PV GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN AKTİF RÜZGÂR YÖNÜNDEN YARARLANARAK SOĞUTULMASI VE DİZAYNI

Ahmet ATAMAN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PV GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN AKTİF RÜZGÂR YÖNÜNDEN YARARLANARAK SOĞUTULMASI VE DİZAYNI

Ahmet ATAMAN
511810008

Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

PV GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN AKTİF RÜZGÂR YÖNÜNDEN YARARLANARAK SOĞUTULMASI VE DİZAYNI

Ahmet ATAMAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

Sanayi tesisleri, enerji maliyetlerini düşürmek için çatı tipi PV santrallerine yönelmektedir. Bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için panellerin sıcaklığını düşürmek kritik öneme sahiptir, çünkü yüksek sıcaklıklar PV panellerin verimliliğini azaltmaktadır. Bu çalışmada, Bursa'da bir fabrika çatısında kurulu 5,9 MW'lık PV santralde, panellerin rüzgâr etkisiyle soğutulması incelenmiştir.

Yaz döneminde yapılan meteorolojik ve sıcaklık ölçümleri, rüzgârın panel sıcaklığını düşürdüğünü göstermiştir. Rüzgâr yönünden bağımsız olarak yapılan değerlendirme de rüzgâr hızı farklarının 1 m/s'nin üzerine çıktığı durumlarda PV panellerdeki soğuma etkisinin 3 - 7 °C aralığında olduğunu göstermektedir.

Rüzgâr hızının yanı sıra, yön etkisi de analiz edilmiş ve bölgedeki hâkim rüzgârların kuzey, kuzeydoğu ve doğu yönlerinden estiği belirlenmiştir. Bu rüzgârların panellere arkadan, 45° açıyla arkadan ve yandan çarptığı tespit edilmiştir. Üç farklı çatı modeli üzerinde yapılan HAD analizlerinde, rüzgâr hızının 2 m/s, ortam sıcaklığının 30 °C ve güneş ışınımının 800 W/m^2 olduğu analiz sonuçları, aynı çevresel şartlardaki deneysel ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, rüzgâr arkadan geldiğinde çatı geometrisinin etkisiyle akış bozulmuş ve rüzgârın soğutma etkisi azalmıştır. Bu nedenle, arka rüzgâr durumunda panel sıcaklıkları 60 °C'ye yaklaşırken, 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda 52 °C'ye, yan rüzgâr durumunda ise 50 °C'ye düştüğü tespit edilmiştir. Yan rüzgâr durumunda en düşük panel sıcaklıkları elde edilmesine rağmen, rüzgâr akış yönünde panel sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Panel sıralarının uzunluğu arttıkça, sıcaklıkların daha da yükselme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlar, PV santral tasarımı sırasında, rüzgâr hızının yüksek olduğu alanların tercih edilmesi ve rüzgârın tüm PV dizilerine ulaşmasını sağlayacak uygun santral konfigürasyonlarının oluşturulması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: PV soğutma, fotovoltaik panel, PV modül sıcaklığı, güneş enerjisi, rüzgarla pasif soğutma.

2025, xii + 136 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

COOLİNG AND DESİNG OF PV SOLAR POWER PLANTS USİNG ACTİVE WİND SİDE

Ahmet ATAMAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU

Industrial facilities are increasingly adopting rooftop PV systems to reduce energy costs. For optimal performance, it is crucial to lower the temperature of the panels, as high temperatures reduce their efficiency. This study investigates the cooling effect of wind on the panels in a 5,9 MW PV plant installed on a factory roof in Bursa.

Meteorological and temperature measurements conducted during the summer showed that wind helps lower panel temperatures. When wind speed differences exceed 1 m/s, the cooling effect on the PV panels ranges from 3 to 7 °C. The prevailing winds in the region come from the north, northeast, and east, hitting the panels from behind, at a 45° angle, and from the side.

In HAD analysis performed on three different roof models, with a wind speed of 2 m/s, ambient temperature of 30 °C, and solar radiation of 800 W/m², the results were compared with experimental measurements under the same conditions. The analysis showed that when wind comes from behind, the flow is disrupted due to roof geometry, reducing the cooling effect. As a result, panel temperatures approached 60 °C with rear wind, 52 °C with wind coming at a 45° angle, and 50 °C with side wind. Despite the lowest panel temperatures being observed with side wind, panel temperatures increased in the wind flow direction. As the length of the panel rows increased, temperatures were found to rise further.

These findings suggest that during PV plant design, areas with high wind speeds should be preferred, and plant configurations should be designed to allow wind to reach all PV arrays effectively.

Key words: PV cooling, photovoltaic panels, PV modules temperature, solar energy, passive cooling by wind.

2025, xii + 136 pages.

TEŞEKKÜR

Değerli danışman hocam merhum Prof. Dr. Abdulvahap Yiğit'e bu çalışmaya yaptığı katkılardan dolayı şükranlarımı sunuyorum. Ruhu şad olsun.

Çalışmam boyunca her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Nurullah ARSLANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yeterlik sürecim ve tez sürecim boyunca bana rehberlik eden değerli hocalarım Prof. Dr. Gökhan SEVİLGEN'e ve Prof. Dr. Ömer KAYNAKLI'ya teşekkürü borç bilirim.

Çalışmam boyunca sevgisinden güç aldığım ve beni bugünlere gelmemi sağlayan annem merhume Bedriye ATAMAN'a şükranlarımı sunuyorum. Ruhu şad olsun. Sevgili babam Tekin ATAMAN'a, ablam Elif ve kardeşim Eylem'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca her zaman değerli desteğini hissettiğim değerli dostum Aysun SOYER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmama verdiği katkılardan dolayı değerli hocalarım Dr. Ebubekir BEYAZOĞLU'na ve Arş. Gör. Muhammed DÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Bursa fabrikasına PV santrali ölçümlerindeki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet ATAMAN

…/…/…….

Biricik Anneme;

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
1.1. Türkiye'de Güneş Enerjisi 7
1.2. Elektrik Üretiminde Güneş Enerjisi 8
1.3. Fotovoltaik Sistemler 10
1.3.1. Güneş hücresi 11
1.3.2. PV hücre türleri 13
1.3.3. Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi 25
1.4. Fotovoltaik Etki Nasıl Oluşur 27
1.5. Işınım Etkisi 29
1.6. Fotovoltaik Hücre ve Panellerin Birbirine Bağlanması 31
1.6.1. Seri bağlantı 31
1.6.2. Paralel bağlantı 31
1.6.3. Seri ve paralel bağlantıların kombinasyonu 32
1.7. Fotovoltaik Sistem Yer Seçim Parametreleri 32
1.8. Fotovoltaik Sistemleri Etkileyen Parametreler 33
1.9. Sıcak Nokta (Hot Spot) ve Gölgelenme Etkisi 35
1.9.1. Sıcak nokta etkisinin oluşumu 36
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 39
3. MATERYAL ve YÖNTEM 53
3.1. CAD Modelinin Oluşturulması 59
3.2. Çözücü Ayarları 61
3.3. Korunum Denklemleri ve Türbülans Modeli 64
3.3.1. k-ω Türbülans modeli 65
3.4. Taşınım Denklemleri 67
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 72
4.1. Deneysel Çalışmalar 72
4.1.1. TOFAŞ güneş enerjisi santrali ölçümleri 74
4.1.2. Ölçüm aletleri 86
4.2. HAD Analizleri 90
4.2.1. Optimum Çözüm Ağı Yapısının Elde Edilmesi 94
4.2.2. Simülasyonların Doğrulanması 95
4.2.3. Arka rüzgâr durumu 96
4.2.4. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumu 108
4.2.5. Yan rüzgâr durumu 115
4.2.6. Panel Eğiminin 10^0 Arttırılması Durumu 118
5. SONUÇ 128
KAYNAKLAR 132
ÖZGEÇMİŞ 136

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_{pv}	PV panel yüzey alanı (m^2)
Cp	Sabit basınçta özgül ısı (J/kgK)
D_{ω}	Çapraz difüzyon terimi
G	Işınım (W/m^2)
$\tilde{G}_k$	Türbülans kinetik enerjisi üretimi
G_{β}	Eğik modül yüzeyindeki toplam güneş radyasyonu
G_{ω}	Hesaplanan ω'nın üretimi
h	Taşınımla ısı transfer katsayısı
k	Türbülans kinetik enerjisi
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
k_T	Sıcaklık katsayısı
p	Basınç
P_m	PV modül çıkış gücü (W)
$P_{m,STC}$	STC sıcaklığında PV modül çıkış gücü (W)
P_{pv}	PV panel çıkış gücü (W)
Q_{conv}	Taşınımla ısı transferi
$Q_{conv.b}$	PV panelin arka yüzünden taşınımla olan ısı kaybı
$Q_{conv,f}$	PV panelin ön yüzünden taşınımla olan ısı kaybı
Q_{rad}	Radyasyonla ısı transferi
Q_{sun}	PV yüzeyine gelen güneş ışığı enerjisi
Q_t	PV panel tarafından emilen termal enerjisi
$Q_{\Delta T}$	Güneş ışığının emilmesi nedeniyle PV panelinin geçici sıcaklık artışı
S_k	k için kullanıcı tanımlı kaynak terimi
S_m	Kütle kaynak terimi
S_M	Momentum kaynak terimi
S_e	Enerji kaynak terimi
S_{ω}	ω için kullanıcı tanımlı kaynak terimi
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (°C)
T_{amb}	Ortam sıcaklığı
T_m	PV modül sıcaklığı (°C)
T_{NOCT}	Nominal işletme hücre sıcaklığı (°C)
T_{pv}	PV panel sıcaklığı (°C)
$T_{pv,b}$	PV panel arka yüzey sıcaklığı (°C)
$T_{pv,f}$	PV panel ön yüzey sıcaklığı (°C)
T_{ref}	Referans sıcaklık (25 °C)
$T_{\%}$	PV panel yüzeyine ulaşan ışık oranı
u	x yönünde hız bileşeni (m/s)
v	y yönünde hız bileşeni (m/s)
w	z yönünde hız bileşeni (m/s)
V	Hız (m/s)

$\vec{V}$	Hız vektörü
Y_k	k'nın dağılımı
Y_ω	ω'nın dağılımı
β	Panel eğim açısı
ε	PV yüzey emisyonu
η_{inv}	İnvertör verimi
η_{loss}	Verim kaybı
η_{pv}	PV panel verimliliği
η_{ref}	25 °C (T_{ref}) hücre sıcaklığındaki referans PV modül verimliliği
θ	Güneş geliş açısı
λ	Viskozite katsayısı
μ	Dinamik viskozite (P)
μp	panel gücünün sıcaklığa bağımlılık katsayısı
μ_t	Türbülanslı viskozite
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
σ	Stefan-Boltzmann sabiti
σ_k	k için türbülanslı Prandtl sayısı
σ_ω	ω için türbülanslı Prandtl sayısı
Γ_k	k'nın etkin yayılımı
Γ_ω	ω'nın etkin yayılımı
Φ	Yayınım terimi

Kısaltmalar	**Açıklama**
a-Si	Amorf Silisyum
BDGH	Boya Duyarlı Güneş Hücreleri
CdTe	Kadmiyum Tellür
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIGS	Bakır İndiyum Galyum Selenid
CPV	Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Hücreler
CSP	Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi
CZTS	Bakır-Çinko-Kalay-Sülfür
EMBER	Sandbag Climate Campaign CIC'nin ticari adı
EVA	Etilen Vinil Asetat
GaAs	Galyum Arsenür
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
I	Akım (A)
IEA	Uluslararası enerji ajansı
IRENA	Uluslararası yenilenebilir enerji ajansı
NOCT	Nominal işletme hücre sıcaklığı
OPV	Organik güneş hücresi
P	Güç (W)
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik/termal (Hibrit sistem)
STC	Standart test koşulları
QD	Kuantum güneş hücreleri
V	Gerilim (V)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ülkelere göre toplam nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı, 2021 (REN21, 2024b) 2
Şekil 1.2. Dünya'da yenilenebilir güç kapasitesi eklemeleri, 2023 (REN21, 2024a) 3
Şekil 1.3. Türkiye'deki Güneş enerjisi santrallerinin dağılışının coğrafi perspektiften analizi (Saygılı, 2024)..... 5
Şekil 1.4. 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılı (TEİAŞ, 2024) 6
Şekil 1.5. Güneş enerjisi sistemleri..... 7
Şekil 1.6. Türkiye Güneş enerjisi haritası (GEPA, 2024)..... 8
Şekil 1.7. Avrupa'da 2023 yılı elektrik üretiminde Güneşin payı (EMBER, 2024)..... 10
Şekil 1.8. Fotovoltaik (PV) hücre, modül ve diziler..... 12
Şekil 1.9. PV Panel yapısı..... 13
Şekil 1.10. Nesillerine göre fotovoltaik sistemlerin sınıflandırılması (Ertürk, 2018)..... 13
Şekil 1.11. Tek kristal PV hücre..... 14
Şekil 1.12. Çok kristal PV hücre 15
Şekil 1.13. İnce film güneş hücresi..... 16
Şekil 1.14. CdTe, CIGS, a-Si ve CZTE güneş hücreleri (Özen, 2015) 17
Şekil 1.15. Esneklik yapıları ile öne çıkan OPV güneş hücreleri..... 23
Şekil 1.16. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için kullanılan lens (Özen, 2015) 25
Şekil 1.17. Silisyum kristal yapısı, (a) Silisyum yarı iletken yapısı, (b) p tipi yarı iletken, (c) n tipi yarı iletken (Bayrak, 2017)..... 28
Şekil 1.18. Fotoelektrik etki ve enerji üretimi (Bayrak, 2017)..... 29
Şekil 1.19. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı akım-gerilim eğrisi (Arçelik, 2021)..... 30
Şekil 1.20. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı güç-gerilim eğrisi (Özen, 2015) . 30
Şekil 1.21. Fotovoltaik hücre bağlantısı, (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı.... 32
Şekil 1.22. PV güneş enerjisi santralleri yer seçim etmenleri 33
Şekil 1.23. 0-75 ^{o}C sıcaklıklarındaki (a) P-V grafiği (b) I-V grafiği (Kerem vd., 2020)..... 35
Şekil 1.24. Kısmi gölgelenme altında PV panel..... 36
Şekil 1.25. PV paneller üzerinde kirlenmenin etkisi (Robsys Robotic Systems, 2018)..... 38
Şekil 3.1. HAD yöntemine ilişkin genel akış diyagramı 54
Şekil 3.2. HAD yöntemine ait detaylı işlem adımları (Sevilgen, 2010)..... 55
Şekil 3.3. HAD ile modelleme prosesi (Tokgöz & Süfer, 2023)..... 57
Şekil 3.4. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan temel elemanlar..... 58
Şekil 3.5. İki boyutlu örnek mesh yapısı 58
Şekil 3.6. Arka rüzgâr durumuna ait CAD modeli ve sınır şartları 60
Şekil 3.7. Rüzgâr arkadan 45^{0} estiği duruma ait CAD modeli ve sınır şartları .. 60
Şekil 3.8. Yan rüzgâr durumuna ait CAD modeli ve sınır şartları 61

Şekil 4.1. Araştırma yapılan çatı PV santrali ve sensörleri içeren ölçüm alanı görseli. 73
Şekil 4.2. Tofaş Bursa Fabrikası güneş enerjisi çatı PV tesisi düzeni. Paneller çatı üzerinde üç farklı alana yerleştirilmiştir. 74
Şekil 4.3. Çalışma alanımız için rüzgâr gülü. (1 Temmuz 2023-1 Ekim 2023) .75
Şekil 4.4. 1 Temmuz-1 Ekim arasında yapılan sıcaklık ölçümleri. (a) Günlük ortalama (T_m) ve (T_{amb}) sıcaklıkları, (b) 15 dakika aralıklarla panel sıcaklığının frekans dağılımı. 76
Şekil 4.5. Gün boyunca güneş ışınımı, panel sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı (06.08.2023). 78
Şekil 4.6. Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve PV panel sıcaklığı şu tarihlerde ölçülmüştür. Düşük rüzgâr hızlarıyla karakterize edilen 13 Temmuz'da ve yüksek rüzgâr hızlarıyla karakterize edilen 6 Ağustos'ta. Düşük ve yüksek rüzgâr hızları için (a) PV panel sıcaklığındaki saatlik değişim, (b) Rüzgâr hızındaki saatlik değişim , (c) Güneş ışınımı ve ortam sıcaklığındaki saatlik değişim..... 80
Şekil 4.7. Rüzgâr hızı artışının PV panel soğutması üzerindeki etkisi. (a) 50 eşleşen verinin şematik gösterimi, (b) Rüzgâr hızı farkı ile soğutma arasındaki ilişki..... 84
Şekil 4.8. PV panelin çatı üzerindeki yerleşimi ve rüzgâr geliş açıları 85
Şekil 4.9. Farklı yönden gelen rüzgârın, PV panel soğutmasına etkisi. (a) rüzgâr geliş yönüne göre eşleştirilmiş örnek olaylar, (b) PV panel soğutması ile yöne göre rüzgâr hızı farklılıkları arasındaki ilişki. 86
Şekil 4.10. Arçelik PV panel özellikleri (Arçelik, 2021) 88
Şekil 4.11. Arçelik PV panel veriminin yıllara göre değişimi (Arçelik, 2021) 89
Şekil 4.12 Arçelik PV panellerin akım-gerilim değerlerinin hücre sıcaklığı ile değişimi (Arçelik, 2021)..... 89
Şekil 4.13. Model üzerinde tanımlanan tüm düzlemler 91
Şekil 4.14. Model üzerinde tanımlanan orta düzlemin konumu 92
Şekil 4.15. Model üzerinde tanımlanan Z düzleminin konumu..... 92
Şekil 4.16. Model üzerinde tanımlanan X düzleminin konumu 93
Şekil 4.17. Model üzerinde tanımlanan Y1 düzleminin konumu 93
Şekil 4.18. Model üzerinde tanımlanan Y2 düzleminin konumu 94
Şekil 4.19. Üç farklı ağ yapısı ile yapılan ağ doğrulama çalışması..... 95
Şekil 4.20. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması çalışması..... 96
Şekil 4.21. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısı-1 97
Şekil 4.22. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısı-2 97
Şekil 4.23. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısının kesit görüntüsü..... 98
Şekil 4.24. Arka rüzgâr durumunda sınır tabakası ağları (İnflation)..... 99
Şekil 4.25. PV panel ağ yapısı 99
Şekil 4.26. PV panel ağ yapısı kesit görüntüsü 100
Şekil 4.27. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı..... 100
Şekil 4.28. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1 101
Şekil 4.29. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2 101

Şekil 4.30. Arkadan gelen rüzgâr durumunda girişten, çıkışa kadar hız dağılımına ait akış çizgileri 102
Şekil 4.31. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri-1..... 103
Şekil 4.32. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri-2..... 103
Şekil 4.33. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde türbülans kinetik enerji..... 104
Şekil 4.34. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı..... 105
Şekil 4.35. Arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki hız dağılımı 105
Şekil 4.36. Arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki türbülans kinetik enerji dağılımı..... 106
Şekil 4.37. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı..... 106
Şekil 4.38. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri..... 107
Şekil 4.39. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminde türbülans kinetik enerji..... 107
Şekil 4.40. Arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı..... 108
Şekil 4.41. Arkadan 45^0 derece açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısı..... 109
Şekil 4.42. Arkadan 45^0 derece açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısının kesit görüntüsü..... 109
Şekil 4.43. Arka rüzgâr durumunda sınır tabakası ağları (İnflation)..... 110
Şekil 4.44. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı 110
Şekil 4.45. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1 111
Şekil 4.46. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2 111
Şekil 4.47. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y2 düzlemindeki hız dağılımı..... 112
Şekil 4.48. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı..... 112
Şekil 4.49. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri 113
Şekil 4.50. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı..... 113
Şekil 4.51. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemi ve PV panel yüzeyinde ortaya çıkan türbülans kinetik enerjiye ait akış çizgileri..... 114
Şekil 4.52. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı..... 115
Şekil 4.53. Yan rüzgâr durumunda ağ yapısı..... 115
Şekil 4.54. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı..... 116
Şekil 4.55. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1 116

Şekil 4.56. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2 117
Şekil 4.57. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı 117
Şekil 4.58. Yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı 118
Şekil 4.59. İki farklı HAD analizi durumunda PV panel eğimleri. (a) Panel eğiminin çatı eğimi ile aynı olduğu durum ($17,8^0$), (b) Panel eğiminin 10^0 artırıldığı durum ($27,8^0$) 119
Şekil 4.60. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı 120
Şekil 4.61. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1 120
Şekil 4.62. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2 121
Şekil 4.63. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri 121
Şekil 4.64. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki hız dağılımı 122
Şekil 4.65. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı 122
Şekil 4.66. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı 123
Şekil 4.67. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı 124
Şekil 4.68. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri 124
Şekil 4.69. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı 125
Şekil 4.70. $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı 126
Şekil 4.71. $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri 126
Şekil 4.72. $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı 127

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

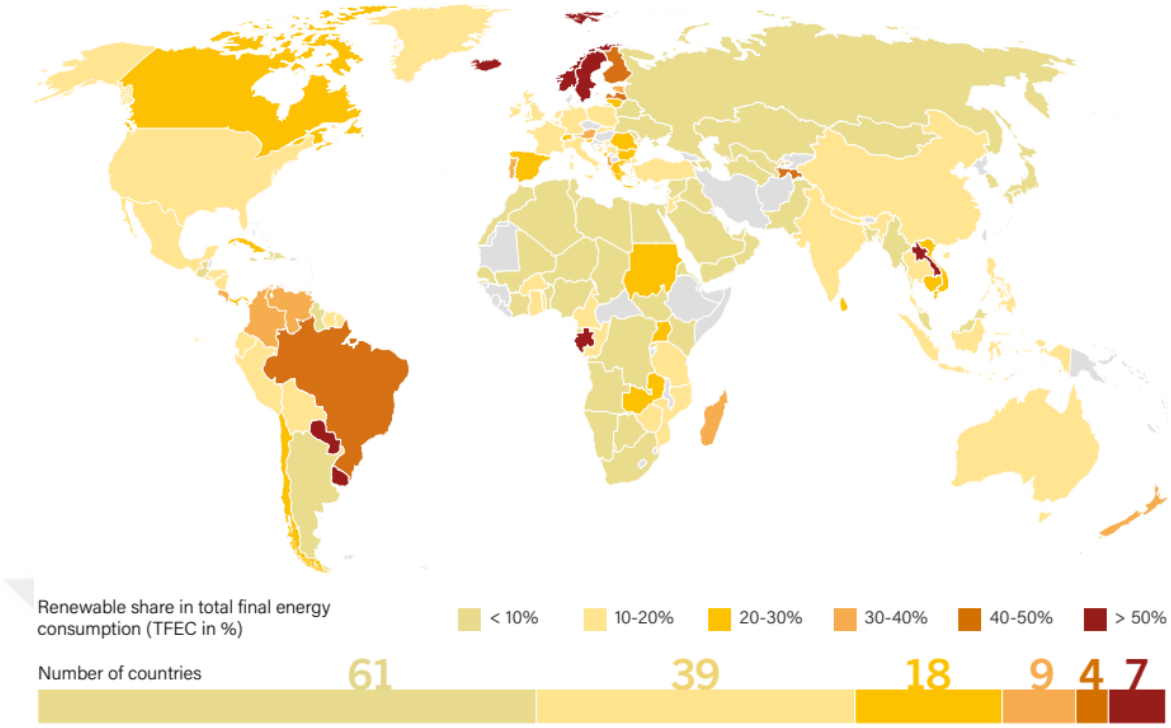
Çizelge 1.1. PV Sistem Kayıpları (Kerem, Atik, & Bayram, 2020)..... 34
Çizelge 3.1. Çözücü ayarları ve kullanılan modeller..... 62
Çizelge 3.2. Ağ yapısı ve sınır şartları..... 63
Çizelge 3.3. Başlangıç koşulları ve yakınsama kriteri..... 63
Çizelge 3.4. Çözüm metodu ve iş istasyonu..... 64
Çizelge 4.1. Tofaş çatı PV sistemi panel ve güç detayı..... 74
Çizelge 4.2. 13 Temmuz - 6 Ağustos tarihlerinde rüzgâr hızındaki saatlik değişim..... 81
Çizelge 4.3. Eşleştirilmiş 50 çift olay için Güneş radyasyonu, rüzgâr yönü, (Tamb), rüzgâr hızı ve (Tm) değerleri..... 82
Çizelge 4.4. PV panel katmanlarının kalınlığı ve özellikleri..... 90
Çizelge 4.5. Deneysel veriler ve HAD analizlerinde bulunan PV panel sıcaklık değerleri..... 95

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması, sanayileşme, teknolojik gelişmeler ve yaşam standartlarının yükselmesi, enerji talebinin sürekli olarak artmasına neden olmuştur. Günümüzde, bu enerji talebini karşılamak için kullanılan kaynaklar temel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır: fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları. Enerji üretimi için kullanılan bu kaynaklar, küresel ölçekte ekonomik, çevresel ve sosyal etkiler doğurmakta, enerji politikalarının da merkezinde yer almaktadır.

