele alınmıştır.
3. Akış alanı içinde bir noktadaki havanın, özelliklerinin zaman içerisinde değişmediği kabul edilerek sürekli akış durumu düşünülmüştür.
4. Akış modeli için türbülans akış koşulu tanımlanmıştır.
5. Sisteme etki eden yük ve sınır şartlarının zamana bağlı olarak değişmediği düşünülerek statik analiz türü seçilmiştir.
6. Sisteme etki eden yükün elastik sınırlar içerisinde kaldığı düşünülerek lineer analiz türü ele alınmıştır.

Parametrik çalışma kısmında öncelikli olarak güneş panelleri ince, düz bir plaka olarak karakterize edilip, parametrik değişkenler ele alınarak sayısal akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir ve güneş panelleri üzerindeki rüzgâr yüklerinin etkileri incelenmiştir.

Doğrulama çalışması bölümünde iki özel durum için yapılan çalışmayı göz önünde bulundurursak, güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne paralel olacak şekilde yerleştirilmesi ile elde edilen direnç katsayı değerleri minimum değerlerdir ve esasen güneş panellerinin eğim açısının 0° olması durumunda gerçekleştirilen parametrik çalışmayı temsil etmektedir. Güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmesi ile elde edilen direnç katsayı değerleri ise maksimum değerlerdir ve esasen güneş panellerinin eğim açısının 90° olması durumunda gerçekleştirilen parametrik çalışmayı ifade etmektedir. Bu yüzden parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen direnç katsayı değerleri, doğrulama çalışması bölümünde iki özel durum için elde edilen değerler arasında gelmesi gerekmektedir. Bu durumda 15 m/s rüzgâr hızında gerçekleştirilen akış analizleri sonucunda elde edilen direnç katsayı değerleri

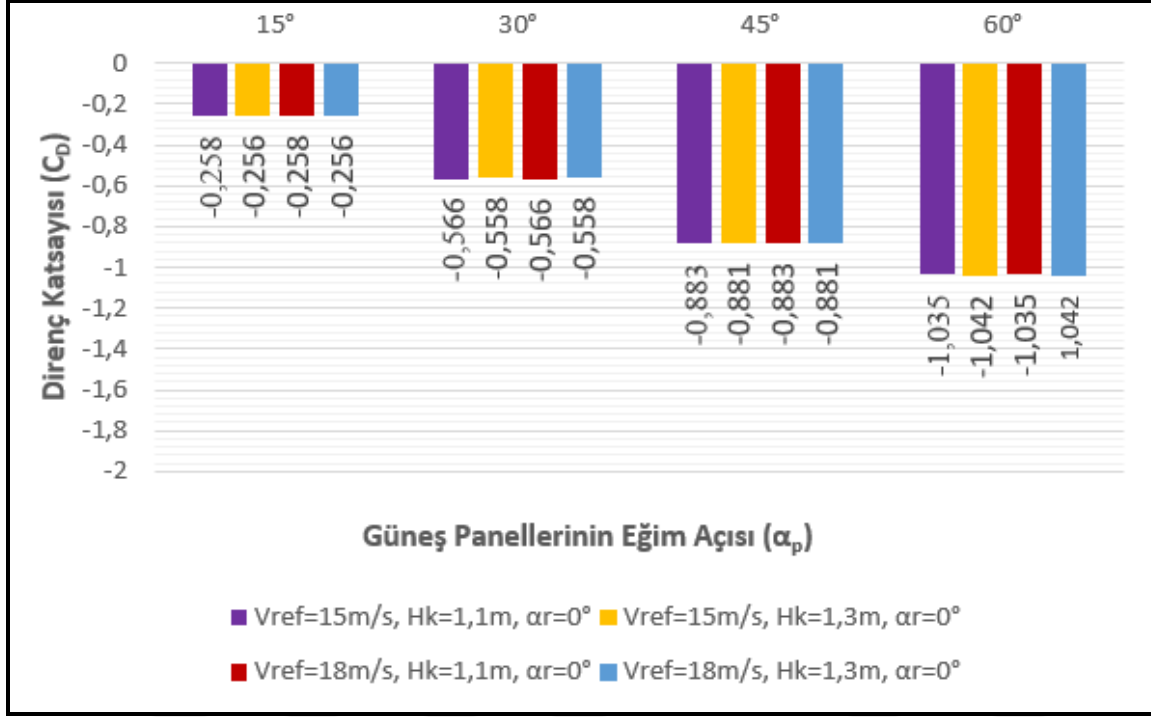
$$0,004 < C_{D_{\text{parametrik}}} < 1,226$$

18 m/s rüzgâr hızında gerçekleştirilen akış analizleri sonuçlarında ise direnç katsayı değerleri

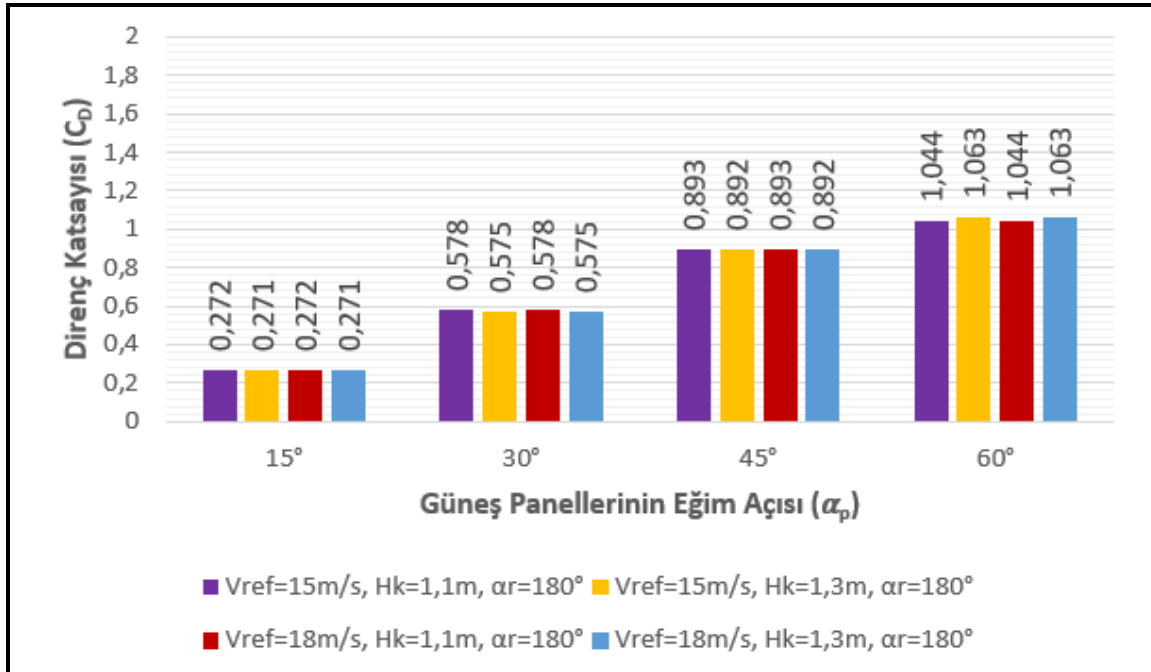
$$0,0039 < C_{D_{\text{parametrik}}} < 1,226$$

olmalıdır.

Akış analizleri sonucunda direnç katsayı değerleri tüm değişkenler için HAD yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açıları için sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



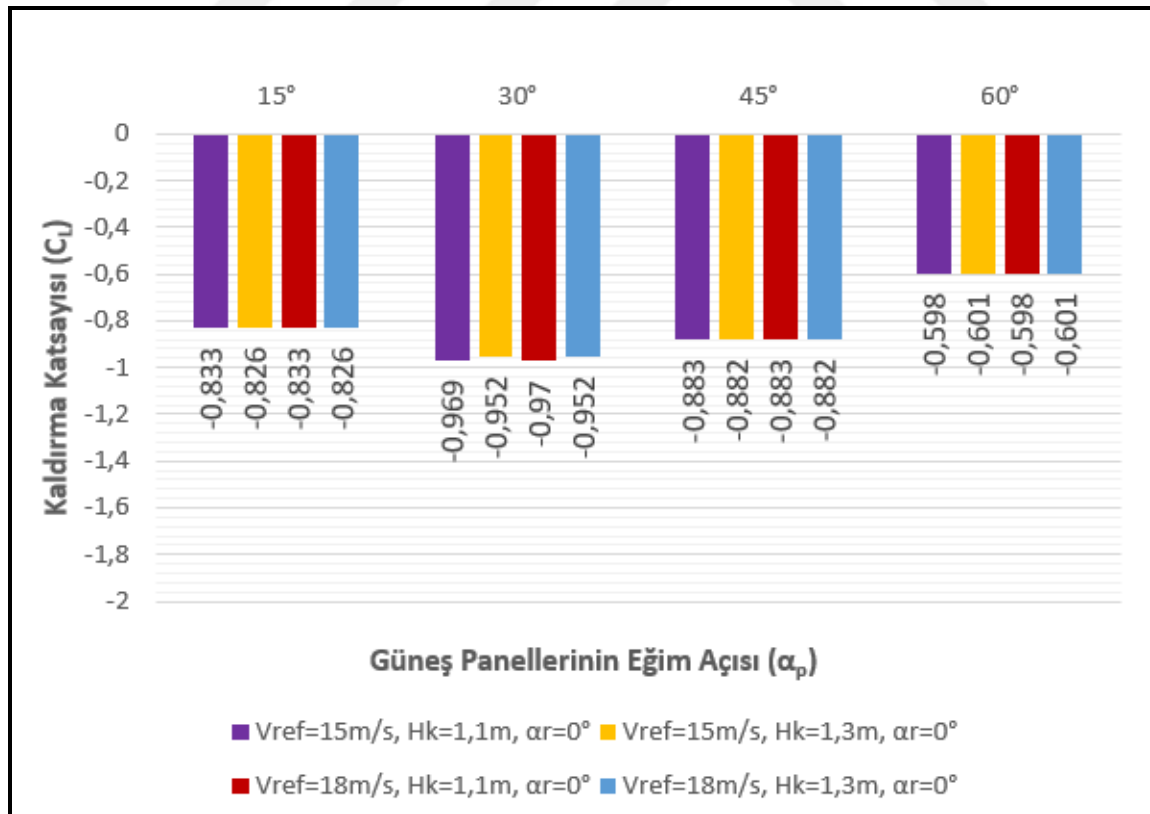
Şekil 7.1. 0° rüzgâr hücum açısı için direnç katsayı değerleri



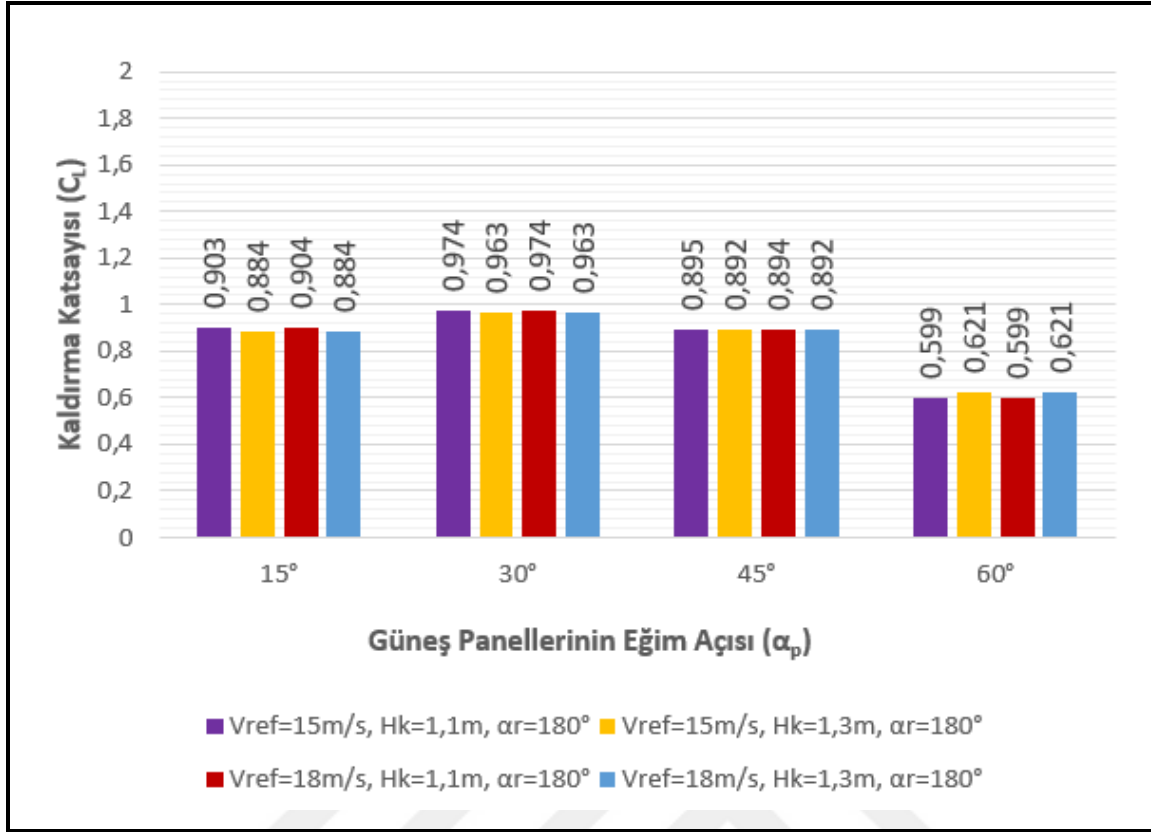
Şekil 7.2. 180° rüzgâr hücum açısı için direnç katsayı değerleri

Direnç katsayı değerlerinin negatif olması, rüzgârın akışkan modelinde oluşturulan koordinat ekseninin (Bkz. Şekil 4.1) tersi yönünde (-z) hareket ettiğini göstermektedir. Oluşturulan direnç katsayı grafiklerine bakıldığında rüzgârın önden esmesi durumunda (0° rüzgâr hücum açısında) maksimum direnç katsayı değeri 60° eğim açısında -1,042, minimum direnç katsayı değeri ise 15° eğim açısında -0,256 gelmiştir. Rüzgârın arkadan esmesi durumunda (180° rüzgâr hücum açısında) ise maksimum direnç katsayı değeri 60° eğim açısında 1,063, minimum direnç katsayı değeri ise 15° eğim açısında 0,271 gelmiştir. Parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen maksimum ve minimum direnç katsayılarının doğrulama çalışması sonucunda oluşturulan direnç katsayı aralığında geldiği görülmektedir.

Aynı şekilde, kaldırma katsayı değerleri tüm değişkenler için HAD yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açıları için sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Kaldırma katsayı değerlerinin negatif olması, güneş panelleri üzerindeki kaldırma kuvvetinin baskı etkisinde olduğunu gösterir. Pozitif değer ise kuvvetin güneş panellerini kaldırmaya çalıştığını göstermektedir.



Şekil 7.3. 0° rüzgâr hücum açısı için kaldırma katsayı değerleri



Şekil 7.4. 180° rüzgâr hücum açısı için kaldırma katsayı değerleri

Oluşturulan kaldırma katsayı grafiklerine bakıldığında rüzgârın önden esmesi durumunda (0° rüzgâr hücum açısında) maksimum kaldırma katsayı değeri 30° eğim açısında -0,97, minimum kaldırma katsayı değeri ise 60° eğim açısında -0,598 gelmiştir. Rüzgârın arkadan esmesi durumunda (180° rüzgâr hücum açısında) ise maksimum kaldırma katsayı değeri 30° eğim açısında 0,974, minimum kaldırma katsayı değeri ise 60° eğim açısında 0,599 gelmiştir.

Parametrik çalışma sonucunda elde edilen direnç ve kaldırma katsayıları birlikte incelendiğinde;

1. Rüzgâr hızının ve kolonların zeminden olan yüksekliğinin (güneş panellerinin yerden yüksekliğinin) aerodinamik katsayıları etkisi oldukça düşüktür. Rüzgârın önden ve arkadan esmesi durumlarında kolonların zeminden olan yüksekliğinin artması ile direnç ve kaldırma katsayıları düşmektedir. Güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne eğimli bir şekilde yerleştirilmesiyle elde edilen sonuçlar doğrultusunda ise rüzgâr hızlarının aerodinamik katsayıları etkisi ihmal edilebilir.

2. Rüzgârın arkadan esmesi durumunda (180° rüzgâr hücum açısında) oluşan direnç ve kaldırma katsayılar, rüzgârın önden esmesi durumunda (0° rüzgâr hücum açısında) oluşan aerodinamik katsayılardan yüksektir. Yani 180° rüzgâr hücum açısının aerodinamik katsayılarına etkisi daha kritiktir.

3. Aerodinamik katsayılara etki eden en önemli değişken güneş panellerinin eğim açısıdır. Tüm simülasyon durumlarında eğim açısının artmasıyla direnç katsayı değerleri artmaktadır. Kaldırma katsayı değerleri ise 30° 'ye kadar artmakta, 30° 'den sonra ise düşüş göstermektedir. Aerodinamik katsayıların güneş panelleri üzerindeki etkileri kıyaslandığında ise aşağıdaki gibi özetlenebilir;

$\alpha_p \leq 45^\circ$ durumunda kaldırma katsayıları daha baskındır.

$\alpha_p = 45^\circ$ durumunda direnç ve kaldırma katsayılarının etkisi aynıdır.

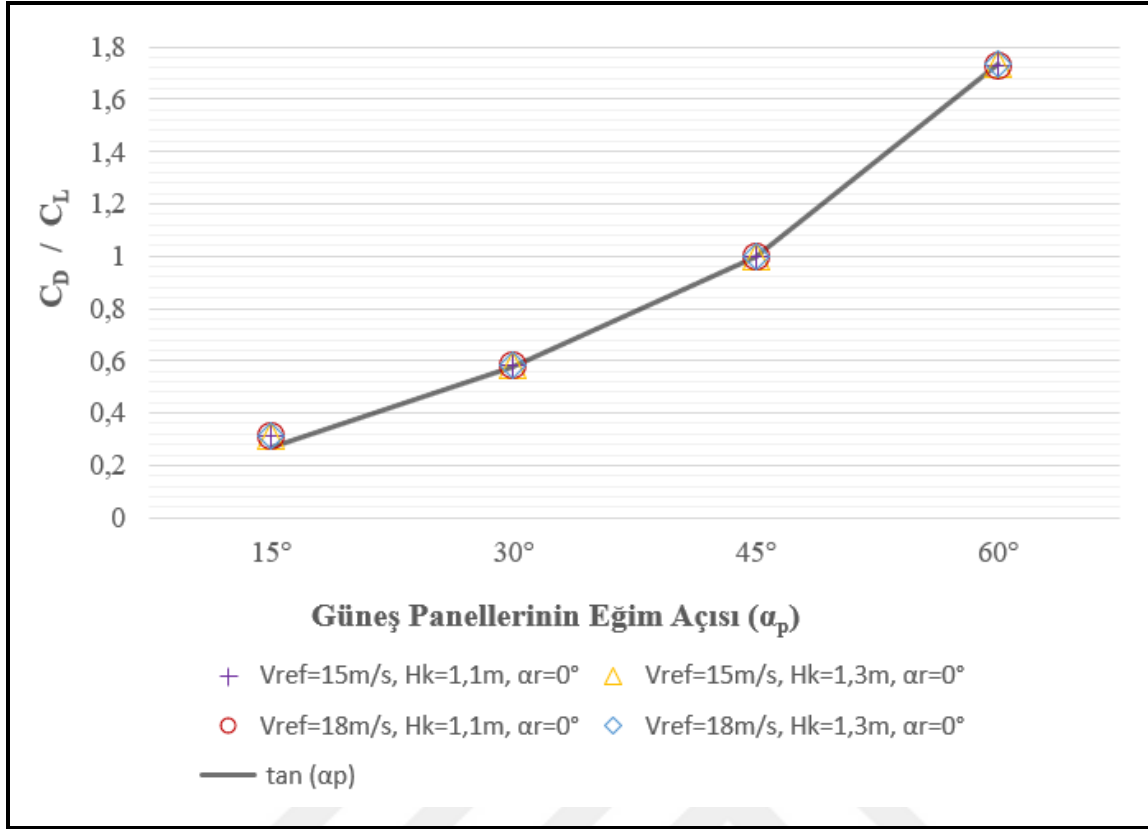
$\alpha_p \geq 45^\circ$ durumunda direnç katsayıları daha baskındır.

3. madde de belirtilen durumların temel sebebi Bölüm 4'te verilen Eş. 4.33 ve Eş. 4.34 kullanılarak aşağıdaki bağıntı ile açıklanabilir.

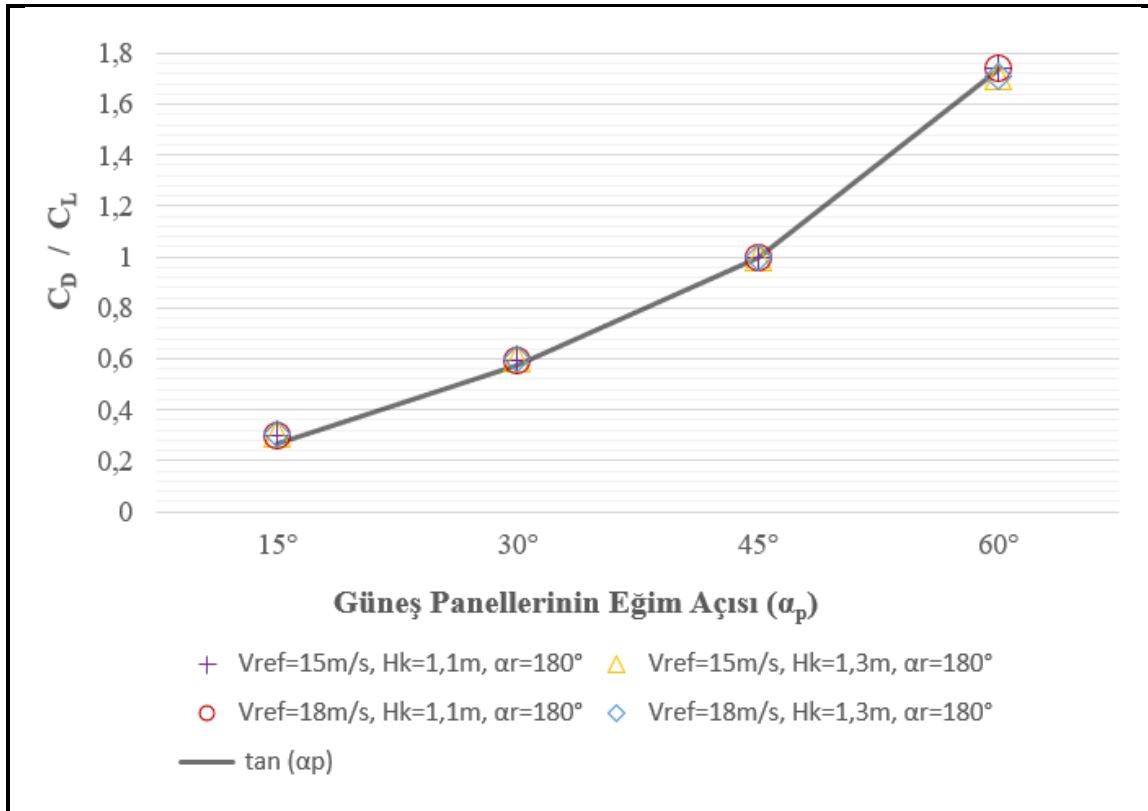
$$\frac{F_D}{F_L} = \frac{F_R \sin \alpha_p}{F_R \cos \alpha_p} = \tan \alpha_p \quad (7.1)$$

Eş. 7.1 güneş panelleri üzerinde oluşan direnç kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı, güneş panellerinin eğim açısının tanjantına eşit olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla eğim açısının 45° olması durumunda tanjant değeri 1 gelmektedir ve direnç ile kaldırma katsayı değerlerinin eşit gelmesi gerekir. Eğim açısının 45° 'den büyük olması durumunda ise tanjant değeri 1'den büyük gelir ve bu durumda direnç katsayı değeri kaldırma katsayı değerinden daha büyük gelmesi gerekir. Bu yüzden Eş. 7.1, güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne eğimli yerleştirilmesi durumunda kullanabilecek bir bağıntı olarak ele alınabilir.

Eş. 7.1'de belirtilen bağıntının kullanılabilirliğini kıyaslamak amacıyla rüzgârın önden ve arkadan esmesi durumlarındaki parametrik çalışmalarda elde edilen direnç katsayısının kaldırma katsayısına oranları, güneş panellerinin eğim açısına göre sırasıyla Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.5. 0° rüzgâr hücum açısı için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği



Şekil 7.6. 180° rüzgâr hücum açısı için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'ya bakıldığında C_D/C_L oranı, 15° eğim açısında bir miktar sapma göstermektedir. Bu durum, 15° eğim açısında güneş panelleri üzerindeki kayma kuvveti etkisinin bir miktar görüldüğünü göstermektedir. Diğer tüm eğim açılarında ise C_D/C_L oranının, güneş panellerinin eğim açısının tanjantına eşit olduğu görülmektedir. Bu durum, güneş panelleri üzerinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin kayma kuvvetinden ziyade basınç kuvveti etkisinde olduğunu göstermektedir.

Güneş panellerinin sayısal akış analizi çalışmaları sonucunda, türbülanslı akış durumunda ve eğimli açılarda güneş panellerine etkileyen basınç kuvvetinin baskın olmasından dolayı Reynolds sayısının ve dolayısıyla rüzgâr hızlarının aerodinamik katsayılara etkisinin ihmal edilebilecek kadar düşük olduğu belirlenmiştir. Aerodinamik katsayıların esasen analizi yapılan cismin geometrisine ve akış alanına konumlandırılmasına bağlı olduğu görülmüştür. Bu yüzden güneş panellerinin eğim açısı aerodinamik katsayıları etkileyen en önemli değişken parametredir.

Ayrıca güneş panellerinin en boy oranının da aerodinamik katsayılara etkisinin yüksek olduğu öngörülmüştür. Bu yüzden güneş panellerinin en boy oranı ile eğim açıları değişken parametreler olarak ele alınarak, rüzgâr hızının 15 m/s, kolon yüksekliğinin 1,1 m ve rüzgâr hücum açısının 0° olması durumunda akış analizleri gerçekleştirilmiş ve paneller üzerindeki aerodinamik katsayılar incelenmiştir. Güneş panellerinin en boy oranı 1, 2, 4, 6 ve 7,2 olarak ele alınmıştır. Güneş panellerinin eğim açısı ise 15° , 30° , 45° , 60° ve 90° olarak ele alınmıştır. Sayısal çalışmalar esnasında, parametrik çalışmaya benzer şekilde güneş panellerinin akış analizi dış akış problemleri olarak ele alınmıştır ve güneş panelleri ince, düz bir plaka olarak düşünülmüştür.

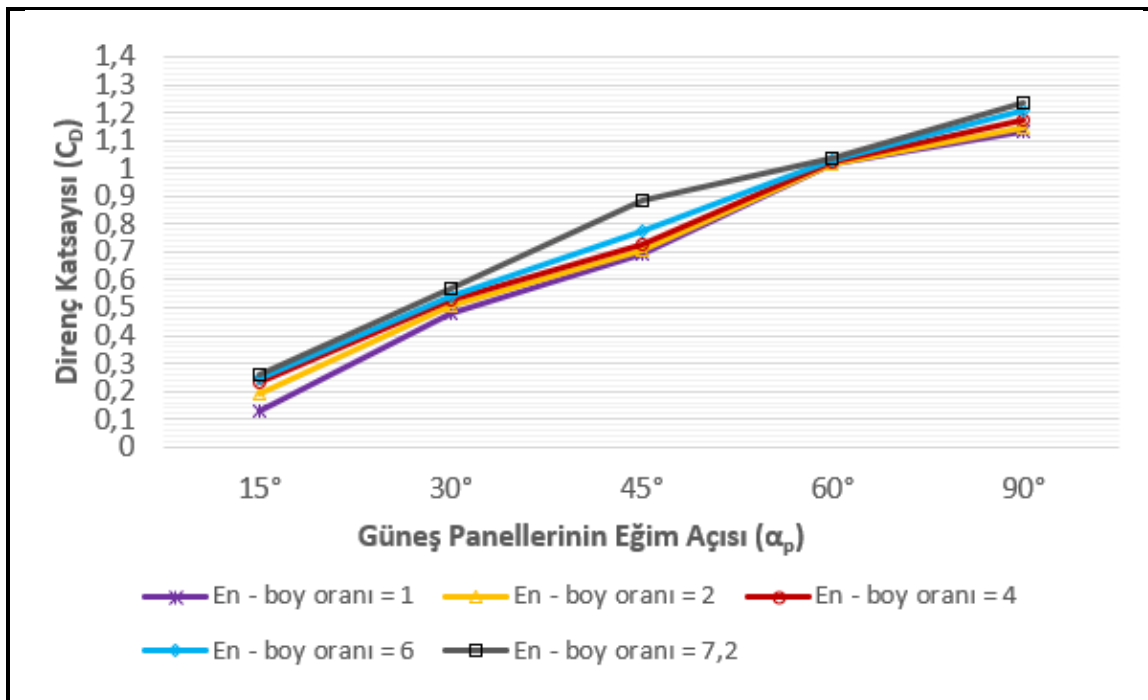
Çizelge 7.1. Güneş panellerinin en boy oranına bağlı olarak direnç katsayı değerleri

En-boy oranı	Güneş panellerinin eğim açısı (α_p)				
	15°	30°	45°	60°	90°
1	-0,127	-0,483	-0,695	-1,014	-1,135
2	-0,194	-0,504	-0,705	-1,016	-1,145
4	-0,234	-0,529	-0,729	-1,024	-1,17
6	-0,249	-0,542	-0,776	-1,029	-1,21
7,2	-0,258	-0,566	-0,883	-1,035	-1,234

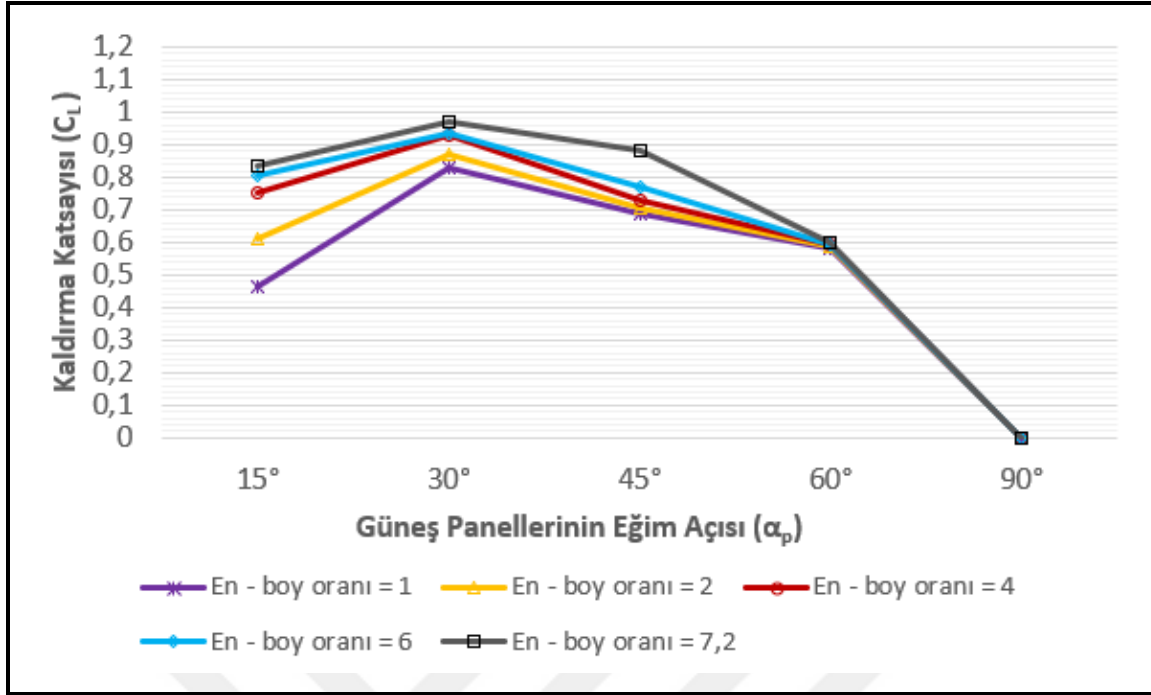
Çizelge 7.2. Güneş panellerinin en boy oranına bağlı olarak kaldırma katsayısı değerleri

En-boy oranı	Güneş panellerinin eğim açısı (α_p)				
	15°	30°	45°	60°	90°
1	-0,467	-0,828	-0,690	-0,582	0
2	-0,610	-0,872	-0,706	-0,588	0
4	-0,753	-0,928	-0,727	-0,592	0
6	-0,803	-0,936	-0,773	-0,596	0
7,2	-0,833	-0,969	-0,883	-0,598	0

Güneş panellerinin en boy oranının aerodinamik katsayılar etkisini görmek amacıyla yapılan akış analizleri sonucunda güneş panelleri üzerinde oluşan direnç ve kaldırma katsayıları sırasıyla Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de sunulmuştur. Genel olarak en boy oranının artması ile direnç ve kaldırma katsayısı değerleri artmaktadır (Şekil 7.7 ve Şekil 7.8). Ayrıca en boy oranının kaldırma katsayısına etkisi daha yüksek çıkmıştır. Eğim açısına benzer şekilde, güneş panellerinin en boy oranının aerodinamik katsayılar etkisi yüksek olmaktadır. Yani güneş takip sistemi tasarımı uygulamalarında güneş panellerinin yan yana sıralı dizilimi ne kadar fazla olursa panellerin en boy oranı artacağı için paneller üzerinde meydana gelecek aerodinamik katsayılar artış gösterecektir.