Fosil yakıtlar, kömür, petrol ve doğalgaz gibi milyonlarca yıl önce yer kabuğunda biriken organik maddelerin fosilleşmesi sonucu oluşmuş yakıtlardır. Tarih boyunca sanayileşmenin lokomotifi olmuş ve bugünkü enerji arzının büyük kısmını sağlamaktadırlar. Ancak, fosil yakıtların kullanımı, atmosfere büyük miktarda karbondioksit (CO_2) ve diğer sera gazlarının salınmasına neden olmakta, bu da küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların temel nedenleri arasında gösterilmektedir.

Bu olumsuz etkiler, fosil yakıtların sürdürülebilir bir seçenek olmadığını ve yerlerine geçebilecek alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu noktada devreye giren yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenen ve tükenme riski olmayan kaynaklar olarak dikkat çekmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara kıyasla çevreye daha az zarar verir ve sürdürülebilir enerji üretimi için ideal çözümler sunarlar. Şekil 1.1 ülkelerin toplam nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payını göstermektedir.



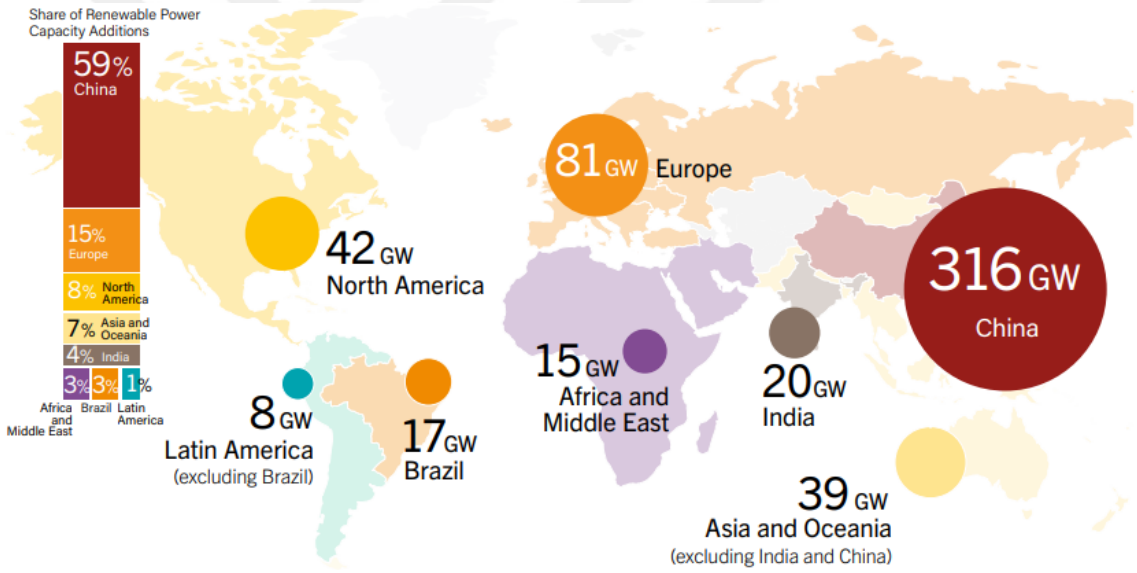
Şekil 1.1. Ülkelere göre toplam nihai enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı, 2021 (REN21, 2024b)

Bu bağlamda, güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Güneş, dünyanın en bol ve erişilebilir enerji kaynağı olarak, modern enerji sistemlerinin geleceği için büyük bir potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, bu enerji kaynağının etkinliği ve verimliliği artmakta, enerji maliyetleri azalmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi kullanımı, sera gazı emisyonlarını büyük ölçüde azaltma potansiyeline sahip olup, iklim değişikliğiyle mücadelede kilit rol oynamaktadır.

Son yıllarda enerji sektörü, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönelmiş ve bu bağlamda güneş enerjisi hızla büyüyen bir pazar haline gelmiştir. Güneş enerjisi, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı gelişen alanlardan biri olarak dikkat çekmektedir. Teknolojik ilerlemeler, maliyetlerin düşmesi ve hükümetlerin teşvik edici politikaları, güneş enerjisine olan yatırımları artırmakta ve küresel enerji üretiminde güneşin payını giderek yükseltmektedir.

Şekil 1.2'de görüldüğü üzere 2023 itibarıyla, dünya genelinde kurulu güneş enerjisi kapasitesi hızla artmış, özellikle Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği ve

Hindistan gibi ülkelerde devasa güneş enerjisi projeleri hayata geçirilmiştir. Güneş panellerinin üretim maliyetlerinin 2000'li yıllardan itibaren büyük ölçüde azalması, bu enerji kaynağını daha erişilebilir ve rekabetçi hale getirmiştir. Güneş enerjisindeki bu maliyet düşüşleri, çeşitli enerji raporları ve kuruluşlar tarafından sıkça ele alınmıştır. Özellikle Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) gibi kuruluşlar, güneş enerjisi maliyetlerinin dramatik bir şekilde düştüğünü raporlamaktadır. 2024 yılı itibarıyla IRENA'nın raporuna göre; 2010 yılında güneş enerjisinden elektrik üretmenin maliyeti yaklaşık 0,46 $/kWh iken, bu maliyet 2023'te birçok bölgede 0,044 $/kWh'nin altına düşmüştür (IRENA, 2024). IEA'nın 2020'de yayımladığı "World Energy Outlook" raporunda da benzer sonuçlar ortaya konmuş ve güneş enerjisinin artık "en ucuz" elektrik üretim kaynağı olduğu ifade edilmiştir (International Energy Agency, 2024).



Şekil 1.2. Dünya'da yenilenebilir güç kapasitesi eklemeleri, 2023 (REN21, 2024a)

Bu veriler, güneş enerjisi maliyetlerinin 2010'dan bu yana nasıl ciddi oranda düştüğünü ve 2023'te birçok bölgede fosil yakıtlarla rekabet edebilecek seviyeye geldiğini doğrulayan güvenilir kaynaklardır.

Günümüzde güneş enerjisinden elektrik üretmenin iki temel yöntemi bulunmaktadır: fotovoltaik (PV) sistemler ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemleri. Fotovoltaik sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri, güneş ışığını ısı enerjisine çevirip bu enerjiyi

bir elektrik jeneratörüne aktararak elektrik üretir. Fotovoltaik sistemler, daha düşük kurulum maliyetleri ve daha yaygın kullanım alanı nedeniyle özellikle evler, ticari binalar ve endüstriyel tesisler için ideal bir çözüm haline gelmiştir. CSP sistemleri ise genellikle geniş arazi gereksinimi nedeniyle büyük ölçekli enerji projelerinde tercih edilmektedir.

Güneş enerjisi kullanımının bugünkü en önemli avantajlarından biri çevre dostu oluşudur. Elektrik üretiminde güneş enerjisinden faydalanmak, karbon emisyonlarını büyük ölçüde azaltmakta, bu da küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) verilerine göre, güneş enerjisi 2050 yılına kadar küresel enerji üretiminin % 20'sini sağlayabilir ve bu süreçte dünya genelinde yıllık milyarlarca ton karbondioksit salımını engelleyebilir.

Ancak, güneş enerjisinin yaygınlaşması önünde bazı zorluklar da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, güneş enerjisinin doğası gereği kesintili olmasıdır. Güneş panelleri sadece güneşin olduğu zaman dilimlerinde enerji üretebilmekte, bulutlu havalarda veya gece saatlerinde enerji üretimi durmaktadır. Bu sorunun çözümü için, enerji depolama teknolojilerinde gelişmeler yaşanmaktadır. Lityum-iyon bataryalar gibi enerji depolama sistemleri, güneş enerjisiyle üretilen elektriği depolayarak, ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılabilir hale getirmekte, böylece bu enerji kaynağının güvenilirliği artırılmaktadır.

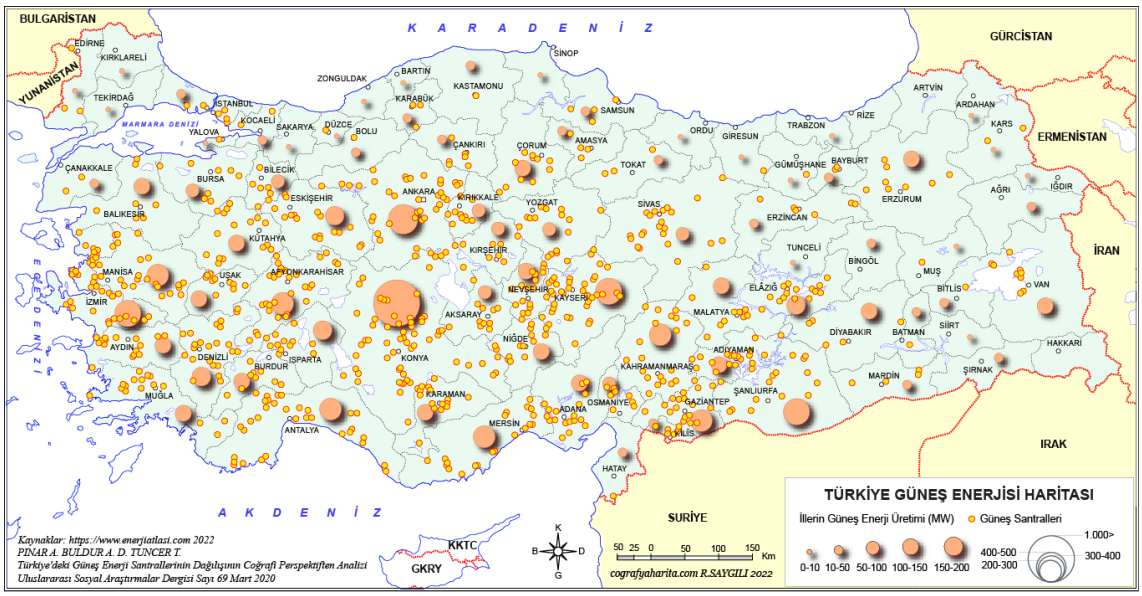
Bunun yanı sıra, güneş enerjisi kurulumları için gerekli olan büyük ölçekli araziler, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde önemli bir sorun teşkil edebilir. Ayrıca, mevcut elektrik altyapısının güneş enerjisi sistemleriyle uyumlu hale getirilmesi gerekmekte, bu da ek maliyetlere neden olabilmektedir. Yine de teknolojik gelişmeler ve inovatif çözümler bu engelleri aşmakta önemli rol oynamaktadır.

Geleceğe dair öngörüler, güneş enerjisinin enerji üretimindeki payının artmaya devam edeceğini ve fosil yakıtların yerini alacak önemli bir çözüm olacağını göstermektedir. Güneş enerjisinin, düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması, enerji politikalarında da giderek daha önemli bir yer edinmesini sağlamaktadır. Özellikle hükümetlerin ve uluslararası kuruluşların, karbon nötr hedeflerine ulaşmak

için güneş enerjisine yönelik teşvik ve destek politikaları, bu enerji kaynağının yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır.

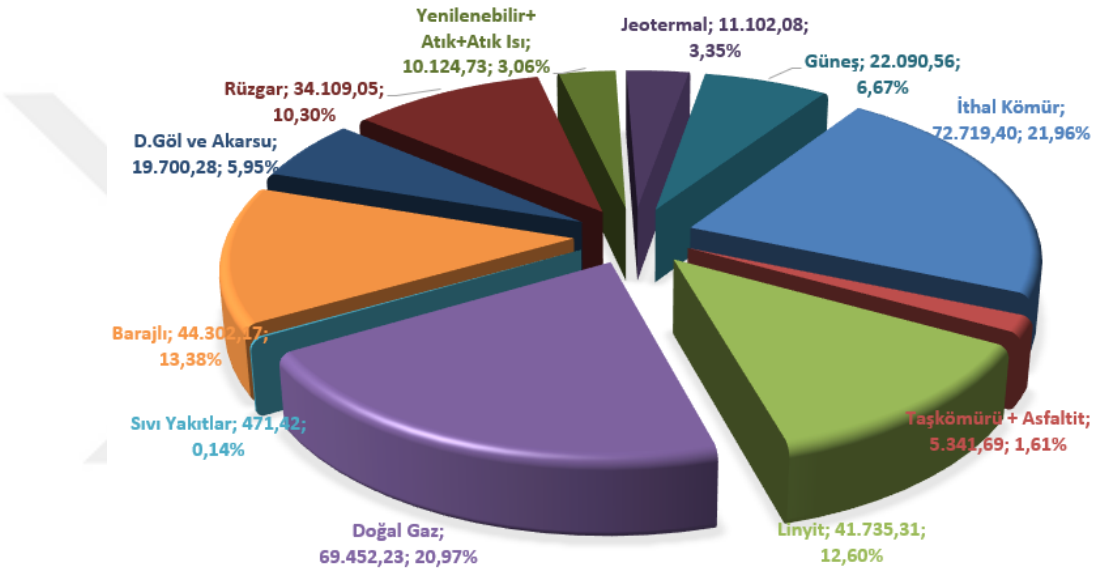
Türkiye, hızla büyüyen bir ekonomi ve artan nüfusuyla birlikte enerji talebinde de önemli bir artış yaşamaktadır. Ülkenin elektrik tüketimi, sanayileşme, şehirleşme ve modernleşen yaşam koşullarıyla paralel olarak her yıl ciddi oranda yükselmektedir. Türkiye, elektrik ihtiyacını büyük oranda fosil yakıtlardan karşılamaktadır; özellikle doğalgaz ve kömür santralleri bu alanda önemli bir paya sahiptir. Ancak bu durum hem dışa bağımlılığı artırmakta hem de karbon salımını yükselterek çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir ve yerli enerji kaynaklarına yönelmek Türkiye için stratejik bir gereklilik haline gelmiştir.

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli açısından oldukça avantajlı bir ülke konumundadır. Ülkenin yıllık güneşlenme süresi yaklaşık 2.737 saat (günlük ortalama 7,5 saat) olup, güneş enerjisinden elektrik üretimi için oldukça uygun koşullar sunmaktadır. Güneydoğu Anadolu, Akdeniz ve İç Anadolu bölgeleri özellikle yüksek güneşlenme potansiyeline sahip olup, bu bölgelerde büyük ölçekli güneş enerji santrallerinin kurulumu için elverişli arazilere sahiptir. Türkiye'de kurulu güneş enerjisi santralleri Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Türkiye'deki Güneş enerjisi santrallerinin dağılışının coğrafi perspektiften analizi (Saygılı, 2024)

Türkiye'nin elektrik tüketimi ve güneş enerjisi potansiyelini birleştirdiğimizde, güneş enerjisinin gelecekte ülkenin enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir çözüm olabileceği görülmektedir. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin toplam elektrik üretimi yaklaşık 331 teravat-saat (TWh) civarında olup, bu üretimin yaklaşık % 42,71'u yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır (TEİAŞ, 2024). Bu payın içinde güneş enerjisinin payı ise yaklaşık % 6,67 seviyesindedir (TEİAŞ, 2024) (bkz. Şekil 1.4). Ancak, Türkiye'nin mevcut güneş potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda, bu oran çok daha yükseklere çıkarılabilir.



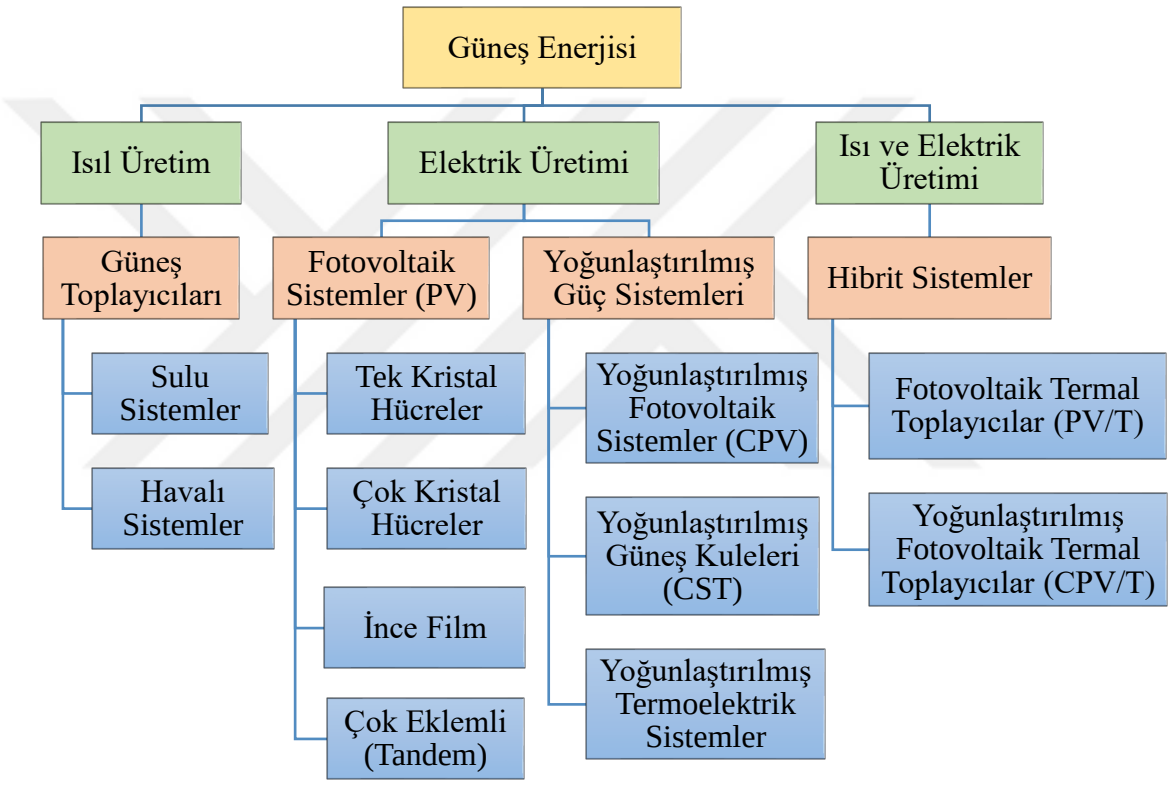
Şekil 1.4. 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılı (TEİAŞ, 2024)

Güneş enerjisi kullanımı artırıldıkça, Türkiye hem dışa bağımlılığını azaltabilir hem de fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden kaynaklanan karbon salımını düşürebilir. Türkiye'nin 2053 yılı için belirlediği karbon nötr hedefi doğrultusunda, güneş enerjisinin bu hedefe ulaşmada kritik bir rol oynayacağı öngörülmektedir. Güneş enerjisi teknolojilerinin daha da gelişmesi, maliyetlerin düşmeye devam etmesi ve enerji depolama çözümlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, Türkiye'nin enerji portföyünde güneş enerjisinin payı önemli ölçüde artabilir.

Bu bağlamda, güneş enerjisi, Türkiye'nin büyüyen enerji talebini karşılayabilecek hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'nin elektrik tüketimi ile güneş enerjisi potansiyeli

arasındaki bu ilişki, enerji güvenliği ve iklim değişikliğiyle mücadele açısından da büyük bir fırsat sunmaktadır.