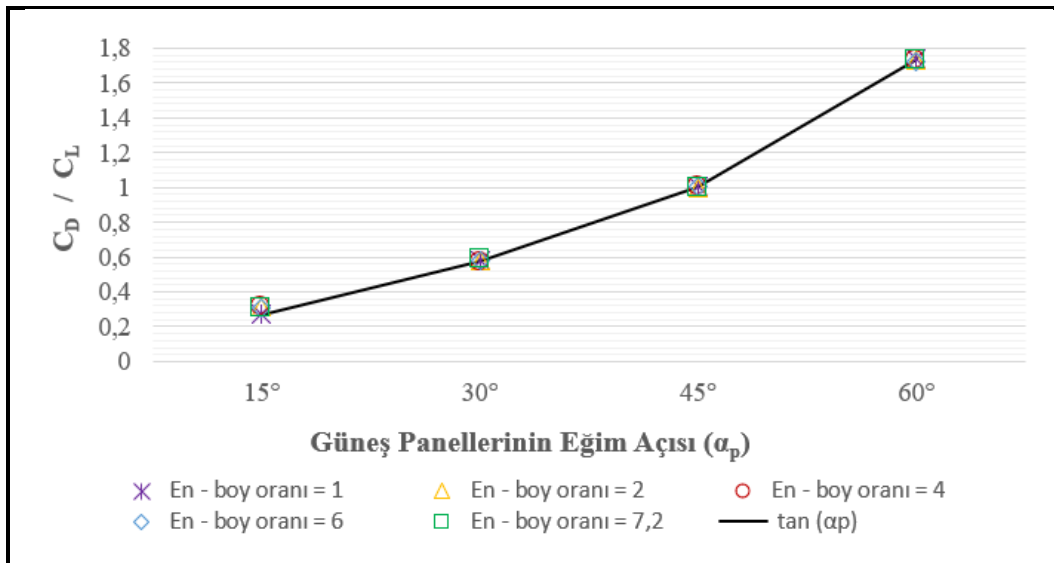


Şekil 7.7. En boy oranı ve eğim açısı değişkenlerine bağlı olarak direnç katsayısı değerleri



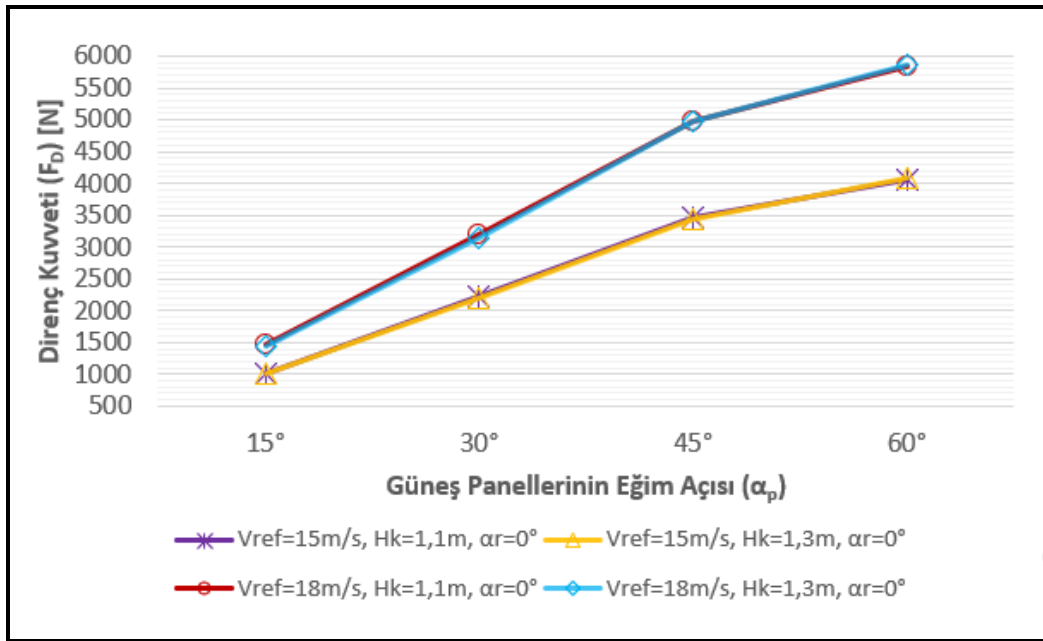
Şekil 7.8. En boy oranı ve eğim açısı değişkenlerine bağlı olarak kaldırma katsayısı değerleri

Şekil 7.8'e bakıldığında, $\alpha_p \leq 45^\circ$ olması durumunda en boy oranının kaldırma katsayılarına etkisi yüksek çıkmıştır. $\alpha_p > 45^\circ$ olması durumunda ise en boy oranının kaldırma katsayılarına etkisi giderek düşmektedir. Bu durum, kaldırma katsayısı değerlerinin $\alpha_p > 45^\circ$ için düşük gelmesi ile açıklanabilir. Ayrıca güneş panellerinin eğim açısı 90° (panellerin akış hareketine dik yerleştirilmesi durumu) iken paneller üzerinde kaldırma kuvveti oluşmayacağı için kaldırma katsayısı değerleri tüm en boy oranları için eşit ve sıfır olmaktadır.

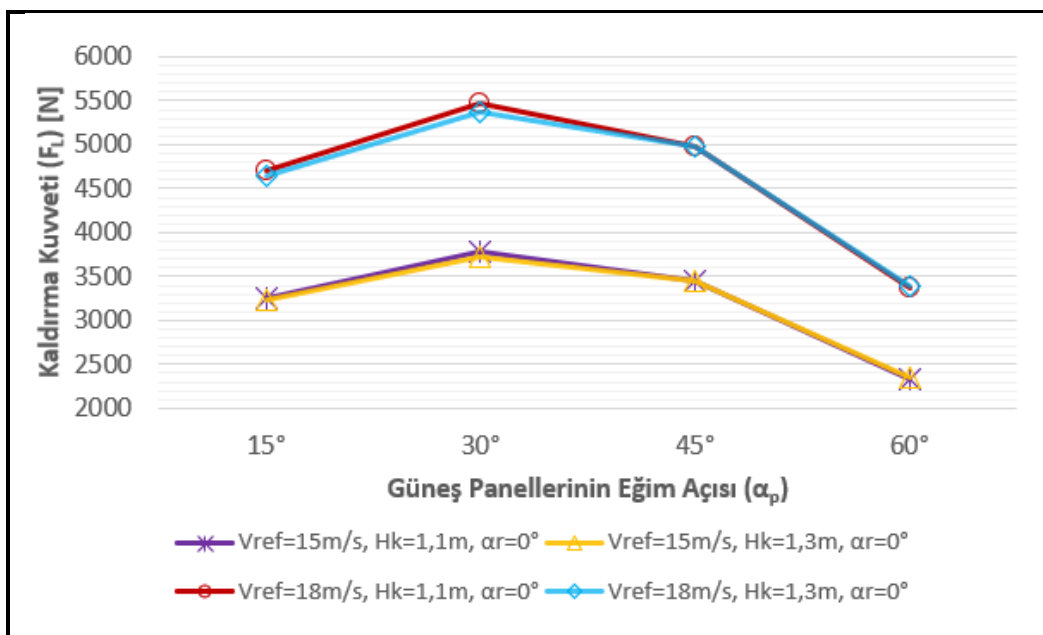


Şekil 7.9. En boy oranları için eğim açısına bağlı olarak C_D/C_L grafiği

Benzer şekilde Eş 7.1’de belirtilen bağıntı ile kıyaslamak amacıyla en boy oranları ile elde edilen direnç katsayıların kaldırma katsayılarına oranları, güneş panellerinin eğim açısına göre Şekil 7.9’da gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında C_D/C_L oranı, 15° eğim açısında bir miktar sapma göstermektedir. Bu durum, 15° eğim açısında güneş panelleri üzerindeki kayma kuvveti etkisinin bir miktar görüldüğünü göstermektedir. Diğer tüm eğim açılarında ise C_D/C_L oranının, güneş panellerinin eğim açısının tanjantına eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10. 0° rüzgâr hücum açısı için direnç kuvvetleri



Şekil 7.11. 0° rüzgâr hücum açısı için kaldırma kuvvetleri

HAD yöntemi ile gerçekleştirilen akış analizleri sonucunda güneş panelleri üzerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetler incelendiğinde (Şekil 7.10 ve Şekil 7.11);

1. Kolonların zeminden olan yükseklik değişkeninin aerodinamik kuvvetlere etkisi ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Güneş panellerinin eğim açısı ise aerodinamik katsayılar da olduğu gibi aerodinamik kuvvetleri etkileyen en önemli değişkenden birisidir. Güneş panellerinin eğim açısının artması ile direnç kuvvetleri sürekli artış göstermektedir.

2. Panel eğim açısı 0° iken panel yüzeyinde oluşan net kuvvet sadece kayma kuvvetinden oluşmaktadır ve kaldırma kuvveti oluşmadığı için direnç kuvveti net kuvvete eşittir. Panel eğim açısının artmasıyla kayma kuvvetinin net kuvvete etkisi azalmaktadır ve basınç kuvveti daha etkin duruma gelmektedir. Panel eğim açısının 90° olması durumunda ise panel yüzeyinde oluşan net kuvvet tamamen basınç kuvvetinden oluşmaktadır.

3. Aerodinamik katsayılar da elde edilen sonucun aksine, rüzgâr hızlarının aerodinamik kuvvetlere etkisi oldukça yüksektir. Aynı eğim açısında rüzgâr hızlarının artması ile direnç ve kaldırma kuvvetleri belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu durumun temel sebebi Bölüm 4'te verilen Eş. 4.36 ve Eş. 4.37 kullanılarak aşağıdaki bağıntılar ile açıklanabilmektedir.

$$F_D = 0,5 \rho V_{ref}^2 A C_D \quad (7.2)$$

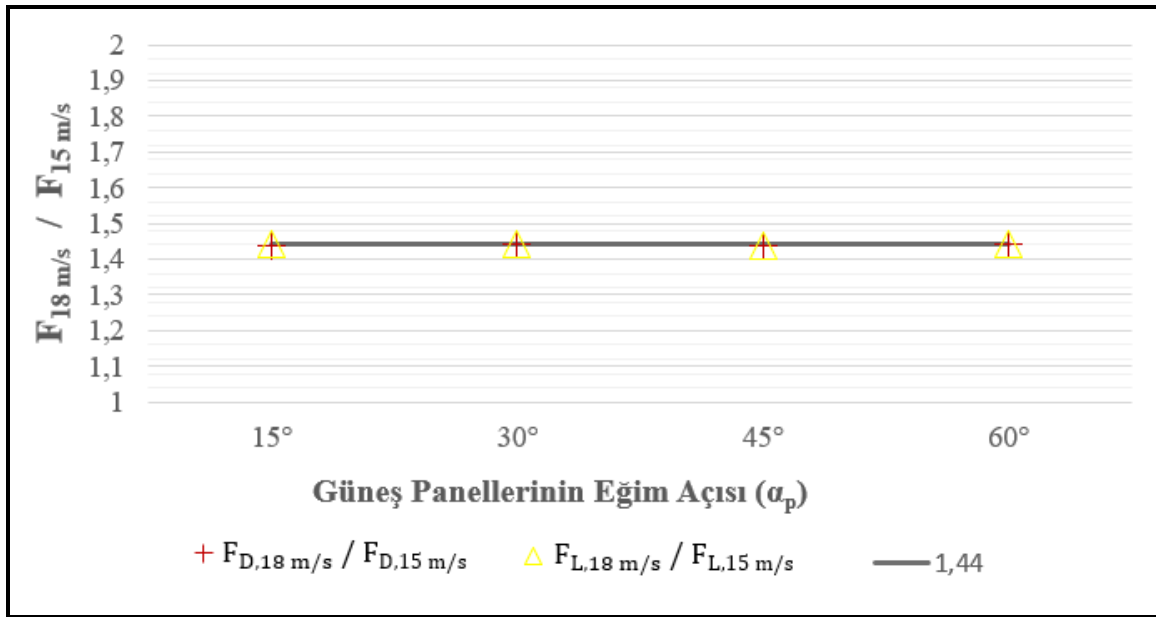
$$F_L = 0,5 \rho V_{ref}^2 A C_L \quad (7.3)$$

Güneş panellerinin eğim açısı ve geometrisi sabit tutulduğunda direnç ve kaldırma katsayı değerlerinin değişkenlik göstermediğini belirtmiştik. Bu durumda Eş. 7.2 ve Eş. 7.3'e bakıldığında direnç ve kaldırma kuvvetlerini etkileyen tek değişkenin rüzgâr hızı olduğu görülmektedir ve aerodinamik kuvvetler rüzgâr hızının karesi ile orantılı gelmektedir. Ayrıca aynı eğim açısında ve güneş panellerinin en boy oranında 18 m/s rüzgâr hızı için elde edilen aerodinamik kuvvetlerin 15 m/s rüzgâr hızında elde edilen kuvvetlere oranı aşağıdaki bağıntılar ile belirlenebilmektedir.

$$\frac{F_{D,18 \text{ m/s}}}{F_{D,15 \text{ m/s}}} = \frac{V_{ref,18 \text{ m/s}}^2}{V_{ref,15 \text{ m/s}}^2} = \frac{18^2}{15^2} = 1,44 \quad (7.4)$$

$$\frac{F_{L,18 \text{ m/s}}}{F_{L,15 \text{ m/s}}} = \frac{V_{\text{ref},18 \text{ m/s}}^2}{V_{\text{ref},15 \text{ m/s}}^2} = \frac{18^2}{15^2} = 1,44 \quad (7.5)$$

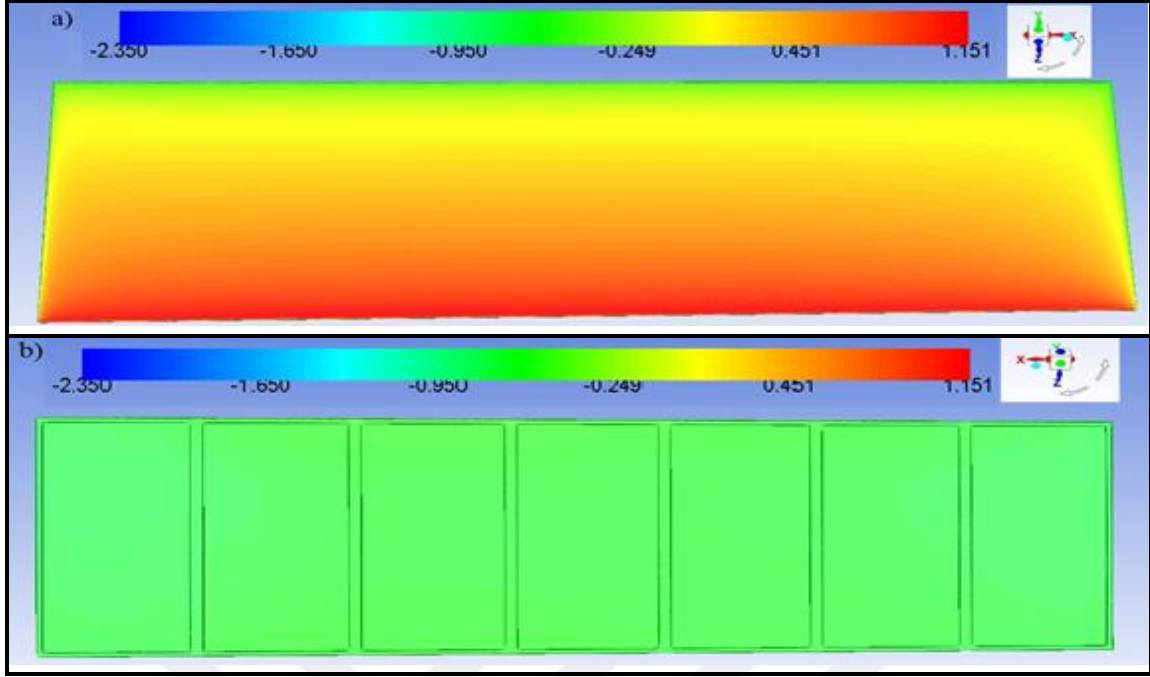
Eş. 7.4 ve Eş. 7.5'te belirtilen bağıntıları kıyaslamak amacıyla, 0° rüzgâr hücum açısında 18 m/s rüzgâr hızında elde edilen direnç ve kaldırma kuvvetlerinin 15 m/s rüzgâr hızında elde edilen kuvvetlere oranları, güneş panellerinin eğim açısına göre Şekil 7.12'de gösterilmiştir.



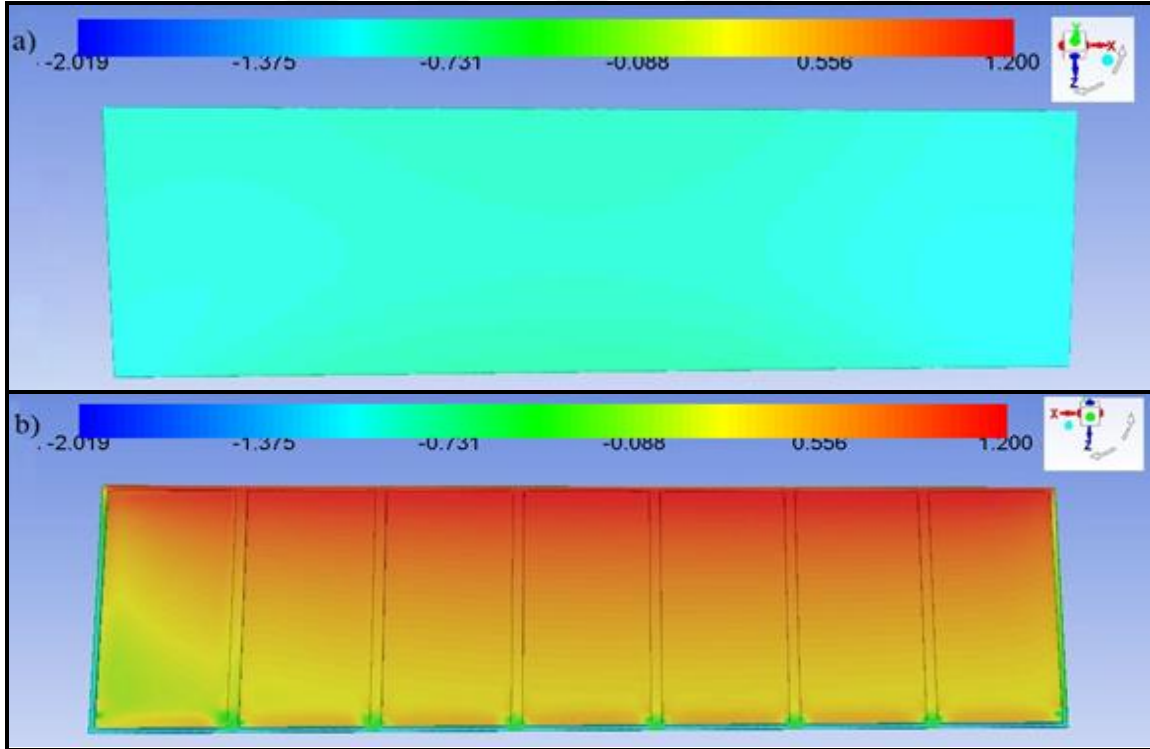
Şekil 7.12. Eğim açısına bağlı olarak 18 m/s ve 15 m/s rüzgâr hızlarındaki aerodinamik kuvvetlerin oranları

Şekil 7.12 incelendiğinde 18 m/s rüzgâr hızında elde edilen aerodinamik kuvvetlerin 15 m/s rüzgâr hızında elde edilen kuvvetlere oranı tüm eğim açılarındaki 1,44 eğrisi üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen aerodinamik kuvvetlerin, Eş. 7.4 ve Eş. 7.5'te belirtilen bağıntılarla örtüştüğünü göstermektedir.

Parametrik çalışmalar sonucunda güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımlarını görmek amacıyla güneş panellerinin üst ve alt yüzeylerinde basınç katsayısı (C_p) dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Dağılım grafiklerini incelemek amacıyla örnek olarak eğim açısının 30°, rüzgâr hızının 18 m/s ve kolon yüksekliğinin 1,1 m alındığında, 0° ve 180° rüzgâr hücum açıları için oluşturulan basınç katsayısı dağılımları sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'te gösterilmiştir. Parametrik çalışma sonucunda tüm değişkenler için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri ise EK-1'de sunulmuştur.



Şekil 7.13. $H_k=1,1\text{m}$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18\text{m/s}$ için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey



Şekil 7.14. $H_k=1,1\text{m}$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18\text{m/s}$ için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

Basınç katsayı dağılımları, güneş panellerinin x eksenindeki orta düzlemine göre simetrik yayılmaktadır. Rüzgârın önden esmesi durumunda güneş panellerinin üst yüzeyindeki basınç değerleri alt yüzeydekilere göre yüksektir. Güneş panellerinin üst yüzeyinin alt kenarında

maksimum basınç meydana gelmiştir ve üst kenarına doğru gidildikçe basınç azalmıştır. En düşük basınç değerleri ise panellerin yan kenarında ve alt yüzeyin üst kenarında meydana gelmiştir.

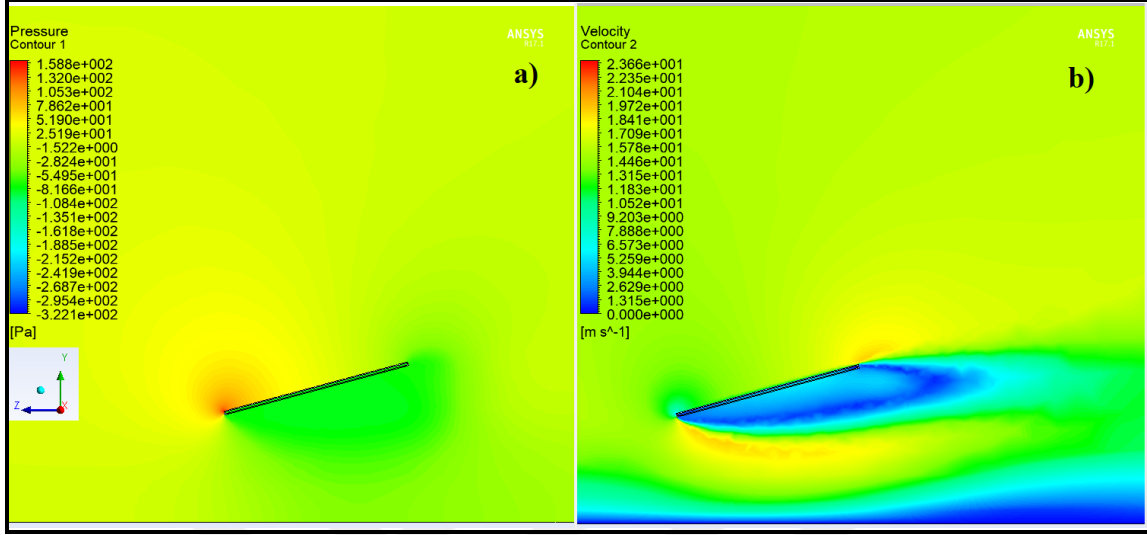
Rüzgârın arkadan esmesi durumunda ise güneş panellerinin alt yüzeyindeki basınç değerleri üst yüzeydekilere göre yüksektir. Güneş panellerinin alt yüzeyinin üst kenarında maksimum basınç meydana gelmiştir ve alt kenara doğru gidildikçe basınç azalmıştır. Tüm değişkenler için yapılan parametrik çalışmalar sonucunda ise C_p dağılımını etkileyen en önemli değişkenin güneş panellerinin eğim açısı olduğu görülmüştür. Eğim açısının artması ile güneş panellerinin yüzeylerindeki C_p katsayı değerleri artmaktadır. Ayrıca yüzeylerdeki C_p dağılım alanı da genişlemektedir. Yani eğim açısının artması ile rüzgâr basıncı daha fazla panel yüzey alanında etkili olmaktadır.

Aynı şekilde, değişken parametrelerin güneş panelleri etrafındaki rüzgâr akış alanına etkilerini incelemek amacıyla tüm simülasyon durumları için basınç ve hız konturları oluşturulmuş ve EK-2’de sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarında elde edilen basınç ve hız konturları incelendiğinde genel olarak düşük hız bölgelerinde yüksek basınç olduğu, yüksek hız bölgelerinde ise düşük basınç meydana geldiği görülmüştür. Havanın ilk temas ettiği yüzeyde basınç maksimum, akış hızı sıfırdır. Akış hızının sıfır olduğu bu noktaya ayrılma noktası denir. Ayrıca rüzgâr hızı ve kolonların zeminden olan yüksekliği değişkenlerinin basınç ve hız konturlarına etkisi oldukça düşük çıkmıştır. Güneş panellerinin eğim açısı ise rüzgâr akış alanına etki eden en önemli değişkendir. Bu yüzden 15° , 30° , 45° ve 60° eğim açılarında meydana gelen basınç ve hız konturları ayrı ayrı incelenmiştir.

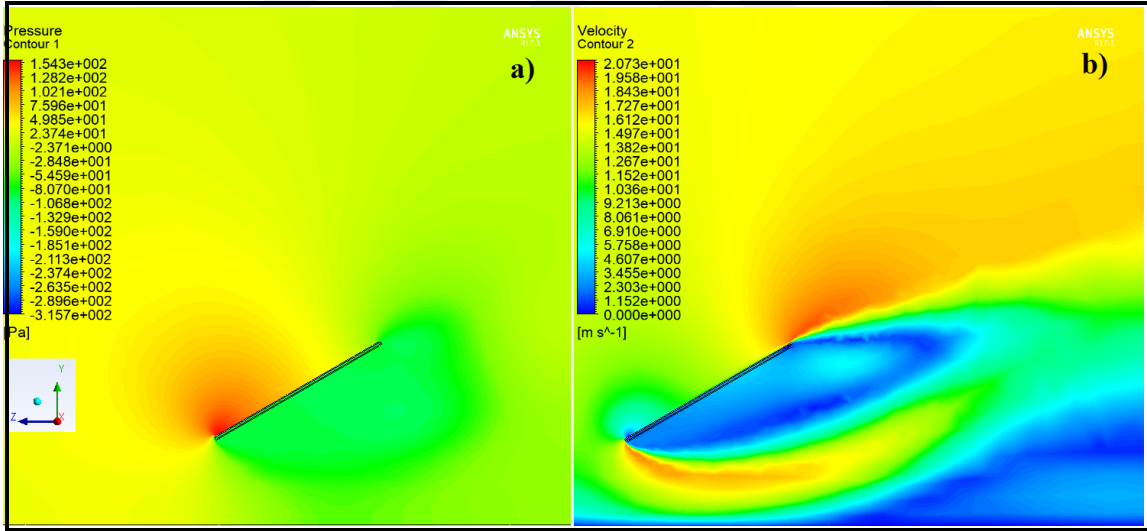
15° eğim açısında rüzgâr basıncısının güneş panellere etkisi düşüktür ve maksimum basınç bölgesi güneş panellerinin ön kenarında oluşmuştur. Güneş panellerinin ön ve arka yüzeylerinde basınç farkı düşük gelmektedir. Bu yüzden hız konturlarına bakıldığında düşük seviyede girdapların olduğu görülmüştür. Yani güneş panellerinin arka tarafında az miktarda düzensiz ve tersine akışlar oluşmuştur. Ayrıca rüzgâr akış ayrımlarının 15° eğim açısında çok belirginleşmediği görülmüştür (Şekil 7.15).

30° eğim açısına çıkıldığında ise rüzgâr basıncı daha fazla panel yüzey alanında etkili olmuştur. Güneş panellerinin ön ve arka yüzeylerindeki basınç farklılığı ise 15° eğim açısına göre artış göstermiştir. Bu yüzden 30° eğim açısında panellerin arka tarafında düzensiz

akışlar artmıştır. Ayrıca güneş panellerinin üst ve alt taraflarında akış ayrımlarının belirginleşmeye başladığı görülmüştür (Şekil 7.16).

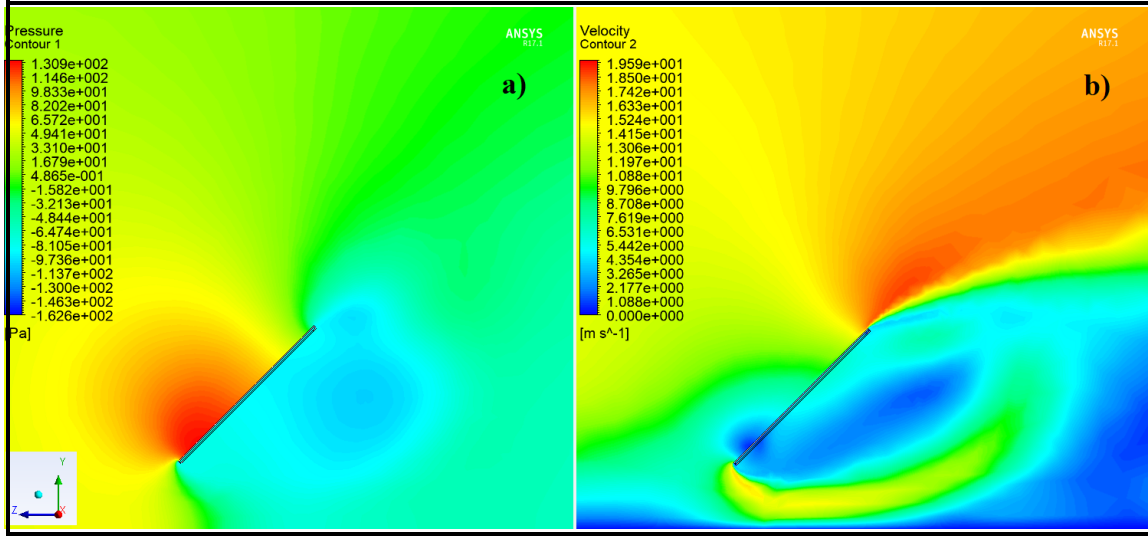


Şekil 7.15. 15° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız

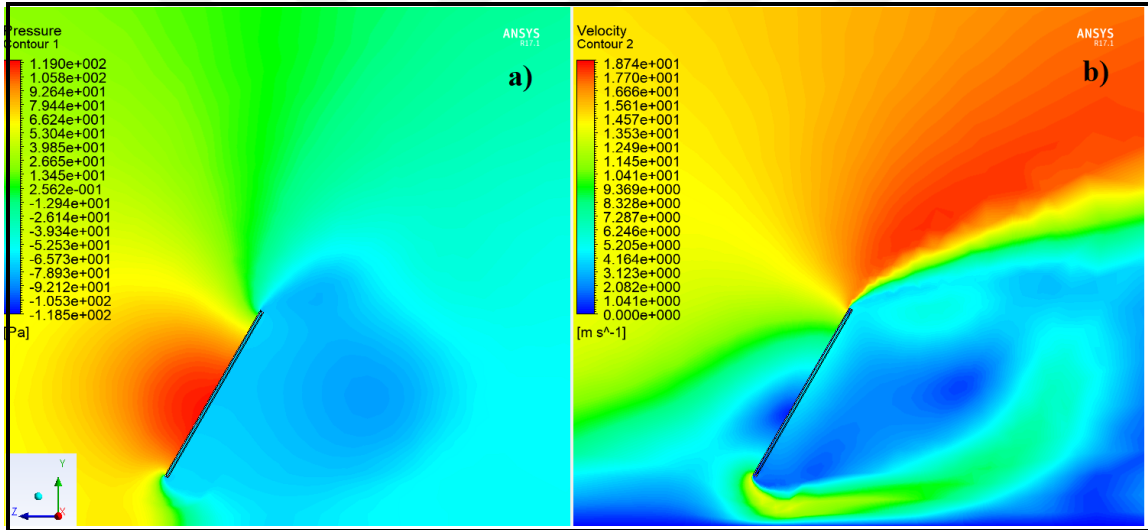


Şekil 7.16. 30° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız

45° eğim açısına çıkıldığında güneş panellerinin ön yüzeyinde rüzgâr basıncı oldukça artmıştır ve rüzgâr basınç dağılımının etkili olduğu alan çok fazla artış göstermiştir. Güneş panellerinin arka yüzeyinde ise rüzgâr basıncının belirgin bir şekilde düştüğü görülmüştür. Bu yüzden güneş panellerinin ön ve arka yüzeylerinde oluşan basınç farklılığı 15° ve 30° eğim açılara göre oldukça yüksektir. Bu durumda güneş panellerinin arka tarafındaki düzensiz akış çoğalmıştır ve rüzgârın akış alanı içerisinde tekrardan düzenli bir akış sergilemesi için gerekli olan mesafe artmıştır (Şekil 7.17).