Güneş enerjisi, uygun teknolojilerle ısıl veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli yüksek olmasına rağmen bu kaynağı yeterince kullanamamaktadır. En yaygın kullanım alanı sıcak su ısıtma sistemleridir, oysa gelişmiş ülkelerde güneşten elektrik üretimi GW seviyelerine ulaşmıştır. Güneş enerjisi uygulamaları Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Güneş enerjisi sistemleri

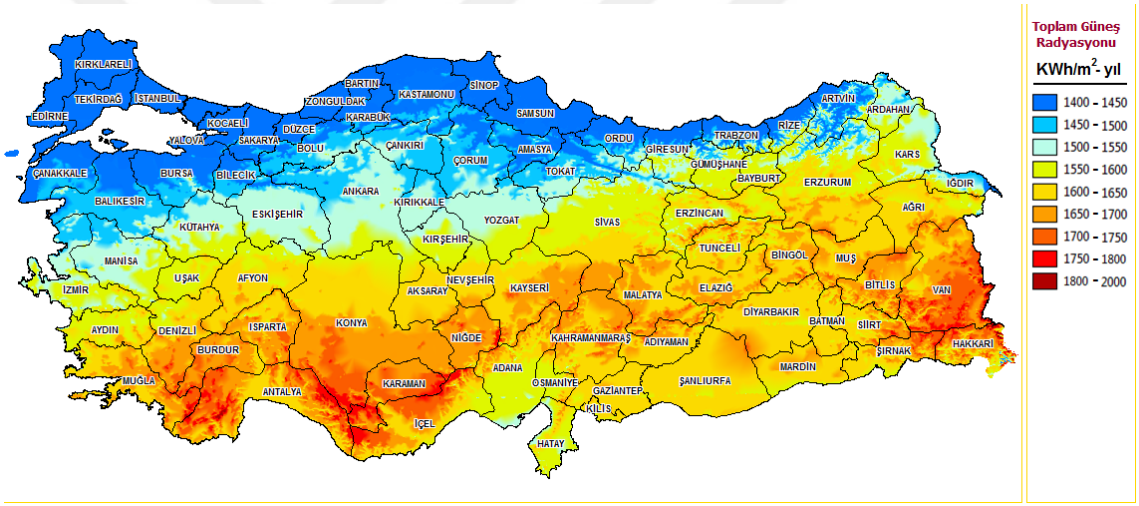
1.1. Türkiye'de Güneş Enerjisi

Türkiye konumundan dolayı güneş enerjisi bakımından yüksek bir potansiyele sahiptir. Türkiye'nin güneşlenme süreleri sene içerisinde değişiklik gösterse de yıllık olarak yaklaşık 2.737 saattir. Ortalama olarak günlük 7,5 saat güneşlenme süresine sahip olan Türkiye'nin Almanya'dan yüzde 60 daha fazla güneş ışınlarından yararlanmaktadır.

Güneş enerjisi aynı iklim koşullarında yer yüzeyinde;

- 36-42. paraleller arasında her bir paralelde aynı rakımda güneye doğru güneş enerjisi yıl bazında % 1,7-1,9 artar.
- Her 1.000 metre yükseklikte % 9 - % 11 artar.

Şekil 1.6'da görüldüğü üzere, ülkemizin en düşük radyasyon değerlerine sahip bölgesi ortalama 1120 kWh/m².yıl ışınım değeri ve 1120 saatlik güneşlenme süresiyle Karadeniz Bölgesi'dir. En verimli bölgeler arasında ise sırasıyla Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz Bölgesi öne çıkmaktadır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi, yıl boyunca 2993 saatlik güneşlenme süresine ve 1460 kWh/m².yıl ışınım şiddetine sahiptir. Genel olarak Güneş enerjisi atlası, Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinin güneyden kuzeye doğru gidildikçe azaldığını göstermektedir. Güneş enerjisi potansiyelini etkileyen faktörler arasında yükselti, enlem ve bakı gibi konum parametreleri bulunmaktadır.



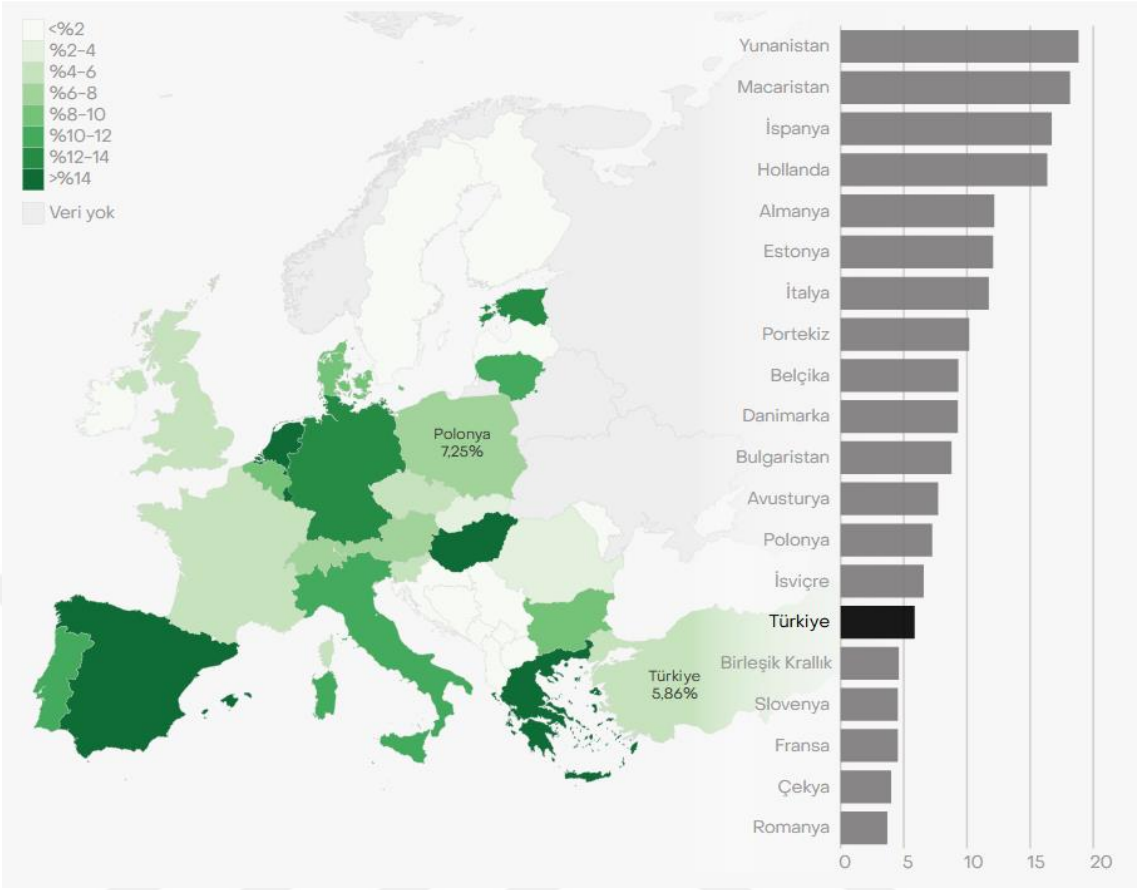
Şekil 1.6. Türkiye Güneş enerjisi haritası (GEPA, 2024)

1.2. Elektrik Üretiminde Güneş Enerjisi

2023 yılında küresel elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı ilk kez yüzde 30'u aşarken, Türkiye bu alanda elektrik ihtiyacının % 42,71'ini bu kaynaklardan karşılayarak küresel ortalamanın üzerine çıkmıştır. Elektrik talebini karşılamak için en hızlı büyüyen kaynaklar güneş ve rüzgâr enerjisi olmuştur. 2023 yılında, küresel elektrik üretiminin % 5,5'i güneş enerjisinden, % 7,8'i ise rüzgâr enerjisinden elde edilmiştir. Güneş enerjisi, yıllık bazda elektrik üretiminde en büyük artışı sağlayarak % 23,2'lik bir artış göstermiş olup son 19 yıldır dünyanın en hızlı büyüyen elektrik kaynağı

olma konumunu sürdürüyor. Enerji düşünce kuruluşu EMBER (kamu yararına çalışan şirket olan Sandbag Climate Campaign CIC'nin ticari adıdır) tarafından yayımlanan bir rapora göre 2023 yılında küresel elektrik üretimindeki karbondioksit yoğunluğu rekor seviyede düşerek, 2007'deki zirve değerine göre % 12 daha az bir seviyeye inmiştir (EMBER, 2024).

Şekil 1.7'de gösterilen (EMBER, 2024), raporuna göre Türkiye, güneş enerjisi potansiyelini değerlendirme konusunda Avrupa'daki diğer ülkelerin gerisinde kalmaktadır. Güneş enerjisi potansiyeli Türkiye'ye benzer olan Yunanistan, yaklaşık % 19'luk bir oranla Avrupa'da ilk sırada yer alırken, güneydeki diğer ülkelerden İspanya üçüncü, İtalya ise yedinci sırada bulunmaktadır. Ayrıca, Hollanda ve Almanya gibi ülkelerin listede üst sıralarda yer alması, çatı güneş enerji sistemlerinin (GES) ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Örneğin, Almanya 2023 yılında yalnızca meskenlerde 7 GW, ticari çatılarda ise 2,5 GW'lık yeni kapasiteyi devreye sokmuştur. Hollanda ise kişi başına düşen kurulu gücün lideri olmayı sürdürmüş ve yeni kurulumların % 41'i çatı sistemlerinden oluşmuştur. 2023 yılında güneş enerjisinde dikkat çekici bir gelişme kaydeden Bulgaristan, % 9'luk payıyla yedi basamak yükselerek Türkiye'yi geçmiştir. Türkiye ise güneş enerjisi potansiyeli çok daha düşük olan Birleşik Krallık (% 4,6), İsviçre (% 6,6) ve Polonya (% 7,3) ile benzer oranlara sahiptir.



Şekil 1.7. Avrupa'da 2023 yılı elektrik üretiminde Güneşin payı (EMBER, 2024)

Türkiye de 2023 yılında, 2 GW'lık yeni bir güneş enerjisi santrali (GES) devreye alınarak toplam güneş kurulu gücü 11,7 GW'a ulaştı. Hibrit güneş santralleri de dahil olmak üzere kurulan güneş kapasitesi 12 GW'ı geçerek, rüzgâr kurulu gücünü ilk kez geride bıraktı. Bu artış, güneş enerjisinin elektrik üretimindeki payının artmasına ve üretime olumlu yansımalar yapmasına katkı sağladı (EMBER, 2024).

Bu bölümde, güneş enerjisinin bugünkü durumuna dair genel bir değerlendirme yapılmış olup, bir sonraki bölümde literatür taraması sunulmuştur.

1.3. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik; Yunanca, ışık anlamına gelen photo ve elektrik akımını geliştiren makinayı tasarlayan Alessandra Volt'dan esinlenerek gerilim anlamına gelen voltaic kelimelerinin birleşiminden oluşmuştur (Öztürk, 2012).

Güneş enerjisi günümüzde sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir ve bu alanda teknolojik gelişmeler hızla ilerlemektedir. PV (Photovoltaic) güneş panelleri, güneşten gelen ışık enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren teknolojik cihazlardır. Bu paneller, fotovoltaik etki sayesinde güneş ışınlarını elektrik enerjisine çevirirler ve bu enerjiyi elektrik şebekesine veya bir bataryaya depolayabilirler.

PV güneş panelleri genellikle silikon tabanlı malzemelerden üretilirler. Silikon yarı iletken özelliği sayesinde güneş ışığını alıp elektrik üretmek için kullanılır. Panellerin üzerindeki fotovoltaik hücreler, güneş ışığının her bir fotonundan elektronları serbest bırakarak elektrik akımı oluştururlar. Bu akım daha sonra bir invertör aracılığıyla kullanılabilir alternatif akıma dönüştürülür ve elektrik şebekesine veya bir bataryaya iletilir.

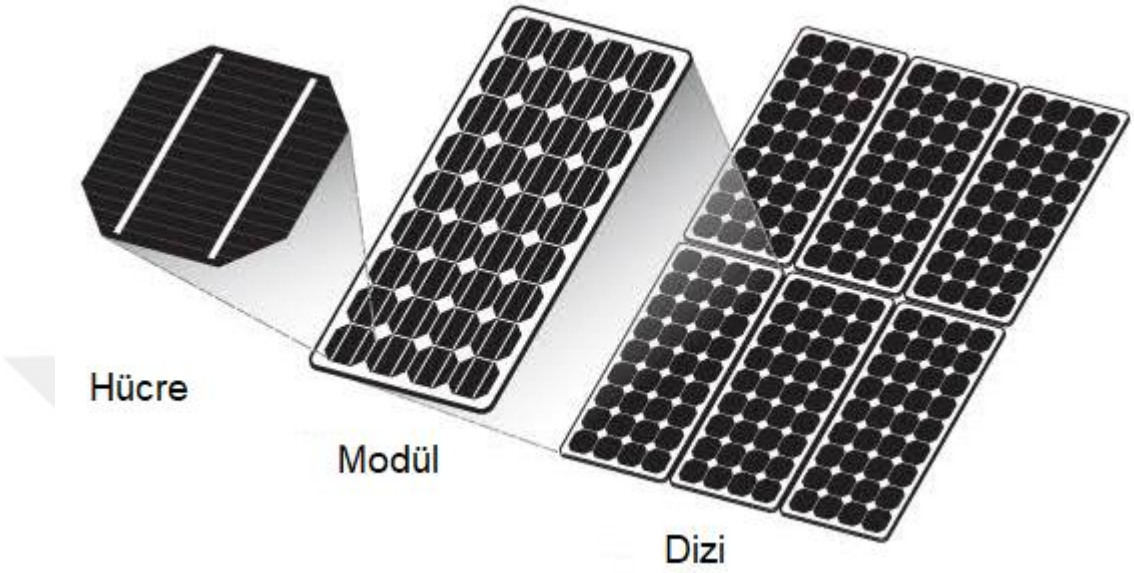
PV güneş panellerinin avantajları arasında çevre dostu olmaları, güneş enerjisi kullanarak elektrik maliyetlerini düşürmeleri ve uzun ömürlü olmaları sayılabilir. Ayrıca, bakım gereksinimleri düşüktür ve güneş ışığının olduğu her yerde kullanılabilmeleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Güneş enerjisiyle ilgili teknolojilerin gelişmesiyle birlikte PV güneş panelleri de sürekli olarak iyileştirilmekte ve verimlilikleri artmaktadır. Bu da gelecekte daha geniş bir enerji üretim potansiyeli ve ekonomik kullanım imkanları sağlamaktadır. Sonuç olarak, PV güneş panelleri günümüzde enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamakta ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkıda bulunmaktadırlar.

1.3.1. Güneş hücresi

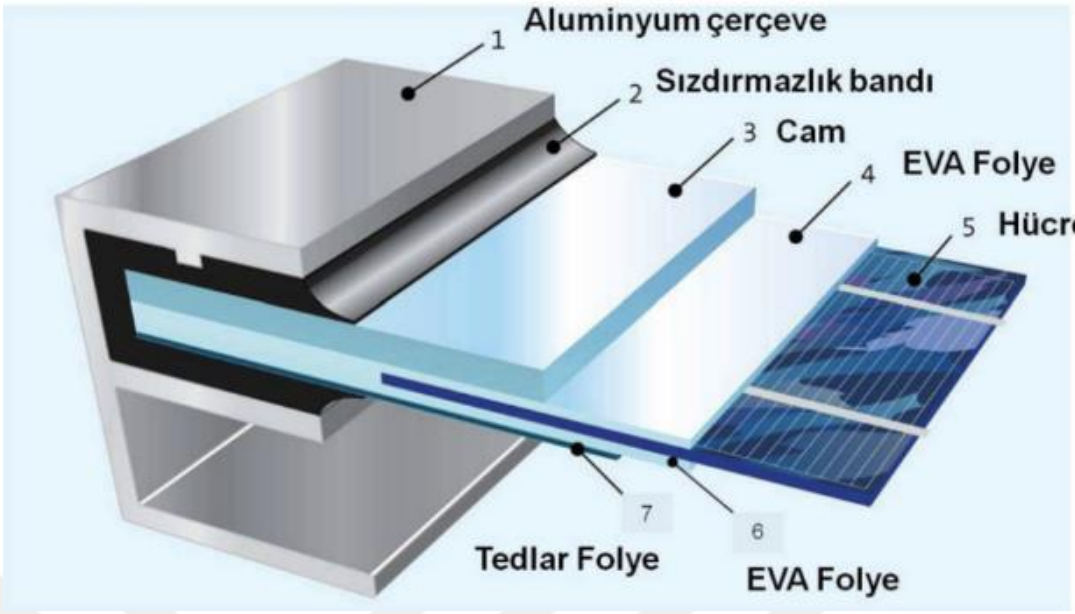
Güneş hücresi, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken bir bileşendir. Fotovoltaik hücre olarak da bilinen bu hücreler, genellikle silikondan yapılır ve güneş panellerinin temel yapı taşıdır. Güneş ışığı hücreye çarptığında, hücre içerisindeki malzemeler fotonları emer ve bu etkileşim sonucunda elektrik akımı oluşur. Genellikle kare, dikdörtgen veya daire şeklinde tasarlanan güneş hücrelerinin boyutları yaklaşık 100 cm^2, kalınlıkları ise 0,1–0,4 mm arasında değişir. Bu hücreler, yapısına bağlı olarak % 5 ile % 30 arasında bir verimle elektrik enerjisine dönüştürebilir. Birden

fazla güneş hücresi bir araya getirilerek daha büyük miktarlarda enerji üretmek için güneş panelleri oluşturulur. PV panellerde bir araya gelerek dizileri meydana getirirler. Şekil 1.8'de PV hücre, modül ve dizi yapısı görülmektedir.



Şekil 1.8. Fotovoltaik (PV) hücre, modül ve diziler

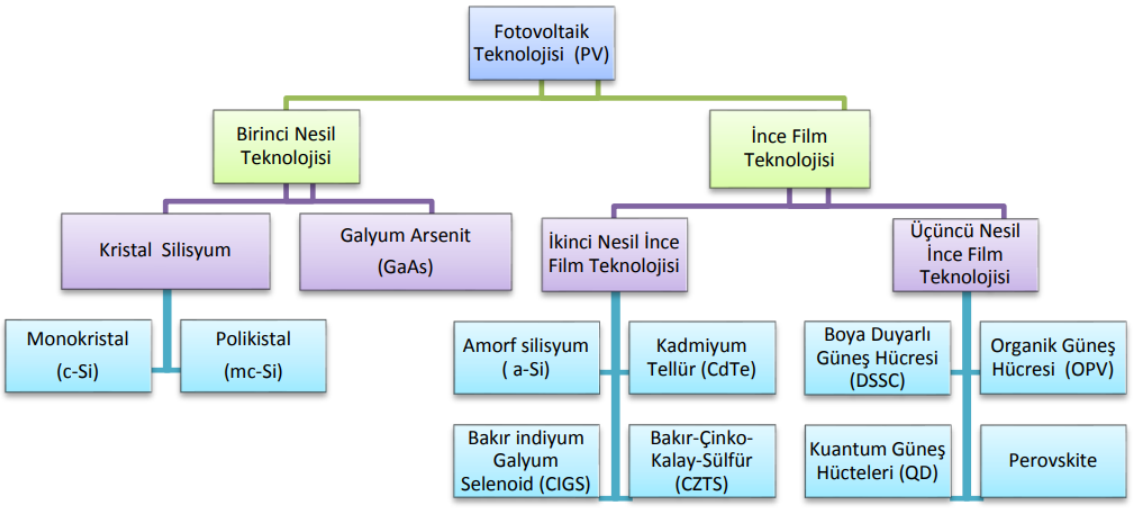
Fotovoltaik paneller genellikle 48, 60 veya 72 güneş hücresinin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Hücreler, güneş ışınlarından korunmak için iki tabaka Etilen Vinil Asetat (EVA) arasında yerleştirilir. Panelin arka kısmına ek bir katman konur ve tüm yapı, koruyucu bir kaplama ile kaplanarak ısıtılır. Ön yüzeye yüksek geçirgenliğe sahip cam eklenir ve bu yapı alüminyum bir çerçeve ile güçlendirilir. Panelin arka kısmına elektrik bağlantıları için bir çıkış terminali eklenir. Şekil 1.9'da güneş panelinin yapısı görünmektedir.



Şekil 1.9. PV Panel yapısı

1.3.2. PV hücre türleri

Fotovoltaik (PV) hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren cihazlardır. Bu hücreler, yarı iletken malzemelerden yapılır ve gelen güneş ışığını soğurarak, elektronların hareket etmesini sağlar. Böylece bir elektrik akımı oluşur. PV hücrelerinin farklı türleri bulunmaktadır ve her biri, üretim maliyetleri, verimlilik ve uygulama alanları açısından farklılık gösterir. PV paneller yaygın olarak Şekil 1.10'da ki malzemeler kullanılarak üretilmektedirler.



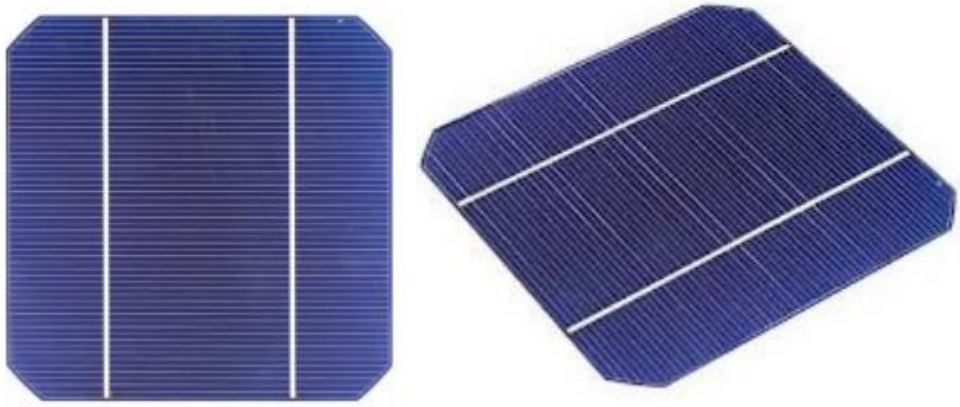
Şekil 1.10. Nesillerine göre fotovoltaik sistemlerin sınıflandırılması (Ertürk, 2018)

1.3.2.1. Monokristal silikon (monokristalin) hücreler

Monokristal silikon hücreler, tek bir kristal yapısından oluşan silikon levhalardan üretilir. Bu tür hücreler, yüksek saflıkta silikondan yapılmıştır ve en yüksek verimliliğe sahip olan PV hücre tipidir. Yapısı düzenlidir ve bu da elektronların daha rahat hareket etmesine olanak tanır. 4-6 yıl arasında geri ödeme maliyeti süresidir. Bu yapılarda 20 yıllık bir sürede % 7 verim kaybı oluşur.