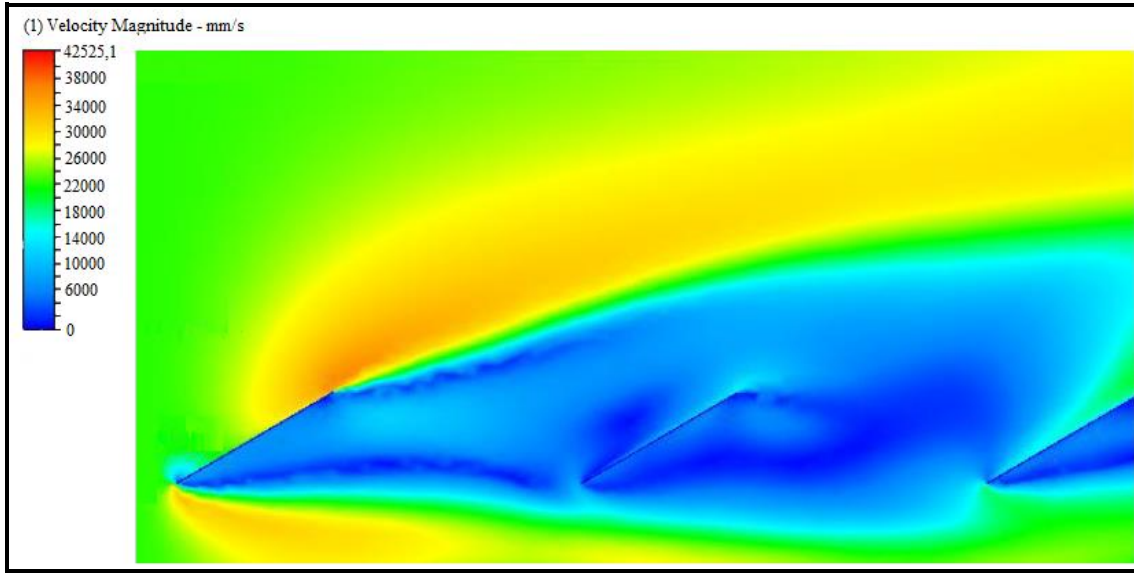
Şekil 7.17. 45° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız



Şekil 7.18. 60° eğim açısı için basınç ve hız konturları; a) basınç b) hız

60° eğim açısında ise rüzgâr basıncı, güneş paneli ön yüzeyinin tamamında etkin olmuştur. Güneş panellerinin ön ve arka yüzeyinde oluşan yüksek basınç farklılığından dolayı panelin arka tarafında tersine akışlar fazlaşmıştır. 60° eğim açısındaki hız konturuna bakıldığında güneş paneli ön yüzeyinde rüzgâr hızlarının diğer eğim açılara göre oldukça düştüğü görülmüştür ve rüzgârın panel yüzeyindeki akışı zorlaşmıştır. Bu yüzden güneş panellerinin üst ve alt taraflarında akış ayrımları belirgin bir şekilde karşımıza çıkmıştır. Ayrıca 60° eğim açısına çıkıldığında, güneş paneli üst kenarındaki ayrım noktasında yüksek seviyede rüzgâr hızları oluşmuştur (Şekil 7.18).

Güneş enerjisi santrallerinin saha uygulamalarına bakıldığında, arka arkaya sıralı halde birçok güneş panelleri bulunmaktadır (Bkz. Şekil 3.8). Güneş panellerinin arka arkaya sıralı dizili olması durumunda rüzgâr yüklerinin arka panellerdeki etkilerini incelemek amacıyla 4 m aralıklarla arka arkaya dizili olan 3 sıra güneş panellerinin 80 km/s rüzgâr hızındaki sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz esnasında sadece sıralı dizili güneş panellerinin etkileri incelenmek istendiği için güneş panellerinin eğim açısı 30° , rüzgâr hücum açısı 0° ve kolonların zemine olan yüksekliği 1,1 m olarak sabit alınmıştır.



Şekil 7.19. Arka arkaya sıralı güneş panellerinin rüzgâr hızı dağılımı

Simülasyon sonucunda güneş panelleri etrafındaki rüzgâr akış alanı incelendiğinde (Şekil 7.19), ön sıradaki güneş panellerinin arka bölgesinde basınç farklılığından kaynaklı girdaplar meydana gelmiştir. Arka sıralardaki güneş panelleri ise ön sıradaki güneş panellerinden kaynaklanan bu girdapların etkisinde kalmıştır ve rüzgâr hızının etkisi arka sıralara gidildikçe azalmıştır. Yani rüzgâra ilk maruz kalan güneş panelleri, arka sıralardaki güneş panellerine siper etkisi sağlamıştır. Ayrıca güneş panellerinde meydana gelen aerodinamik kuvvetlere bakıldığında (Çizelge 7.3), ilk sıradaki güneş paneli yüzeyinde oluşan toplam aerodinamik kuvvet maksimumdur. Arka sıralardaki güneş panellerinde meydana gelen toplam aerodinamik kuvvetler ise ön sıradaki panelde oluşan kuvvetlere göre oldukça düşük gelmiştir. Birinci sıradaki güneş panellerinden ikinci sıradaki güneş panellerine geçildiğinde toplam aerodinamik kuvvetlerin etkisi yaklaşık %78 oranında düşmektedir. İkinci sıradaki güneş panellerinden son sıradaki güneş panellerine geçildiğinde ise toplam aerodinamik kuvvetlerin etkisi yaklaşık %14,6 oranında düşmektedir. Yani güneş panellerinin arka

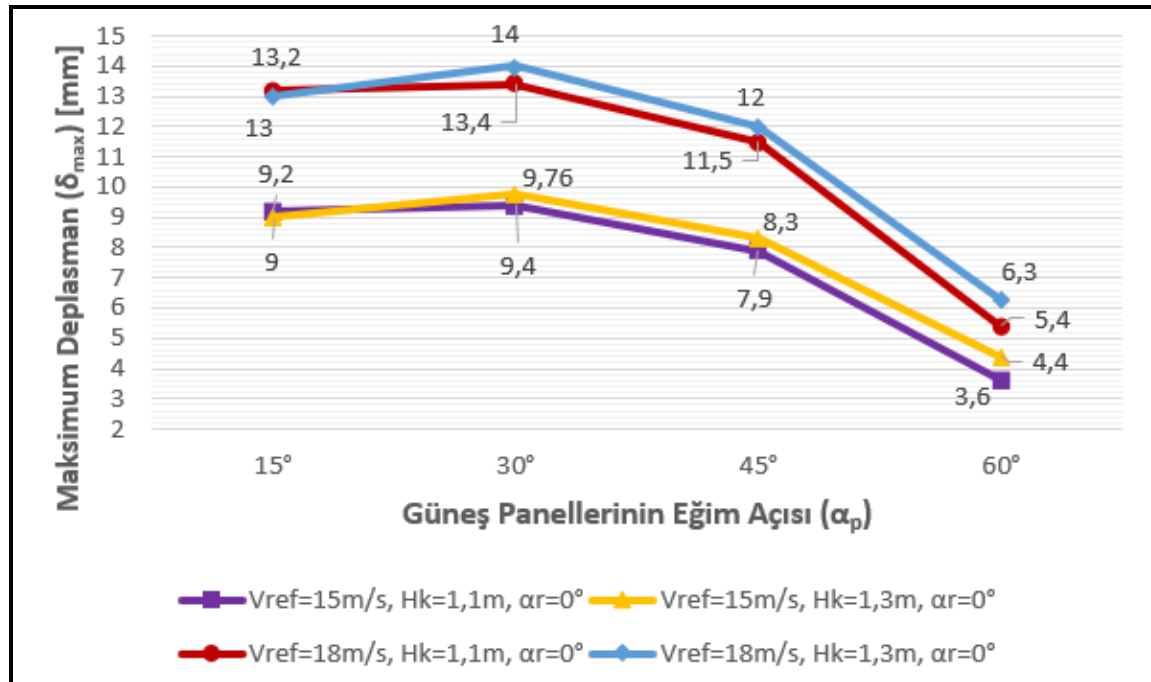
arkaya sıralı dizili olması durumunda rüzgâr yükünden en fazla etkilenen ve mühendislik uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en önemli panel grubu rüzgâra ilk maruz kalan ön sıradaki panellerdir.

Çizelge 7.3. Güneş panelleri yüzeyine etki eden aerodinamik kuvvetler

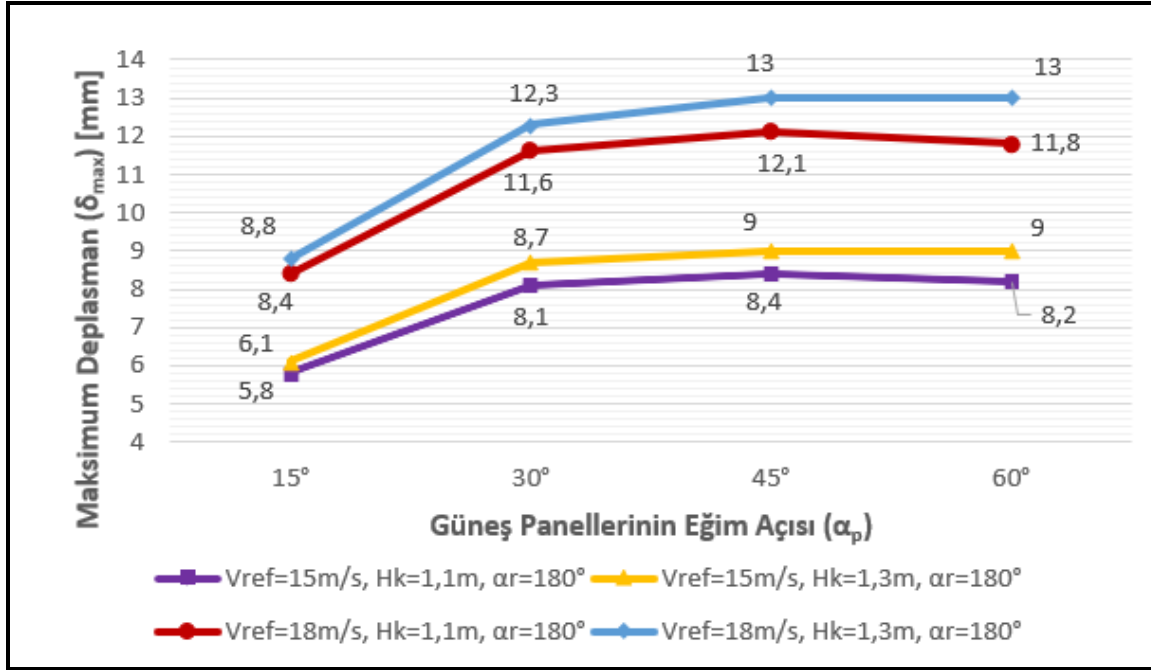
Sıra	Kaldırma Kuvveti (N)	Direnç Kuvveti (N)	Toplam Kuvvet (N)
1. Panel	8332	4862	9647
2. Panel	1831	1069	2120
3. Panel	1564	913	1811

Parametrik çalışma bölümünde son olarak değişken parametreler ile yapılan akış analizleri sonucunda güneş panelleri yüzeyinde elde edilen aerodinamik kuvvetlerin güneş paneli altındaki destek yapılarına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla güneş panelleri yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvetler güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır ve SEY yaklaşımı kullanılarak bu yükler altındaki destek yapılarının mekanik davranışlarına bakılmıştır.

Yapısal analizler sonucunda güneş takip sistemi üzerinde oluşan maksimum deplasman değerleri tüm değişkenler için SEY ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açıları için sırasıyla Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de gösterilmiştir.



Şekil 7.20. 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum deplasman değerleri



Şekil 7.21. 180° rüzgâr hücum açısı için maksimum deplasman değerleri

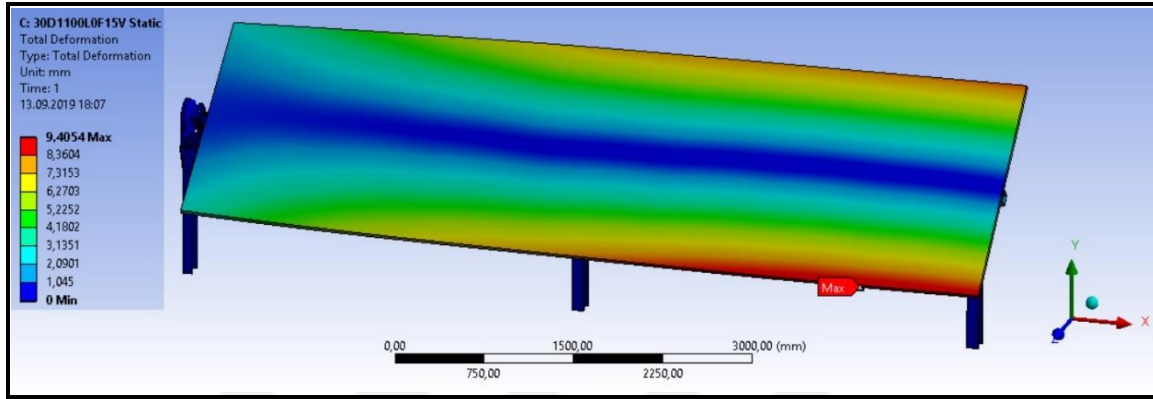
0° rüzgâr hücum açısına göre maksimum deplasman değeri 14 mm'dir ve $H_k = 1,3$ m, $\alpha_p = 30^\circ$, $V_{ref} = 18$ m/s durumunda oluşmuştur. 180° rüzgâr hücum açısına göre maksimum deplasman değeri ise 13 mm'dir ve $H_k = 1,3$ m, $\alpha_p = 45^\circ$, $V_{ref} = 18$ m/s durumunda oluşmuştur.

Kolonların zeminden olan yüksekliğinin maksimum deplasman değerine etkisi oldukça düşüktür ve 180° rüzgâr hücum açısındaki etkisi 0° rüzgâr hücum açısındakine göre daha belirgindir. Rüzgâr hızı ve güneş panellerinin eğim açısı değişkenleri ise maksimum deplasman değerini etkileyen en önemli parametrelerdir.

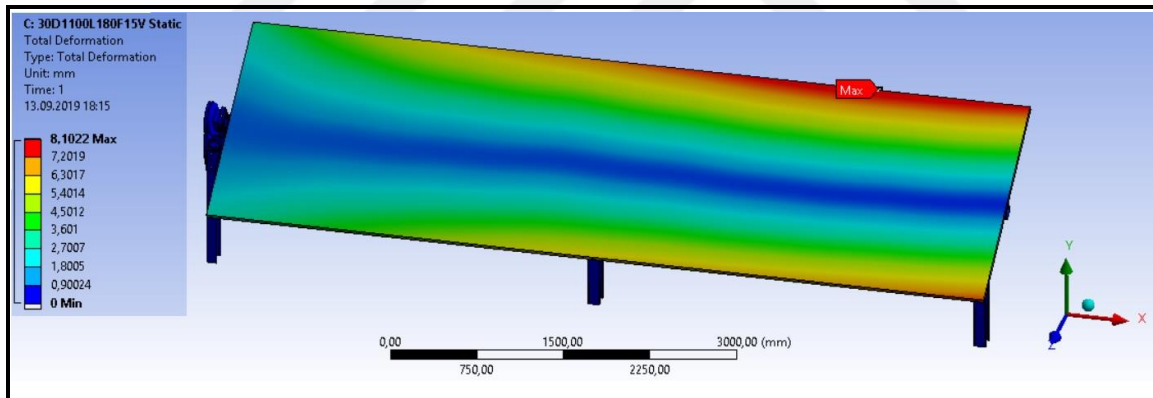
Her iki rüzgâr yönünde de rüzgâr hızlarının artması ile maksimum deplasman değerlerinin arttığı görülmüştür. 180° rüzgâr hücum açısında gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarında maksimum deplasman değerleri temelde panellerin eğim açısının artışıyla monoton bir artış göstermektedir.

Yapısal analizler sonucunda tüm değişkenler için maksimum yer değiştirmenin her iki rüzgâr yönünde de güneş panelleri üzerinde olduğu belirlenmiştir. Çünkü rüzgârın güneş panelleri ile etkileşimi sonucunda paneller yüzeyinde oluşan kaldırma kuvvetleri güneş panellerini döndürmeye çalışmaktadır. Bu durumda motor, panellerin dönme yönünün tersinde moment

oluşturmaktadır ve motor bağlantısı bölümü güneş panellerinin dönmesini engelleyen bir yapıdadır. Rulman takımı parçaları ise güneş panellerinin dönmesini destekleyen yapıdadır. Bu yüzden 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum yer değiştirme değeri güneş panellerinin alt kısmının köşe kısmında (Şekil 7.22), 180° rüzgâr hücum açısı için ise güneş panellerinin üst kısmının köşe kısmında olduğu görülmüştür (Şekil 7.23).



Şekil 7.22. 0° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası

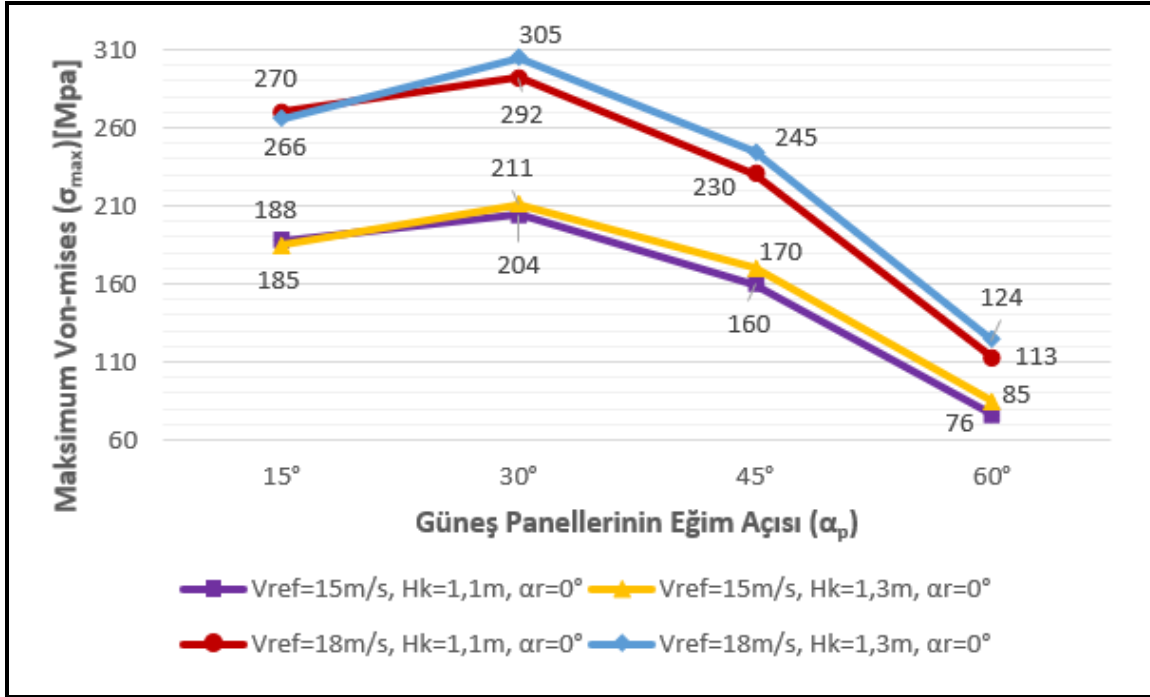


Şekil 7.23. 180° rüzgâr hücum açısı için güneş takip sisteminin deplasman haritası

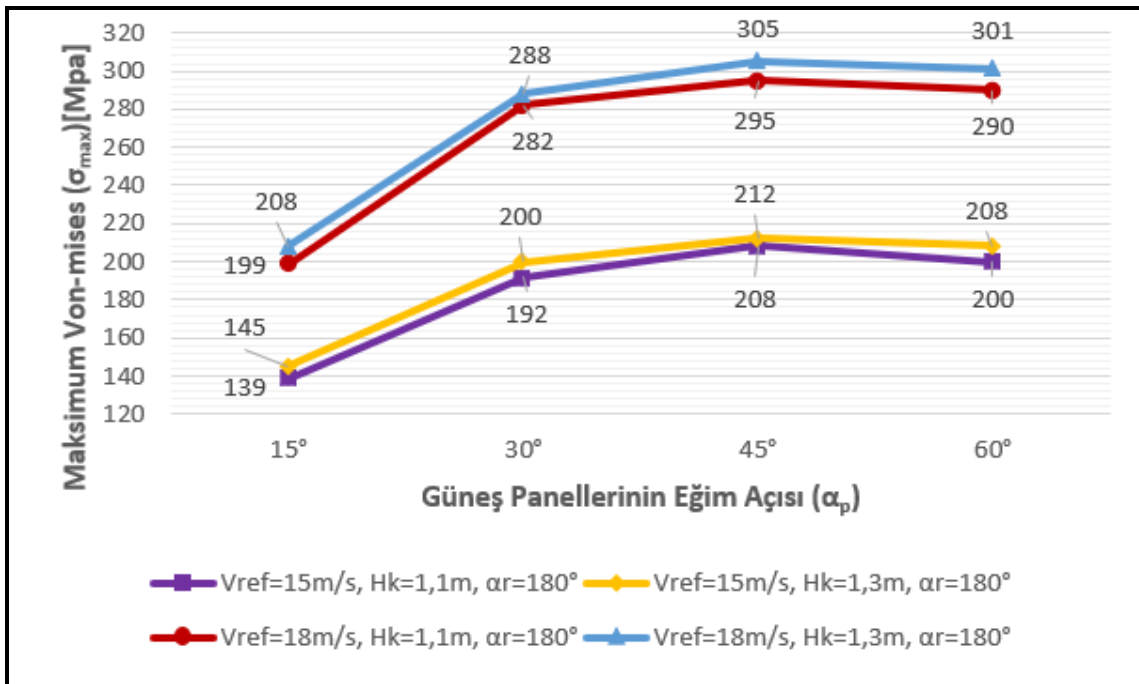
Aynı şekilde yapısal analizler sonucunda güneş takip sistemi üzerinde oluşan maksimum von-mises gerilim değerleri tüm değişkenler için SEY ile elde edilmiştir. Elde edilen değerler 0° ve 180° rüzgâr hücum açıları için sırasıyla Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'te gösterilmiştir.

0° rüzgâr hücum açısına göre maksimum von-mises gerilim değeri 305 MPa'dır ve $H_k = 1,3$ m, $\alpha_p = 30^\circ$, $V_{ref} = 18$ m/s durumunda oluşmuştur. Aynı şekilde 180° rüzgâr hücum açısına göre maksimum von-mises gerilim değeri de 305 MPa gelmiştir, fakat $H_k = 1,3$ m,

$\alpha_p = 45^\circ$, $V_{ref} = 18\text{m/s}$ durumunda oluşmuştur. Her iki rüzgâr yönünde de kolonların zeminden olan yüksekliğinin maksimum gerilim değerine etkisi ihmal edilebilecek kadar düşük gelmiştir. Rüzgâr hızı ve güneş panellerinin eğim açısı değişkenleri ise maksimum von-mises gerilim değerini etkileyen en önemli parametrelerdir.



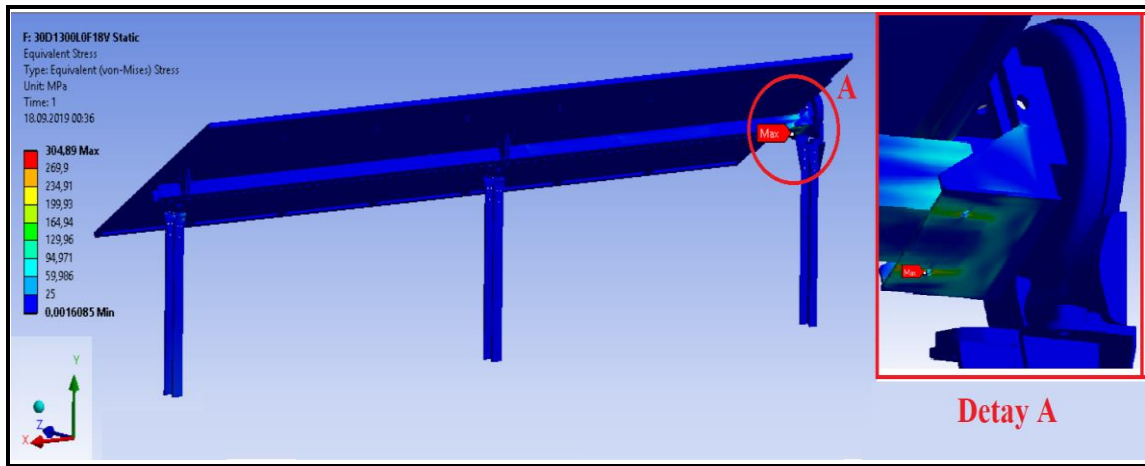
Şekil 7.24. 0° rüzgâr hücum açısı için maksimum von-mises gerilim değerleri



Şekil 7.25. 180° rüzgâr hücum açısı için maksimum von-mises gerilim değerleri

Her iki rüzgâr yönünde de rüzgâr hızlarının artması ile maksimum gerilim değerlerinin arttığı görülmüştür. Bunun temel sebebi ise aynı eğim açılarında rüzgâr hızlarının artması ile panellerin yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvetlerin artmasıdır. Havanın 0° rüzgâr yönünde esmesi durumunda, güneş panellerinin eğim açısının 30° 'ye kadar artmasıyla maksimum gerilim değerlerinin arttığı, 30° 'den 60° 'ye kadar artışında ise bu değerlerin düştüğü gözlemlenmiştir. Havanın 180° rüzgâr yönünde esmesi durumunda ise maksimum gerilim değerlerinin, güneş panellerinin eğim açısının 45° 'ye kadar artmasıyla arttığı, 45° 'den 60° 'ye kadar artışında ise düştüğü belirlenmiştir.

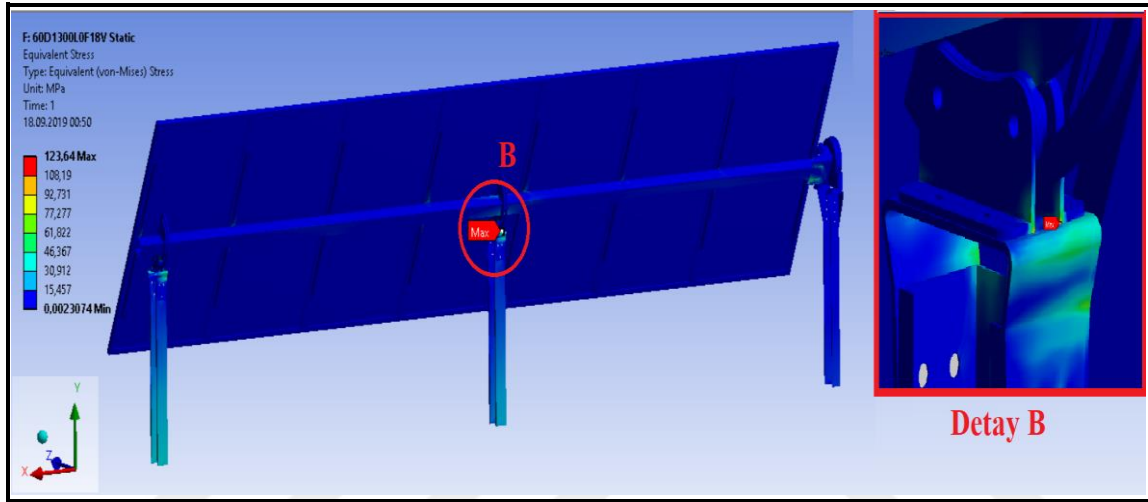
Güneş takip sistemini oluşturan destek yapılarında meydana gelen maksimum gerilme değerleri güneş panellerinin eğim açısına bağlı olarak farklı parçalarda oluşmuştur. 45° eğim açısına kadar maksimum gerilme yığılmaları motor bağlantı parçasında, 45° ile 60° eğim açılarında ise rulman takımı parçasında oluşmuştur. Örneğin rüzgârın önden esmesi durumunda, 30° eğim açısında gerçekleştirilen sayısal çalışmada maksimum gerilme değeri motor bağlantı parçası üzerinde oluşmuştur (Şekil 7.26, A bölgesi). Bu durumun temel sebebi ise 30° eğim açısında kaldırma kuvvetinin güneş panelleri yüzeyinde etkisi daha baskındır ve güneş panellerini döndürmeye çalıştığı için sistem üzerinde moment oluşturmaktadır. Motor bağlantı parçası ise güneş panellerinin dönmesini engelleyen tek parça olduğu için oluşan momentin tamamı bu parçaya iletilmektedir.



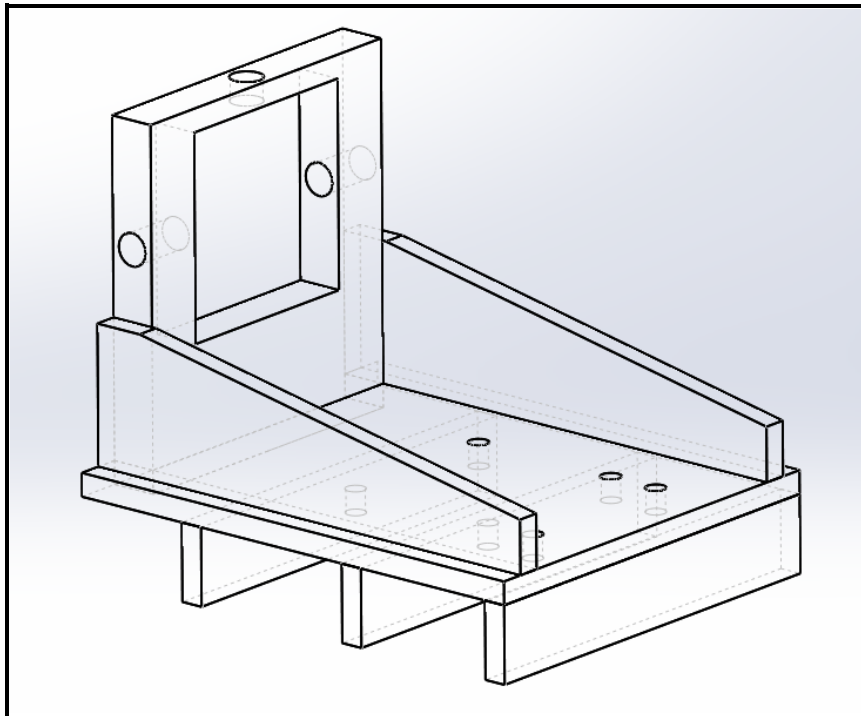
Şekil 7.26. $H_k=1,3m$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için güneş takip sisteminin gerilim haritası

Aynı şekilde 60° eğim açısında gerçekleştirilen sayısal çalışmada ise maksimum gerilme değeri rulman takımı parçası üzerinde oluşmuştur (Şekil 7.27, B bölgesi). Bu durumun temel sebebi ise 60° eğim açısına çıkıldığında direnç kuvvetinin güneş panelleri yüzeyinde etkisi

daha baskın hale gelmektedir. Sistem üzerindeki direnç kuvveti güneş panellerini ve destek yapılarını sürüklemeye çalışmaktadır. Bu sürüklenme etkisi tüm yapı tarafından karşılandığı için gerilim yığılmaları tek bir parça üzerine gelmemektedir. Bu yüzden 60° eğim açısındaki maksimum von-mises gerilim değerleri diğer eğim açılarında elde edilen değerlere göre düşük gelmiştir. Ayrıca direnç kuvveti kolonları x ekseninde burkmaya çalıştığı için rulman takımı parçaları dışında kolonların zemine yakın bölgelerinde de gerilme değerlerinin yüksek çıktığı görülmüştür.



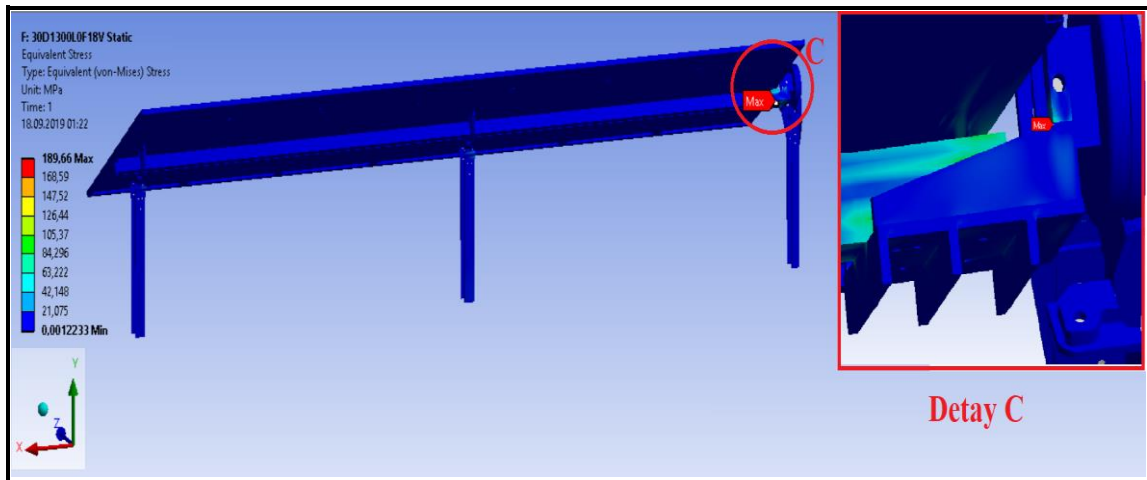
Şekil 7.27. $H_k=1,3m$, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$ için güneş takip sisteminin gerilim haritası



Şekil 7.28. Mukavemeti güçlendirilmiş motor bağlantı parçası

Tüm değişkenler için gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarına bakıldığında maksimum von-mises gerilim değerinin 305 MPa geldiği ve motor bağlantı parçası üzerinde olduğu belirlenmiştir. Motor bağlantı parçasının malzemesi St-52 (S355JR) kalite çeliktir ve akma sınır değeri 355 MPa'dır (Bkz. Çizelge 5.1). Bu durumda motor bağlantı parçasında güvenilirlik katsayısı 1,16 gelmiştir. Güvenirlik katsayısının artırılması amacıyla motor bağlantı parçasında iyileştirilmeler yapılmıştır. Şekil 7.26'ya bakıldığında motor bağlantı parçasındaki gerilim yığılmaları parçanın alt plakasındaki bağlantı yerlerinde görülmüştür. Bu yüzden alt plakanın altına bayrak parçaları kaynatılmıştır ve alt plakanın burkulmasını engellemek amaçlanmıştır. Ayrıca alt plaka kalınlığı 5 mm'den 10 mm'ye çıkartılarak mukavemeti güçlendirilmiştir. Mukavemeti güçlendirilmiş olan motor bağlantı parçası Şekil 7.28'te gösterilmiştir.

Motor bağlantı parçasında yapılan iyileştirmelerin gerilim değerlerine ve güvenilirlik katsayısına etkisini incelemek amacıyla en kritik durum için ($H_K=1,3m$, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18m/s$) tekrardan sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonucunda motor bağlantı parçasının alt plakasında burkulmadan kaynaklı gerilim yığılmalarının kaynaklı parçalar sayesinde giderildiği görülmüştür (Şekil 7.29, C bölgesi). Ayrıca motor bağlantı parçasındaki iyileştirmeler sonucunda maksimum von-mises gerilim değeri %37,7 düşmüştür ve 190 MPa gelmiştir. Bu durumda motor bağlantı parçasının güvenilirlik katsayısı 1,87 gelmiştir. Böylece motor bağlantı parçasının sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlamak için hasar oluşumunun engellenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7.29. Motor bağlantı parçasındaki iyileştirme sonucunda oluşan gerilim haritası



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş takip sisteminin her durum altında sorunsuz bir şekilde çalışmasını sağlayarak enerji üretiminin beklenen seviyede tutulabilmesi için destek yapılarının yeterince mukavemetli olması gerekir. Bu yüzden rüzgâr yükü altında çalışacak olan güneş takip sistemlerinin akış ve yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir.

Bu kapsamda ilk olarak sayısal analiz çalışmaları için oluşturulan materyal ve metotlar kullanılarak deneysel ve literatür doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için güneş panelleri üzerindeki rüzgâr akışı ince, düz bir plaka üzerindeki akışa benzetilmiş ve plakaların rüzgâr hareket yönüne paralel ve dik yerleştirilmesi sonucunda geliştirilen bağıntılar ele alınmıştır. Bu bağıntılar kullanılarak elde edilen aerodinamik katsayı değerleri, sayısal analizler ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, maksimum hata oranı plaka üzerindeki dik akış durumunda %0,65 gelmiştir. Maksimum hata oranının ihmal edilebilecek kadar düşük gelmesi, oluşturulan akış alanının gerçeğe uygun olduğunu, oluşturulan ağ yapısının çözümde doğru yakınsama sağladığını ve kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinin doğruluğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel çalışma sonucunda, paralel akış durumu için kayma kuvvetlerinin, dik akış durumu için ise basınç kuvvetlerinin panel yüzeyinde oluşan net kuvvete etkisinin daha baskın olduğu doğrulanmıştır. Literatür doğrulaması bölümünde ise Jubayer ve Hangan (2014) tarafından güneş panelleri üzerindeki rüzgâr akışının sayısal analizi üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmasının doğruluğunu desteklemek amaçlanmıştır. Bu amaçla literatür çalışmasında elde edilen aerodinamik katsayı değerleri, mevcut sayısal analizler sonucunda elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda maksimum %2,96 hata oranı ile literatür çalışmasının doğruluğu desteklenmiştir. Ayrıca 180° yönünde esen rüzgârın aerodinamik katsayılarına olan etkisinin, 0° yönünde esen rüzgâra göre daha kritik olduğu görülmüştür.

İkinci olarak rüzgâr yüküne etki eden en önemli faktörler olarak görülen güneş panellerinin boyutları ve eğim açısı, rüzgâr hücum açısı, rüzgâr şiddeti ve kolonların zeminden yüksekliği değişken parametreler olarak dikkate alınmış ve sayısal analizler gerçekleştirilerek bu değişkenlerin güneş panellerindeki ve destek yapılarındaki etkilerine bakılmıştır. Sayısal analiz çalışmalarında güneş panelleri üzerindeki hava akışı, üç boyutlu, sıkıştırılmaz ve sürekli akış olarak ele alınmıştır. Ayrıca güneş panelleri üzerindeki hava akışı, bir akışkan

içerisine daldırılan ince, düz bir plaka üzerindeki dış akışla benzerlik göstermiştir. HAD simülasyonları sonlu hacimler metodunu esas alan Ansys Fluent paket programı ile SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akış analizi sonucunda güneş panelleri yüzeyi üzerinde elde edilen basınç dağılımları, Ansys akışkan-yapı etkileşim paket programı kullanılarak sonlu elemanlar modeline aktarılmış ve güneş takip sistemine etki eden yük olarak tanımlanmıştır. Bu yükler altındaki güneş takip sisteminin sonlu elemanlar simülasyonları von-mises kriterini esas alan Ansys Structure paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

Tüm parametrik değişkenler için gerçekleştirilen sayısal akışkanlar dinamiği analizlerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Türbülanslı akışlar için güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne eğimli bir şekilde yerleştirilmesi ($\alpha_p > 0^\circ$) durumunda paneller üzerindeki aerodinamik kuvvetler basınç kuvvetinin etkisi altında oluşmaktadır. Bu durumda aerodinamik katsayı değerleri Reynolds sayısından bağımsız hale gelmektedir ve esasen analizi yapılacak olan geometrinin boyutlarına ve konumuna bağlı olmaktadır. Bu yüzden aerodinamik katsayıları etkileyen en önemli değişken parametreler güneş panellerinin en boy oranı ile eğim açısıdır.
- Aerodinamik kuvvetleri etkileyen en önemli değişkenler ise güneş panellerinin en boy oranı, güneş panellerinin eğim açısı ve rüzgâr hızıdır.
- Güneş panellerinin en boy oranının artması ile aerodinamik katsayı ve kuvvet değerleri artmaktadır. 90° eğim açısında ise güneş panelleri üzerinde kaldırma kuvveti oluşmayacağı için kaldırma katsayı değerleri tüm en boy oranları için eşit ve sıfırdır.
- Güneş panellerinin eğim açısı, aerodinamik katsayılara ve kuvvetlere etkisi en yüksek olan değişkendir. Güneş panelleri üzerinde oluşan direnç kuvvetlerinin kaldırma kuvvetlerine oranı, güneş panellerinin eğim açısının tanjantına eşit çıkmıştır. Bu yüzden eğim açısının artışı ile direnç katsayı ve kuvvet değerleri sürekli artış göstermektedir. Eğim açısının 45° 'den küçük olması durumunda tanjant değeri 1'den küçük geldiği için kaldırma katsayı ve kuvvet değerleri direnç katsayı ve kuvvet değerlerinden yüksek gelmektedir. Eğim açısının 45° olması durumunda tanjant değeri 1 olduğu için direnç ve kaldırma katsayı

değerleri eşit gelmektedir. Eğim açısının 45° 'den küçük olması durumunda ise tanjant değeri 1'den büyük geldiği için kaldırma katsayı ve kuvvet değerleri direnç katsayı ve kuvvet değerlerine göre düşük gelmektedir.

- Kolonların zeminden yüksekliği, aerodinamik katsayılara etkisi en düşük olan değişkendir. Genel olarak rüzgârın önden veya arkadan esmesi durumunda kolonların zeminden yüksekliğinin artması ile direnç ve kaldırma katsayıları düşmüştür. Ayrıca bu değişkenin aerodinamik kuvvetlere etkisi ihmal edilebilir.

- Güneş panellerinin rüzgârın hareket yönüne eğimli bir şekilde yerleştirilmesi ($\alpha_p > 0^\circ$) durumunda aerodinamik katsayı değerleri Reynolds sayısından bağımsız hale geldiği için rüzgâr hızlarının aerodinamik katsayılara etkisi ihmal edilebilir. Fakat rüzgâr hızları aerodinamik kuvvetlere etki eden en önemli değişkenlerden birisidir. Güneş panellerinin en boy oranı ve eğim açısı sabit tutulduğunda, aerodinamik kuvvetler rüzgâr hızının karesi ile orantılıdır. Bu yüzden, aynı en boy oranı ve eğim açısında rüzgâr hızlarının artması ile aerodinamik kuvvetler belirgin artış göstermiştir.

- Güneş panellerinin eğim açısının artması ile rüzgârın panel yüzeyindeki hareketi zorlaşmaktadır ve panellerin ön ve arka yüzeyindeki basınç farkı artmaktadır. Bu yüzden eğim açısının artması ile basınç farklarının olduğu bölgelerde düzensiz ve tersine akışlar artmaktadır.

- Güneş panellerinin arka arkaya sıralı olması durumunda maksimum aerodinamik kuvvet, rüzgâra ilk maruz kalan ön sıradaki güneş panellerinde oluşmuştur. Yani rüzgâr yükünden en fazla etkilenen ve mühendislik uygulamalarında dikkat edilmesi gereken en önemli panel grubu rüzgâra ilk maruz kalan ön sıradaki panellerdir.

Tüm parametrik değişkenler için gerçekleştirilen yapısal analizlerin sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

- Maksimum deplasman ve gerilim değerlerini etkileyen en önemli değişkenler rüzgâr hızı ve güneş panellerinin eğim açısıdır. Kolonların zeminden olan yüksekliğinin etkisi ise ihmal edilebilecek kadar düşük çıkmıştır.

- Rüzgâr hızının artması ile maksimum deplasman ve gerilim değerleri artmaktadır. Çünkü rüzgâr hızının artması ile güneş panelleri yüzeyinde oluşan aerodinamik kuvvetler artmaktadır.

- Teorikte güneş panellerinin eğim açısının artması ile güneş takip sistemini oluşturan yapıların maksimum deplasman ve gerilim değerlerinde artış beklenmektedir. Fakat yapısal analiz sonuçlarında bu değerlerin belli bir eğim açısına kadar arttığı ve sonrasında düştüğü görülmüştür. Bu durumun temel nedeni, rüzgârın güneş takip sistemi üzerindeki etkisinin belli bir açıya kadar kaldırma kuvvetinden dolayı moment olarak görülmesidir. Yani güneş panelleri üzerinde oluşan basınç dağılımları, belli bir açıya kadar güneş takip sistemini döndürmeye çalışmaktadır. Bu durumda güneş takip sistemindeki moment etkisinden kaynaklanan gerilimi sistemde karşılayan sadece motor bağlantı parçasıdır. Bu yüzden motor bağlantı parçasında oldukça yüksek gerilim değerleri oluşmaktadır. Belli bir eğim açısından sonra ise direnç kuvvetlerinin etkisinin daha baskın olmasından dolayı rüzgâr daha çok güneş takip sistemini sürüklemeye çalışmaktadır ve bu durumda rüzgâr yükünün etkisi tüm sistem tarafından karşılanmaya çalışılmaktadır. Böylece sistemdeki maksimum deplasman ve gerilim değerlerinin düştüğü saptanmıştır.

- 15 m/s rüzgâr hızında güneş takip sistemini oluşturan destek yapılarında ve güneş panellerinde von-mises kriterine göre herhangi bir hasar oluşmadığı fakat 18 m/s rüzgâr hızına çıkıldığında motor bağlantı parçasında meydana gelen gerilim değerinin, parçada kullanılan malzeme akma sınırına yakın geldiği görülmüştür. Daha yüksek rüzgâr hızlarında motor bağlantı parçasında hasar meydana gelmesini engellemek amacıyla parçada iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca tüm simülasyon durumları için motor bağlantı parçası dışındaki diğer parçalarda meydana gelen gerilim değerleri, malzeme akma dayanımına göre düşük gelmiştir. Bu yüzden bu parçalarda herhangi bir kalıcı deformasyon oluşumu riski oldukça düşük çıkmıştır.

Sayısal modellerde oluşturulan ağ yapılarının, çözüm sonuçlarındaki hata miktarını etkileyen en önemli faktör olduğu fark edilmiştir. Mevcut çalışmada akış analizi için ağ yapısı oluşturulurken, Ansys Fluent paket programı içindeki ağ modülünden yararlanılmıştır. İleride yapılacak olan çalışmalarda, Ansys paket programı içindeki ICEM CFD modülü kullanılarak ağ yapısının oluşturulması ile çözüm sonuçlarındaki hata oranı daha da aşağılara çekilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Granda, C. (2010). Wind storm in northern VT damaged 4 month old PV tracker. Web: <https://homeenergypros.org/photo/after-the-storm?context=user> adresinden 7 Nisan 2019'da alınmıştır.
2. Türk Standardı TS498. (1997). *Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 8-12.
3. Chevalier, L., Norton, J. (1979). *Wind loads on solar collector panels and support structure*, Master of Science, Texas A&M University Aerospace Engineering Department, United States of America, 1-71.
4. Bitsuamlak, G. T., Dagnev, A. K., Erwin, J. (2010, May). *Evaluation of wind loads on solar panel modules using CFD*. Paper presented at the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering, Chapel Hill, North Carolina, United States of America, 23-27.
5. Warsido, W. P., Bitsuamlak, G. T., Barata, J., Chowdhury, A. G. (2014). Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array. *Journal of Fluids and Structures*, 48, 295-315.
6. Shademan, M., Barron, R. M., Balachandar, R., Hangan, H. (2014). Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panel at different flow configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(8), 728-738.
7. Jubayer, C. M., Hangan, H. (2012). *Numerical simulation of wind loading on photovoltaic panels*. Paper presented at the American Society of Civil Engineers on Structures Congress, Reston, Virginia, 1180-1189.
8. Jubayer, C. M., Hangan, H. (2014). Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134, 56-64.
9. Jubayer, C. M., Hangan, H. (2016). 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*, 153, 60-70.
10. Yemenici, O., Aksoy, M. O. (2018, May 7). *Numerical study of wind loads on a solar panel at different inclination angles*. Paper presented at the 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Budapest, Hungary, 406-409.
11. Irtaza, H., Agarwal, A. (2018). CFD simulation of turbulent wind effect on an array of ground-mounted solar PV panels. *Journal of the Institution of Engineers*, 99(2), 205-218.
12. Lin, C. K., Dai, C. Y., Wu, J. C. (2013). Analysis of structural deformation and deformation induced solar radiation misalignment in a tracking photovoltaic system. *Journal of Renewable Energy*, 59, 65-74.

13. Li, H., Zhang, D., Qin, Z., Li, L., Zhang, E. (2015). *Analysis of deformation and strength of solar module support under wind-wave load*. Paper presented at the International Conference on Manufacturing Science and Engineering, Guangzhou, China, 1626-1629.
14. Khelifi, Ch., Ferroudji, F. (2016). Stress and fatigue analyses under wind loading of the dual axis sun tracking system via finite element analysis. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10(2), 2008-2015.
15. Reina, G. P., Stefano, G. D. (2017). Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel array. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 170, 283-293.
16. Filik, T., Filik, Ü. B. (2017). Efficiency analysis of the solar tracking PV system in Eskişehir region. *Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, 18(1), 209-217.
17. Adeleke, B. (2016). *Experimental and finite element analysis of wind induced displacement of a dual axis photovoltaic solar tracker*, Master of Science, University of Ottawa Faculty of Engineering, Canada, 6-8.
18. Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. (Second Edition) Harlow, England: Pearson Education Limited Company, 1-38.
19. Wu, Z., Gong, B., Wang, Z., Li, Z., Zang, C. (2010). An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat. *Journal of Renewable Energy*, 35, 797-806.
20. Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., Carissimo, B. (2007). *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Cost Action 732, 1-52.
21. Analysis System Incorporated. (2013). *Analysis System (ANSYS) fluent theory guide*. (15th Edition) Analysis System Incorporated, 1-65.
22. Menter, F. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 32(8), 1598-1605.
23. Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Journal of Atmospheric Environment*, 41(2), 238-252.
24. Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. (First Edition) New York: McGraw-Higher Education, 561-609.
25. Kaplan, G. (2013). *Esnek Mekanizmaların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelemesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 28-42.
26. Chen, X., Liu, Y. (2015). *Finite Element Modeling and Simulation with Analysis System (ANSYS) Workbench*. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall, Productivity Press, 1-17.

27. Moaveni, S. (1999). *Finite Element Analysis: Theory and Application with Analysis System (ANSYS)*. (First Edition) Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 33-449.
28. Ovalı, İ., Esen, C. (2017). *Analysis System (Ansys) Workbench*. (İkinci Baskı) İstanbul: Kodlab Yayınevi, 1-47.
29. Dinler, N. (2006). *Fluid Flow about Immersed Bodies*, Basılmamış Ders Notu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 133-144.
30. Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics*. (Sixth Edition) United States, America: John Wiley Incorporated, 433-439.