- **Avantajları**:
    - Yüksek verimlilik (% 18-24).
    - Uzun ömür (25-30 yıl).
    - Düşük ışık koşullarında bile iyi performans gösterir.
- **Dezavantajları**:
    - Üretimi diğer türlere göre daha maliyetlidir.
    - Üretim süreci sırasında daha fazla malzeme israfı olur.
    - İlk yatırım maliyetinin geri dönüş süresi 4-6 yıl arasındadır. 20 yıllık bir süre zarfında yaklaşık % 7 verim kaybı oluşabilir.

Monokristal silikon hücre yapısı Şekil 1.11'de görülmektedir.



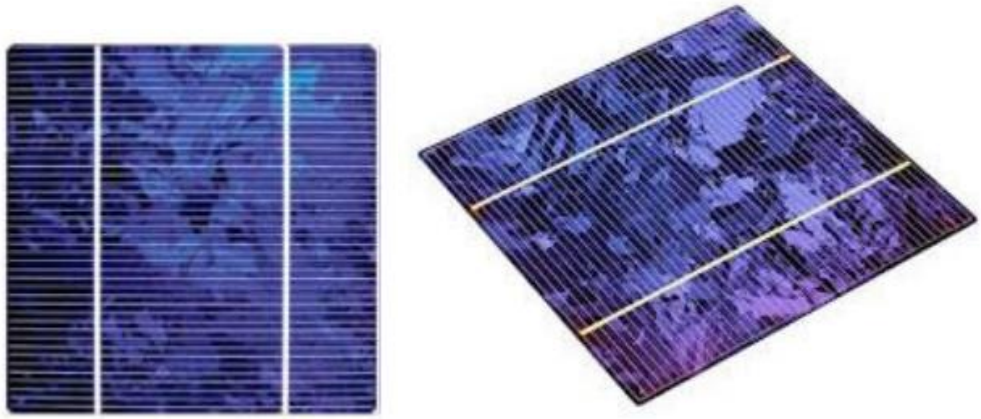
Şekil 1.11. Tek kristal PV hücre

1.3.2.2. Polikristal silikon (polikristalin) hücreler

Polikristal silikon hücreler, birçok küçük kristal yapının birleşimiyle oluşur. Bu tür hücreler, monokristal hücrelere göre daha düşük saflıkta silikondan üretilir, bu da hücrelerin verimliliğini azaltır. Ancak, üretim süreçleri daha basittir ve bu yüzden daha düşük maliyetlidir.

- **Avantajları**:
    - Daha düşük üretim maliyeti.
    - Üretim sürecinde daha az atık.
- **Dezavantajları**:
    - Monokristal hücrelere göre daha düşük verimlilik (% 15-20).
    - Yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşanabilir.
    - İlk yatırım maliyetini geri dönüş süresi 2-5 yıl arasındadır. 20 yıllık bir süre zarfında yaklaşık % 14 verim kaybı yaşanabilir.

Polikristal silikon hücre yapısı Şekil 1.12'de görülmektedir.



Şekil 1.12. Çok kristal PV hücre

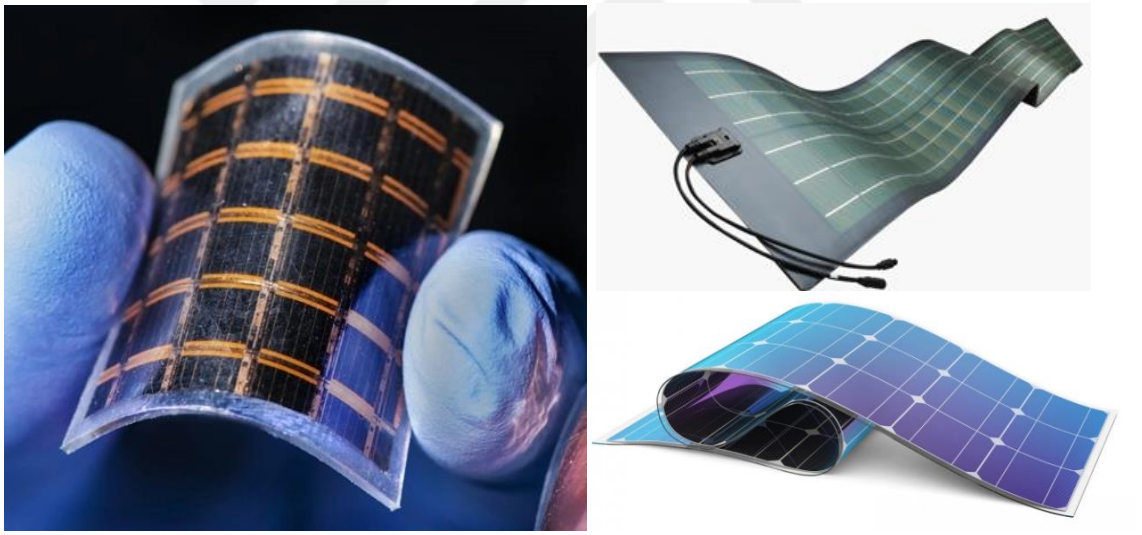
1.3.2.3. İnce film PV hücreler

İnce film hücreler, silikon dışındaki malzemelerden üretilir ve çok ince tabakalar halinde uygulanır. Genellikle, amorf silikon, kadmiyum tellür (CdTe) ve bakır indiyum

galyum selenid (CIGS) gibi malzemeler kullanılır. İnce film hücreler, esnek yüzeylere uygulanabilir ve düşük maliyetlidir.

- **Avantajları**:
    - Düşük üretim maliyeti.
    - Esnek ve hafif yapıları sayesinde çeşitli yüzeylere uygulanabilir.
    - Zayıf ışık koşullarında bile çalışabilir.
- **Dezavantajları**:
    - Diğer PV hücre türlerine göre daha düşük verimlilik (% 10-12).
    - Daha kısa ömür.
    - Yüksek sıcaklık ve nem gibi dış etkenlere karşı daha az dayanıklıdır.

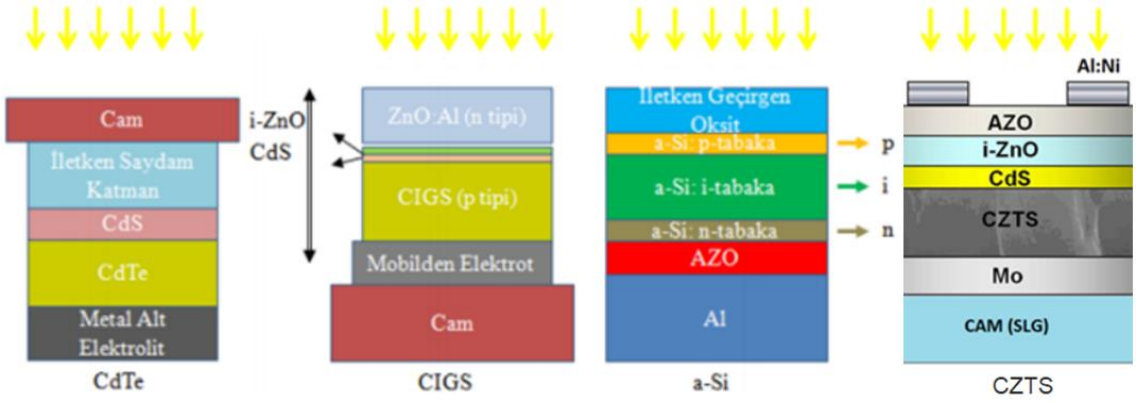
İnce film PV hücre yapısı Şekil 1.13'te görülmektedir.



Şekil 1.13. İnce film güneş hücresi

Yapısı itibariyle geniş yüzeylere kolay uygulanabilen ince film güneş hücre tipleri aşağıda verilmiştir ve Şekil 1.14'te yapıları görülmektedir;

- Amorf Silisyum (a-Si) Güneş hücreleri
- Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş hücreleri
- Bakır İndiyum Galyum Selenoid (CIGS) Güneş hücreleri
- Bakır Çinko Kalay Sülfür (CZTS) Güneş hücreleri



Şekil 1.14. CdTe, CIGS, a-Si ve CZTE güneş hücreleri (Özen, 2015)

1.3.2.4. Amorf Silisyum (a-Si) hücreler

Amorf silisyum hücreler, silikonun kristalize edilmemiş bir formu olan amorf silikon kullanılarak üretilir. Bu hücreler, genellikle düşük maliyetli uygulamalar için kullanılır ve ince film teknolojisiyle yapılır. Esnek yapıları, genellikle taşınabilir cihazlar ve bütünleşik PV uygulamaları için uygundur.

- **Avantajları**:
    - Uygun maliyet.
    - Esnek ve hafif tasarımlar.
    - Düşük ışıkta iyi performans.
- **Dezavantajları**:
    - Düşük verimlilik (% 6-8).
    - Zamanla performans kaybı.

1.3.2.5. Kadmiyum Tellür (CdTe) hücreler

Kadmiyum tellür bazlı ince film hücreler, düşük maliyetli üretim süreçleri ve geniş çaplı uygulama potansiyelleri nedeniyle dikkat çekicidir. CdTe hücreler, genellikle büyük ölçekli güneş santrallerinde kullanılır. Kadmiyum tellür, düşük maliyeti ve uygun enerji band aralığı ile güneş ışığını etkili bir şekilde emebilir.

- **Avantajları**:
    - Düşük üretim maliyeti.
    - Yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşamaz.
    - Geri dönüştürülebilir.
- **Dezavantajları**:
    - Kadmiyum, toksik bir malzemedir ve çevresel açıdan sorunlara neden olabilir.
    - Verimliliği silikon bazlı hücrelere göre daha düşüktür (% 9-11).

1.3.2.6. Bakır İndiyum Galyum Selenid (CIGS) hücreler

CIGS hücreler, bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinden yapılır. Yüksek ışık emme kapasitesine sahiptir ve bu nedenle daha ince yapılarda dahi etkili enerji üretimi sağlar. İnce film teknolojisinde en yüksek verimlilik oranlarına sahip olan türlerden biridir.

- **Avantajları**:
    - Yüksek verimlilik (% 12-14).
    - Esnek yapılar üzerine uygulanabilir.
    - Düşük ışık koşullarında bile çalışabilir.
- **Dezavantajları**:
    - Üretimi karmaşıktır ve maliyetlidir.
    - Hammaddeye erişim zorlukları.

1.3.2.7. Bakır Çinko Kalay Sülfür (CZTS) hücreler

Bakır çinko kalay sülfür (CZTS) güneş hücreleri, dört elementten oluşan ve çevre dostu özellikleri ile dikkat çeken ince film fotovoltaik hücrelerdir ve geleneksel fotovoltaik teknolojilere alternatif olarak geliştirilmiştir. Bakır çinko kalay sülfür (CZTS) güneş hücreleri, toksik olmayan, bol bulunan ve düşük maliyetli malzemeler kullanarak çevre dostu bir fotovoltaik teknoloji sunar. Bu hücreler, verimlilik açısından henüz ticari

silikon hücrelerle rekabet edemese de gelecekte enerji maliyetlerini düşürme ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelme açısından büyük bir potansiyele sahiptir

- **Avantajları:**
    - CZTS hücreleri, toksik olmayan ve bol bulunan malzemelerden yapıldığı için çevre dostudur.
    - Yüksek maliyetli malzemeler yerine daha ucuz ve yaygın bulunan elementler kullanılır.
    - CZTS hücreleri, sürdürülebilir enerji çözümleri için ideal bir seçenektir.
- **Dezavantajları:**
    - CZTS hücrelerinin laboratuvar koşullarındaki en yüksek verimliliği % 11-12 civarındadır, bu da ticari olarak yaygın kullanılan silikon tabanlı hücrelerle kıyaslandığında düşük kalmaktadır.
    - Verimliliklerinin yanı sıra, uzun vadeli stabilite ve dayanıklılık konularında da hala araştırmalar devam etmektedir.

1.3.2.8. Boya duyarlı Güneş (BDGH) hücreleri

Bu hücreler, yapısal olarak doğal fotosentez sürecini taklit eder ve düşük maliyetli, basit üretim süreçleriyle öne çıkar. BDGH'lerde, ışığa duyarlı bir boya, yarı iletken malzeme (genellikle titanyum dioksit) ile kaplanır. Güneş ışığı bu boyayı uyardığında, boya elektronları serbest bırakır ve bu elektronlar yarı iletken aracılığıyla akıma dönüşür.

- **Avantajları:**
    - BDGH'lerin üretiminde kullanılan malzemeler, silikon bazlı güneş hücrelerine göre daha ucuzdur. Üretim süreci de daha basit ve düşük maliyetlidir.
    - Şeffaf veya esnek malzemeler üzerinde uygulanabilir. Bu özellik, bina ile bütünleşmiş fotovoltaik sistemlerde veya taşınabilir güneş enerjisi uygulamalarında kullanımını kolaylaştırır.
    - BDGH'ler, düşük ışıkta (örneğin bulutlu hava veya iç mekân aydınlatmasında) dahi çalışabilir. Bu özellik, geleneksel güneş hücrelerine kıyasla geniş bir uygulama yelpazesi sunar.

- Farklı renklerde boyalar kullanılabilir, bu da mimari tasarım açısından estetik çözümler sağlar.
- Kullanılan malzemeler daha çevre dostu ve geri dönüştürülebilir olabilir, bu da BDGH'leri sürdürülebilir enerji çözümleri arasında önemli kılar.

- **Dezavantajları:**

  - BDGH'lerin verimliliği, silikon tabanlı hücrelere göre daha düşüktür (% 12-14 civarında). Ticari uygulamalarda bu oran genellikle daha da düşebilir.
  - Boya malzemelerinin zamanla bozulma eğiliminde olması, hücrelerin uzun ömürlü olmamasına neden olabilir. Güneş ışığı ve çevresel etmenlere karşı stabilite sorunları yaşanabilir.
  - BDGH'ler, enerji üretiminde daha düşük verimlilik sunduğu için büyük ölçekli enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalabilir.
  - BDGH'lerin ticari kullanımları için uzun vadeli dayanıklılık ve performans açısından daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir.
  - Yüksek sıcaklıklarda performans kaybı yaşayabilir ve bu da belirli iklimlerde kullanımını sınırlayabilir.

1.3.2.9. Kuantum Güneş (QD) hücreleri

Geleneksel fotovoltaik hücrelere kıyasla daha yüksek verimlilik noktaları adı verilen nano kristaller kullanarak güneş enerjisini elektriğe dönüştüren bir teknolojidir. Kuantum noktaları, birkaç nanometre çapında olan yarı iletken parçacıklardır ve boyutlarına göre farklı dalga boylarındaki ışığı soğurabilirler. Bu özellikleri sayesinde, kuantum güneş hücreleri daha geniş bir ışık spektrumunu kullanarak enerji üretebilir. Bu sayede, sadece görünen ışık değil, kızılötesi ve morötesi ışınlar da enerji üretimi için kullanılabilir. Kuantum noktaları, güneş enerjisinin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak enerji dönüşüm sürecindeki kayıpları en aza indirmeyi amaçlar.

- **Avantajları:**

    - Kuantum noktalarının farklı boyutları sayesinde geniş bir ışık spektrumu soğurabilirler. Bu, güneş ışığının daha fazla kısmının elektriğe dönüştürülmesini sağlar.
    - Teorik olarak, kuantum güneş hücreleri % 40'a kadar verimlilik sağlayabilir. Bu, geleneksel silikon hücrelerinin % 20-25 seviyesindeki verimlilik oranlarından çok daha yüksektir.
    - Kuantum noktaları, görünür ışığın yanı sıra kızılötesi ve morötesi ışığı da emebilir, bu da hücrelerin daha fazla enerji üretmesini sağlar.
    - Kuantum noktaları, düşük maliyetli üretim süreçleri ile üretilebilir. Ayrıca, bu teknoloji esnek yüzeylere uygulanabilir, bu da farklı uygulama alanlarına olanak tanır.
    - Kuantum güneş hücreleri, esnek yüzeylerde ve şeffaf yapılar üzerinde uygulanabilir. Bu da pencere kaplamaları veya taşınabilir cihazlarda kullanımını mümkün kılar.
    - Kuantum güneş hücreleri, farklı dalga boylarındaki ışığı yakalamak için çok katmanlı yapılar olarak tasarlanabilir. Her bir katman farklı bir enerji seviyesini soğurarak toplam verimliliği artırabilir.

- **Dezavantajları:**

    - Kuantum güneş hücreleri henüz araştırma ve geliştirme aşamasındadır. Ticari olarak yaygınlaşmaları için daha fazla araştırma ve teknolojik ilerleme gereklidir.
    - Pratikte, laboratuvar ortamında elde edilen yüksek verimlilikler, ticari uygulamalara henüz tam olarak yansımamaktadır. Kuantum noktalarının etkinliği üzerine araştırmalar devam etmektedir.
    - Kuantum noktalarının çevresel etmenlere (nem, sıcaklık) karşı dayanıklılığı henüz ideal seviyede değildir. Bu da uzun vadeli kullanım için sorun yaratabilir.
    - Bazı kuantum noktaları, kadmiyum gibi toksik ve çevreye zararlı elementler içerebilir. Bu durum, çevresel kaygıları artırabilir ve sürdürülebilirlik açısından dezavantaj oluşturabilir.

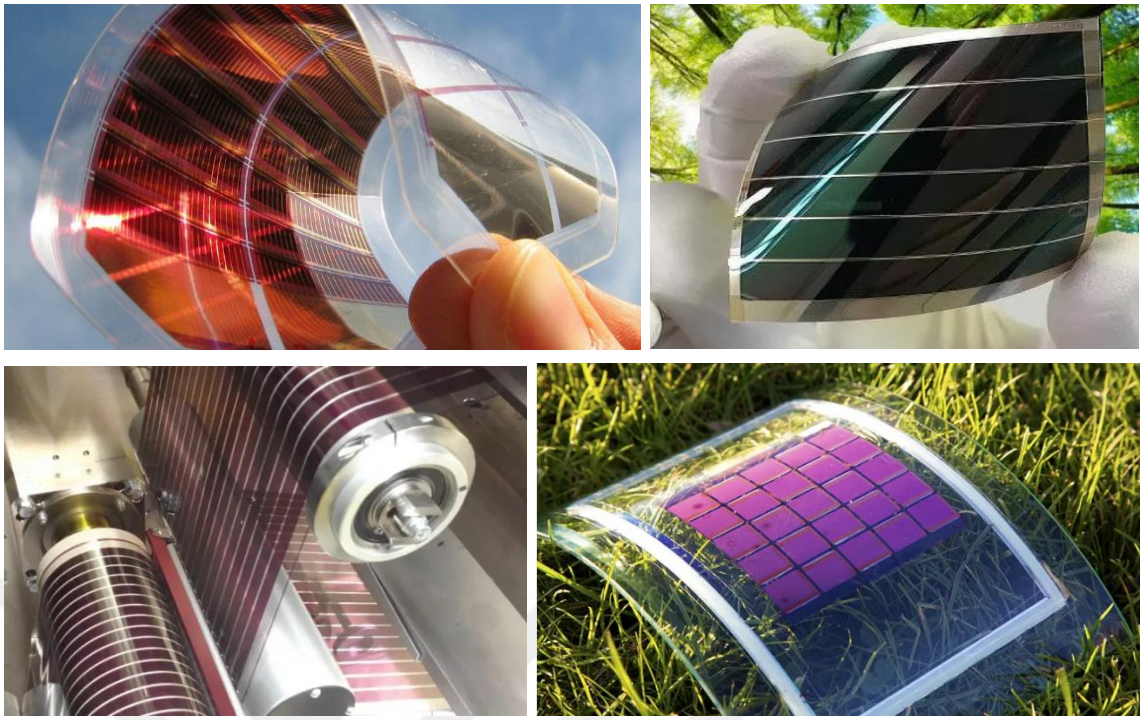
- Kuantum noktalarının üretim süreçleri hala oldukça karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren bir alandır. Ticari ölçekte yaygın üretim için üretim teknolojilerinin daha da iyileştirilmesi gerekmektedir.

1.3.2.10. Organik PV (OPV) hücreler

Organik fotovoltaik hücreler (OPV), organik moleküller veya polimerlerden yapılır. Bu hücreler, daha ucuz ve çevre dostu malzemeler kullanarak güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Organik PV hücreleri, esnek ve şeffaf olabilme gibi avantajlara sahiptir, bu da onları bütünleşik fotovoltaik uygulamalar için ideal kılar.

- **Avantajları:**
  - Hafif ve esnek yapıları.
  - Düşük üretim maliyeti.
  - Şeffaf ve renksiz olabilir.
- **Dezavantajları:**
  - Düşük verimlilik (% 5-10).
  - Kısa ömürlüdür.

Organik PV hücre yapısı Şekil 1.15'te görülmektedir.



Şekil 1.15. Esneklik yapıları ile öne çıkan OPV güneş hücreleri

1.3.2.11. Perovskit PV hücreler

Perovskit hücreler, son yıllarda hızla gelişen ve büyük umut vadeden bir PV teknolojisidir. Perovskit malzemesi, ucuz ve kolayca üretilebilir. Bu hücrelerin verimliliği hızla artmakta ve silikon tabanlı hücrelere rakip olacak düzeye ulaşmıştır.

- **Avantajları**:
    - Yüksek verimlilik (% 20-25)
    - Üretim maliyeti düşük.
    - Esnek yüzeylere uygulanabilir.
- **Dezavantajları**:
    - Stabilite sorunları.
    - Henüz geniş çapta ticarileşmemiştir.

1.3.2.12. Yoğunlaştırıcılı PV hücreler (CPV)

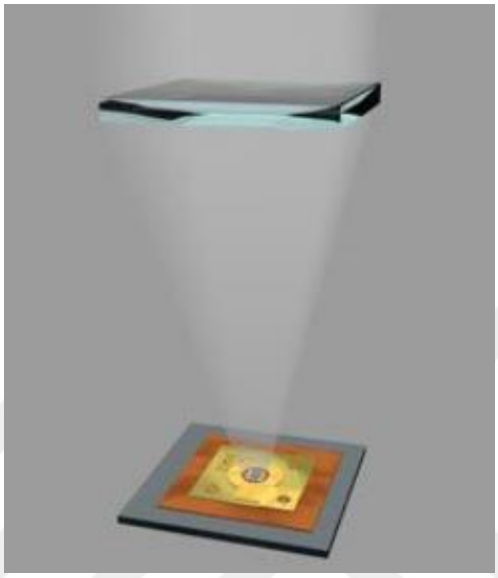
Güneş ışığını bir mercek veya ayna sistemi kullanarak küçük, yüksek verimli fotovoltaik hücrelerin üzerine yoğunlaştıran bir teknoloji türüdür. Bu sistemler, normalden çok daha fazla güneş ışığını küçük bir hücre alanına odaklar ve böylece daha az malzeme kullanarak daha fazla enerji üretimini hedefler. Genellikle çok yüksek verimli (çoğunlukla III-V yarı iletkenlerden yapılmış) güneş hücreleri kullanılır. Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Hücreler (CPV), yüksek güneş yoğunluğuna sahip bölgelerde, özellikle büyük ölçekli enerji santralleri için çok uygun bir teknolojidir. Ancak, karmaşık yapıları, yüksek maliyetleri ve sürekli güneş takibi gereksinimi, CPV sistemlerinin yaygın kullanımını sınırlayan başlıca dezavantajlar arasındadır.

- **Avantajları:**
    - CPV sistemleri, geleneksel silikon tabanlı güneş hücrelerine göre çok daha yüksek verimliliklere (% 40'a kadar) ulaşabilir.
    - Güneş ışığını yoğunlaştırarak daha küçük bir alana odakladığı için daha az fotovoltaik malzeme kullanılır, bu da maliyetleri düşürebilir.
    - Yoğunlaştırıcı sistemler, güneş ışığının güçlü olduğu yerlerde çok verimli çalışır. Bu, özellikle güneşli bölgelerdeki büyük ölçekli enerji santralleri için cazip bir seçenektir.
    - CPV sistemleri, yüksek verimlilik sunan çok eklemli (multi-junction) hücrelerle birleştirildiğinde enerji dönüşümü açısından mükemmel sonuçlar elde edebilir.

- **Dezavantajları:**
    - CPV sistemlerinin kurulumu, takip sistemleri ve yoğunlaştırıcı optikler gerektirdiği için maliyeti ve sistem karmaşıklığı yüksektir.
    - CPV sistemleri sadece doğrudan güneş ışığı altında verimli çalışır. Bulutlu hava ve difüz ışık koşullarında performansı ciddi şekilde düşer.
    - Yoğunlaştırıcı sistemler, güneşi sürekli takip eden (solar tracking) bir mekanizmaya ihtiyaç duyar. Bu mekanizma, ek bakım ve maliyet gerektirir.

- Yüksek verimlilik sağlamak için CPV sistemleri yoğun güneş ışığı alan bölgelerde kurulmalıdır. Daha düşük güneş ışığı alan bölgelerde kullanışlı olmayabilir.

Yoğunlaştırıcı PV hücre yapısı Şekil 1.16'de görülmektedir.



Şekil 1.16. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için kullanılan lens (Özen, 2015)

1.3.3. Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi

Fotovoltaik (PV) teknolojilerin tarihsel gelişimi, 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanan önemli bir bilimsel ve teknolojik süreçtir. Bu sürecin bazı temel dönüm noktaları şunlardır:

- **1839 – Fotovoltaik Etkinin Keşfi:** Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel, elektrotlarla sıvı bir iletken arasındaki ışık etkisi ile elektrik akımı oluşabileceğini keşfetti. Bu, fotovoltaik etkinin ilk gözlemlenmesiydi ve güneş enerjisinden elektrik elde etme fikrinin temelini attı.
- **1873 – Selenyumun Keşfi:** İngiliz mühendis Willoughby Smith, selenyum elementinin ışığa duyarlı olduğunu keşfetti. Bu buluş, fotovoltaik teknolojinin gelişmesinde önemli bir adım olarak kabul edildi.
- **1883 – İlk Güneş Hücresinin Üretimi:** Amerikalı mucit Charles Fritts, selenyumdan yapılan ilk güneş hücresini geliştirdi. Bu hücre, % 1 civarında

düşük bir verimlilikle elektrik üretebiliyordu, ancak fotovoltaik sistemlerin geleceği açısından önemli bir adımdı.

- **1946 – İlk Modern PV Patenti**: Dünya'da modern fotovoltaik hücrenin patenti ilk kez **Russell Ohl** tarafından alındı.
- **1954 – Modern Güneş Hücresinin Gelişimi:** Bell Laboratuvarları, silikon bazlı ilk modern güneş hücresini geliştirdi. Bu hücre, % 6 verimlilikle çalışıyordu ve günümüzde kullanılan fotovoltaik sistemlerin temelini oluşturdu. Bu gelişme, güneş enerjisinin ticari ve endüstriyel uygulamalarının yolunu açtı.
- **1957 – Silisyum PV Hücreler:** Hoffman Elektronik firması, % 8 verimliliğe sahip silisyum fotovoltaik hücreler geliştirdi.
- **1958 – Uzay Uygulamaları:** Fotovoltaik hücreler, ilk kez 1958 yılında Vanguard I adlı uyduda elektrik üretmek için kullanıldı. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin uzay teknolojilerinde kullanılmasının başlangıcı oldu ve güneş hücrelerinin güvenilirliğini kanıtladı.
- **1960 – Verim Artışı:** Hoffman Elektronik firması %14 verimliliği olan silisyum fotovoltaik hücreler üretmeyi başardı.
- **1970 - GaAs Hücreler:** Zhores Alferov, GaAs tabanlı hetero-eklem fotovoltaik hücreleri tasarladı.
- **1970'ler – Petrol Krizi ve Araştırmaların Artması:** 1970'lerde yaşanan petrol krizleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırdı. Bu dönemde, özellikle ABD'de fotovoltaik araştırmalar hız kazandı ve teknolojinin maliyeti düşmeye başladı. Aynı zamanda, daha verimli silikon hücreleri geliştirilerek % 20'ye varan verimliliklere ulaşıldı.
- **1990'lar – Ticari Büyüme:** 1990'larda fotovoltaik teknolojiler, ticari olarak daha yaygın hale geldi. Güneş panellerinin maliyeti düşerken, çeşitli ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik teşvik programları başlattı. Gelişmiş ülkelerde çatı üstü güneş enerjisi sistemleri yaygınlaştı.
- **1985 - % 20 Verimlilik:** New South Wales Üniversitesinde, % 20 verimliliğe sahip silisyum fotovoltaik hücreler geliştirildi.
- **2000'ler – Büyük Ölçekli Uygulamalar**: 2000'li yıllarda güneş enerjisi teknolojilerinin maliyeti hızla düştü. Bu dönemde, Avrupa, ABD, Çin ve diğer

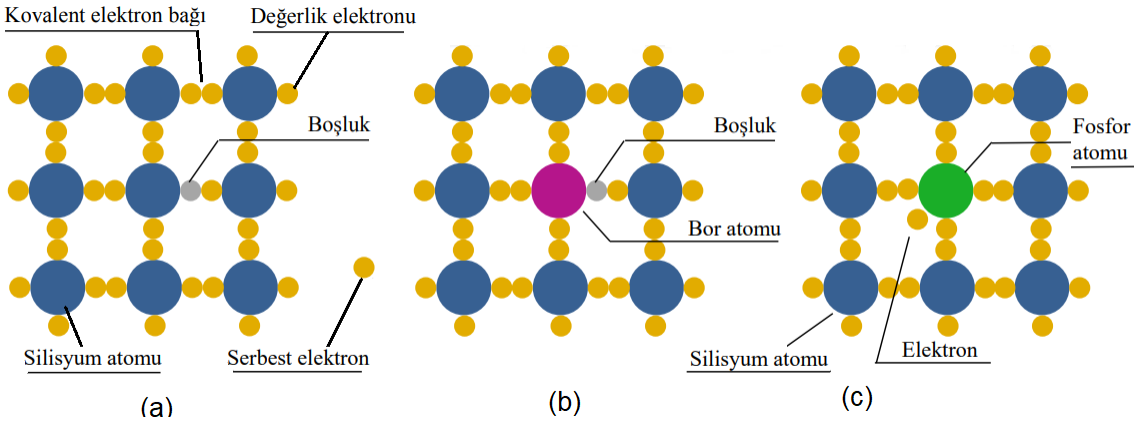
ülkelerde büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri kuruldu. Ayrıca, ince film güneş hücreleri ve çok katmanlı PV hücreler gibi yeni teknolojiler geliştirildi.

- **2006 - % 40 Verimlilik:** Spectrolab firması % 40 verimli üç-eklemli fotovoltaik hücreleri geliştirdi.
- **2010 ve Sonrası – Verimlilikte Artış ve Global Yaygınlık:** Son yıllarda fotovoltaik hücrelerin verimliliği % 25'in üzerine çıktı ve üretim maliyetleri daha da düştü. Çin, dünya güneş paneli üretiminde lider hale gelirken, birçok ülke enerji geçiş planlarında güneş enerjisine daha fazla yer vermeye başladı. Ayrıca, organik güneş hücreleri ve perovskit malzemeler gibi yeni nesil teknolojiler üzerinde de yoğun araştırmalar yapılıyor.

Fotovoltaik teknolojiler, 19. yüzyıldan bu yana sürekli olarak gelişen bir alan olmuş ve özellikle 21. yüzyılda yenilenebilir enerji sistemlerinin temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Maliyetlerin düşmesi ve verimliliğin artmasıyla birlikte güneş enerjisi, küresel enerji talebini karşılamak için daha önemli bir rol oynamaktadır.

1.4. Fotovoltaik Etki Nasıl Oluşur

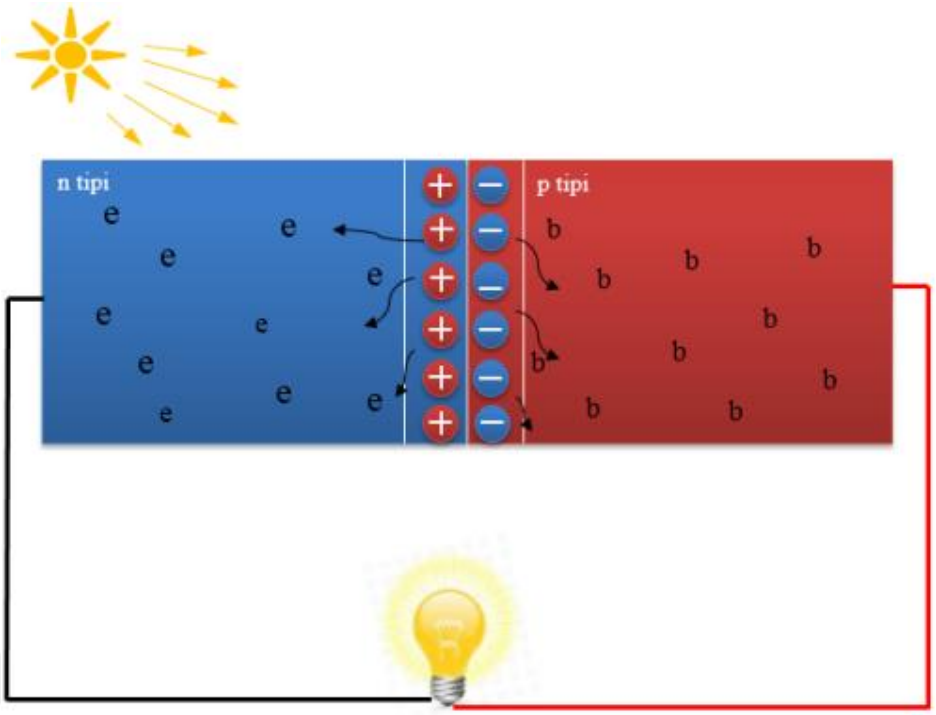
Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensibi, kristal silisyum hücreler örneğinde anlatılacaktır. Bu hücrelerin üretimi için yüksek saflıkta ve kristal yapısı kusursuz silisyum gerekmektedir. Silisyum atomları, birbirleriyle sıkı bir kristal yapı oluşturur. Her silisyum atomunun dış katmanında dört değerlik elektronu bulunur ve bu atomlar kararlı bir yapı oluşturmak için komşu atomlarla elektronlarını paylaşarak kovalent bağlar oluştururlar. Böylece, her silisyum atomu dört komşu atomla bağ yaparak, dış katmanda toplamda sekiz elektrona sahip olur ve kararlı bir yapıya ulaşır. Işık veya ısı enerjisi bu bağların kırılmasına neden olabilir. Bağlarından kopan elektronlar serbest hale gelir ve kristal yapıda boşluklar bırakır. Şekil 1.17, silisyumun kristal yapısını ve bu iletim sürecini göstermektedir.



Şekil 1.17. Silisyum kristal yapısı, (a) Silisyum yarı iletken yapısı, (b) p tipi yarı iletken, (c) n tipi yarı iletken (Bayrak, 2017)

Enerji üretimi için silisyum kristal yapısına bilinçli olarak katkı atomları eklenir. Bu katkı atomları, dış elektron katmanlarında ya bir fazla (fosfor) ya da bir eksik (bor) elektrona sahip atomlardır. Fosfor ile yapılan katkılamada, silisyum yapısına eklenen her fosfor atomu fazladan bir elektron sağlar. Bu elektron, kristal yapı içinde serbestçe hareket ederek elektrik yükü taşır (n tipi katkılama). Bor kullanılarak yapılan katkılamada ise, her bor atomu kristal yapıda bir boşluk oluşturur (p tipi katkılama). Komşu silisyum atomlarından gelen elektronlar bu boşlukları doldurur ve bu süreç yeni boşlukların oluşmasına neden olur. Katkılama süreci, Şekil 1.17'de gösterildiği gibi kristal yapıda örgü bozukluklarına yol açar.

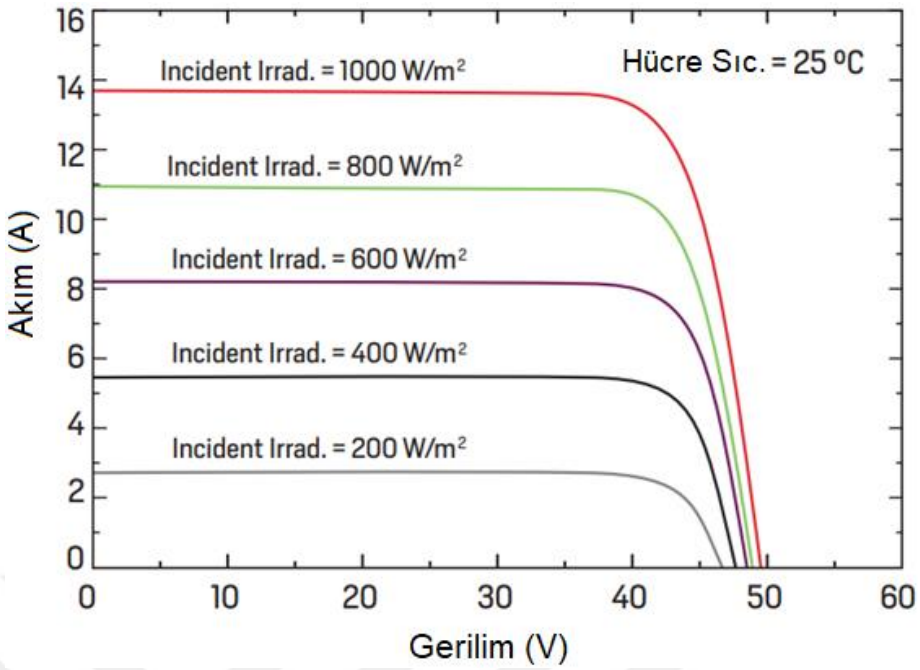
N ve P tipi yarı iletken tabakalar bir araya getirildiğinde p-n kavşağı oluşur. Bu tabakalar temas ettiğinde, elektronlar ve boşluklar karşılıklı olarak birbirlerine doğru hareket eder ve birleşir. Bu süreç tamamlandığında, serbest yük taşımayan bir bölge oluşur ve bu alan "azalma bölgesi" olarak adlandırılır. Eğer azalma bölgesinde fotoelektrik etki gerçekleşirse, elektronlar p tipi katmanda serbest kalır. Mevcut elektrik alan, boşlukları kendine çekerken, elektronları iter ve bu durum elektrik akımının oluşmasını sağlar. P-n katmanları tarafından üretilen bu alan, elektriksel bir gerilim oluşturur ve bu sayede fotoelektrik etkiyle elektrik üretimi sağlanır. Bu süreç Şekil 1.18'de gösterilmektedir.



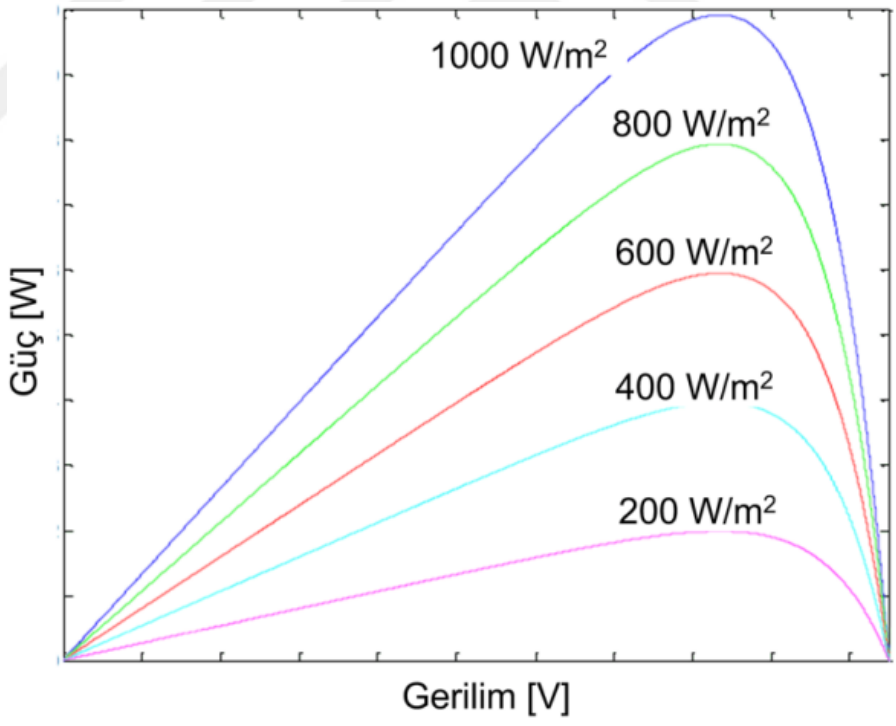
Şekil 1.18. Fotoelektrik etki ve enerji üretimi (Bayrak, 2017)

1.5. Işınım Etkisi

Bir fotovoltaik (PV) hücresinden elde edilen güç, üzerine düşen güneş ışığıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle, ışık şiddeti arttıkça elde edilen güç de artar. Fotovoltaik hücreye ışınım geldiğinde yaklaşık 0,6 V'luk bir gerilim oluşur. PV hücrelerin I-V (akım-gerilim) karakteristiği lineer değildir ve her ışınım seviyesinde yalnızca bir maksimum güç çıkış noktası bulunur. PV hücrelere ait akım-gerilim ve güç-gerilim eğrileri sırasıyla Şekil 1.19 ve Şekil 1.20'de gösterilmektedir.



Şekil 1.19. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı akım-gerilim eğrisi (Arçelik, 2021)



Şekil 1.20. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı güç-gerilim eğrisi (Özen, 2015)

Işınım seviyesindeki değişimlerin PV hücresinin akımını önemli ölçüde etkilediği, ancak gerilim üzerinde aynı derecede büyük bir etkisinin olmadığı gözlemlenebilir. Yani, ışınım arttıkça hücreden elde edilen akım belirgin şekilde artarken, gerilimde daha

sınırlı bir değişiklik olur. Bu, PV hücrelerinin karakteristiğinde sıkça görülen bir durumdur ve ışınım değişimlerinin akım üzerinde daha güçlü bir etki oluşturduğunu gösterir.

1.6. Fotovoltaik Hücre ve Panellerin Birbirine Bağlanması

Fotovoltaik (PV) hücreler, kristal yapıları gereği düşük gerilim üretirler. Bu yüzden, istenen çıkış gerilimi ve akımı elde etmek için hücreler farklı şekillerde bağlanır. Seri bağlantı ile gerilim artırılırken, paralel bağlantı ile akım yükseltilir. Standart bir PV panel, 36 veya 72 hücrenin seri olarak bağlanmasıyla oluşturulur ve bu şekilde istenen gerilim sağlanır.

1.6.1. Seri bağlantı

PV hücreler seri olarak bağlandığında, toplam çıkış gerilimi hücrelerin bireysel gerilimlerinin toplamına eşit olur, ancak akım sabit kalır. Seri bağlantı genellikle daha yüksek gerilim elde etmek için kullanılır. Hücrelerin birbirine seri bağlanması şu şekilde işler:

- **Gerilim:** Seri bağlanan hücrelerin voltajları toplanır. Örneğin, her biri 0,6 V üreten 10 hücre seri bağlanırsa toplamda 6 V elde edilir.
- **Akım:** Seri bağlantıda, tüm hücrelerden geçen akım aynıdır. Yani, hücrelerin ürettiği akım değerleri toplamda değişmez.

Seri bağlamanın avantajı, yüksek gerilim elde etmek, böylece daha düşük akım kullanarak enerji kayıplarını azaltmaktır. Ancak dezavantajı, seri bağlı hücrelerden birinin gölgelenmesi ya da arızalanması durumunda tüm zincirin performansının düşmesidir.