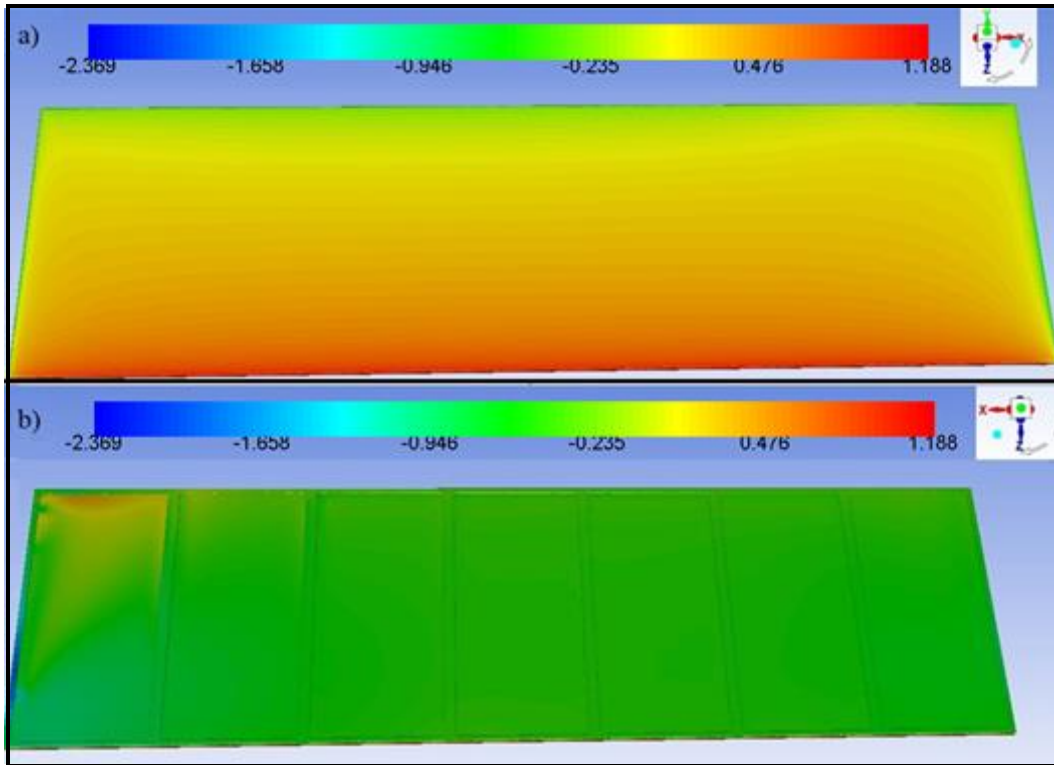




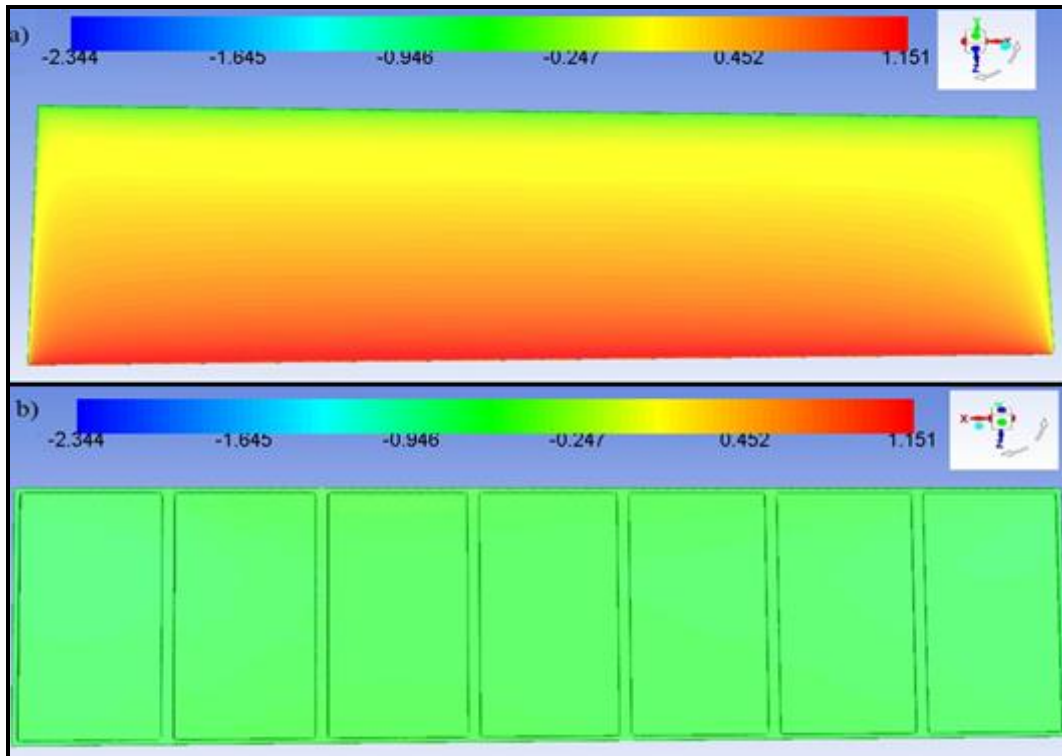


EKLER

EK-1. Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

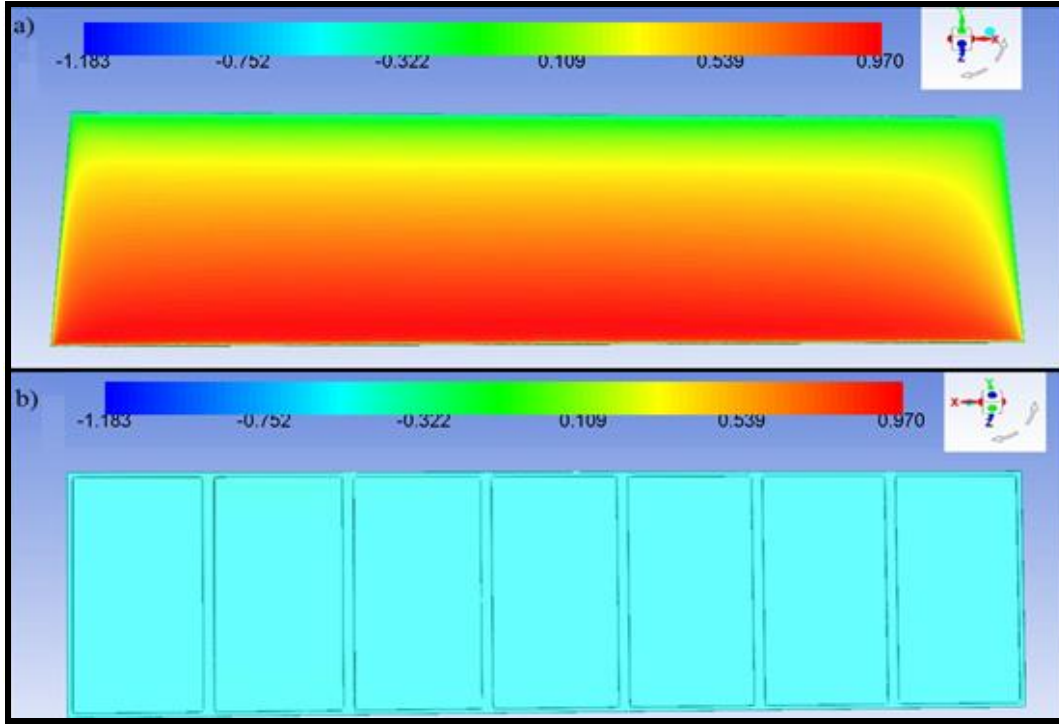


Ek 1.1. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

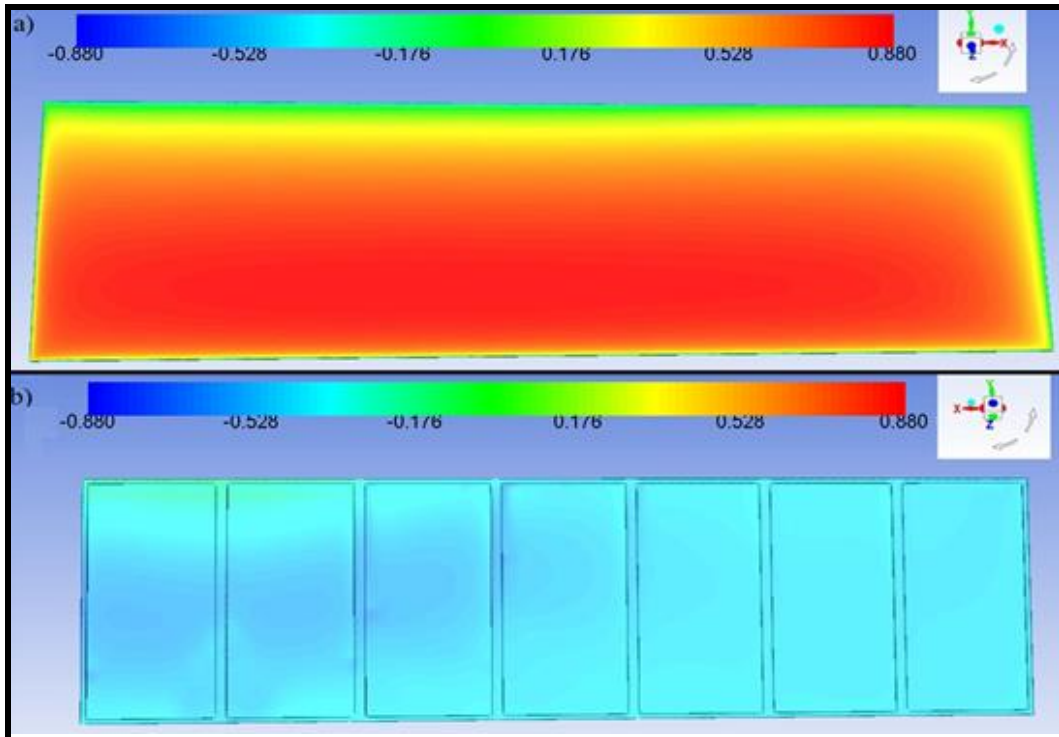


Ek 1.2. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

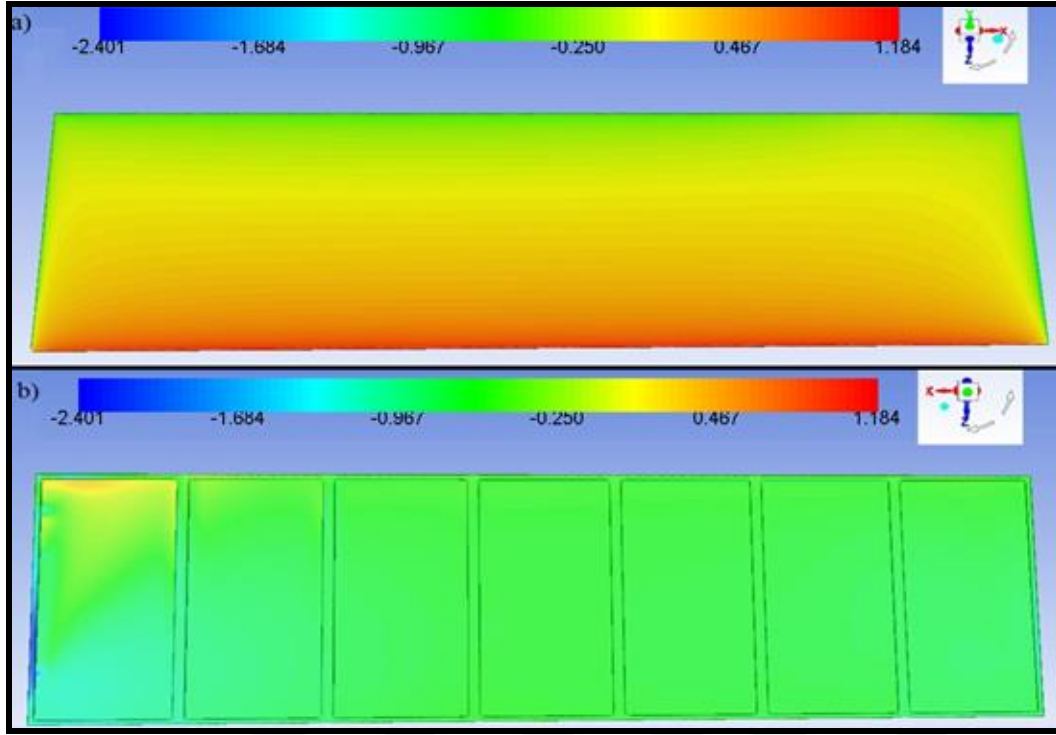


Ek 1.3. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

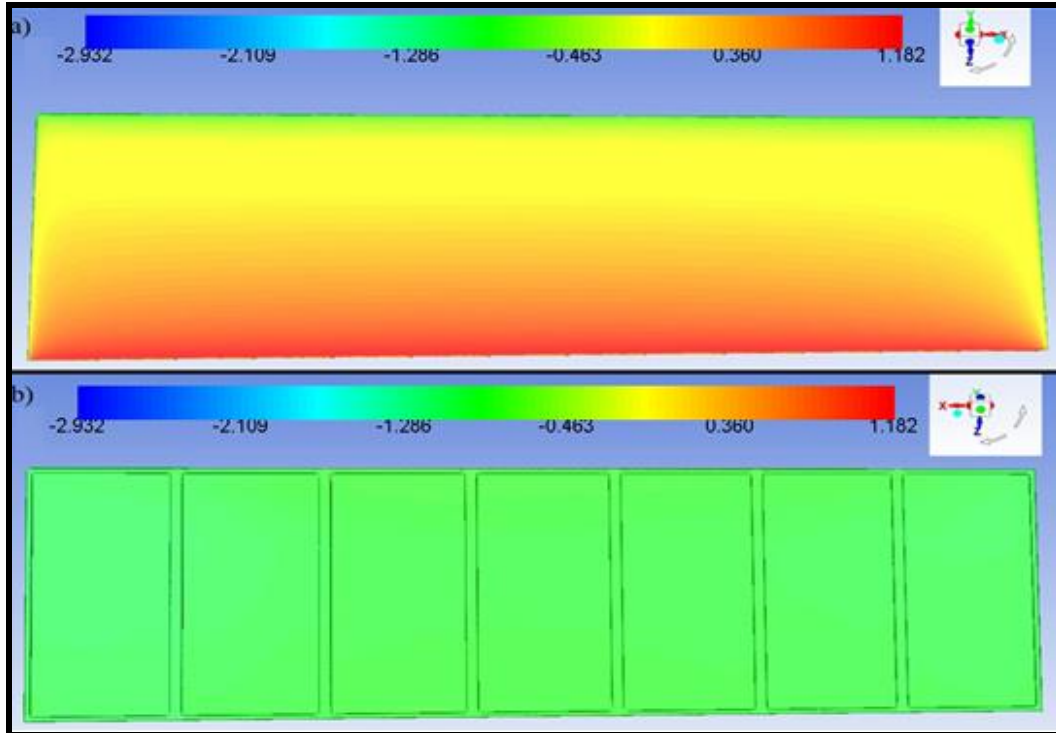


Ek 1.4. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

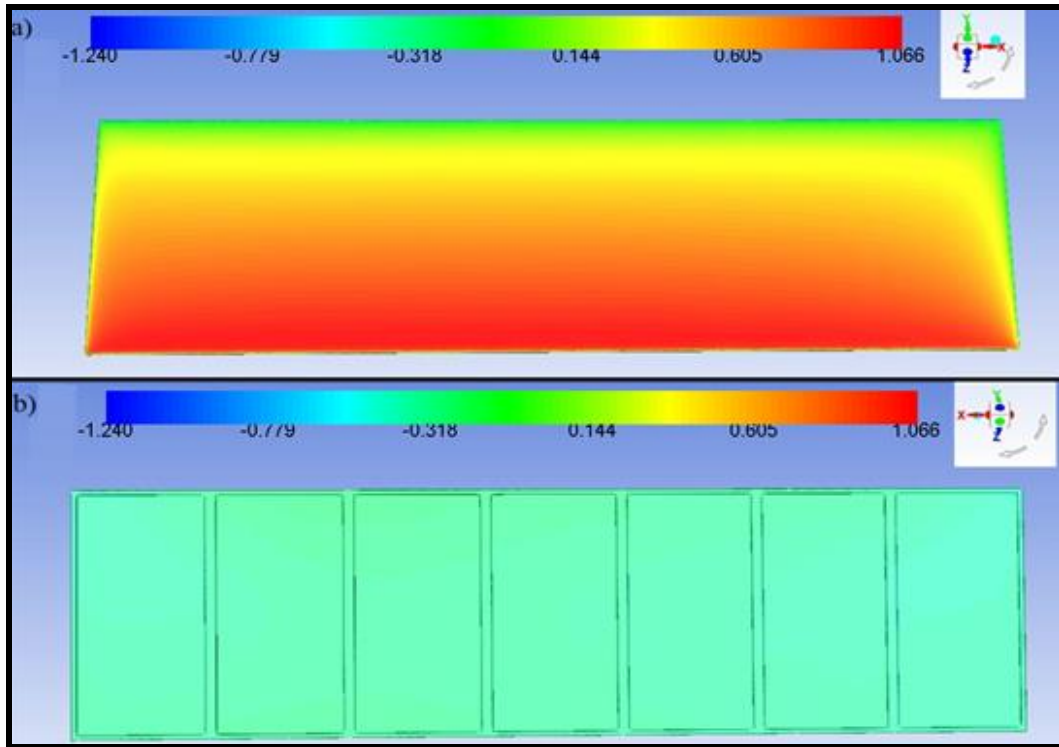


Ek 1.5. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

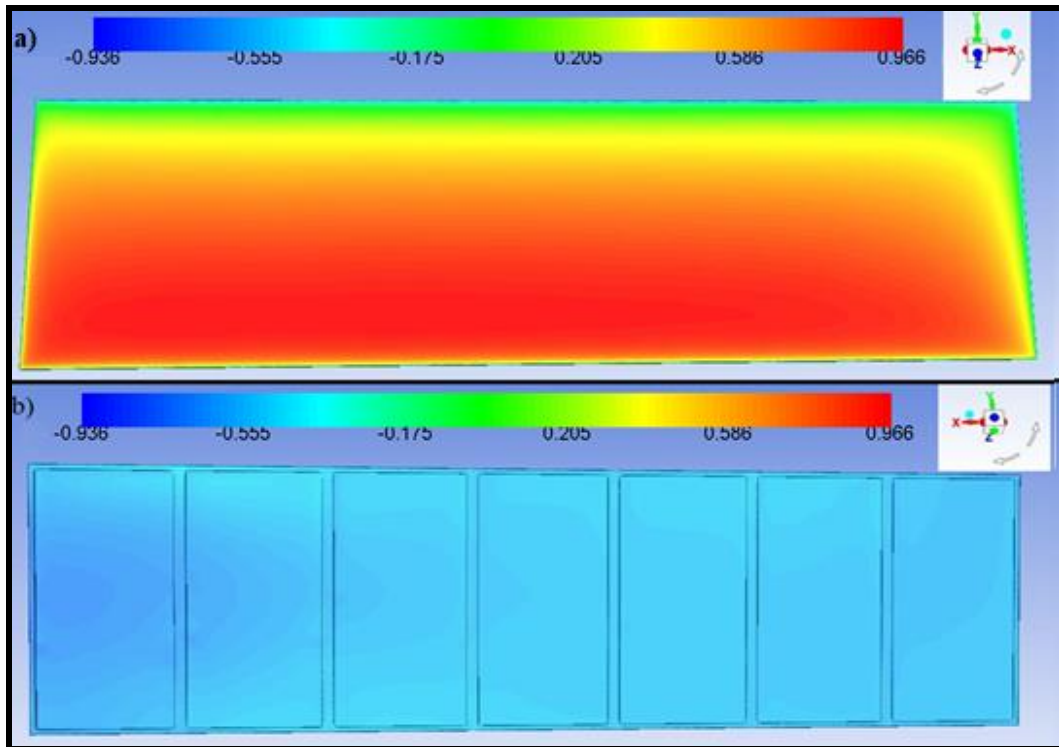


Ek 1.6. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

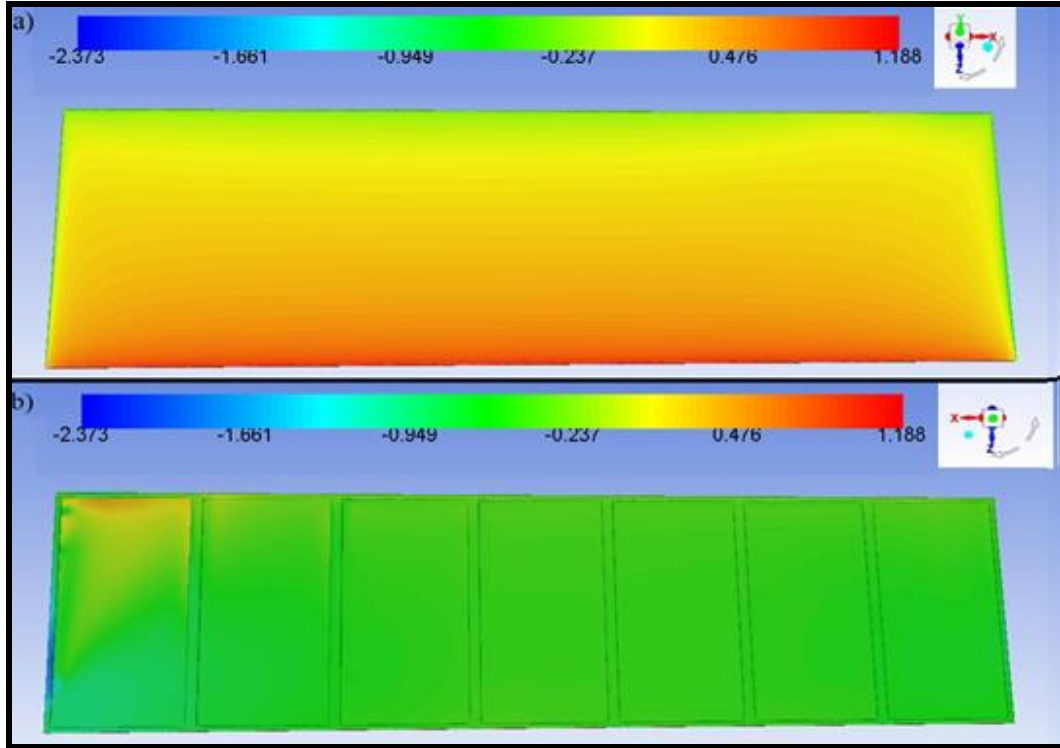


Ek 1.7. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

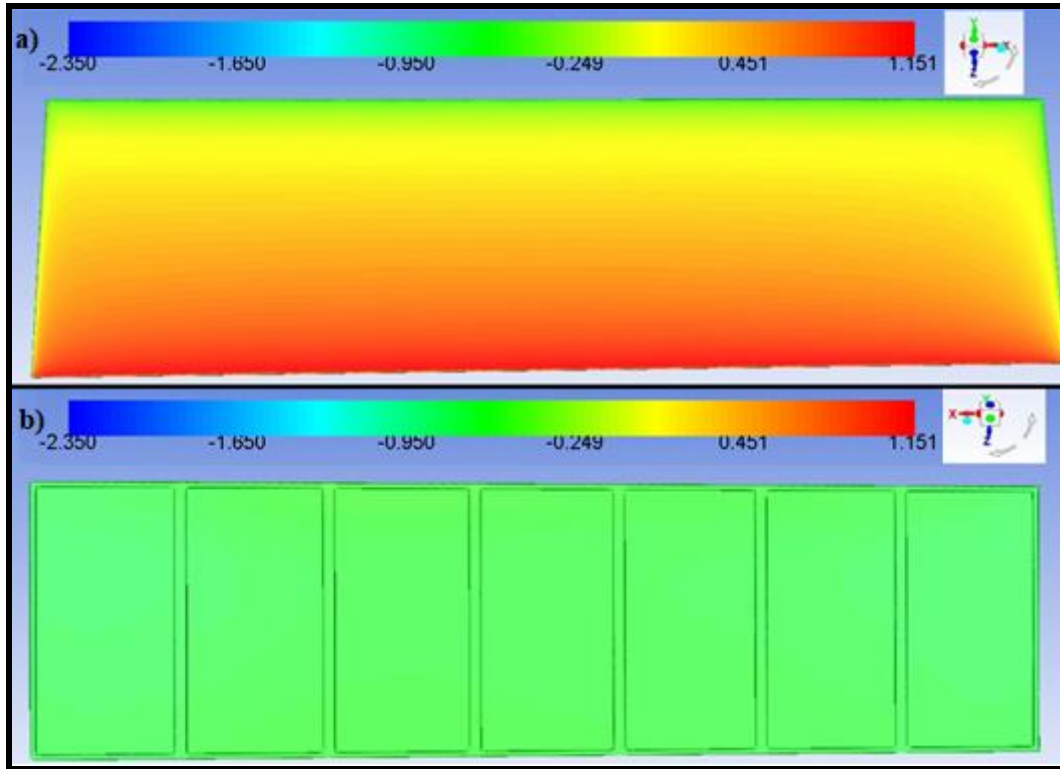


Ek 1.8. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

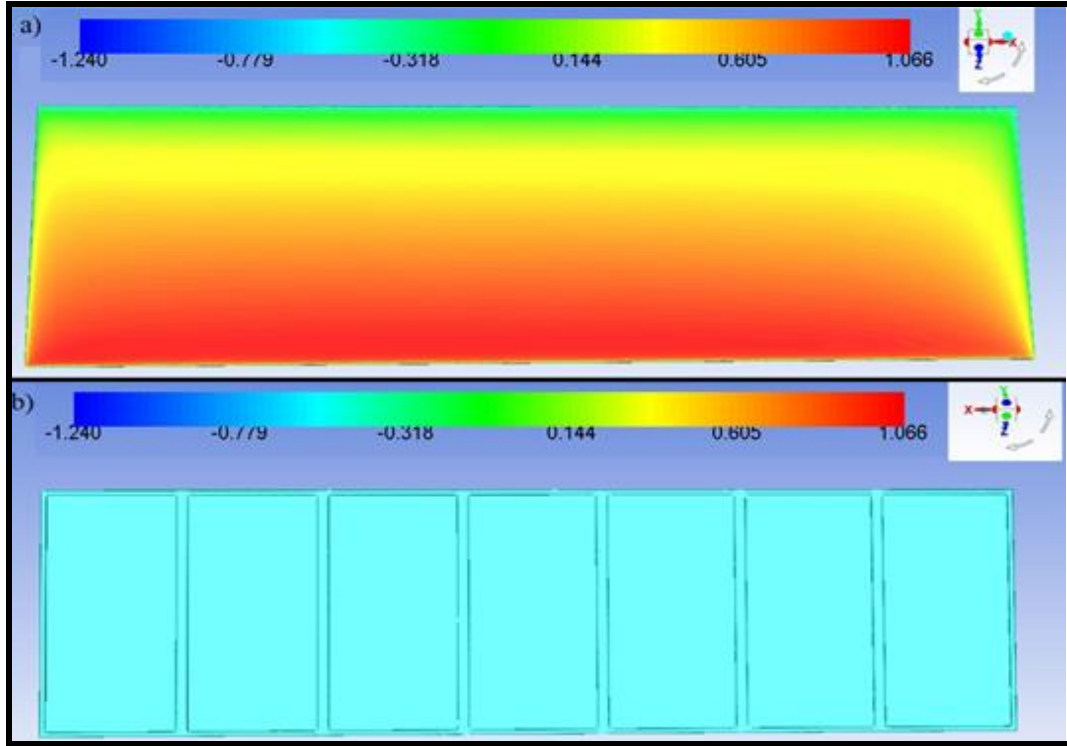


Ek 1.9. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

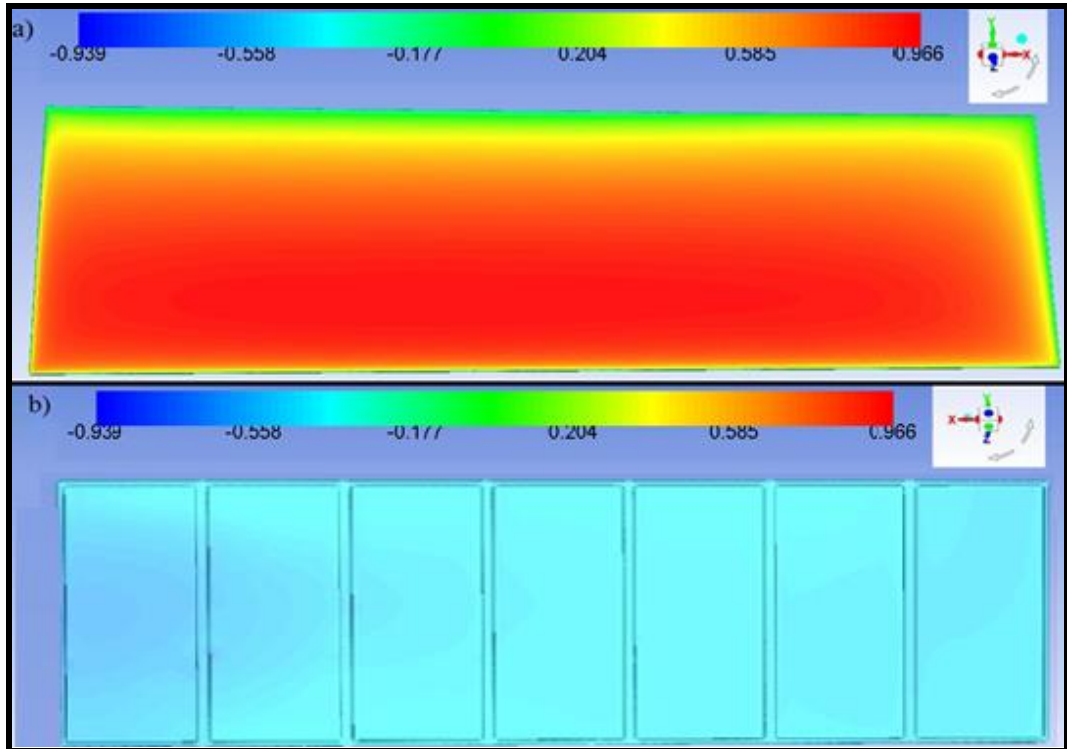


Ek 1.10. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

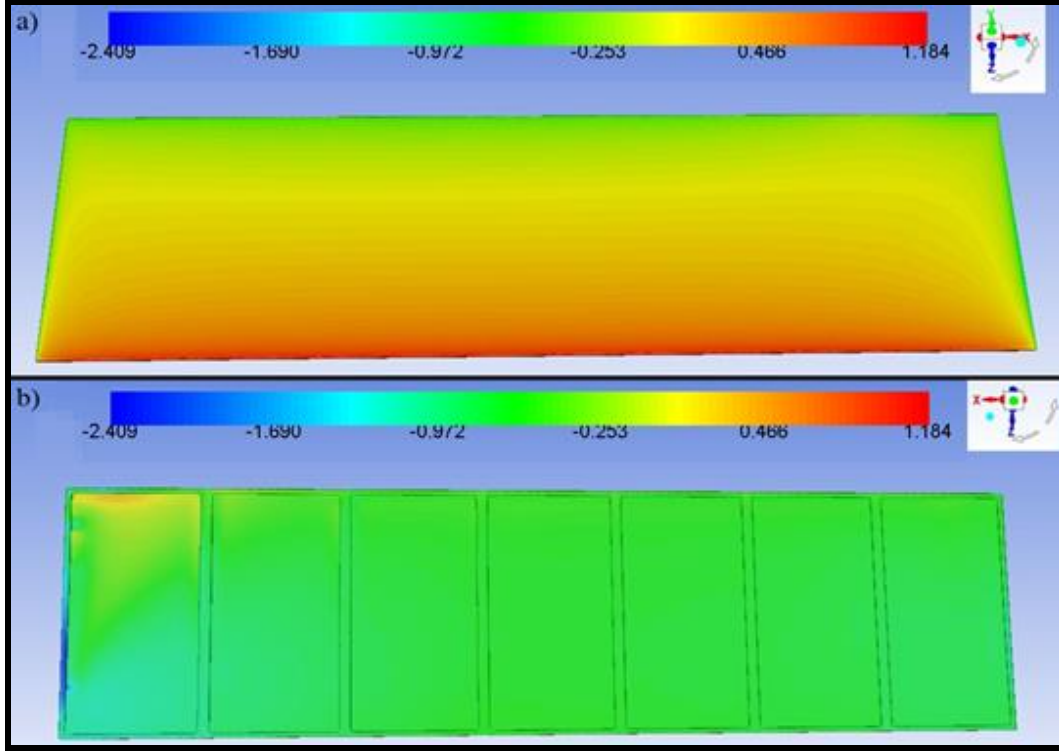


Ek 1.11. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

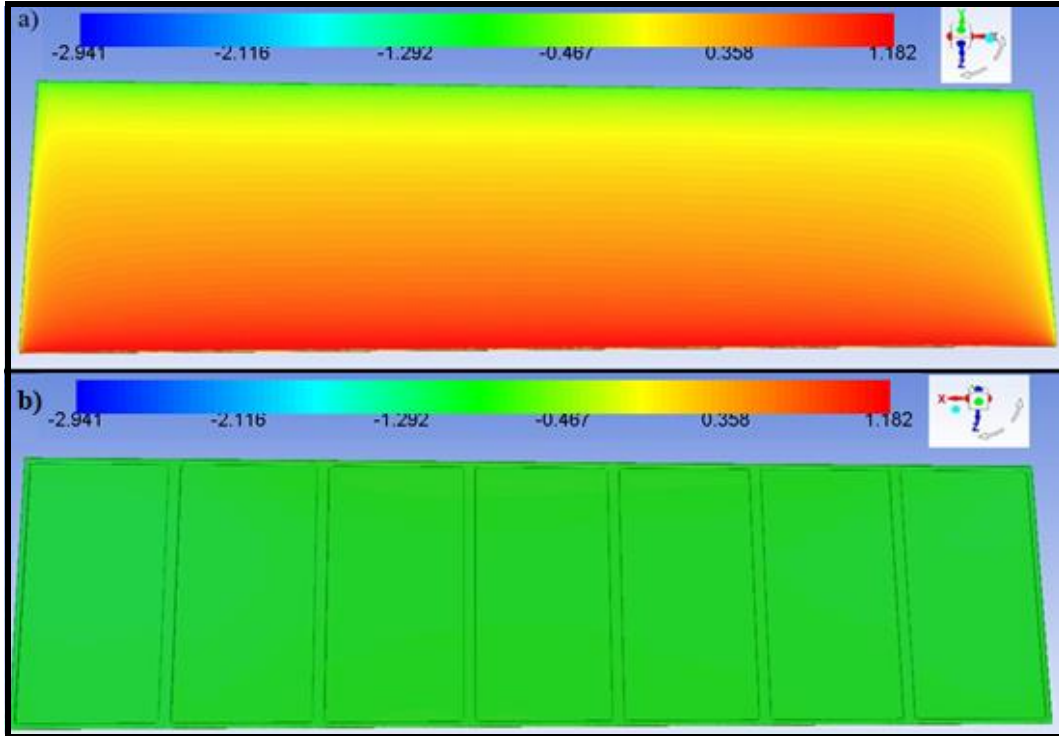


Ek 1.12. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

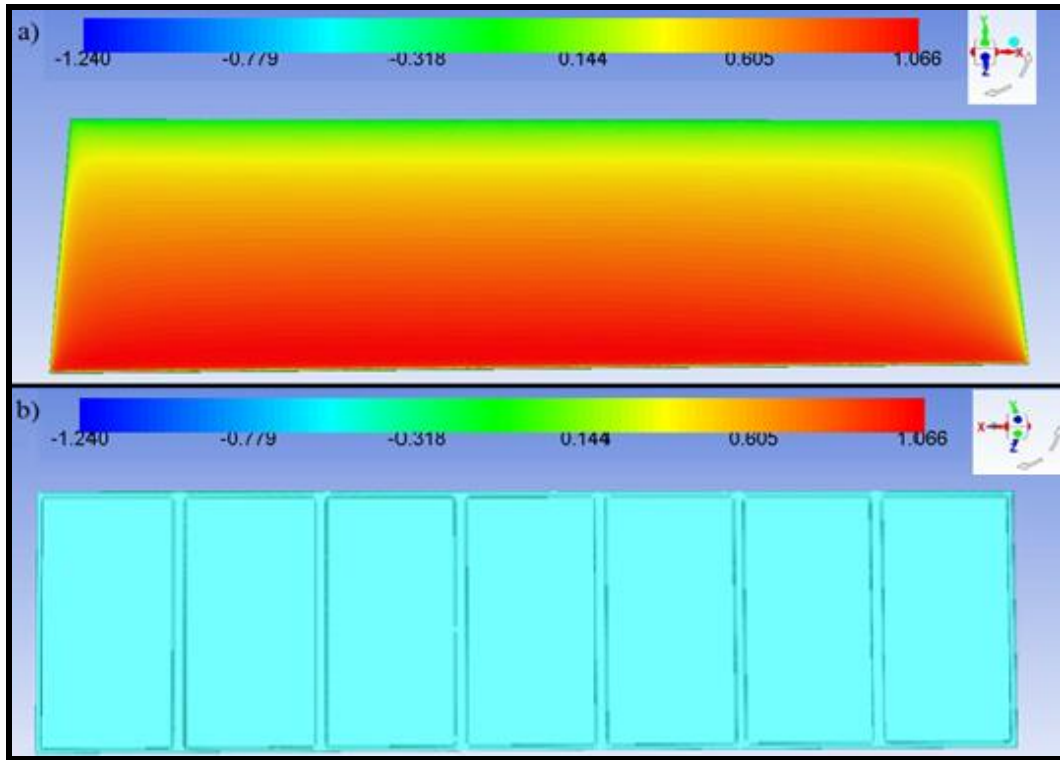


Ek 1.13. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

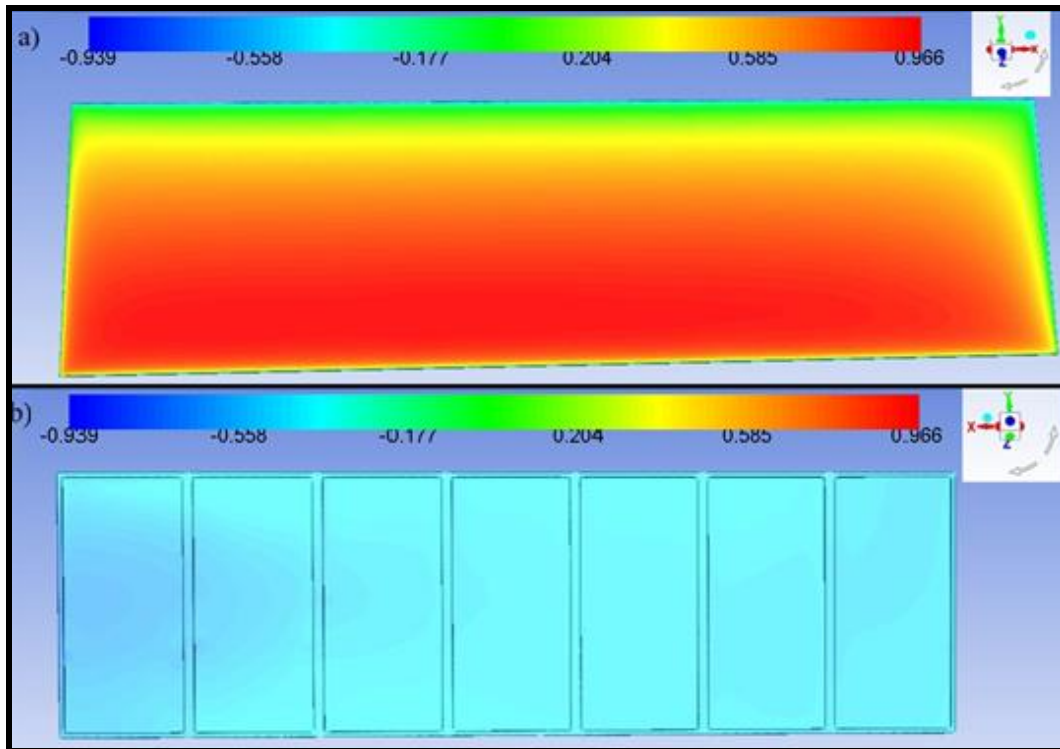


Ek 1.14. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

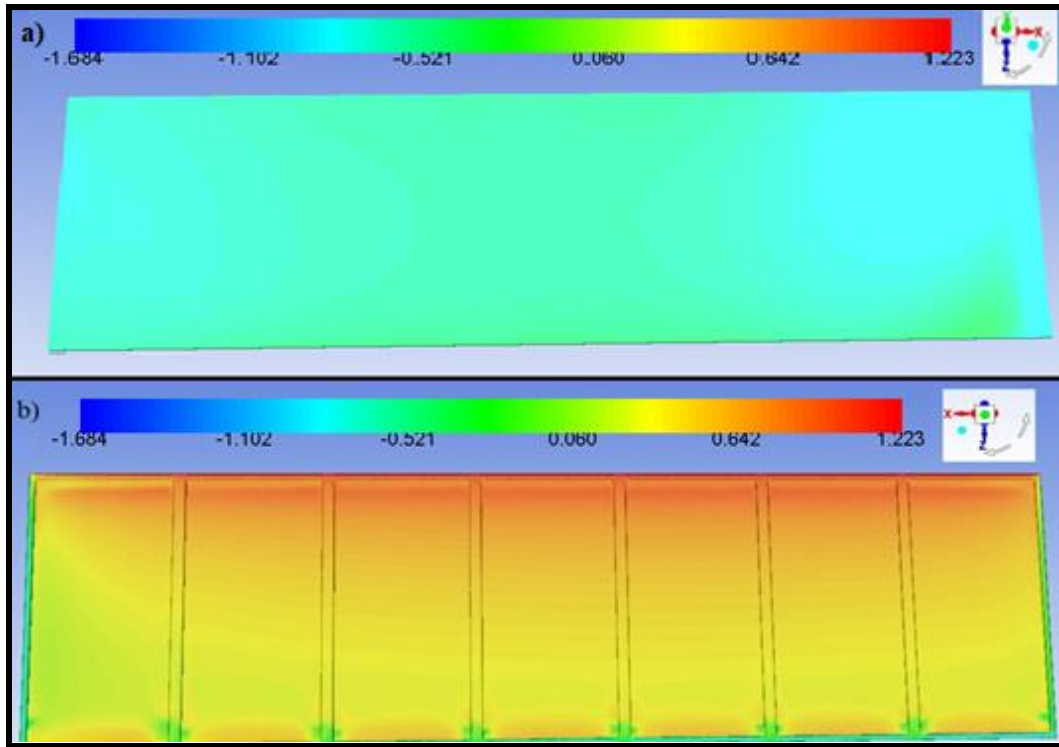


Ek 1.15. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

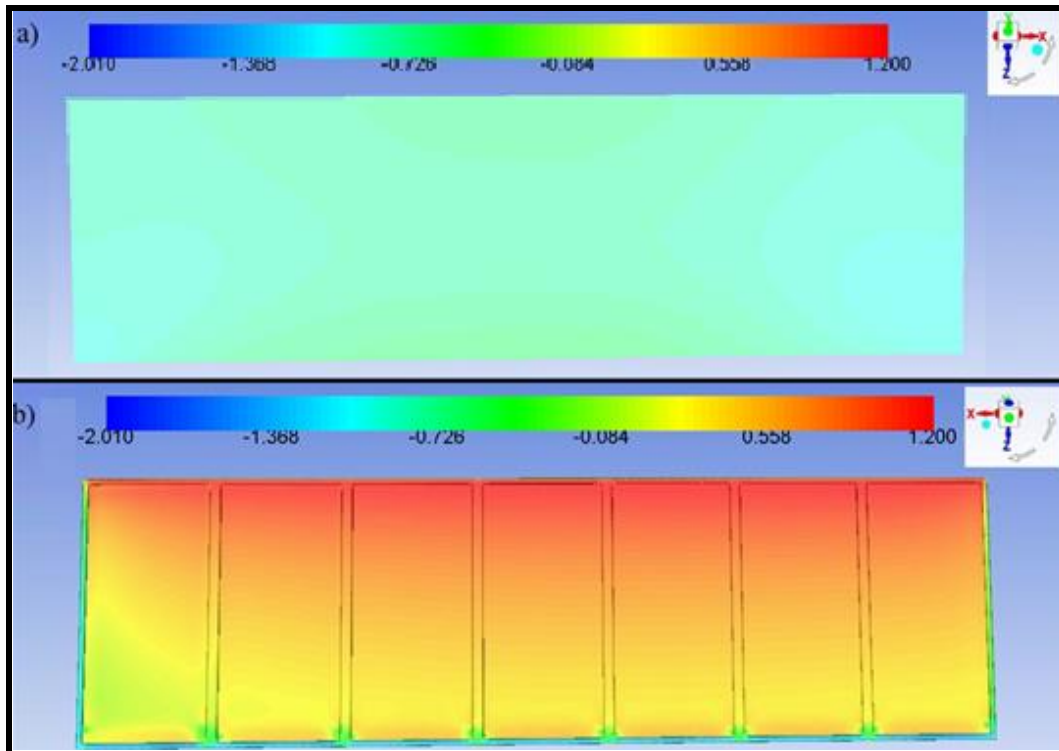


Ek 1.16. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