1.6.2. Paralel bağlantı

PV hücreler paralel olarak bağlandığında, toplam çıkış akımı hücrelerin bireysel akımlarının toplamına eşit olur, ancak gerilim sabit kalır. Paralel bağlantı, daha yüksek akım elde etmek için tercih edilir:

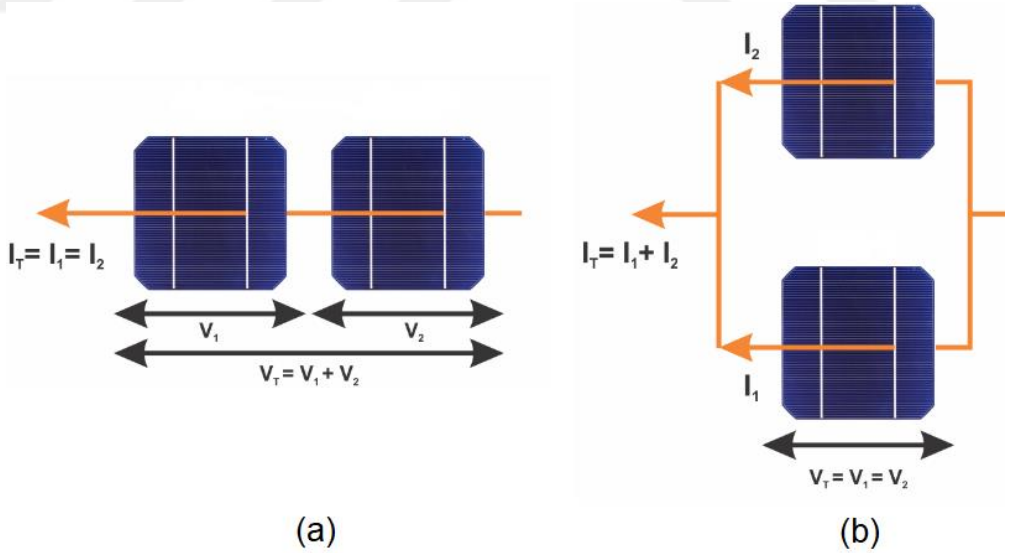
- **Gerilim:** Paralel bağlı hücrelerde her bir hücrenin voltajı sabit kalır. Örneğin, 0,6 V üreten 10 hücre paralel bağlandığında, yine 0,6 V elde edilir.

- **Akım:** Paralel bağlı hücrelerde toplam akım, hücrelerin ürettiği akımların toplamıdır. Yani, her biri 2 A üreten 10 hücre paralel bağlanırsa toplamda 20 A elde edilir.

Paralel bağlantı, akımı artırarak daha yüksek güç elde etmeyi sağlar. Ancak yüksek akım, iletim hatlarında enerji kayıplarına ve daha kalın kablo gereksinimine neden olabilir.

1.6.3. Seri ve paralel bağlantıların kombinasyonu

Bir PV paneli dizisinde hem seri hem de paralel bağlantılar bir arada kullanılabilir. Seri bağlantılarla gerilim artırılırken, paralel bağlantılarla akım artırılarak toplam çıkış gücü optimize edilebilir. Bu yöntem, genellikle daha büyük PV sistemlerinde tercih edilir ve sistemin verimliliğini artırmak için tasarlanır. Seri ve paralel PV hücre bağlantıları Şekil 1.21'de görülmektedir.



Şekil 1.21. Fotovoltaik hücre bağlantısı, (a) seri bağlantı, (b) paralel bağlantı

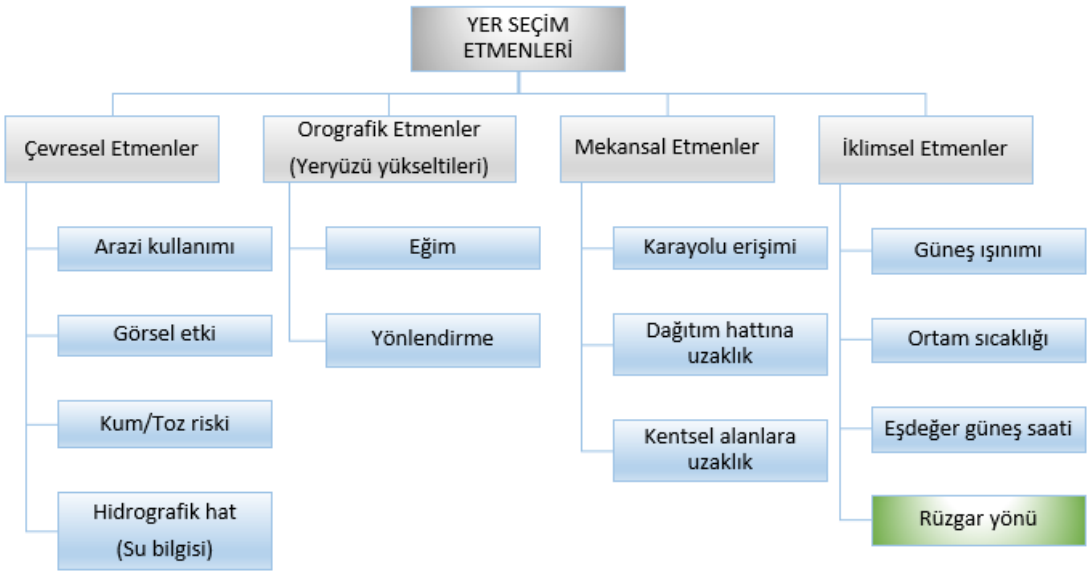
1.7. Fotovoltaik Sistem Yer Seçim Parametreleri

PV güneş enerjisi santrallerini geliştirmek için yer seçimi en önemli parametrelerden biridir. Güneş enerjisinin daha yaygın olarak kullanılmaya başlanması; rüzgâr hızının

güneş panellerine etkisini bulmak için yapılan araştırmaları hızlandırmıştır. Deneysel yöntemlerle böyle bir araştırma yapmak uzun bir zaman ve iş kaybına neden olurken, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD-HAD) hızlı ve uygun maliyetli bir yöntem olarak önümüze çıkmaktadır.

Herhangi bir güneş PV tesisinin güç üretim verimliliği üzerinde en önemli etkiye sahip değişkenler; güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, eşdeğer güneş saatleri ve rüzgâr hızı gibi iklim faktörleridir. PV hücrelerinin çıkış gücü üzerinde sıcaklık artışının negatif etkiler doğurduğu bilinmektedir. Aynı zamanda termal stresin uzun süreli varlığından kaynaklanan kalıcı yapısal zararlar PV hücrelerinin yaşam döngüsünü kısaltmaktadır.

Yıllık ortalama güç performansının yüksek ve sistem maliyet koşullarının düşük olmasını sağlayabilen bir PV geliştirmek için çevresel, orografik, mekânsal, iklimsel faktörlerin geniş bir yelpazede değerlendirilmesi gerekmektedir. PV santrallerin yer seçiminde dikkat edilmesi gereken kriterler Şekil 1.22'de görülmektedir.



Şekil 1.22. PV güneş enerjisi santralleri yer seçim etmenleri

1.8. Fotovoltaik Sistemleri Etkileyen Parametreler

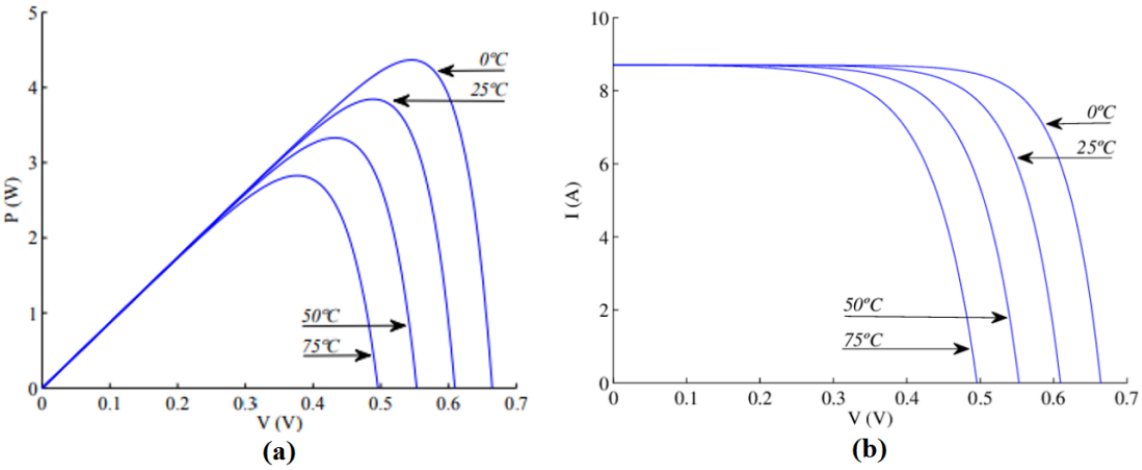
Fotovoltaik sistemin ürettiği güç, birçok faktöre bağlıdır. Sistemi oluşturan bileşenlerin karakteristikleri, coğrafi konum, kurulum yerinin çevresindeki yapılar, panelin yüzey alanı, yüzeye gelen ışınım değerleri, panelin eğim açısı, panel ve çevre sıcaklığı, rüzgâr,

tozlanma, gölgelenme, inverter, AC ve DC kablo kaybı, uyumsuzluk gibi parametreler bu faktörler arasında yer alır. Bu etmenler, sistemin verimliliğini ve üretilen güç miktarını doğrudan etkiler. Örneğin, ışınım seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde sistem daha fazla enerji üretebilirken, panel sıcaklığı arttıkça verimlilik düşebilir. Bir fotovoltaik sistemdeki kayıpları Çizelge 1.1'deki gibi sınıflandırabiliriz.

Çizelge 1.1. PV Sistem Kayıpları (Kerem, Atik, & Bayram, 2020)

Parametre	**Açıklama**	**Etki oranı**
Gölgelenme	Sisteme güç kaynağı yerine yük bağlanmış gibi bir etki oluşturacağından güç tüketimine sebep olmakta ve verim kaybına yol açmaktadır.	% 7
Sıcaklık	Aşırı ısınma panel verimini önemli ölçüde azaltmaktadır.	% 4,60
Yansıma	Bir foton n tipi ve p tipi malzeme üzerine düştüğünde yasak bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar eşit sayıda elektron ve boşluk çifti oluştururlar. Güneşten gelen ışınımın % 100'ü kullanılamaz ve bir kısmı geri yansır.	% 2,50
Tozlanma	Oluşan toz panel üzerine gelen ışınımın azalmasına yol açarak geçirgenliği azaltmakta ve kısa devre akımını etkileyerek verimi azaltmaktadır.	% 2
Işınım	Enerjinin güneşten tanecik biçiminde yayılmasıdır ve gelen ışınımın % 100'ü kullanılamaz, bir kısmı geri yansır.	% 1,50
Spektrum	Fotovoltaik olayda güneş ışığını soğuracak malzeme yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin birbirinden ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarı iletken olmalıdır.	% 1
DC kablo kaybı	Sistemde kullanılan kabloların iç direncinden kaynaklanan kayıplardan kaynaklanır	% 5
İnverter	İnverterdeki yarı iletken, manyetik malzeme ve kapasitörlerin iletim ve anahtarlama kayıplarına bağlıdır.	% 3
AC kablo kaybı	Sistemde kullanılan kabloların iç direncinden kaynaklanan kayıplardır.	% 1
Uyumsuzluk	Şebekeye bağlı bir sistemde uygun gerilim seviyesine ulaşmak için çok sayıda hücre kullanılır. Bu durum çok sayıda PV hücresinin birbirine seri bağlı olarak aynı DC akımda çalışmasına yol açar.	% 0,70

PV sistemlerde panel verimliliğini etkileyen önemli etmenler arasında sıcaklık gelmektedir. Aşırı ısınma panel verimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Hücre sıcaklığındaki her 1 ^{o}C artışta üretilen gerilim yaklaşık 0,5 V azalmaktadır (Kerem vd., 2020). Şekil 1.23'te 0-75 ^{o}C sıcaklıklarındaki P-V ve I-V grafikleri gösterilmiştir



Şekil 1.23. 0-75 °C sıcaklıklarındaki (a) P-V grafiği (b) I-V grafiği (Kerem vd., 2020).

PV hücreye gelen ışımanın enerjiye dönüşmeyen kısmı ısı olarak hücreden dışarı atılır. T_{pv} hücre sıcaklığı, T_{NOCT} (nominal işletme hücre sıcaklığında), 20 °C ortam sıcaklığında, 800 W/m^2 ışıma değeri (G) ve 1 m/s rüzgâr hızında tanımlanır.

Bulunan sıcaklık değeri, panel gücünün (P_m) sıcaklığa bağımlılık katsayısı (µp) ile kullanılarak PV çıkış gücü hesaplanabilir;

$$P_m T_{pv} = P_{m,STC}\left[1 - \mu p\left(T_{pv} - 25\right)\right] \qquad (1.1)$$

Burada (P_m), STC standart test koşullarındaki panel gücünü ifade etmektedir. PV'lerde (T_{pv}) nominal işletme hücre sıcaklığı 40-50 °C aralığında değişmektedir. Aradaki bu 10 °C'lik fark sıcaklığa bağımlılık katsayısını (µp) ifade etmektedir. µp değeri 0,30-0,40 %/K alındığında % 3-4 aralığında bir güç farklılığı ortaya çıkmaktadır (Kerem vd., 2020).

1.9. Sıcak Nokta (Hot Spot) ve Gölgelenme Etkisi

Fotovoltaik (PV) panellerde oluşan bir arıza durumu olup, genellikle hücrelerin gölgelenmesi veya hasar görmesi sonucunda ortaya çıkar. Bu etki, güneş hücresinin aşırı ısınmasına neden olarak hem hücrenin hem de modülün zarar görmesine yol açabilir. Sıcak nokta etkisi, panelin verimliliğini düşüren ve uzun vadede ciddi hasarlara sebep olabilecek bir sorundur.

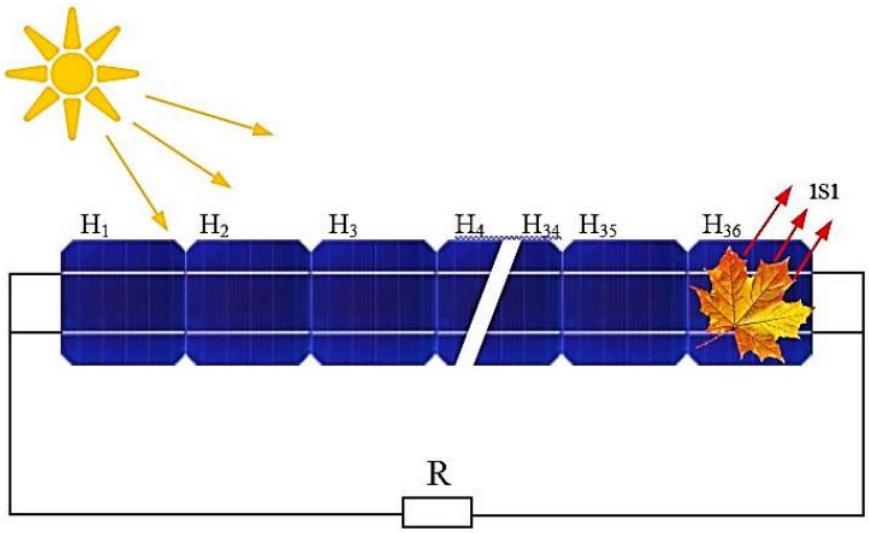
1.9.1. Sıcak nokta etkisinin oluşumu

Sıcak nokta etkisi, seri bağlı PV hücre dizisinde, bir hücrenin diğer hücrelere göre daha düşük akım üretmesiyle başlar. Gölgelenen veya hasarlı bir hücre, tam performans gösteren diğer hücrelerle aynı akımı üretemez ve bu hücre artık enerji üreten bir bileşen olmaktan çıkar. Bunun yerine, bu hücre bir yük gibi davranarak, diğer hücrelerin ürettiği enerjiyi tüketir. Bu durum, hücrede ters gerilim oluşmasına ve bir direnç gibi davranmasına neden olur. Enerji, hücrede ısıya dönüşür ve aşırı ısınma meydana gelir.

1.9.1.1. Sıcak nokta etkisine sebep olan faktörler

- **Gölgelenme:** Ağaçlar, binalar, direkler veya çevresel faktörler (yapraklar, kar, toz) gölgelenmeye neden olabilir.
- **Hasarlı Hücreler:** Kırılmış veya üretim sırasında kusurlu olan hücreler, performans kaybı yaşar ve sıcak nokta etkisi oluşturabilir.
- **Eşleşmeyen Hücreler:** Seri bağlı hücrelerin eşleşmemesi, düşük akımlı hücrelerin aşırı yüklenmesine neden olabilir.

PV panellerde gölgelenme sonucu oluşan sıcak nokta etkisi Şekil 1.24'te gösterilmektedir.



Şekil 1.24. Kısmi gölgelenme altında PV panel

36 adet seri bağlı hücreden oluşan bir panelde fotovoltaik hücrelerden 35 tanesi normal çalışırken bir tanesi çok düşük akım üretirse 35 fotovoltaik hücrenin gücü bu zayıf hücre üzerine dağılır ve panelden güç alınması mümkün olmaz. Otuz altıncı hücre üzerine dağılan güç miktarı uyumsuzluğa ve fotovoltaik hücrelerin sızıntı akımlarına bağlıdır. Uyumsuzluk etkisi sebebiyle seri bağlı güneş hücrelerinden oluşan panelde iki etki gözlenir. Birincisi gölgelenme etkisi ile sıcaklık artar ve açık devre gerilimi azalır. Panelin çıkış gücü gölgeli hücreye bağlı olarak değişim gösterir (Bayrak, 2017).

1.9.1.2. Sıcak nokta etkisi ve sonuçları

- **Aşırı Isınma:** Gölgelenen veya hasarlı hücre üzerinde fazla enerji birikmesi, hücrenin sıcaklığını artırır ve bu, sıcak nokta etkisinin temelini oluşturur. Hücre malzemesi zarar görebilecek kadar yüksek sıcaklıklara ulaşabilir.

- **Verimlilik Kaybı:** Aşırı ısınma nedeniyle hücrenin verimi düşer, hatta modül genelinde enerji üretimi azalır. Isı, hücrenin enerji dönüşüm kapasitesini olumsuz etkileyerek, panelin performansını büyük ölçüde azaltır.

- **Hücre ve Modül Hasarı:** Sürekli ısınma, PV hücresinin fiziksel olarak zarar görmesine ve kalıcı deformasyonlara yol açabilir. Zamanla bu, hücrelerin yanmasına ve PV modülün bozulmasına neden olabilir.

- **Devre Kesintileri:** Sıcak nokta etkisi, modülde devre kesintileri oluşturabilir ve bu da panelin tamamen işlevsiz hale gelmesine yol açabilir.

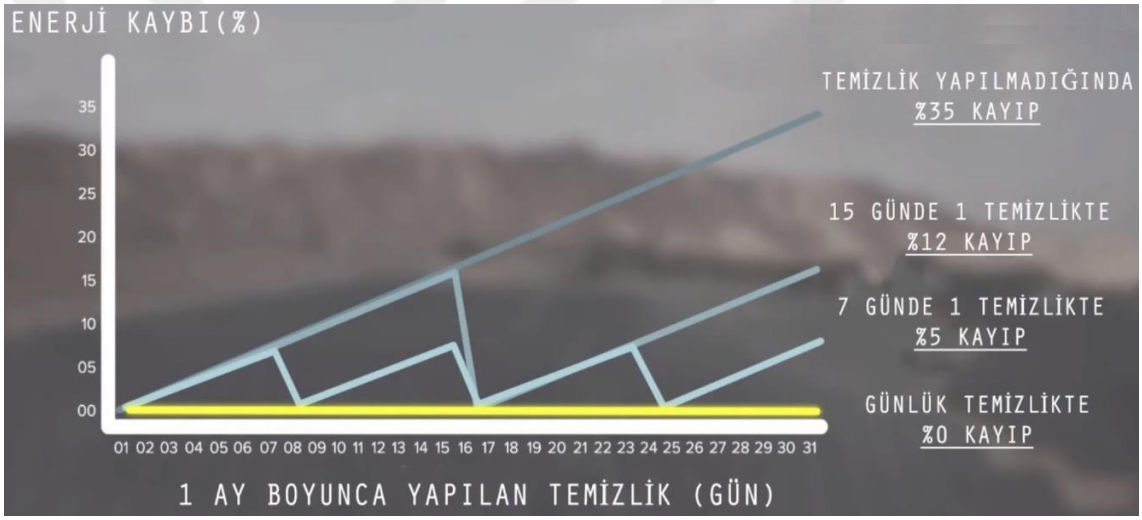
1.9.1.3. Sıcak nokta etkisini önleme

- **Bypass Diyotlar:** Sıcak nokta etkisini önlemek için en yaygın çözüm, PV hücrelerinin yanına bypass diyotları yerleştirmektir. Bypass diyotlar, gölgelenen veya hasarlı hücreyi devre dışı bırakarak, akımın bu hücreyi atlayarak akmasını sağlar. Bu sayede, akımın daha verimli bir şekilde devam etmesi sağlanır ve aşırı ısınma önlenir.

- **Doğru Kurulum ve Bakım:** Gölgelenme riskini en aza indirmek için, panelin kurulum alanı dikkatle seçilmelidir. Ağaçlar, yapılar, telefon direkleri gibi gölge oluşturabilecek nesnelerden kaçınılmalıdır. Ayrıca, düzenli temizlik ve bakım,

toz ve kir birikmesini engelleyerek gölgelenmeyi önler. Şekil 1.25'te PV paneller üzerindeki temizlik etkilerini gözlemleyebiliriz.

- **Eğitimli Tasarım:** PV sistem tasarımında gölgelenme analizleri yapılmalı ve sistem bu etkiler dikkate alınarak planlanmalıdır. Her hücre için doğru eğim açısı ve doğru modül düzeni ile gölgelenme minimize edilebilir. Kar özellikle dağlık bölgelerde, toz, is ve kirlenme ise endüstriyel bölgelerde önemli gölgelenme etmenleridir. Fotovoltaik panellerin yatayla yaptığı 12^0 ve daha üzerindeki açılar bu etkilerin yağmur suları yardımıyla temizlenmesine olanak sağlamaktadır (Ertürk, 2018). Bu tip gölgelenmeler, fotovoltaik panellerin eğim açısının arttırılmasıyla önemli ölçüde giderilebilir.