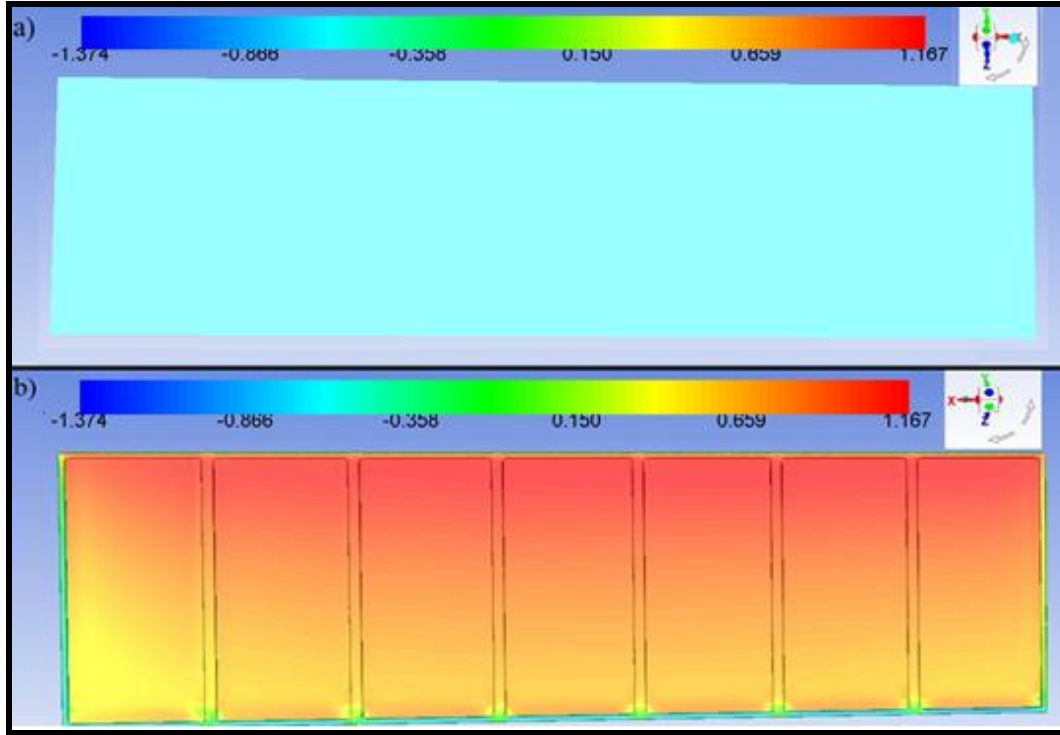


Ek 1.17. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

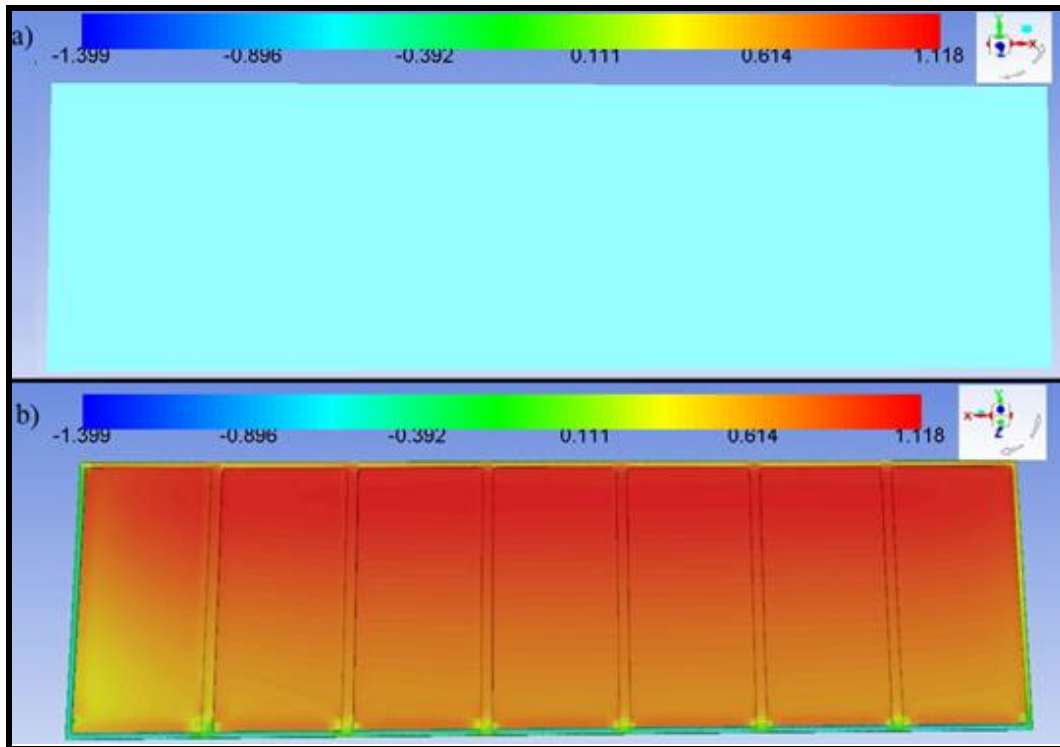


Ek 1.18. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

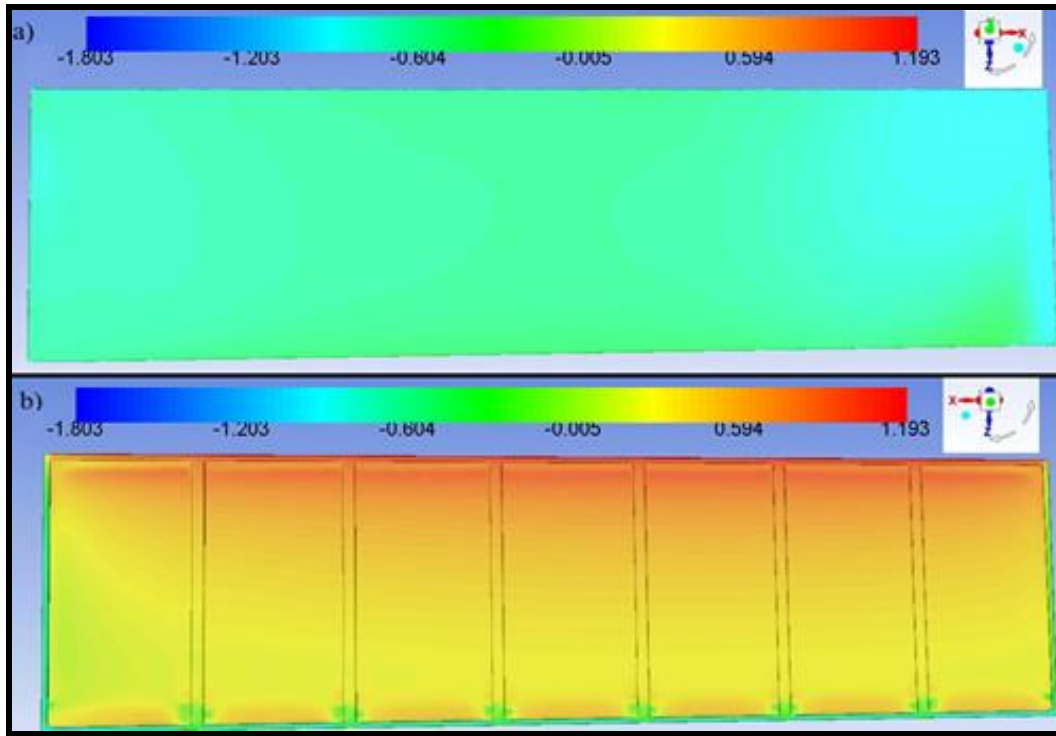


Ek 1.19. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

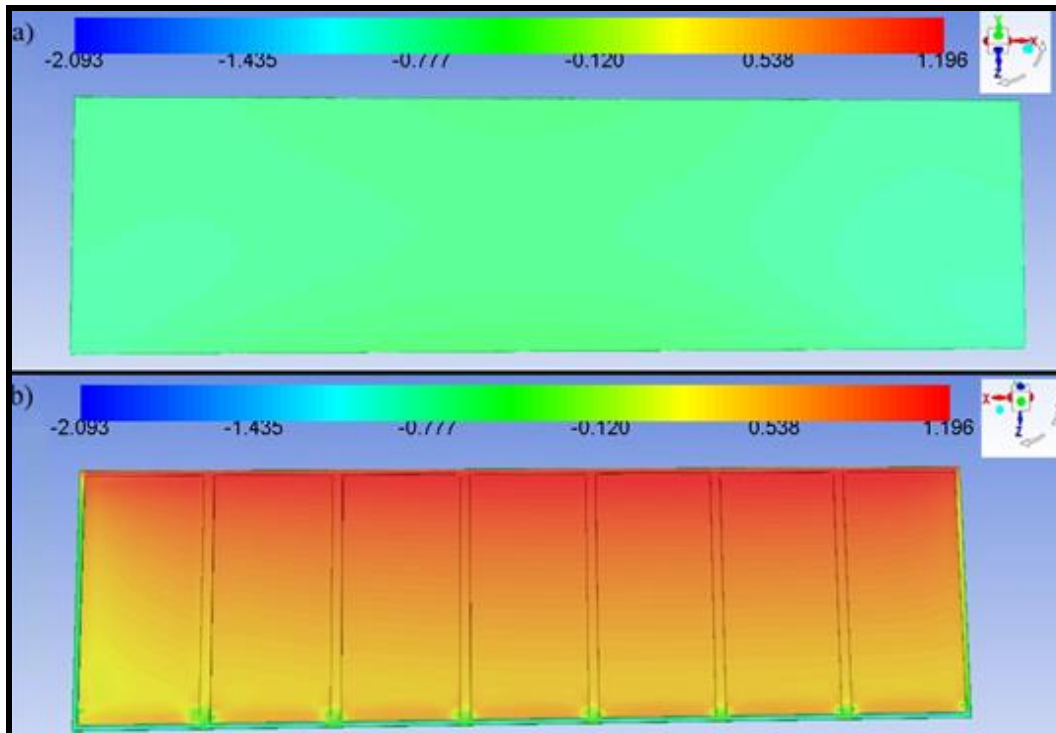


Ek 1.20. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

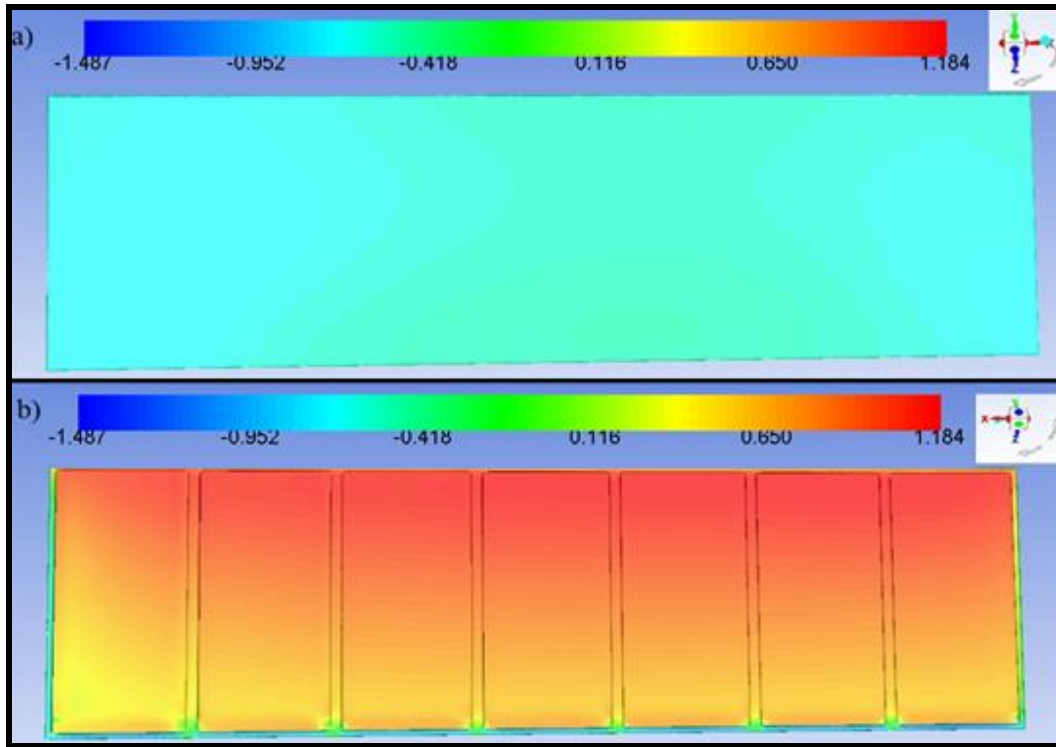


Ek 1.21. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

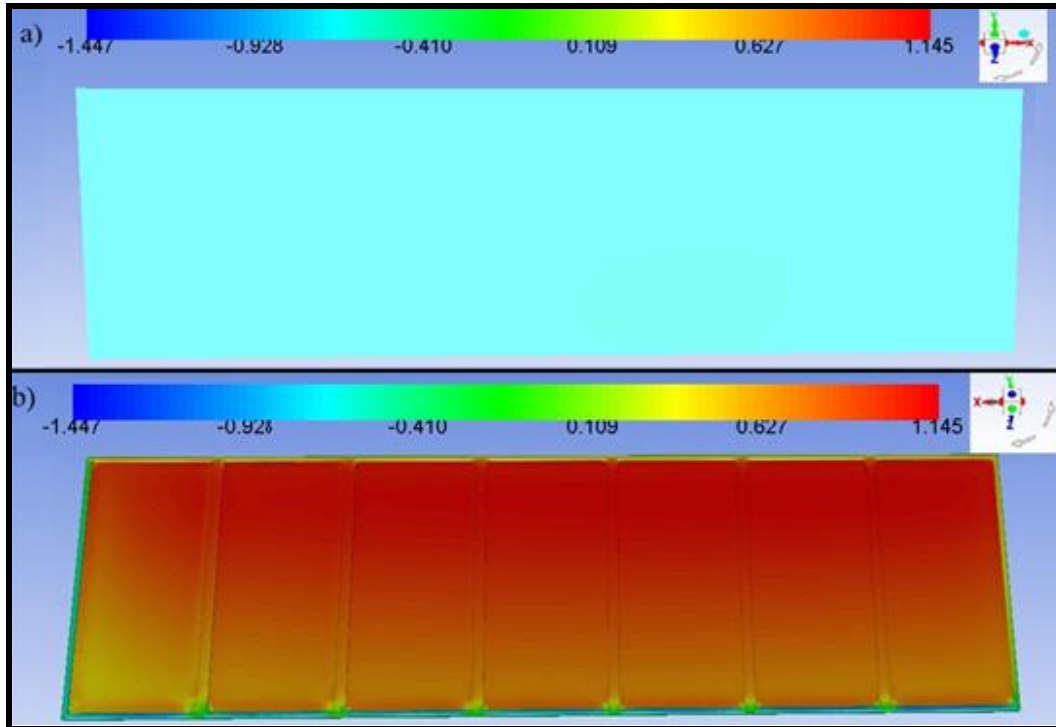


Ek 1.22. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

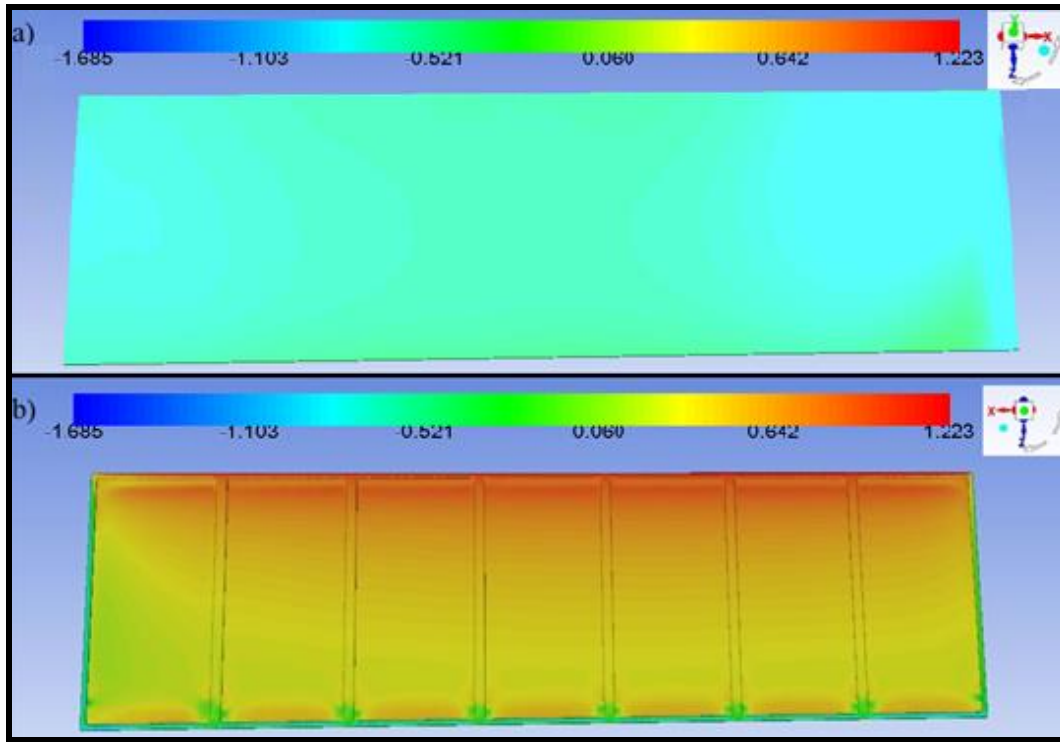


Ek 1.23. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

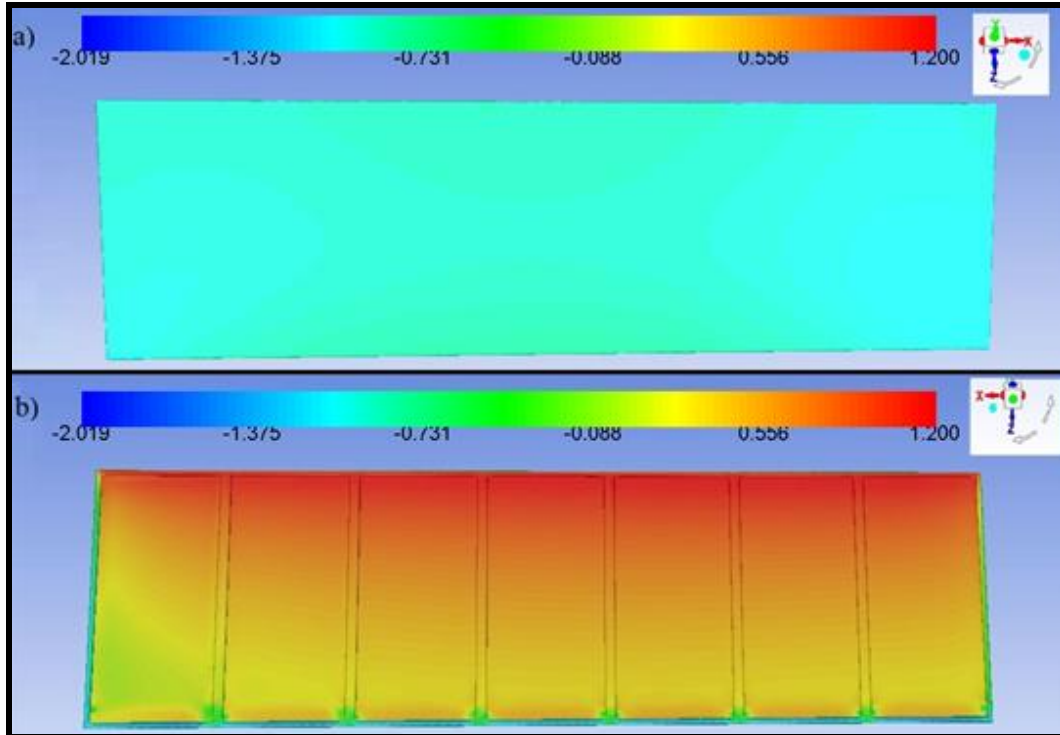


Ek 1.24. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

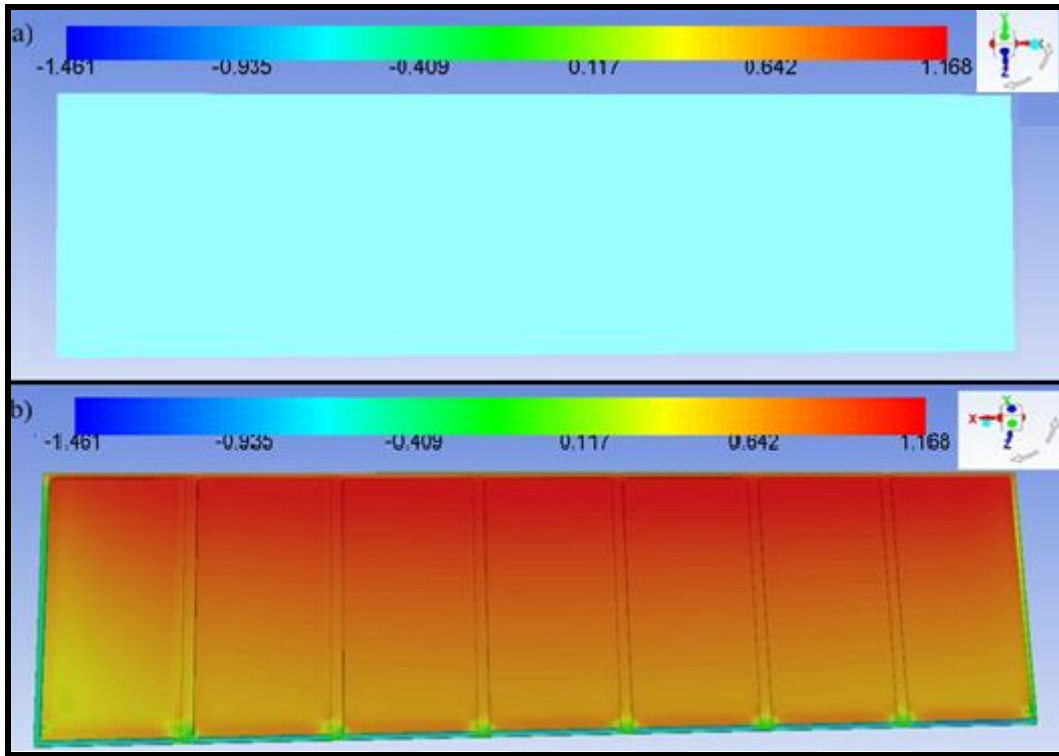


Ek 1.25. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

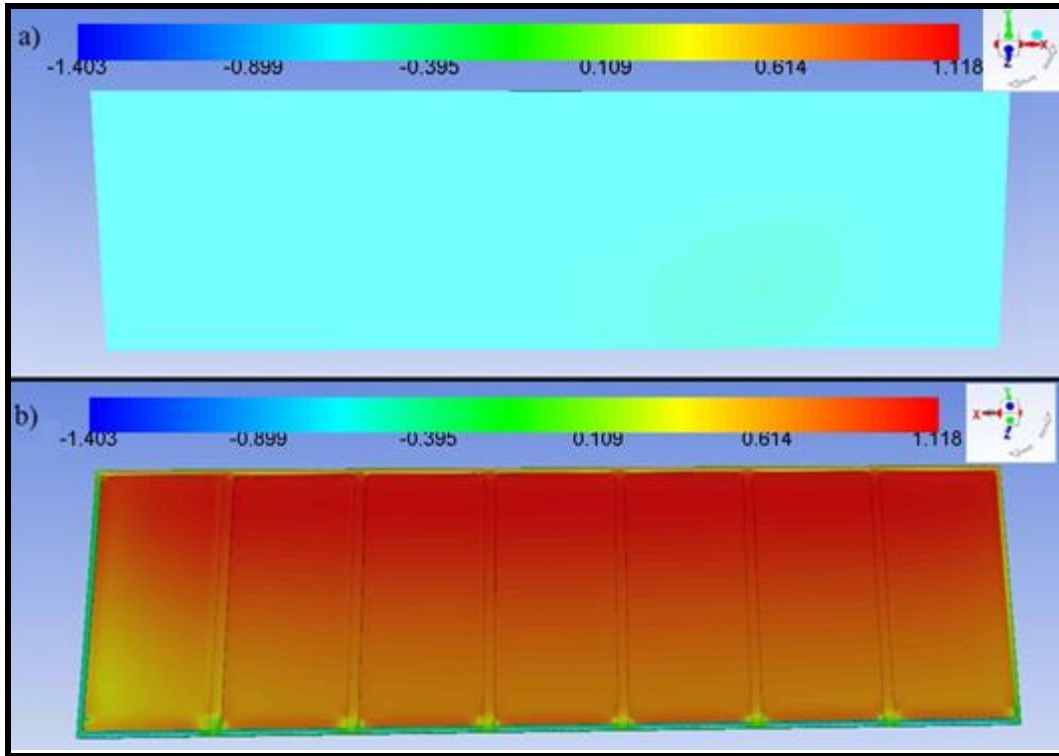


Ek 1.26. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

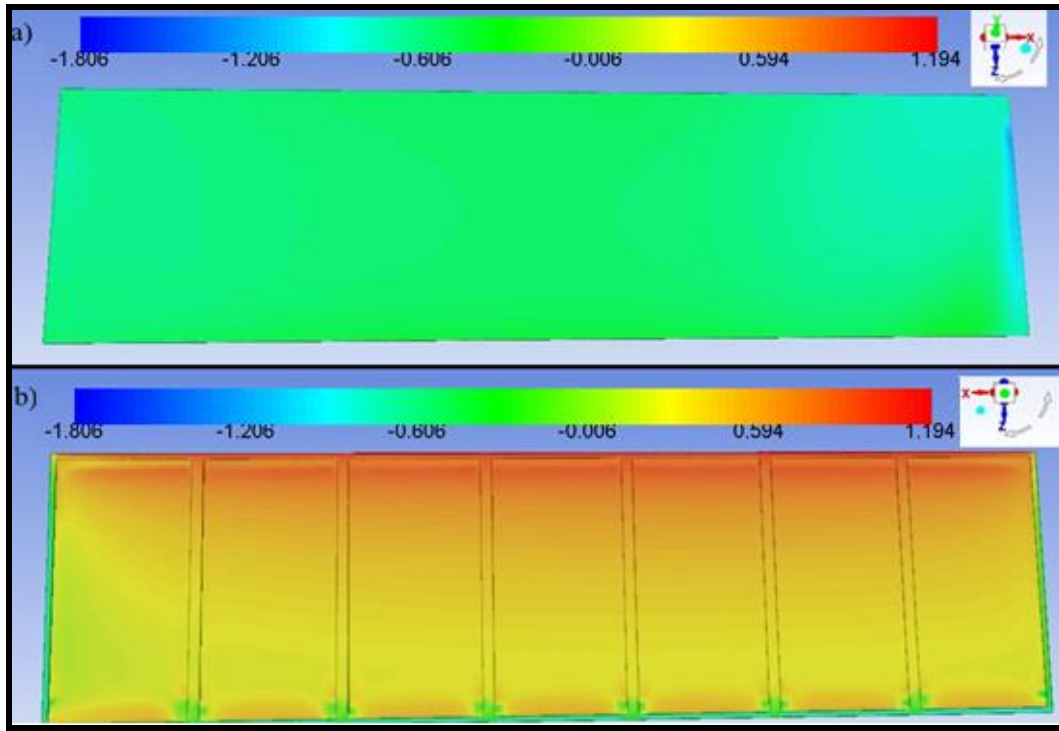


Ek 1.27. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

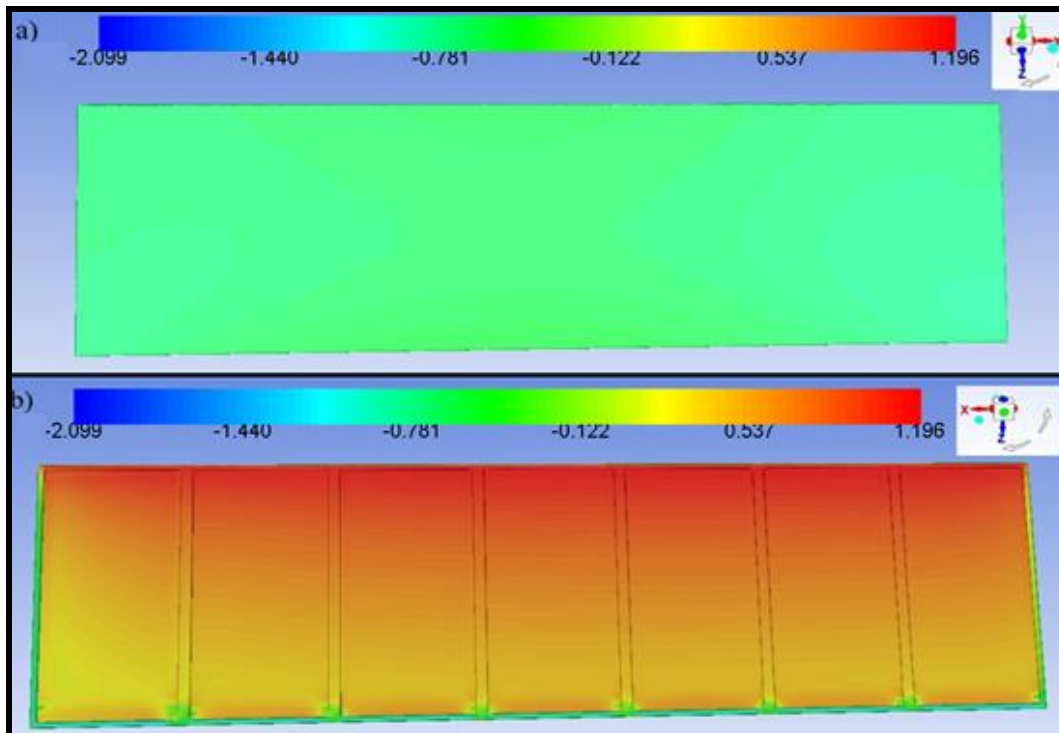


Ek 1.28. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

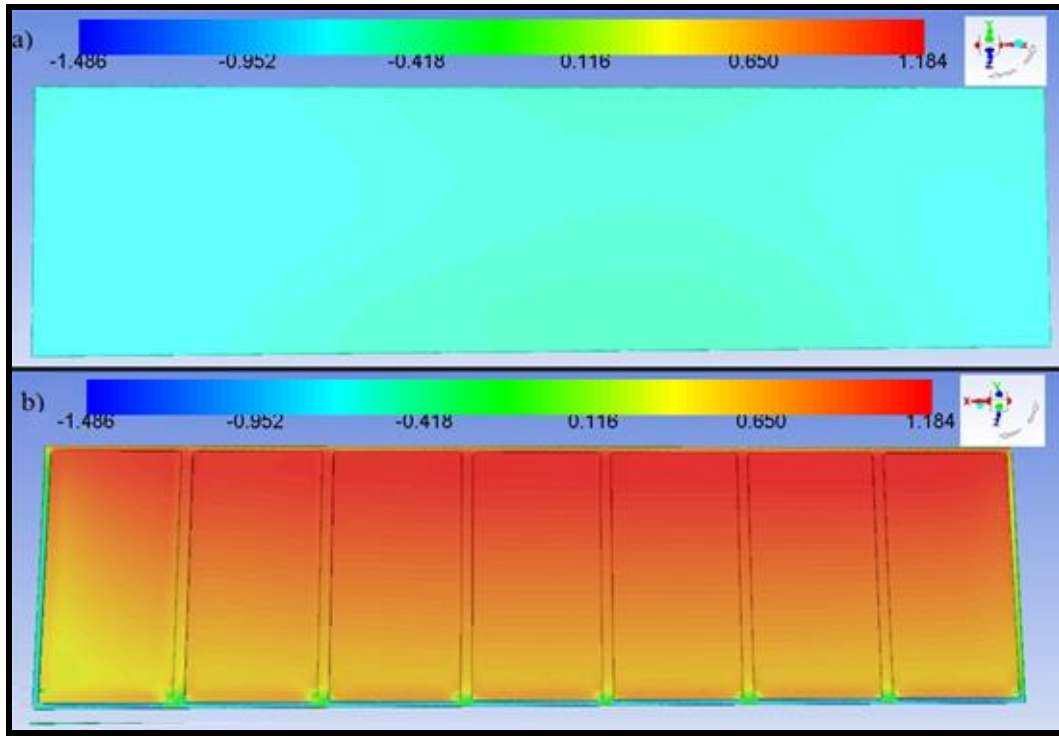


Ek 1.29. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

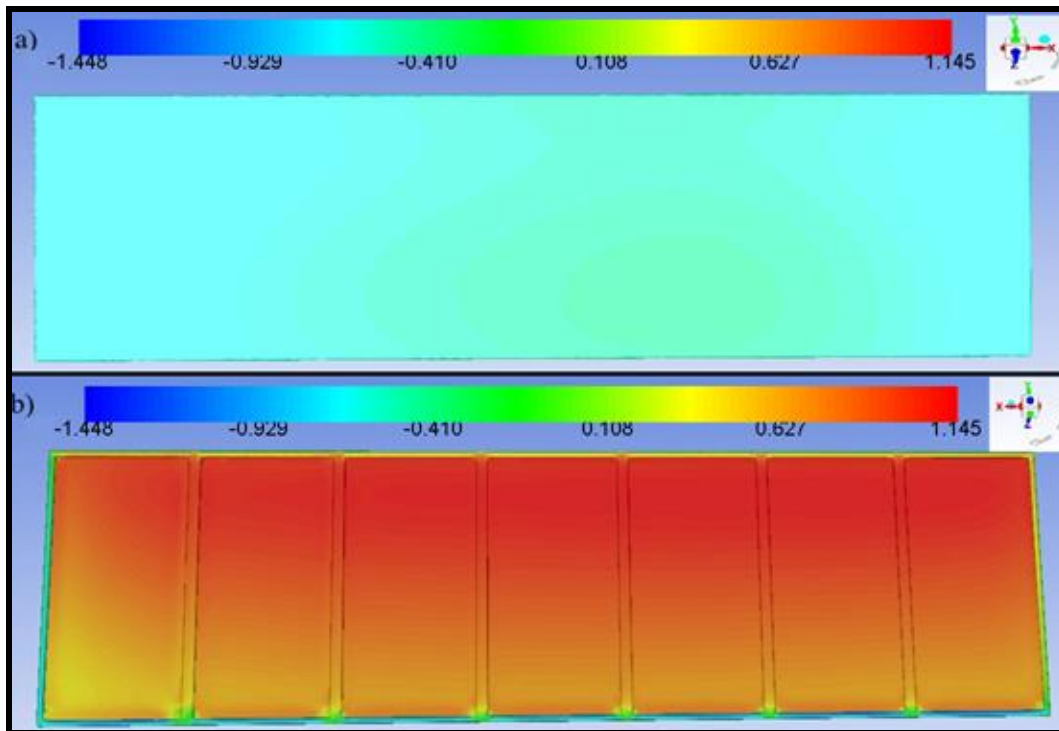


Ek 1.30. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-1. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç katsayısı dağılım grafikleri

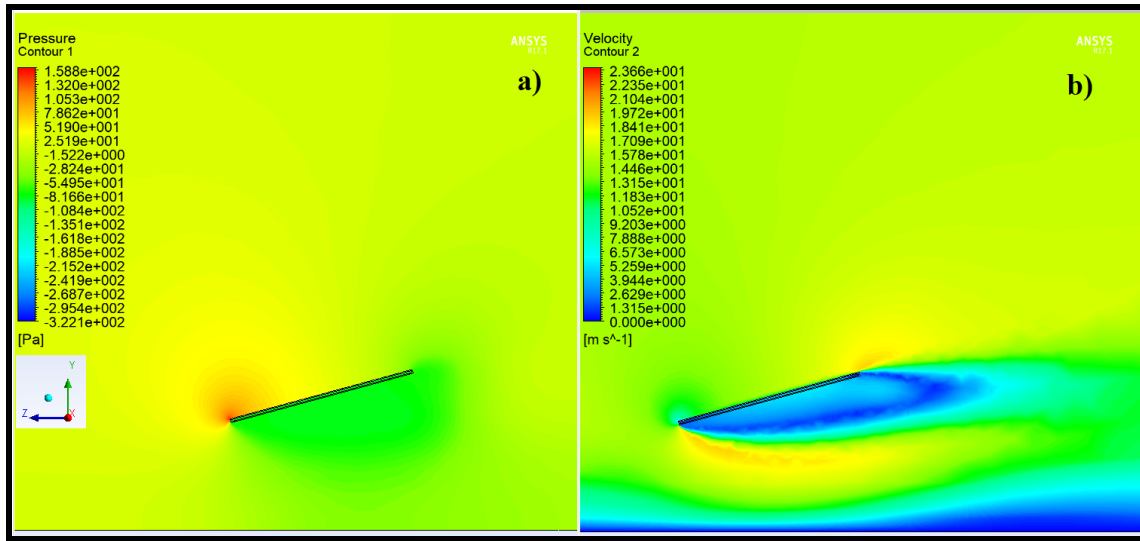


Ek 1.31. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

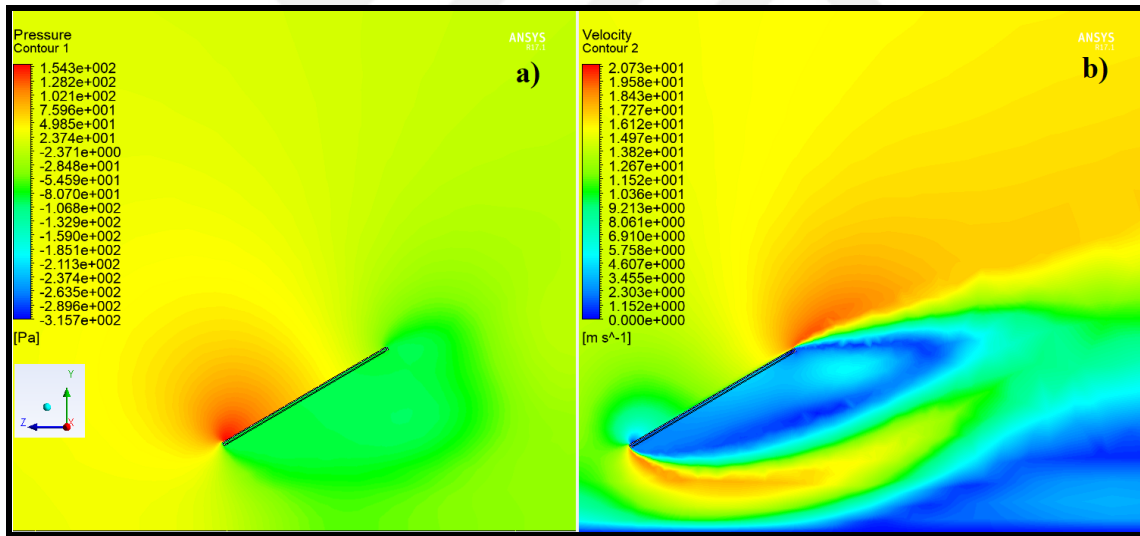


Ek 1.32. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için C_p dağılımı; a) üst b) alt yüzey