Şekil 1.25. PV paneller üzerinde kirlenmenin etkisi (Robsys Robotic Systems, 2018)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

(Malik & Damit, 2003), yaptığı çalışmada Fotovoltaik (PV) hücrelerin performansını değerlendirmek için akımın, voltajın, sıcaklığın, ışınım yoğunluğunun, rüzgâr hızının ve radyasyon spektrumunun birer değişken olarak ölçülmesi gerektiğini belirtmiştir. Ortam sıcaklığı arttıkça, güneş pillerinin üretebileceği elektrik enerjisi azalır. Bu etki, sıcak iklimlerde daha belirgindir. Brunei Sultanlığı Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yapılan dış mekân güneş pili testlerinde elde edilen sonuçlar, hücre sıcaklığındaki her 1 °C'lik artışın hücre veriminde % 0,06 azalmaya yol açtığını göstermiştir. Aynı ışınım seviyesinde, hücre sıcaklığı arttıkça çıkış gücü ve verimlilik düşer. Deneylerdeki panel ile STK'daki panel verimleri arasında % 54 fark tespit edilmiştir.

Mondol, Yohanis, Smyth, ve Norton (2006), tarafından yapılan bir çalışmada, Kuzey İrlanda'da çatıya monte edilmiş fotovoltaik (PV) sistemlerin yaz aylarındaki ortalama saatlik sıcaklıklarının 22 °C ile 33 °C arasında değiştiği belirlenmiştir. Araştırmada, PV modüllerinin yüksek çalışma sıcaklıklarının, verimliliklerinde yaklaşık % 10, düşük güneşlenme koşullarında ise % 4-8 oranında azalmaya neden olduğu bulunmuştur.

Park, Kang, Kim, Yu ve Kim (2010), binalara bütünleşik PV modülleri üzerine odaklanmıştır. Bu tür modüllerin montajında, modülün açısı, yönü, gölgeleme durumu ve sıcaklık gibi çeşitli faktörler dikkate alınmalıdır. Özellikle bina yüzeylerine entegre edilen PV modüllerinin sıcaklıkları hem elektrik verimliliği hem de binanın enerji ihtiyacı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışma, cam bileşeni olarak tasarlanmış yarı saydam bir PV modülünün elektriksel ve termal performansını incelemektedir. Araştırma, PV modülünün termal özelliklerinin elektrik üretim performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Deneyler, hem Standart Test Koşulları (STC) hem de dış ortam koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, PV panel çıkış gücünün, yüzey sıcaklığındaki her 1 °C artış başına yaklaşık % 0,48 (STC koşullarında) ve % 0,52 (dış ortam koşullarında) oranında azaldığını göstermektedir. Ayrıca, modül için kullanılan camın özelliklerinin, PV modül sıcaklığını ve dolayısıyla elektrik performansını etkilediği kanıtlanmıştır.

(Cuce, Bali, & Sekucoglu, 2011), çalışmalarında, silikon bazlı güneş pillerinin performans parametreleri üzerindeki pasif soğutmanın etkileri deneysel olarak

incelenmiştir. Fotovoltaik (PV) hücrelerden açığa çıkan atık ısının dağıtılması amacıyla alüminyumdan yapılmış bir ısı emici kullanılmıştır. Soğutucunun boyutları, kararlı durum ısı transferi analizinin sonuçlarına göre optimize edilmiştir. Deneyler, farklı ortam sıcaklıkları ve çeşitli aydınlatma yoğunlukları altında bir güneş simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan soğutma yöntemiyle PV hücresinin enerji, ekserji ve güç dönüşüm verimliliğinin kayda değer bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. 800 W/m² güneş ışınımında PV hücresinin güç çıkışında yaklaşık % 20'lik bir artış sağlanmıştır. En yüksek soğutma etkisi ise 600 W/m² ışınım seviyesinde gözlemlenmiştir. Ayrıca, kanatçıklı ve kanatsız PV hücrelerinin performanslarının ortam sıcaklığının düşmesiyle birlikte iyileştiği belirlenmiştir.

(Teo, Lee, & Hawlader, 2012), tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit güneş sistemi oluşturmak için PV panelinin arkasına giriş/çıkış manifoltu bulunan paralel bir kanal dizisi eklenmiştir. Araştırmanın sonuçları, aktif soğutma olmadan PV modül sıcaklığının daha yüksek olduğunu ve bu koşullarda % 8-9 verimlilik elde edildiğini göstermektedir. Aktif soğutma sayesinde PV/T modülünün sıcaklığı önemli ölçüde düşerken, PV panelinin verimliliğinde % 12 ile % 14 arasında bir artış sağlanmıştır. Aktif soğutma yaklaşımları yalnızca PV panellerin verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda atık ısının bir kısmının geri dönüştürülmesine de olanak tanır. PV modülünün elektriksel verimliliği, sıcaklık artışıyla azalma gösterirken, modül sıcaklığı güneş ışınımı ile doğru orantılıdır. Aktif soğutma ile, modül sıcaklığı her 100 W/m² için 1,4 °C artarken, soğutma uygulanmadığında bu değer 1,8 °C'ye çıkmaktadır.

(Rehman & El-Amin, 2012), Suudi Arabistan'ın Dhahran kentinde bulunan Kral Fahd Petrol ve Mineraller Üniversitesi'nde kurulan 5,28 kW kapasiteli izole şebekeli fotovoltaik enerji santralinin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Performans analizi için sıcaklık, güneş radyasyonu yoğunluğu ve PV panel güç çıkışı verileri toplanmıştır. PV yüzey sıcaklığı ve panellerdeki toz birikiminin güç çıkışına etkisi incelenmiş; ayrıca PV panel arka yüzey sıcaklığı ile doğru akım (DC) performans oranı değişimi analiz edilmiştir. Temmuz ve Ağustos aylarında artan PV panel sıcaklığının, saatlik ortalama enerji verimini azalttığı tespit edilmiştir. Günlük enerji verimi ayın

günlerine göre azalma eğilimi gösterirken, bu durum toz birikimi ile ilişkilendirilmiştir. DC performans oranı da artan yüzey sıcaklığı ile azalma göstermiştir.

(Cuce, Cuce, & Bali, 2013), araştırmalarında, mono-kristal ve polikristal fotovoltaik modüllerin performansını etkileyen parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, 200-500 W/m² aralığındaki farklı ışık yoğunlukları ve 15-60 °C aralığındaki hücre sıcaklıkları için kalibre edilmiş bir güneş simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ışık yoğunluğunun performans parametreleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Hücre sıcaklığı arttıkça açık devre voltajı ve maksimum voltajda belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu bulgulara dayanarak, PV sistemlerinin verimliliğini artırmak için ışık yoğunluğunun maksimum seviyeye çıkarılması ve hücre sıcaklığının minimuma indirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, açık devre voltajı ve maksimum voltajdaki düşüşleri önlemek için hücre sıcaklığı olabildiğince düşük tutulmalıdır.

(Sudhakar & Srivastava, 2014), fotovoltaik panellerin elektrik üretimini etkileyen parametreleri, deneysel yöntemlerle incelemiştir. Araştırmada, modül sıcaklığı, açık devre gerilimi, kısa devre akımı, dolgu faktörü ve ısı kayıp katsayıları gibi faktörler değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre enerji verimi % 6,4, ekserji verimi ise % 8,5 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, modül sıcaklığının PV panellerin verimi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu ve ciddi ekserji kayıplarına neden olduğu vurgulanmıştır.

(Gedik, 2016), çalışmasında bir fotovoltaik (PV) modülün verimi, temel olarak ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı, güneş ışınım şiddeti ve kullanılan fotovoltaik malzemenin özelliklerine bağlı olduğunu belirtmiştir ve modül sıcaklığının PV panel verimi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney süresince, PV yüzeyine gelen güneş ışınım şiddeti (I), ortam sıcaklığı (Ta), panel arkası sıcaklığı (Tp), gerilim ve akım gibi temel parametreler ölçülmüştür. Deneyler, PV modülün bulunduğu ortamın sıcaklığı 10, 20, 30 ve 40 °C olarak ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen verilere dayanarak PV modülün verimi hesaplanmıştır. Sonuçlar, panel arkası sıcaklığı (Tp) 14,9 °C olduğunda modül veriminin % 12,07, Tp 51,3 °C olduğunda ise % 10,7 olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, PV modül sıcaklığının artışının verimde düşüşe neden olduğunu doğrulamaktadır.

Leow vd. (2016), güneş ışınımı ile PV modüllerinin performansının çalışma sıcaklığından etkilendiğini gözlemlemiş ve kristal silikon PV modülünün etkinliğinin hücre sıcaklığı ile ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. İncelenen panel, 120 cm × 54 cm × 3 cm boyutlarında mono kristal silikon malzemeden yapılmış 36 güneş hücresinden oluşmaktadır. Çalışmada, güneş paneli modeli farklı rüzgâr hızlarında Ansys yazılımında simüle edilmiş; Kangar, Perlis, Malezya'da 0 m/s, 0,43 m/s, 2,5 m/s ve 6,95 m/s rüzgâr hızları seçilmiştir. Simülasyon sonuçları, en iyi soğutma performansının en yüksek rüzgâr hızında elde edildiğini ve bu durumda güneş panelinin daha düşük sıcaklıkta en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Rüzgâr hızı arttıkça panel sıcaklığı düşmekte ve üretilen güç artmaktadır. 0 m/s rüzgâr hızına kıyasla, 0,43 m/s'de panel sıcaklığı % 3,72, 2,5 m/s'de % 17,45 ve 6,95 m/s'de % 33,65 daha düşük olmuştur; bu da 6,95 m/s rüzgâr hızında 15 °C'lik bir soğutma sağlamaktadır.

Homadi (2016), çalışmasında panelleri (altı panel-üç sıra ve iki sütun) gerçek durumu simüle etmek için bir yüzü giriş hızı diğeri sürtünmesiz duvar olarak kabul edilen bir hava tüneline yerleştirmiş ve rüzgâr yönüne bağlı olarak beş vaka yürütülmüştür. Aynı zamanda her bir arazinin arazi türüne göre dört alt vakada incelemiştir ve güneş panelleri üzerindeki rüzgâr yönünün etkisi hakkında bir HAD simülasyonu çalışmasını ortaya koymuştur. Hava hızı ile güneş panellerinin sıcaklığının düşürülmesinde taşınımla ısı transfer katsayısı doğrudan hıza bağlı olduğu için negatif ilişki olduğunu tespit etmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, rüzgâr hızı artışı ile PV verimliliğinin arttığını; maksimum artış verimliliğinin, rüzgâr kuzeyden estiğinde ve güneş panellerine arkadan çarptığında gerçekleştiğini; sonuçta dönen havanın daha büyük ısı transferi oluşturduğunu; rüzgâr 200 metre yükseklikte güneş panelleri ile kuzey yönünden geldiğinde verimliliğin yaklaşık % 20 arttığını bulmuştur.

Jubayer, Siddiqui ve Hangan (2016), k–x türbülans modeli ile Reynolds Transfer Teoremi (RANS) simülasyonu kullanarak zemine monte edilmiş bağımsız bir güneş panelinde rüzgâr kaynaklı taşınım ile ısı transferini incelemişlerdir. Farklı rüzgâr yönlerinde (0° ve 180°) ve değişik hızlarda (10 m yükseklikte 1,5 ve 10 m/s) güneş paneli yüzeylerindeki taşınım katsayıları analiz edilmiştir. Silikon hücreli PV panellerin elektriksel verimliliği, her bir derecelik sıcaklık artışında % 0,45 oranında azalmaktadır.

En düşük Re sayısının ($1*10^5$) en kritik durum olduğu ve bu koşullarda maksimum panel yüzey sıcaklığının elde edildiği belirtilmiştir. Termal sınır koşulları olarak 30 °C ortam sıcaklığı ve 70 °C panel sıcaklığı seçilmiştir.

Hasanuzzaman, Malek, Islam, Pandey ve Rahim (2016), araştırmalında PV sistemlerinin verimliliğini artırma ve ömrünü uzatma hedefiyle pasif soğutma sistemlerinin etkilerini incelemişlerdir. Pasif sistemlerin PV modül sıcaklığında 6–20 °C arasında bir azalma sağladığı ve elektrik verimliliğinde % 15,5'e kadar iyileşme sağladığı bulunmuştur. Aktif soğutma sistemleri ise PV modül sıcaklığında 30 °C'ye kadar bir azalma ve elektrik verimliliğinde % 22'ye kadar bir artış ile % 60 'a varan verimlilikle ek termal enerji çıkışı sağlamaktadır.

Gökmen vd. (2016), araştırması, proje planlamacılarına rüzgâr hızı soğutma etkisini dikkate alarak, özellikle rüzgârlı bölgelerde fotovoltaik (PV) santrallerinin potansiyelini daha doğru bir şekilde tahmin etme imkânı sunmayı hedeflemektedir. Çalışmada ilk olarak, optimum eğim açılarının değişimi incelenmiş, ardından rüzgâr hızının hesaba katıldığı ve alınmadığı senaryolar için yıllık enerji üretim karşılaştırmaları yapılmıştır. Planlama aşamasında yıllık enerji kazancını daha hassas bir şekilde tahmin etmek için geliştirilmiş bir matematiksel model sunulmuştur. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritması, çeşitli zaman dilimleri için en uygun eğim açılarını belirlemek üzere kullanılmıştır. Araştırmanın sonuçları, Danimarka'nın Aalborg şehrinde gerçekleştirilen bir vaka çalışması ile desteklenmiştir. Önerilen yöntem, dünya genelindeki diğer sistemlere de uygulanabilir niteliktedir.

Bu çalışma, rüzgâr hızının, bir PV sisteminin tasarım parametreleri ve performansı üzerindeki etkisini gözler önüne sermektedir. Tasarım parametreleri bağlamında, eğim açısı ve bir PV dizisinin güç çıkışı, Aalborg'daki koşullar ile incelenmiştir. Eğim açısı analizi, yaz mevsimindeki açılarının, kış mevsimine göre daha fazla değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Rüzgâr hızı göz önünde bulundurulmadığında, yıllık enerji üretiminde % 3,5'lik bir kayıptan bahsedilmektedir. Bu fark, geleneksel yöntemlerde rüzgârın soğutma etkisinin dikkate alınmaması sebebiyle PV modüllerinin sıcaklık tahmininin aşırı olmasıyla ilişkilidir. Rüzgârın varlığının her durumda göz önünde bulundurulması gerektiği önemle vurgulanmaktadır. En önemli sonuç, enerji üretimi değerlendirilirken rüzgâr hızının mutlaka dikkate alınması gerektiğidir.

Elibol, Özmen, Tutkun ve Köysal (2017), Düzce ilindeki araştırmalarında PV panel verimliliğini laboratuvarda standart test koşullarında (STC) (25 °C, 1000 W/m) test etmişlerdir. Çalışmada PV panellerin dış mekân performansları literatürle karşılaştırılmış, ayrıca monokristal (2,35 kW), polikristal (2,64 kW) ve amorf silikon (2,40 kW) fotovoltaik panellerin bir yıllık sonuçları analiz edilmiştir. Panellerin bir gün, bir ay ve bir yıl boyunca ürettiği enerji miktarlarının yanı sıra inverter verimlilik ve performans oranları hesaplanmıştır. Performans oranları a-Si, polikristal ve monokristal PV paneller için sırasıyla % 73, % 81 ve % 91 olarak bulunmuştur. Panel verimliliği ise aynı sırayla % 4,79, % 11,36 ve % 13,26 olarak hesaplanmıştır. Panel tiplerinin verimlilik ve performans oranları, çevre sıcaklığı, panel sıcaklığı ve radyasyon miktarı arasındaki ilişkiyi belirlemek için istatistiksel analiz yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, 1 °C'lik sıcaklık artışının a-Si panellerin verimini % 0,029 ve polikristal panellerin verimini % 0,033 artırdığı, buna karşın monokristal panellerin verimini % 0,084 oranında düşürdüğü görülmüştür.

(Vasel & Iakovidis, 2017), çalışmalarında güneş takip sistemleri kullanmayan fotovoltaik (PV) tesislerde panellerin maksimum verimlilik için her zaman güneye yönelmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Güneyden gelen rüzgâr, PV panellerinin yüzey sıcaklığını düşürürken, kuzeydeki rüzgârlar panellerin arkasında engel oluşturur ve bu nedenle yüzey sıcaklığını düşürmeye katkıda bulunmaz. Doğu-batı yönünde konumlandırılmış PV tesisleri, rüzgâr yönüne bağlı olarak dikeydeki panel sayısının azalması ve yataydaki panel sayısının artması sayesinde doğal soğutmadan daha fazla yararlanılmasına yardımcı olabilir. Örneğin, Hadley güneş PV santrali güney-kuzey yönünde inşa edilmiştir; bu nedenle, rüzgâr kuzey tarafındaki PV panel sıralarına ulaştıkça sıcaklığı artırır ve soğutma verimliliğini düşürür. Eğer bu santral doğu-batı yönünde konumlandırılmış olsaydı, daha verimli bir performans sergileyecektir.

(Syafiqah, Amin, Irwan, Majid, & Aziz, 2017), çalışmalarında soğutma sistemlerinin termal performansa etkisini ve üretilen enerji çıkışına katkısını incelemişlerdir. Çalışmada, hava soğutmalı PV paneller ile su soğutmalı PV paneller arasındaki sıcaklık kriterleri ve çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Ölçümler, saat 13:30'da güneş ışınımı 1175 W/m² ve en yüksek ortam sıcaklığı 36,5 °C olduğunda gerçekleştirilmiştir. Hava soğutmalı PV panelin en yüksek sıcaklığı 53,6 °C, su soğutmalı panelin en yüksek

sıcaklığı ise 31,3 °C olarak belirlenmiştir. Soğutmasız PV panelin en yüksek sıcaklığı 66,3 °C'ye ulaşırken, soğutma sistemine sahip PV panel ile soğutmasız panel arasında yaklaşık 12,7 °C sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Su soğutma sistemine sahip panel, soğutma sistemi bulunmayan panele göre neredeyse 35 °C sıcaklık farkıyla en büyük düşüşü göstermektedir.

PV panelinin sıcaklığı arttığında, akımda yalnızca marjinal değişiklikler gözlemlenirken gerilimde belirgin değişiklikler meydana gelir. Soğutma sistemi bulunmayan PV panel, en yüksek sıcaklığa ulaştığında gerilim değeri sadece 19 V olarak ölçülmüştür. Ancak, sisteme su soğutma sistemi eklendiğinde, gerilim 21,5 V'a kadar yükselmektedir. Su soğutma sistemi, hava soğutma sistemine kıyasla PV panelin en yüksek çıkış gücünü 78,5 W olarak üretmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, suyun havaya göre daha yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Su soğutma sistemine sahip PV panelin, diğer sistemlere göre en yüksek verime sahip olduğu tespit edilmiştir. Saat 13:30'da 1175 W/m² güneş ışıması ve 36,5 °C ortam sıcaklığı altında, su soğutma sistemli PV panelin verimi % 3,11 oranında artış göstermektedir. Ayrıca, en yüksek ortam sıcaklığı 21 °C ve güneş ışıması 979 W/m² koşullarında, PV panelin arka yüzeyine bir ısı eşanjörü eklenmesiyle enerji verimliliğinin % 9 arttığı belirlenmiştir.

(Abd-Elhady, Serag, & Kandil, 2018), araştırmalarında aşırı güneş ışınımı ve yüksek çevre sıcaklıkları, özellikle Orta Doğu ve Kuzey Afrika (MENA) bölgesinde silikon PV panellerinin aşırı ısınması konusunda önemli bir sorun teşkil ettiğini belirtmişlerdir. Bu tür bölgelerde PV panellerinin sıcaklığı kolaylıkla 75 °C'ye kadar çıkabilmekte, bu da verimlilikte yaklaşık % 25'lik bir düşüşe yol açmaktadır. Araştırmada, PV panellerinin aşırı ısınmasını en aza indirmek amacıyla yenilikçi bir çözüm önerilmektedir ve bu çözüm, doğal konveksiyona dayanmaktadır.

PV panelinin altındaki sıcak sınır tabakasının yükselmesine yardımcı olmak için panelde delikler açılmakta, bu da panelin soğumasını sağlamaktadır. Bu fikri kanıtlamak için deneyler gerçekleştirilmiş ve delik boyutunun ve delik sayısının etkisini daha fazla araştırmak amacıyla Ansys Fluent programında sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, delikli PV panellerin sıcaklığının, deliksiz panellerin

sıcaklığından daha düşük olduğunu ve delik sayısı arttıkça sıcaklık farkının da arttığını göstermiştir. Ancak, delik boyutu için belirli bir kritik çap bulunmaktadır; bu çaptan önce ve sonra PV panelinin sıcaklığının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu araştırmalardan, PV paneline delikler eklemenin, panelin aşırı ısınmasını en aza indirebilecek etkili bir pasif soğutma tekniği olduğu sonucuna varılabilir.

Chowdhury vd. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada, PV modülünün zorlanmış taşınıma karşı duyarlılığını incelemişlerdir. Araştırmanın ilk bulguları, dinamik rüzgâr etkilerinin göz ardı edildiği durumlarda, deneysel veriler ile simüle edilen PV modülünün enerji verimliliği ve hücre sıcaklığı arasında önemli bir fark olduğunu göstermektedir. İkinci aşamada, PV modülünün hücre sıcaklığı ve güç çıkışının zorlanmış taşınım koşullarındaki değişimi ortaya konmuştur. EOT modeli, iki farklı senaryo için uyarlanmıştır. İlk senaryoda, simülasyon rüzgâr hızı ve yönüne bağlı olarak ısı transfer katsayısını içermektedir. İkinci senaryoda ise, sabit bir ısı transfer değeri (10 W/m^2K) varsayımı altında, rüzgârın etkisi göz önüne alınmamıştır. Araştırmada, ölçülen PV modülünün arka sac sıcaklığı ve enerji verimi, simüle edilen güneş pili sıcaklığı ve enerji verimi ile karşılaştırılmıştır. Yüksek rüzgâr hızı bölgelerinde, güç çıkışı değişen ısı transfer katsayısına karşı daha az duyarlı iken, düşük rüzgâr hızı bölgelerinde hücre sıcaklığı bu katsayıdaki değişikliklere karşı oldukça hassas kalmaktadır. Ayrıca, ısı transfer katsayısındaki küçük bir hata, PV modülünün güç çıkışı tahmininde büyük farklılıklara yol açabileceği tespit edilmiştir.