EK-2. Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

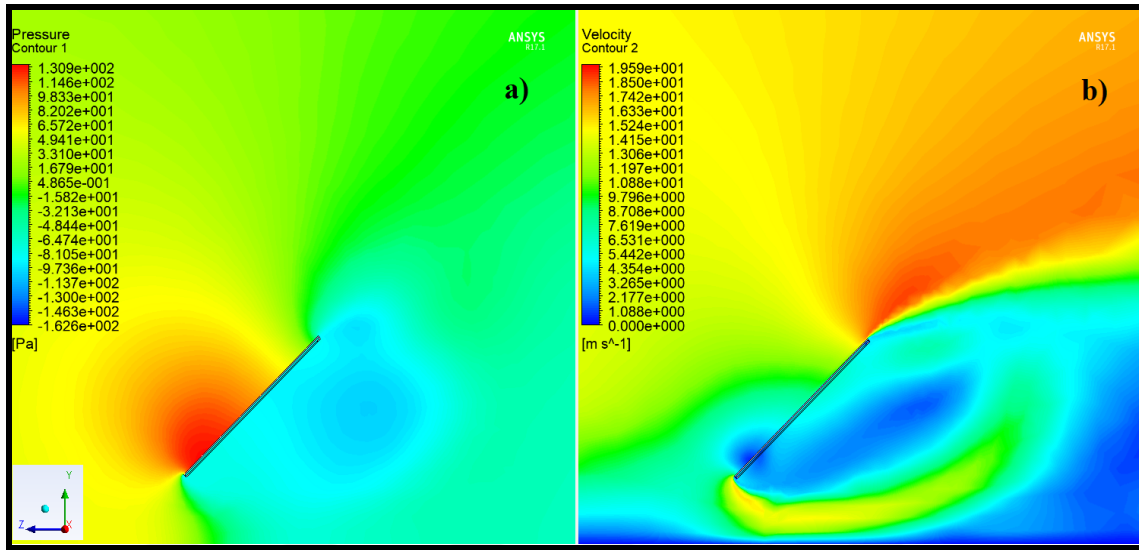


Ek 2.1. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

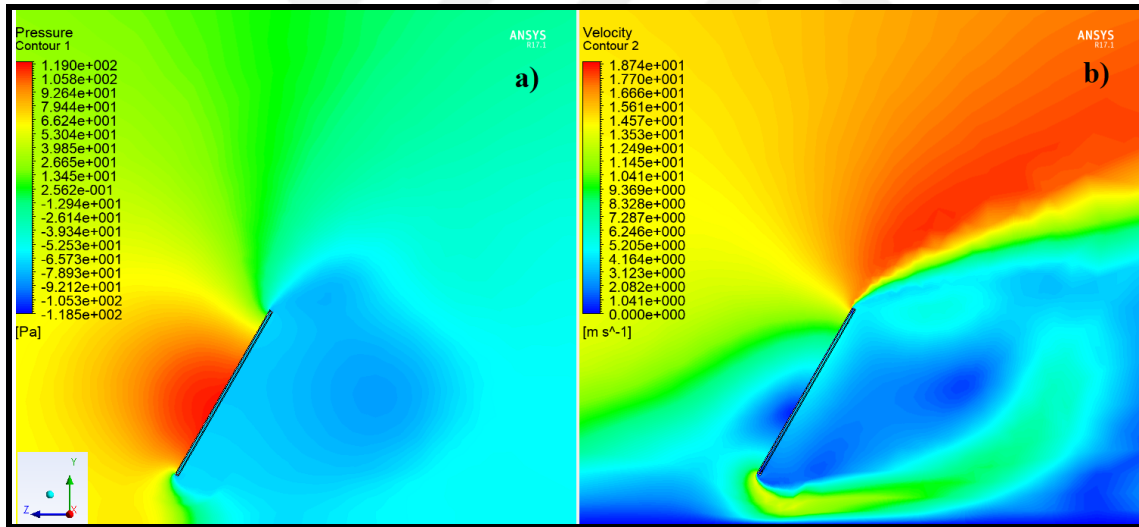


Ek 2.2. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

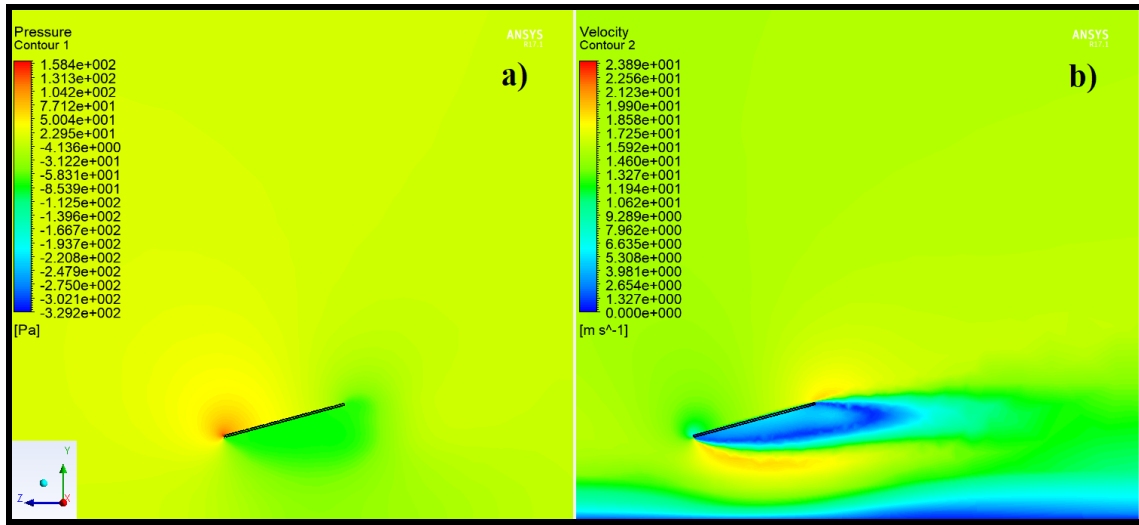


Ek 2.3. $H_k=1,1\ m$, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15\ m/s$ için; a) basınç b) hız konturları

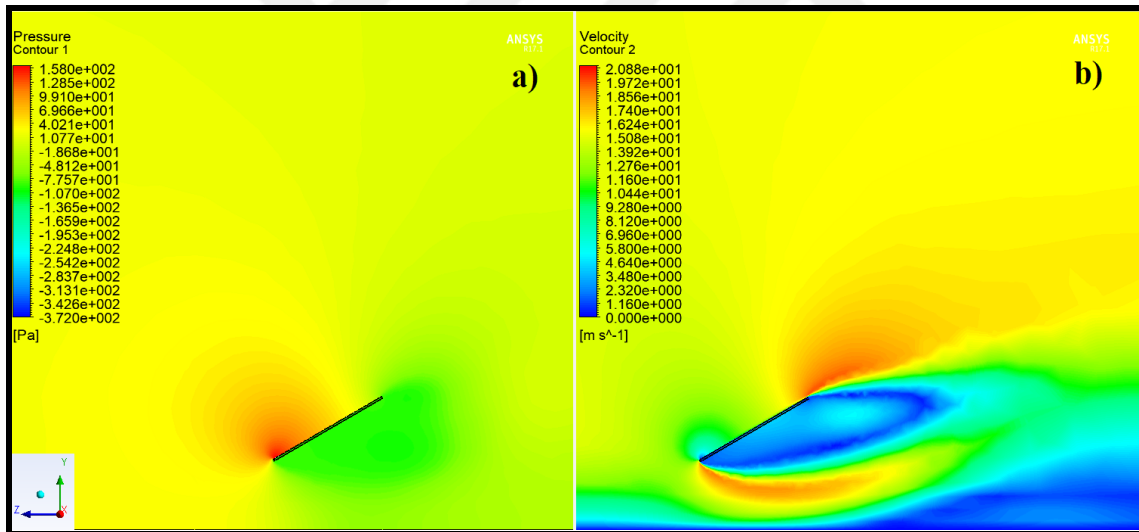


Ek 2.4. $H_k=1,1\ m$, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15\ m/s$ için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

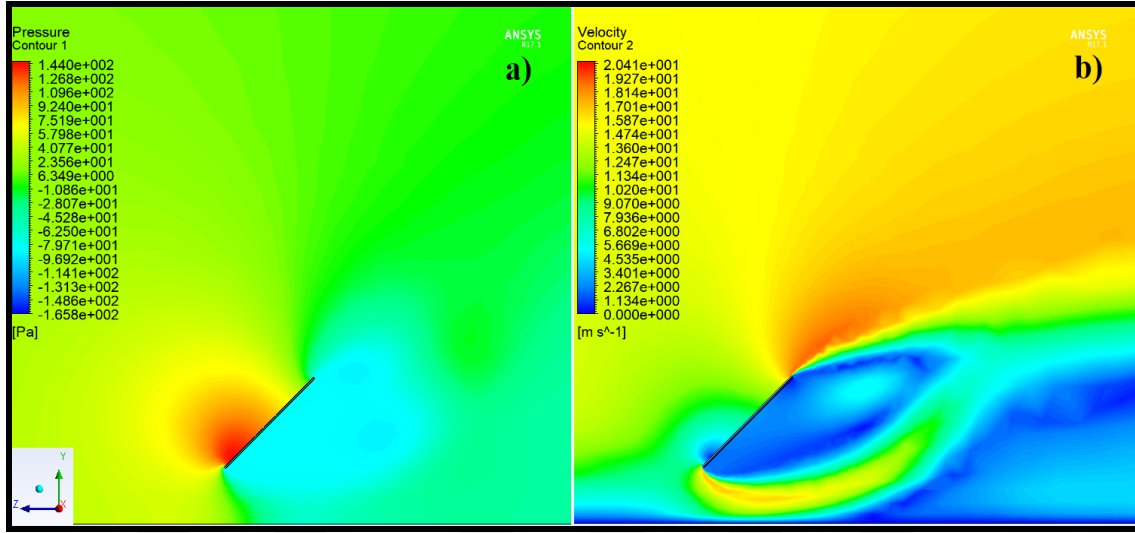


Ek 2.5. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

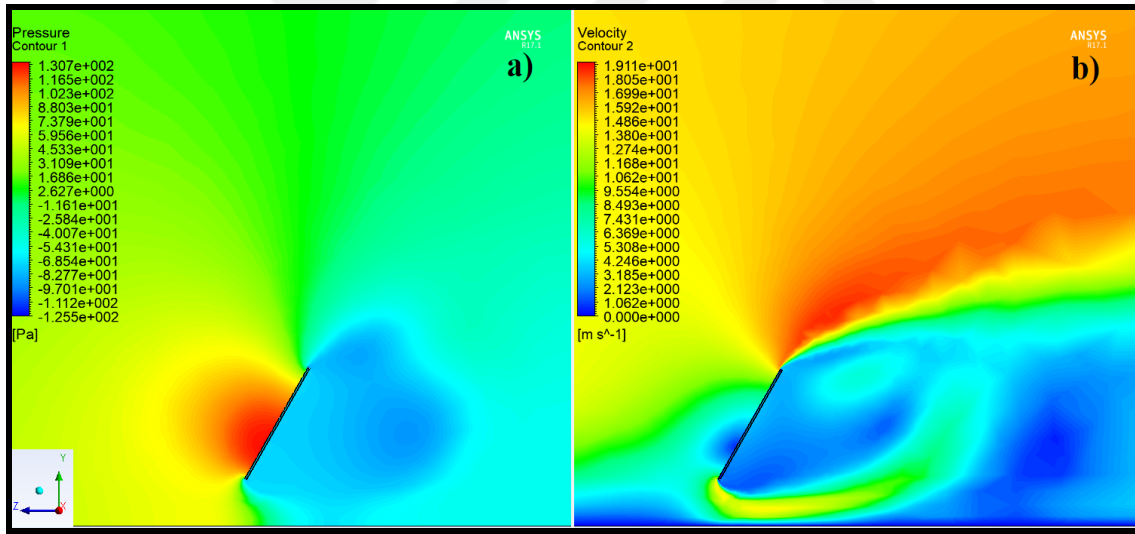


Ek 2.6. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

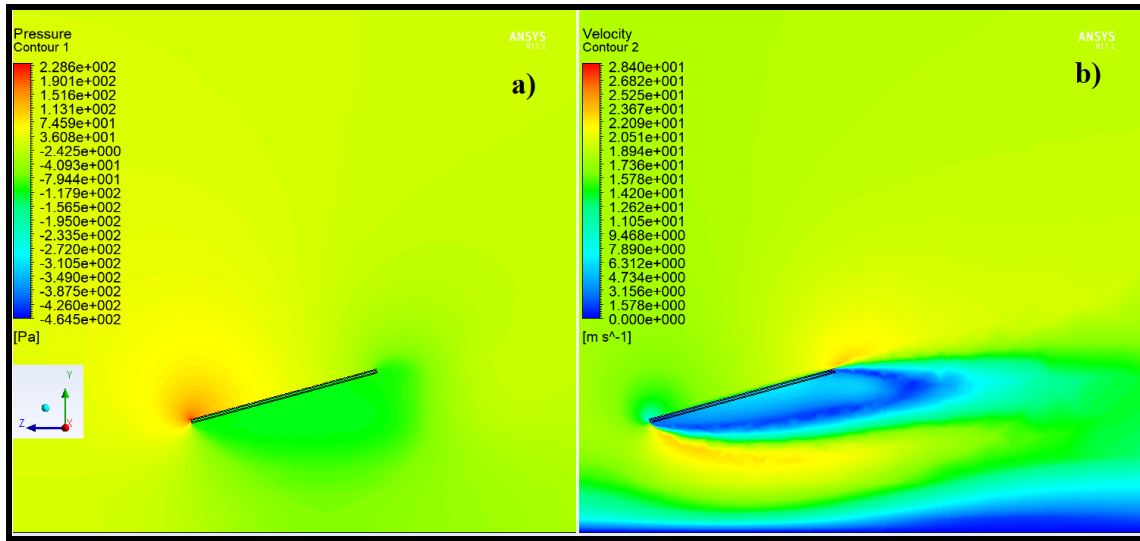


Ek 2.7. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

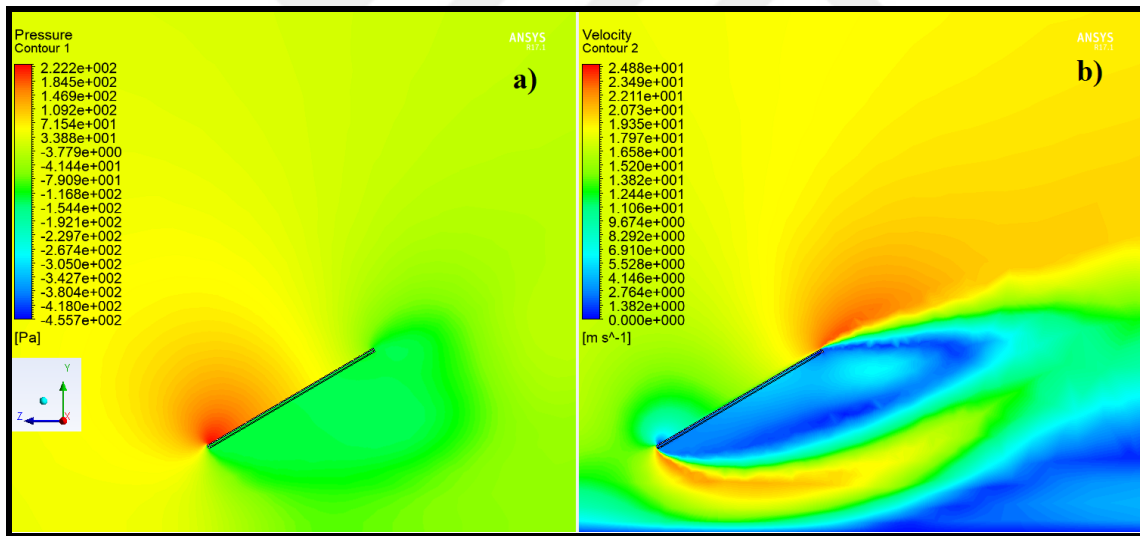


Ek 2.8. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

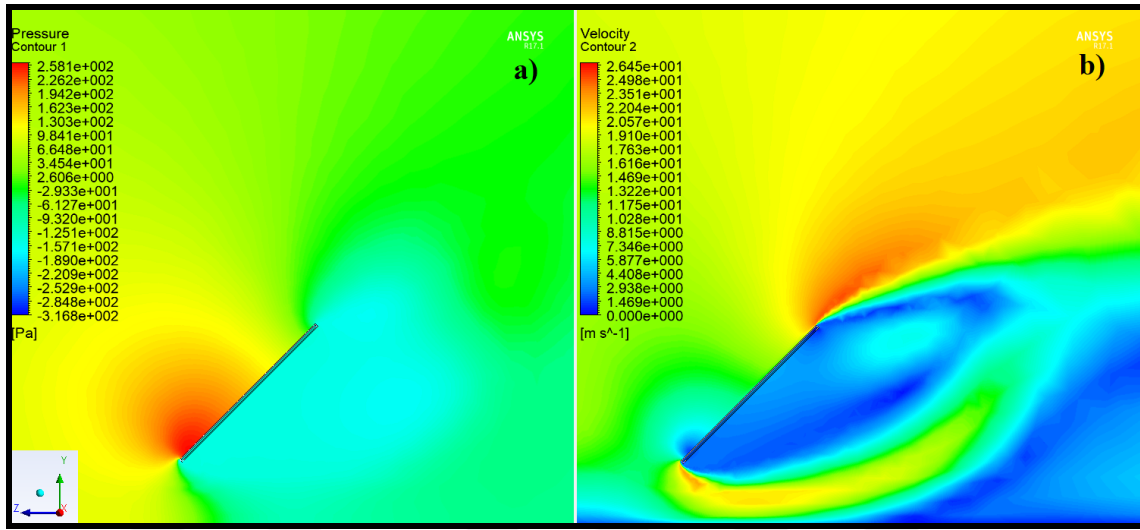


Ek 2.9. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

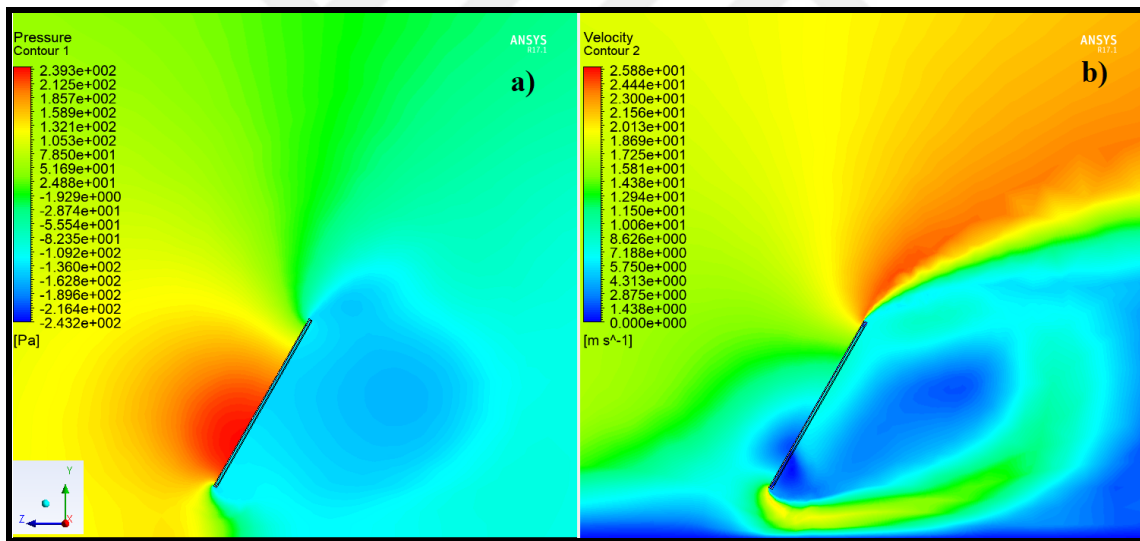


Ek 2.10. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

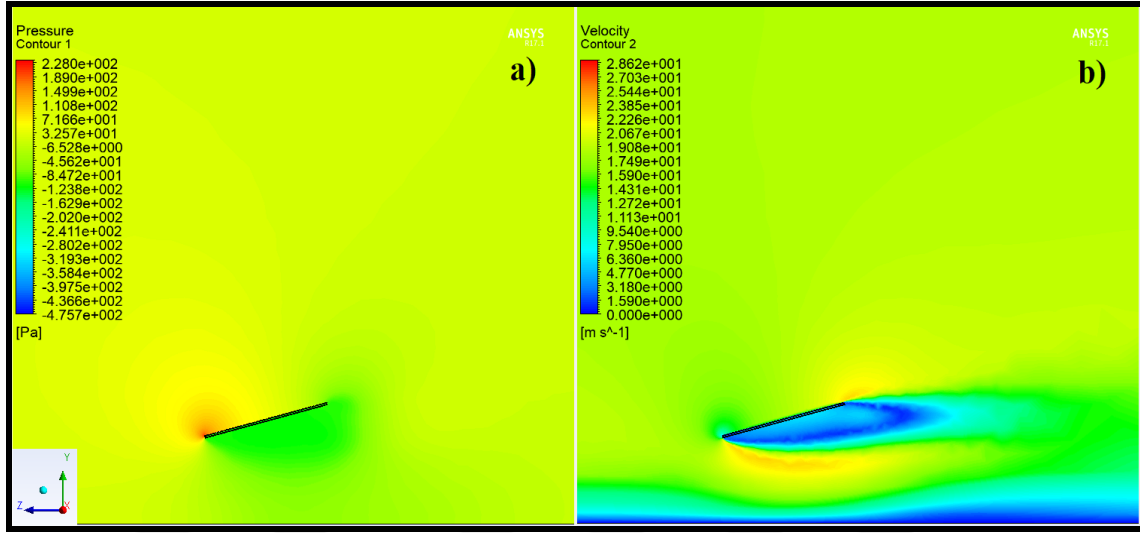


Ek 2.11. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

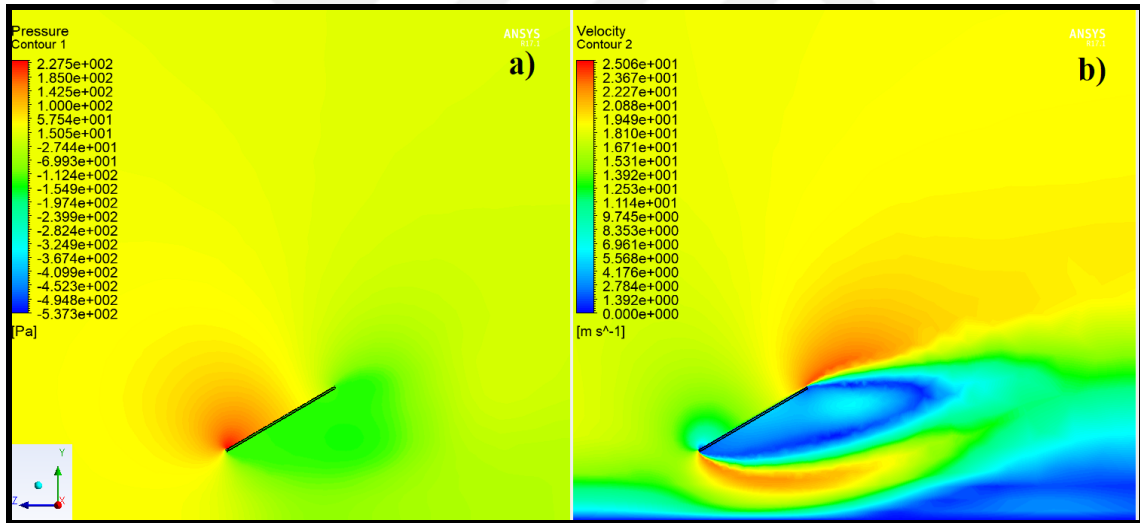


Ek 2.12. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

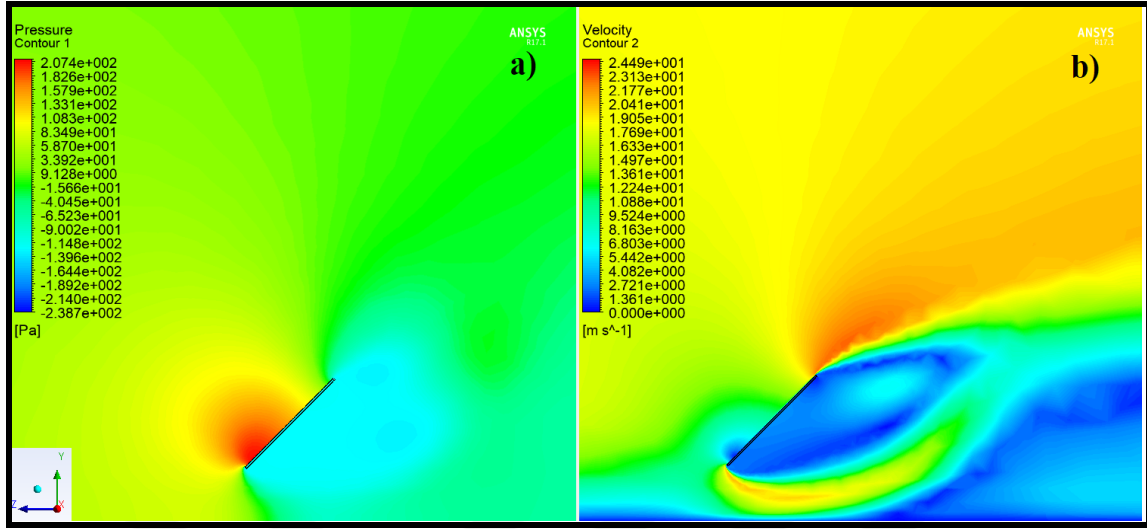


Ek 2.13. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

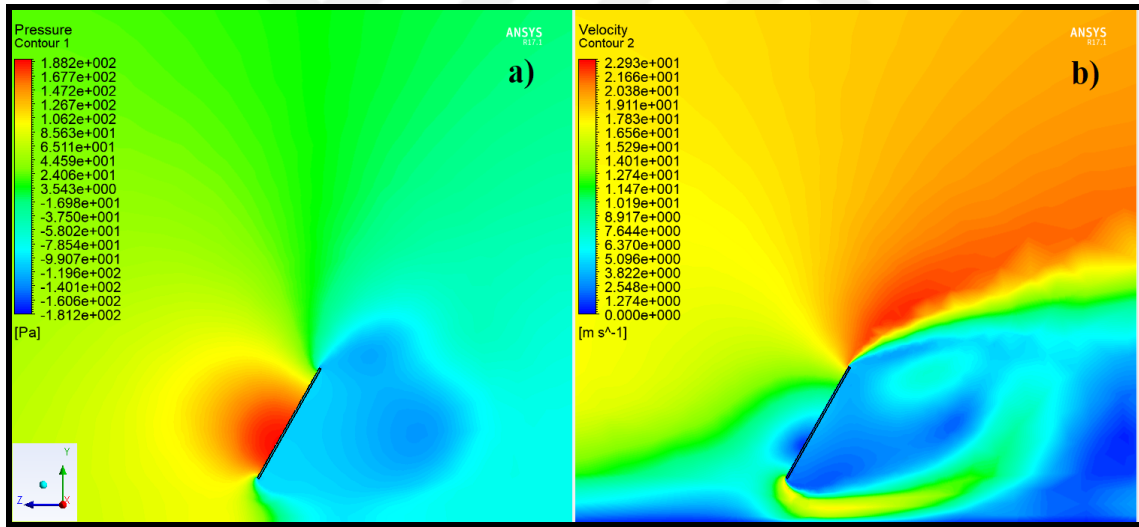


Ek 2.14. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

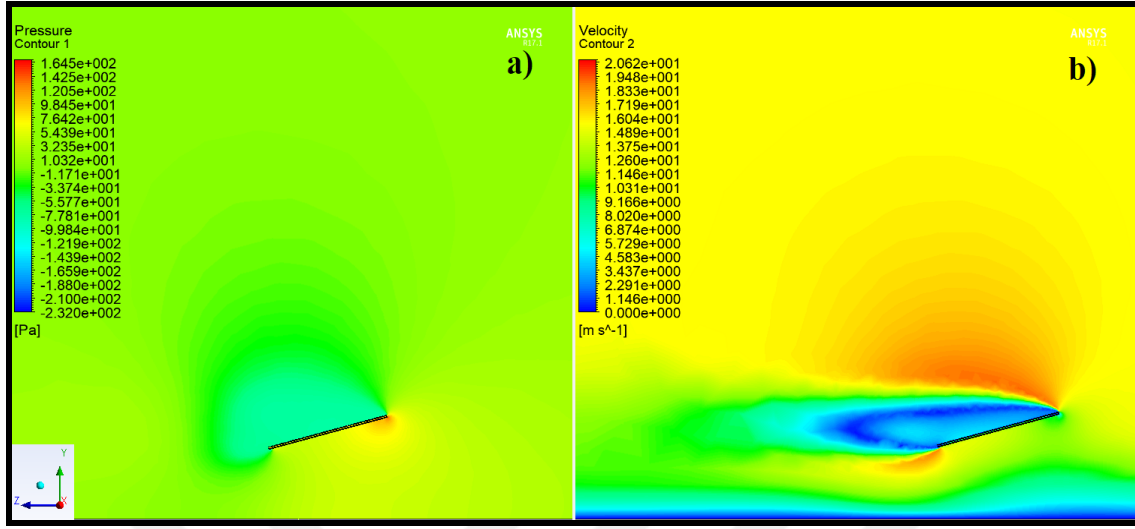


Ek 2.15. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

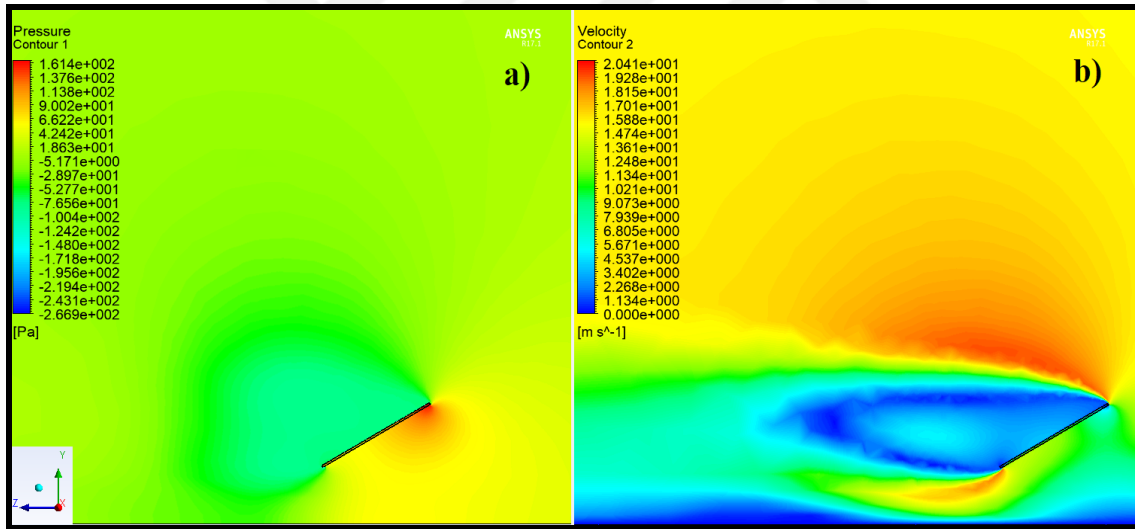


Ek 2.16. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=0^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

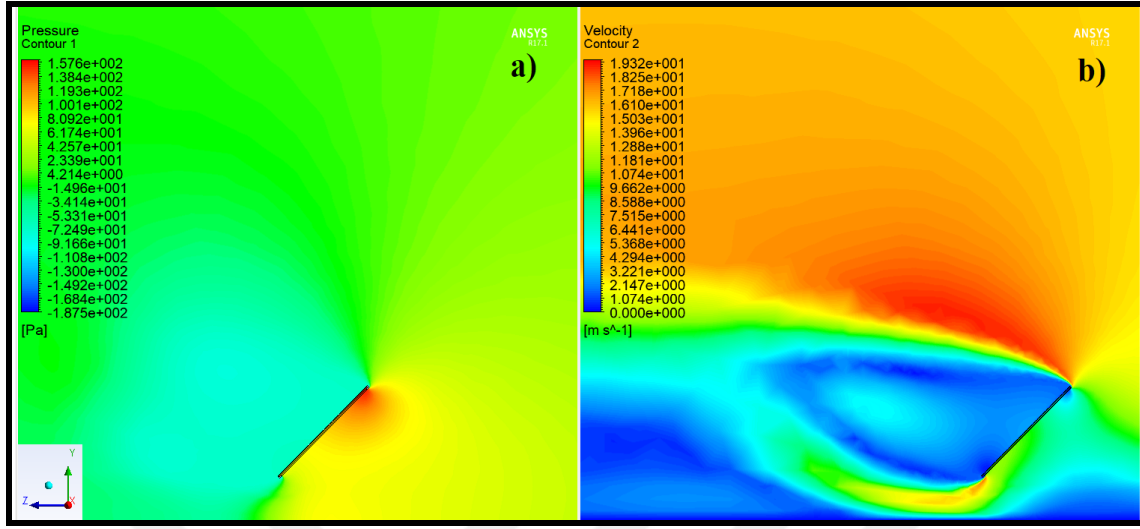


Ek 2.17. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

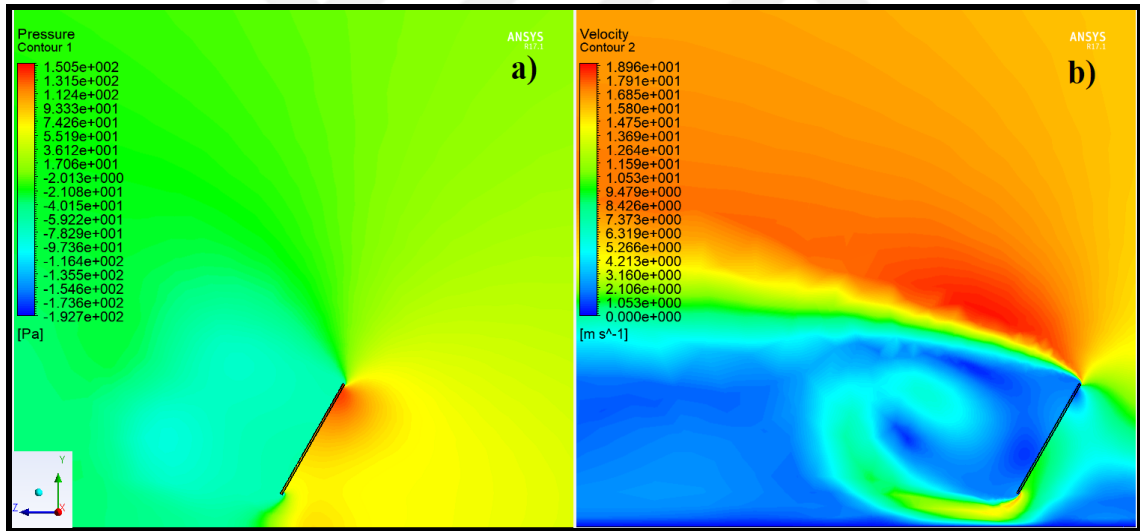


Ek 2.18. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

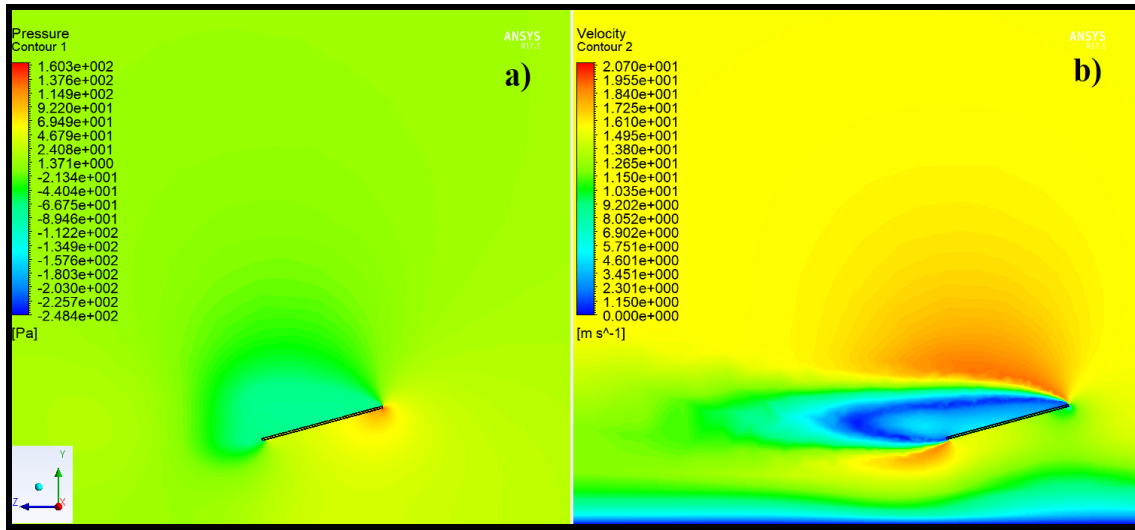


Ek 2.19. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

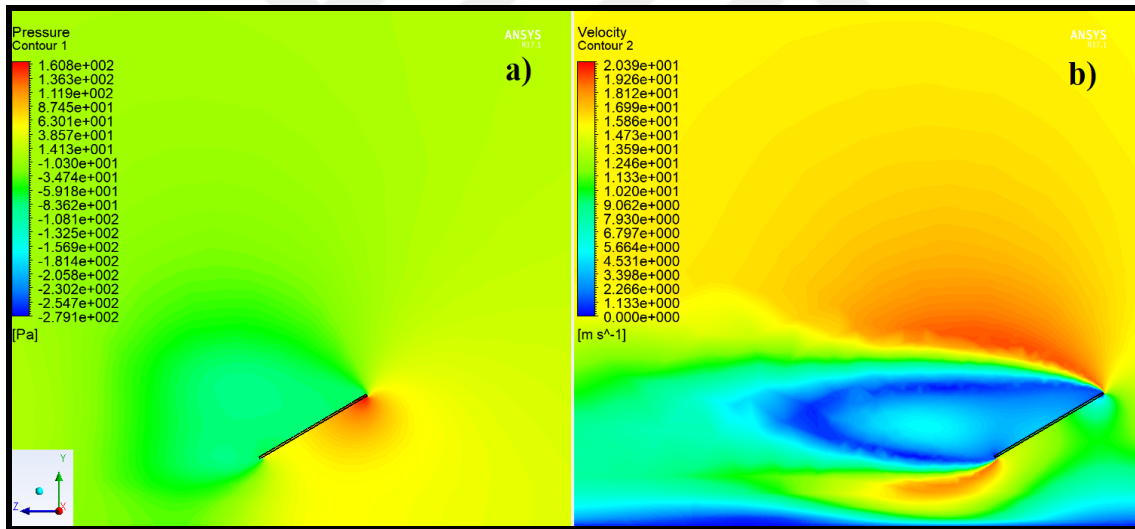


Ek 2.20. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

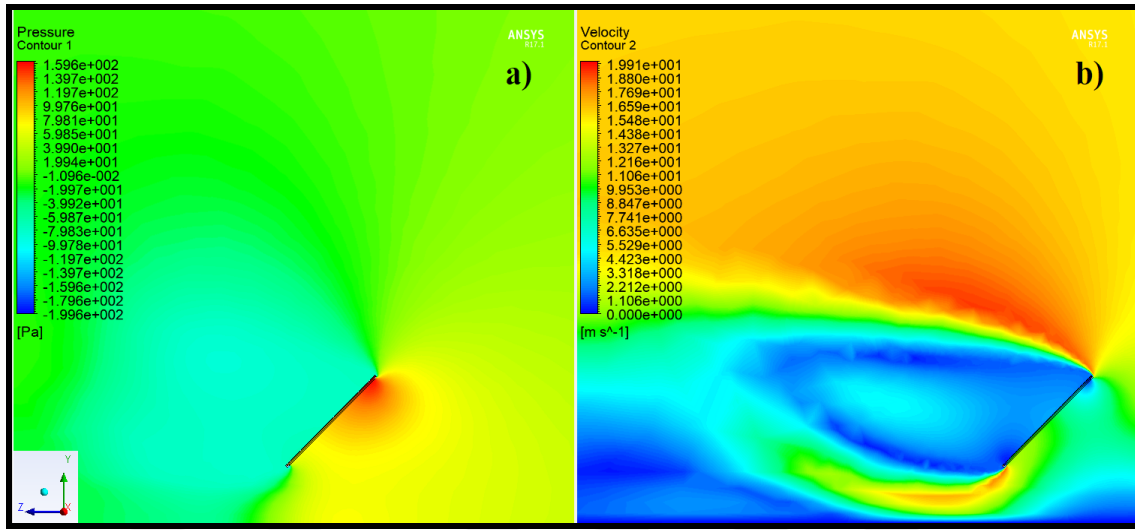


Ek 2.21. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

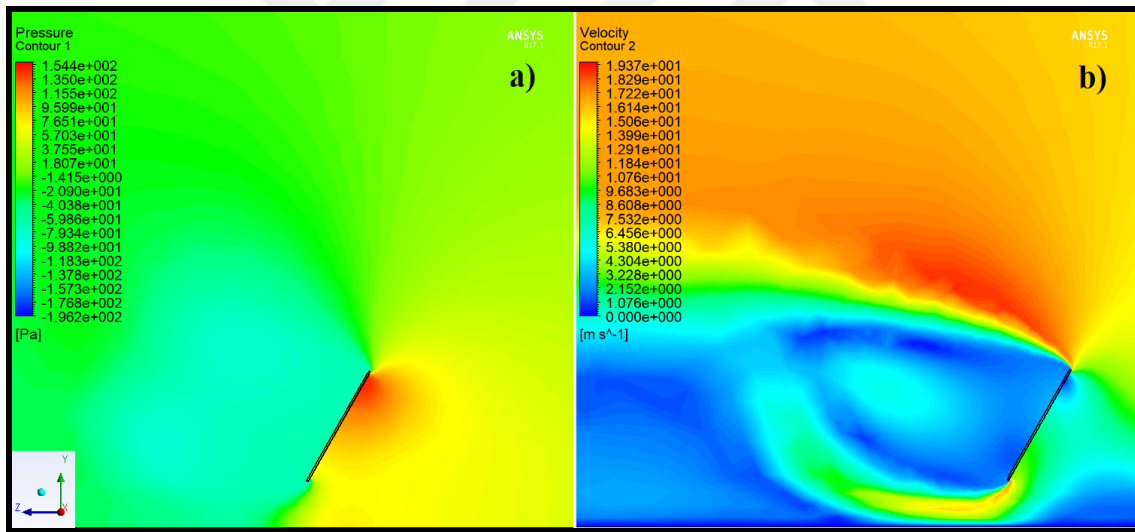


Ek 2.22. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

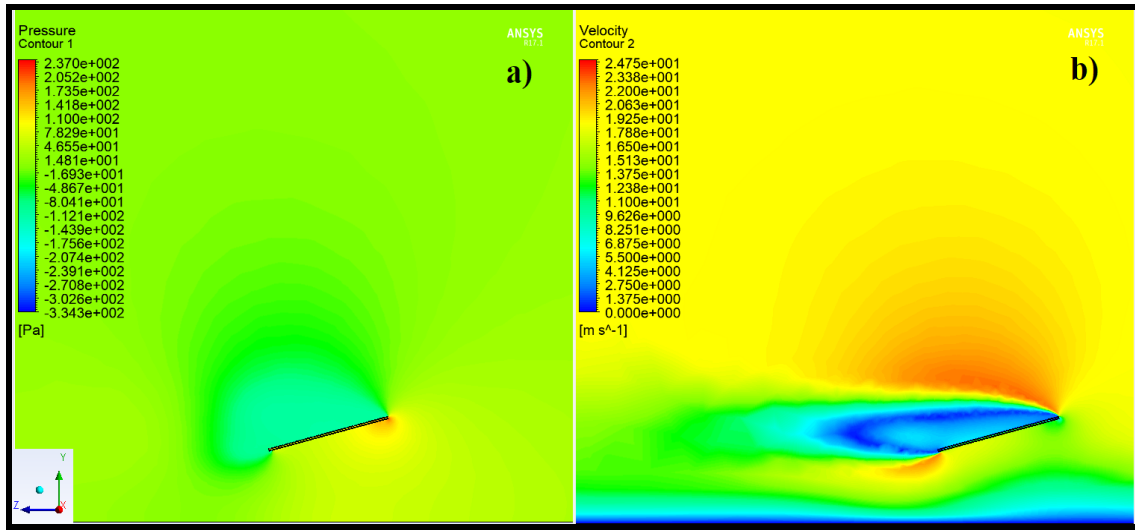


Ek 2.23. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

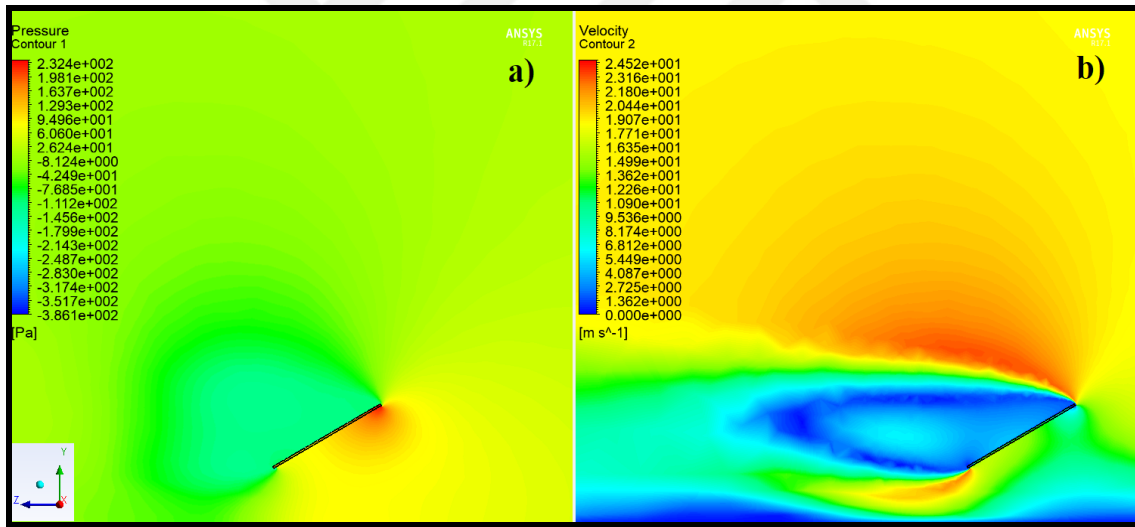


Ek 2.24. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=15$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

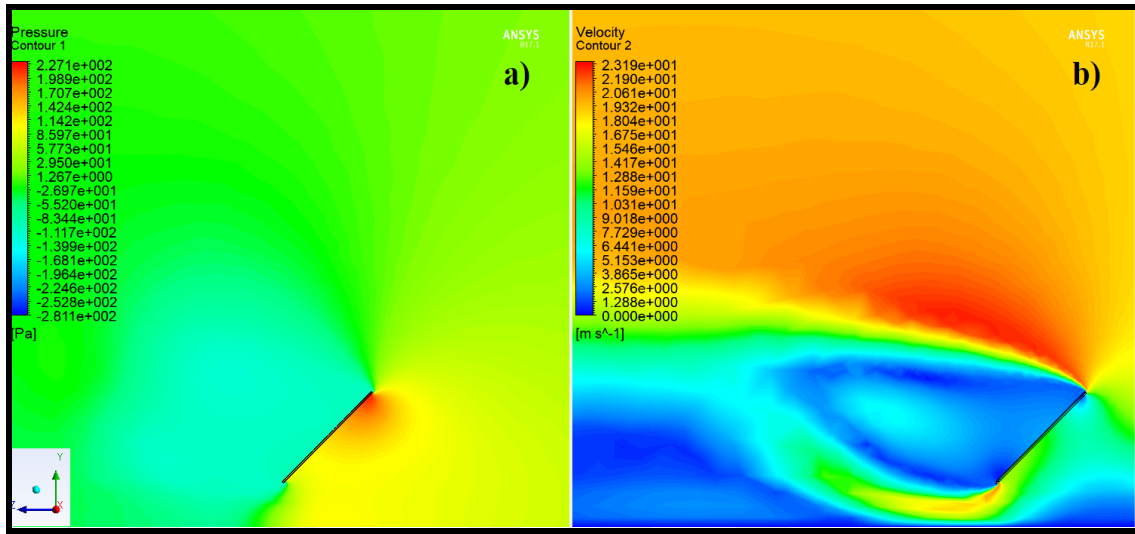


Ek 2.25. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

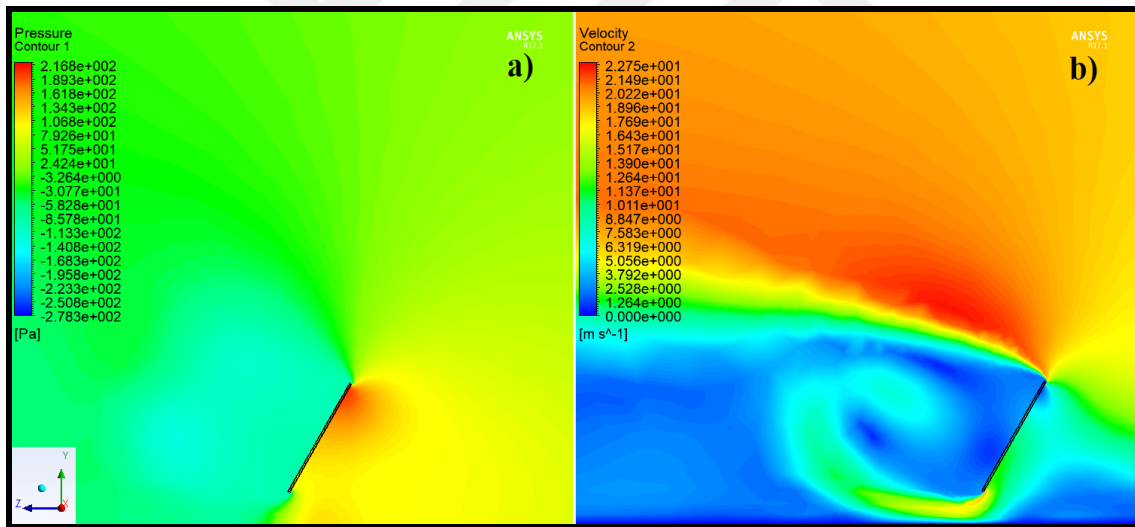


Ek 2.26. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

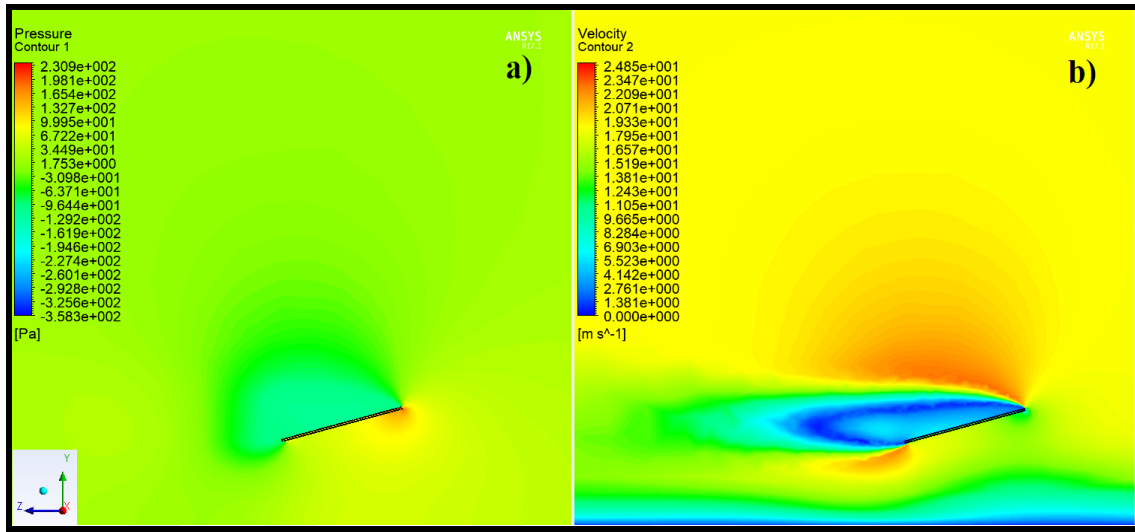


Ek 2.27. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

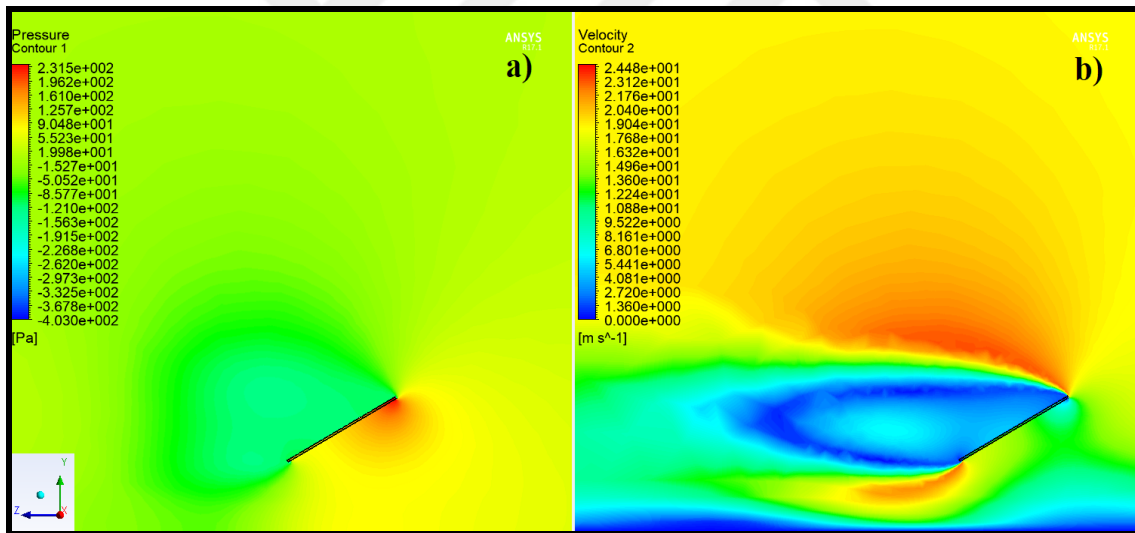


Ek 2.28. $H_k=1,1$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları

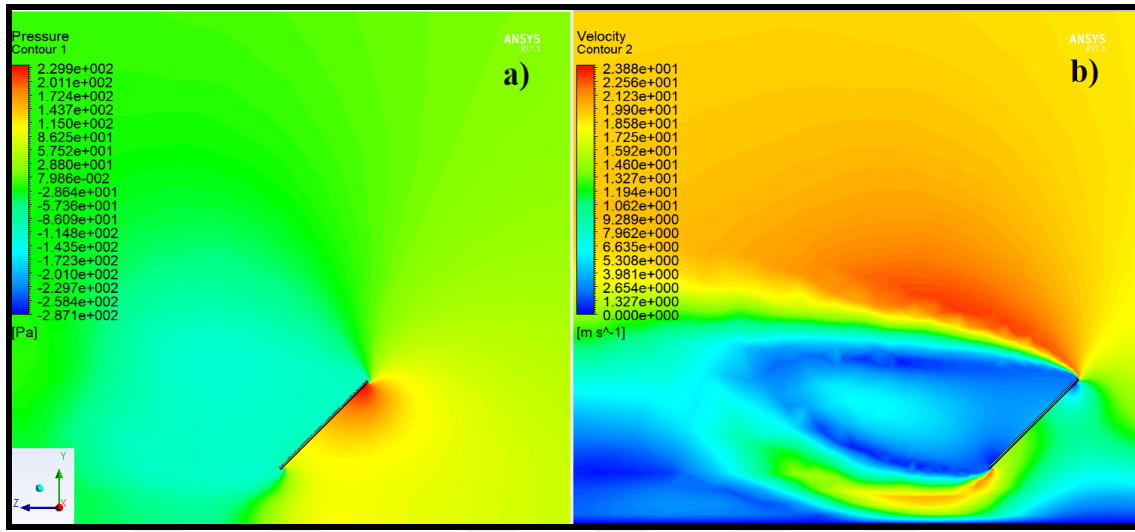


Ek 2.29. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=15^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

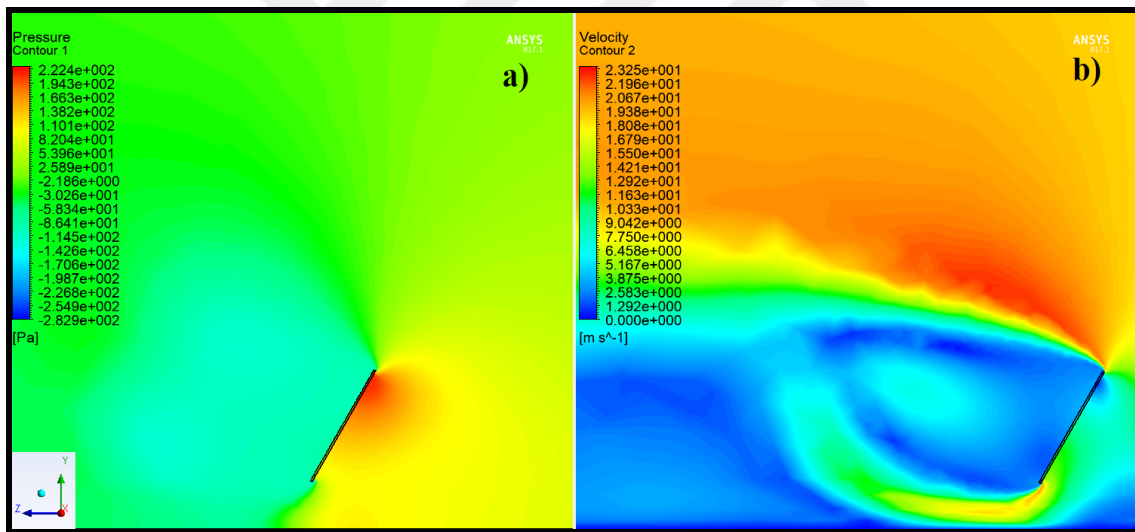


Ek 2.30. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=30^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

EK-2. (devam) Tüm simülasyon durumları için oluşturulan basınç ve hız konturları



Ek 2.31. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=45^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları



Ek 2.32. $H_k=1,3$ m, $\alpha_p=60^\circ$, $\alpha_r=180^\circ$, $V_{ref}=18$ m/s için; a) basınç b) hız konturları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜRÜK, Fatih
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.08.1989, Isparta
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (530) 521 97 90
 e-mail : fyurukk@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gaziantep Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2013
Lise	Isparta Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Başarıarge Enerji Teknolojileri A.Ş.	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Yürük, F., ve Gemalmayan, N. (2019). Solar Tracker Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi Rüzgâr Kuvveti Dayanımının Analitik Çözümleri. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 34-46.

Hobiler

Yüzme, Futbol, Halk Oyunları

DİZİN

A

açık arazi · iv, 1, 2, 9, 25
aerodinamik · 3, 4, 5, 6, 7, 26, 35,
37, 38, 39, 51
ağ yapısı · x, 3, 4, 31, 36, 52
akış alanı · x, 16, 17, 18, 19, 24,
25, 36, 39
akış modeli · 15, 36
akışkan · iv, 15, 20, 32, 36, 39,
51
akışkanlar mekaniği · 3, 15
akma · iv, 2, 33, 34, 50, 52
Ansys Fluent · iv, v, 15, 18, 20,
24, 25, 26, 27, 51, 52
Ansys Structure · iv, v, 29, 30, 51
atmosferik · 3, 6, 17, 24, 25, 39,
51
atmosferik sınır tabaka · 25
ayrılma noktası · 43
azimuth · 11

B

basınç · iv, viii, xi, xii, 3, 4, 7, 8,
18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 32,
35, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 51,
52, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62,
63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70,
71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78,
79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86,
87
basınç katsayısı · viii, xi, xii, 7,
26, 40, 41, 42, 56, 57, 58, 59,
60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67,
68, 69, 70, 71

Ç

çalkantı hız · 21

çarpıklık faktörü · 19, 31

D

daimi · iv, 6, 7, 39, 51
deformasyon · 32, 52
deplasman · xi, xiii, 2, 4, 39, 46,
47, 48, 51, 52
dinamik · 8, 19, 20, 32
direnc · xi, xii, 6, 26, 27, 37, 43,
44, 46, 51
direnc katsayısı · xii, 44, 51
diskritizasyon özellikleri · 28
duvar · 17, 18, 24

E

elastik · 32, 33, 34
enerji · iv, x, xii, xiv, 1, 8, 9, 10,
12, 15, 21, 22, 28, 51
eşdeğer gerilme · 34

F

fotovoltaik · 6, 7

G

geometri · 14, 15, 29, 36
gerilim · iv, xi, 1, 4, 8, 33, 39, 48,
49, 50, 51, 52
gerinim · x, 8, 33
girdap · 6, 21
Güneş enerjisi santralleri · 3, 9
Güneş enerjisi sistemleri · 1
güneş ışınları · 10, 13
güneş panelleri · iv, 1, 3, 5, 6, 8,
9, 11, 14, 15, 18, 19, 32, 35,
37, 39, 41, 42, 46, 47, 51, 52
Güneş takip sistemi · 2, 8
Güneş takip sistemleri · iv, 1, 11

H

HAD · vii, xiv, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 14,
15, 35, 39, 43, 44, 51
harmonik · 32
hasar · iv, x, 1, 2, 3, 8, 33, 50, 52
hava · 9, 10, 15, 16, 18, 20, 25,
26, 36, 39, 44, 46
hesaplamalı akışkanlar dinamiği ·
iv, 2
hexahedral · 18, 30
hız · viii, x, xi, xii, xiii, 6, 18, 20,
23, 24, 25, 27, 42, 43, 72, 73,
74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81,
82, 83, 84, 85, 86, 87

İ

iterasyon · 37

K

kaldırma · xi, xii, 6, 7, 26, 27, 37,
44, 45, 46, 51, 52
kaldırma katsayısı · xii, 44, 46,
51
konstrüksiyon · iv, 3, 14
Kontak · 31
kord uzunluğu · 20
kuvvet · xii, 15
kütle · 15, 20, 21

L

laminar · 19
literatür · 3, 4, 37

M

momentum · 15, 20, 21, 27, 28
 Motor · 14, 30, 50, 52
 motor rulman takımı · 14, 50, 52
 mukavemet · 8, 52

N

Newton · 15
 nümerik · 7, 15, 27, 35

O

ortalama basınç katsayı · 37
 ortalama hız · x, 5, 21, 25

P

parametrik · iv, 4, 38
 plastik · 14, 32, 33
 Prandtl · 22
 prototip · vi, 3, 13, 14, 39

R

relaksasyon kriterleri · 27, 28
 Reynolds · xii, xiv, 3, 6, 19, 20,
 21, 23
 rulman takımı · 14, 30, 50, 52

rulman yatağı · 14
 rüzgâr hızı · 3, 4, 7, 8
 rüzgâr hücum açısı · xi, 4, 7, 37,
 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51
 rüzgâr şiddeti · 51
 rüzgâr tüneli · 5
 rüzgâr yükleri · iv, 1, 2, 3, 5, 51

S

sabit sistem · x, 9, 10
 sayısal analiz · 4, 35, 36, 37, 38,
 39
 SEA · xiv, 4, 8, 32, 46, 48
 SEY · vii, xiv, 4, 7, 14, 29, 39, 51
 sıkıştırılmaz · 7, 39, 51
 sınır şartları · 15, 25, 32, 36
 simülasyon · viii, ix, 4, 19, 25,
 26, 30, 39, 40, 41, 43, 44, 46,
 47, 48, 50, 51, 52, 56, 57, 58,
 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66,
 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74,
 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82,
 83, 84, 85, 86, 87
 siper etkisi · 5
 sistem bağlantısı · 39
 Solidworks · 13
 sonlu elemanlar analizi · 4
 sonlu elemanlar modeli · x, 29,
 30
 sonlu elemanlar yöntemi · iv, 4

sonlu hacimler metodu · 15, 39
 statik · 8, 20, 32, 34

T

tasarım · vi, 8
 tetrahedral · 18, 30
 TS498 · x, 2, 53
 türbülans · iv, 6, 7, 8, 19, 20, 21,
 22, 23, 24, 25, 39, 51
 türbülans yoğunluğu · 25

V

von-mises · iv, v, xi, xiv, 33, 34,
 48, 49, 50, 51, 52

Y

yakınsama · xi, 27, 28, 38
 yapı · iv, 7, 32, 39, 51
 yapısal analiz · iv, 8, 29, 31, 34
 yenilenebilir enerji · 1
 yer değiştirme · 48
 yüzey pürüzlülük uzunluğu · 25,
 26

Z

zenith · 11



GAZİ GELECEKTİR..