(Dabaghzadeh & Eslami, 2019), çalışmalarında PV modülünden akış ve ısı transferinin üç boyutlu HAD simülasyonunu geliştirilmiştir. Araştırmada sonlu elemanlar yöntemi ile momentum ve enerji denklemlerini sayısal olarak çözerek modüldeki sıcaklık dağılımını hesaplamaya çalışarak sistemin etrafındaki üç boyutlu rüzgâr akış alanı, modül yüzeylerinden gerçekçi ve tek düze olmayan taşınımla ısı transferini hesaba katmak için farklı geometrik ve ortam koşullarında simüle edilmiştir. Ayrıca elektrik çıkış gücü PV modül sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplanmış ve enerji denkleminde negatif kaynak terimi olarak modellenmiştir. Sonuçlar, mevcut yöntemin çeşitli geometrik ve çevresel koşullarda PV modüllerin sıcaklık dağılımını ve çıkış gücünü tahmin etmede çok başarılı olduğunu göstermektedir. Ve;

- 1 m/s' den daha yüksek rüzgâr hızlarında eğim açısının artırılmasıyla, ortalama PV sıcaklığı yaklaşık 4 K artar; sonuç olarak etkinliği azalır.
- Ortalama PV modül sıcaklığında 3 K soğutma elde edilebildiği için en uygun rüzgâr yönü 90°'dir.
- Montaj yönünün doğru seçimi de önemlidir ve rüzgârın yönüne bağlıdır.
- Çoğu durumda, yatay montaj (yani, panelin uzun tarafı yere paralel) daha iyi soğutma ile sonuçlanır.
- PV eğim açısı, taşınım ile soğutma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu açı genellikle neredeyse yerel enlem ile aynıdır bir yıl boyunca maksimum güneş radyasyonuna dayalı olarak seçilir.

Sabit eğim açısına sahip bir PV modül dikey (genişlik boyunca) veya yatay olarak (uzunluk boyunca) monte edilebilir. Bu seçim güneş radyasyonu etkilemez ve yer kısıtlamalarına göre tercih yapılabilir. Ancak montaj yönü sistemin pasif olarak soğutulmasında önemlidir. Bu soğutma etkisi de rüzgâr yönüne bağlıdır. Bu nedenle, bu iki parametre aynı anda ele alınır. ($\beta = 45^0$, $S = 840{,}7$ W/m^2)

- Eğim açısı artırılarak, modülün arka tarafındaki ayrılmış akış bölgesinde daha büyük girdaplar oluşur ve bu da biraz daha yüksek sıcaklıklara neden olur. Örneğin, 3 m/s'lik bir rüzgâr hızında, eğim açısı 0 °'den 90 °'ye değiştiğinde ortalama PV sıcaklığında 4 K'lik bir değişim gözlenir.

- Rüzgâr yönü de bir fotovoltaik modülün soğutulmasında eğim açısı kadar önemlidir. En uygun rüzgâr yönü $\varphi = 90°$'ye karşılık gelir ve fotovoltaik sistemlerin yıllık performansını artırmada çok etkilidir.

(Amr, Hassan, Abdel-Salam, & El-Sayed, 2019), kurdukları deney düzeneği, Mısır'ın El-Minia Şehri'ndeki Mühendislik Fakültesi binalarından birinin çatısına monte edilen altı adet 250 W'lık fotovoltaik (PV) modülden oluşmaktadır. Bu çalışmada, bir PV modülünün arka yüzeyine takılan kanatçıklar aracılığıyla pasif soğutma yöntemleri incelenmiştir. Hava soğutması bulunmayan bir PV modülü, ısıyı dağıtmaya yardımcı olan kanatçıklarla soğutulan modüllerle karşılaştırma yapılması için temel model olarak kullanılmıştır. Kanatlı modüller hem durgun hava hem de havalandırılmış hava koşullarında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kanatçıkların soğutma etkisiyle

modül sıcaklığında düşüş sağlandığını ve bunun da elektriksel verimliliği artırdığını göstermektedir. Elektriksel verimlilik, kanat yüksekliği ve sayısı arttıkça daha da yükselmektedir. Kanatlı ve kanatsız modüllerin hücre sıcaklığı, açık devre voltajı ve kısa devre akımı gibi hesaplanan değerler, gün boyunca yapılan deneysel ölçümlerle büyük oranda örtüşmüştür. Güneş ışınımı etkisiyle modüllerin çıkış gücü, gün doğumundan öğleye kadar yükselmekte, ardından gün batımına kadar azalmaktadır. Buna karşılık, elektriksel verimlilik sabah saatlerinde azalıp günün ilerleyen saatlerinde tekrar artış göstermekte ve bu durum literatürdeki önceki çalışmalarla tutarlılık göstermektedir. Ayrıca, ortam sıcaklığı arttıkça, kanatlı ve kanatsız modüllerin hücre sıcaklığında doğrusal bir artış görülmektedir. Kanatçıklar, hücre sıcaklığını yaklaşık 4-5 °C kadar azaltarak modül performansını iyileştirmektedir.

(Waterworth & Armstrong, 2020), çalışmalarında, rüzgâr, bulutluluk, ortam sıcaklığı ve bağıl nemin etkilerini belirlemek amacıyla Oxfordshire'deki Westmill Solar Park'tan elde edilen meteorolojik veriler ile PV panel üretim verilerini incelemişlerdir. Güneş radyasyonunun ardından, bağıl nem ve bulut örtüsünün PV elektrik çıkışını en çok etkileyen faktörler olduğunu bulmuşlardır. Bağıl nem ve bulut örtüsündeki artışların, elektrik çıkışlarındaki düşüşle ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, diğer tüm değişkenler sabit tutulduğunda, güney rüzgarları altında üretilen ortalama elektrik, kuzey rüzgarlarına göre % 20,4 ile % 42,9 arasında daha fazla olmaktadır; bu fark, yüksek elektrik çıkışlarında daha belirgin hale gelmektedir. Bu sonuç, PV elektrik çıkışı tahminlerinin rüzgâr yönü bilgisinin simülasyonlara eklenmesiyle geliştirilebileceğini göstermektedir. Rüzgârın verimlilik kaybında önemli bir etken olduğu durumlarda, güneş parkı tasarımı ve PV panel dağılımında değişiklik yapma potansiyeli bulunmaktadır. PV panel dağılımının çevresel koşullara göre optimize edilmesi, elektrik çıktılarını artırarak karlılığı yükseltebilir ve sübvansiyon sonrası pazarlarda sistemin uygulanabilirliğini etkileyebilir.

(Dwivedi, Sudhakar, Soni, Solomin, & Kirpichnikova, 2020), çalışmalarının amacı, fotovoltaik (PV) sistemlerde kullanılan soğutma yöntemlerini inceleyerek, bu tekniklerin tasarımı, uygulanabilirliği ve gelecekteki geliştirilmesi için uygun stratejiler belirlemektir. Aşağıda, farklı PV soğutma sistemlerinin analizi sonucunda elde edilen temel bulgular sıralanmıştır:

- Aktif su soğutma, en kolay ve en etkili soğutma yöntemi olarak öne çıkmıştır; bu tekniğin takip edilmesi önerilmektedir. Ancak, aktif su soğutması her zaman pratik bir çözüm olmayabilir. Etkin bir aktif su soğutma sistemi için ortamda sürekli bir soğuk su kaynağı bulunmalı ve soğutulacak PV dizisi büyük olmalıdır ki enerji tüketimi dengelenebilsin.

- PV sistemlerinin doğal konveksiyon yoluyla pasif soğutulmasının en basit yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu yöntem sınırlı kapasiteye sahiptir ve hava, su kadar etkili bir soğutma malzemesi değildir.

- Su bazlı soğutma sistemleri, sıcak su ve enerji ihtiyacının birleştiği uygulamalarda, özellikle restoranlar, oteller ve endüstriyel proseslerde daha ideal kabul edilmektedir. Ayrıca, bu sistemler PV modüllerinin toz birikimini önleyerek temizlik sağlar ve tarımsal alanlarda sulama amaçlı su geri kazanımına katkıda bulunabilir.

- Faz değiştiren malzemelerle (PCM) yapılan soğutma, birim hacim başına yüksek enerji yoğunluğu sağladığı için en güçlü tekniklerden biri olarak değerlendirilmektedir.

- Hem hava hem de suyla soğutma yöntemleri, ek ısı enerjisi sağladıkları için geniş kullanım potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, bu soğutma sistemlerinin uygulanabilirlik açısından performans verimliliği değerlendirilmelidir.

- Gelecekte teknoloji geliştirme yönü, yüzey sıcaklığını düşük ve sabit tutma amacına yönelik hibrit soğutma yöntemlerinin ilerletilmesine odaklanmalıdır. Araştırmalar, aktif su soğutması ve ısı borusu ile lavabolu soğutmanın birleştirildiği sistemlerin geliştirilmesine yönelik olmalıdır.

(Jaszczur, Teneta, Hassan, Majewska, & Hanus, 2021), araştırmalarında, yerinde yapılan deneysel ölçümler ve bilgisayar simülasyonları kullanarak fotovoltaik modüllerin kapsamlı bir analizini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, modül sıcaklığını belirlemek için üç boyutlu sayısal simülasyonla bir fotovoltaik modülden sıvı akışı ve ısı transferi modellenmiştir. Değişken eğimli fotovoltaik modüller, çeşitli çevresel ve çalışma koşullarına maruz bırakılmıştır. Analiz sonuçları, modül sıcaklığının yalnızca

ortam sıcaklığına ve güneş radyasyonuna bağlı olmadığını, aynı zamanda rüzgâr hızına ve yönüne de etki ettiğini göstermektedir. Literatürdeki çoğu modelin dikkate almadığı montaj koşullarının önemli bir rol oynadığı ve bu durumun modül sıcaklığında yaklaşık 10-15 °C'lik ek bir artışa yol açarak modül verimliliğini % 4-6,5 oranında azaltabileceği belirlenmiştir.

Naghavi vd. (2021), çalışmalarında, PV panelleri ile çatı arasındaki boşluğun, serbest doğal konveksiyon yoluyla panellerden ısıyı uzaklaştırma etkinliği üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Hem deneysel hem de sayısal araştırmalar, dikey olarak monte edilen beş PV panelinin altındaki doğal hava akışının etkisini incelemek için yapılmıştır. Çalışmada, hava giriş/çıkış sıcaklığı ve PV panel yüzey sıcaklığı ölçümleri esas alınarak analizler sınırlandırılmıştır. Paneller ile çatı arasındaki mesafe ve güneş radyasyonu yoğunluğu, değerlendirilen iki ana parametre olmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçlar, hava boşluğu olmayan PV dizisinin ortalama sıcaklığının, 200 mm'den büyük bir hava boşluğuna sahip dizilere göre yaklaşık 12 ± 5 °C daha yüksek olduğunu göstermektedir. Güneş radyasyonunun yaklaşık 1000 W/m² olduğu durumlarda, hava boşluğu 250 mm'ye çıktığında sıcaklık farkı yaklaşık 18 ± 5 °C'ye kadar artmaktadır. Standart Test Koşulları (STC) altında PV panel verimliliği % 18,04 iken, hava boşluğu 0 mm olduğunda verim % 14,17'ye düşer. Boşluk 200 mm ve 250 mm olduğunda verimlilik sırasıyla % 15,01 ve % 15,44'e yükselmektedir. CFD simülasyonu, panellerin yüzey sıcaklıklarının neredeyse eşit olduğunu göstermekte ve deneysel sonuçlarla uyumlu ilerlemektedir.

(Ahmed, Karal, Das, & Das, 2023), çalışmalarında Bangladeş'in Rajshahi kentindeki 50 W'lık bir PV modülünde, ışınım, hücre sıcaklığı, rüzgâr hızı, su soğutma ve toz birikiminin etkilerini incelemişlerdir. Deneysel bulgular, PV panelinin üst yüzeyini soğutmak için ideal rüzgâr hızının yaklaşık 5 m/s ve su akış hızının 0,0045 m³/dk olduğunu göstermektedir. Uygulanan soğutma sistemi, PV panellerin çıkış gücünü % 20,47, enerji verimliliğini % 12 ve ekserji verimliliğini ise % 37,5 oranında artırmıştır. Toz birikimi incelendiğinde, 0,29 mm boyutunda 42 gram toz uygulandığında güç çıkışı 46,81 W'tan (tozsuz durumda) 21 W'a düşmüştür. Ayrıca, 5 m/s rüzgâr hızı, sistem verimliliğini % 14,8'den % 16,5'e yükseltmiştir.

Kazem vd. (2023), çalışmalarında, fotovoltaik (PV) teknolojisi için hem aktif hem de pasif termal yönetim çözümleri gözden geçirilmiş ve tartışılmıştır. PV sistemlerinin arkasında kanatçıkların kullanımı, tasarım ve performans parametreleri açısından çalışmanın ana odak noktasıdır. Bu kanatçıların bu sistemlere entegre edilmesi, performansı artırarak elektriksel ve termal verimliliği % 8 ile % 10 arasında bir oranla yükseltmektedir.

(Mehdi, Ammari, Alami Merrouni, Benazzouz, & Dahmani, 2023), çalışmalarında, sıcak ve kurak iklim koşullarında rüzgârın fotovoltaik (PV) modüllerinin soğutulması üzerindeki etkisi incelenmiş ve deneysel olarak ölçülmüştür. Bu amaçla, Fas'ın Orta-Güney Benguerir bölgesinde, 300 W'lık bir PV modülü altı ay boyunca (yılın sıcak döneminde) açık havada test edilmiştir. PV modülünün elektriksel parametreleri, meteorolojik verilerle birlikte yüksek hassasiyetli sensörler kullanılarak kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular, çöl iklimi gibi aşırı sıcak koşullarda bile rüzgârın PV modüllerinin sıcaklığını düşürdüğünü, elektrik üretimini artırdığını ve dönüştürme verimliliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Örneğin, rüzgâr hızındaki 5,8 m/s'lik bir artış, PV modülünün sıcaklığında 12 °C'lik bir düşüşe neden olmuş, bu da güç üretiminde % 7,2 ve dönüştürme verimliliğinde % 6,5 oranında artış sağlamıştır. Ayrıca, rüzgâr yönünün de önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir; PV modülünün ön yüzüne doğrudan esen rüzgarlar (Güney rüzgarları), arka yüzeye esen rüzgarlara (Kuzey rüzgarları) kıyasla daha etkili bir soğutma sağlamış ve bu da modül sıcaklığında 13 °C'lik bir azalma yaratmıştır.

Alantali, Rafiq, Alzarouni, Qureshi ve Rodriguez-Ubinas (2023), çalışmalarında rüzgâr hızının ve yönünün güneye bakan fotovoltaik (PV) modüllerin verimliliği üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırma kapsamında, Dubai Elektrik ve Su İdaresi'nin Ar-Ge Merkezi'nde bulunan açık hava test tesisinden bir yıl boyunca toplanan veriler analiz edilmiştir. Yaz ve kış aylarında elde edilen örnek veriler, görsel inceleme ve geçici analizlerle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, güney yönünden gelen ve 6 ila 13 m/s arasında değişen yüksek rüzgâr hızlarının, modül sıcaklığını 8 °C'den fazla azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yapılan geçici model analizi, rüzgâr hızının ve modül sıcaklığının ters orantılı ancak doğrusal olmayan bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur.

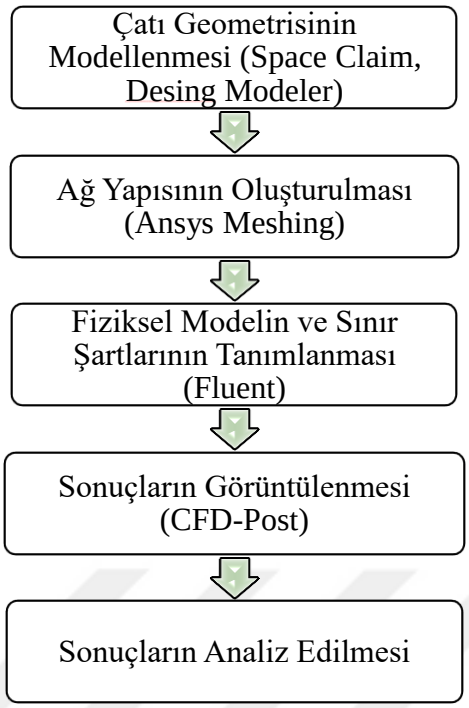
Chan-Dzib, Bassam ve Carrillo (2024), çalışmalarında, yeni bir kıvrımlı alüminyum kanat profiline sahip pasif bir soğutma sistemi önermektedir. Yeni tasarımın geometrik parametrelerindeki değişiklikler, fotovoltaik panellerin termal performansı üzerinde incelenmiş ve en uygun kıvrımlı kanat tasarımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları ile belirlenmiştir. Termal tepkileri analiz etmek için dikdörtgen kanat tasarımı ile kıyaslamalar yapılmış ve soğutma sistemi olmayan bir PV paneli referans alınarak deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sistemin geri ödeme süresini hesaplamak amacıyla enerji maliyeti ve fazla üretim oranları üzerinden bir ekonomik analiz yapılmıştır. Sonuçlar, önerilen sistemin PV panel sıcaklığını 8°C düşürdüğünü, kanatçık bulunmayan bir sistemin ise panel sıcaklığını ortam sıcaklığının 16°C üzerine çıkardığını göstermektedir. Bununla birlikte, kıvrımlı kanatçıkların kullanımıyla enerji üretiminde % 4'lük bir artış sağlanmış ve geri ödeme süresi, ülkedeki elektrik maliyetlerine bağlı olarak 1,1 ile 6,4 yıl arasında değişmiştir.

Nahani, Eslami ve Hamzehzarghani (2024), çalışmalarında, rüzgârın fotovoltaik (PV) dizilerinin güç üretimi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, 5'e 10 boyutlarında iki PV dizi için kapsamlı bir üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonu gerçekleştirmiştir. İncelenen diziler, sıralar arasında modül aralığı olan ve olmayan konfigürasyonlara sahiptir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin aynı anda çözülmesi yoluyla PV modülleri ve çevresindeki hava sıcaklık dağılımı ve hız profilleri elde edilmiştir. İki farklı rüzgâr yönü (kuzey ve güney) ve iki farklı rüzgâr hızı (2 m/s ve 5 m/s) koşullarında analizler yapılmıştır. Sonuç olarak, bu farklı koşullar altında PV modüllerinin elektrik çıkışları karşılaştırılmıştır. Bulgular, sıralar arası modül aralığı bulunmayan PV dizisinin, kuzey rüzgârı koşullarında daha iyi performans sergileyerek, rüzgâr hızındaki artışla güç çıkışında % 5,3'lük bir artış sağladığını göstermektedir. Buna karşın, 3 cm aralıklı PV dizisi, güney rüzgârı altında daha iyi performans göstermiş ve artan rüzgâr hızında güç çıkışında % 4,6 oranında bir artış kaydedilmiştir. Genel olarak, sıralar arası aralığa sahip PV dizisinin, modül aralığı bulunmayan diziden daha yüksek performans gösterdiği belirlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

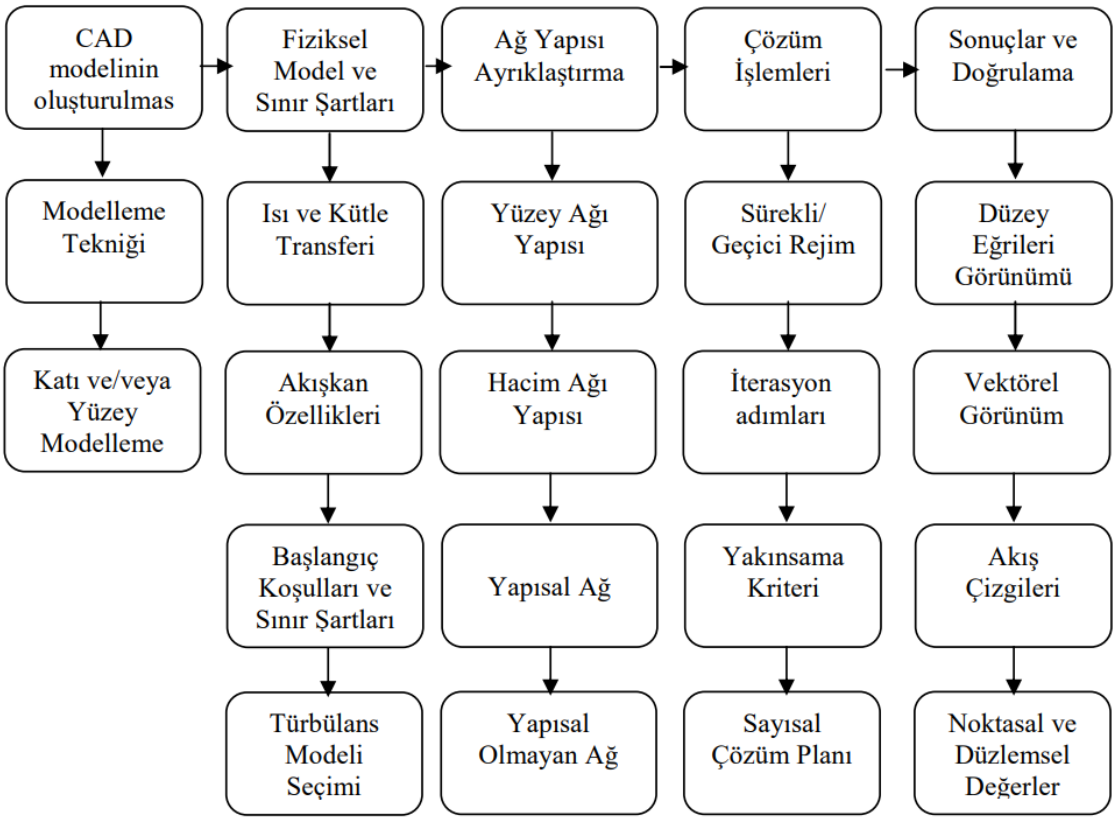
Akışkanlar dinamiği, akışkanın hareketini incelemektedir. Akışın bu hareketi deneysel, teorik ve sayısal olmak üzere üç farklı yolla incelenebilmektedir. Deney yapmanın maliyetinin ve zaman gereksinimleri fazla olması bizleri daha hızlı ve maliyet etkin çözümlere yönlendirmektedir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü hesaplamalı bir yaklaşımı teşvik etmektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanın akışını (laminer veya türbülans), kimyasal reaksiyonları, ısı ve kütle transferini sayısal bir süreç kullanarak ve aynı zamanda bu süreçleri matematiksel denklemlerle çözerek yöneten tahmin etme bilimidir.

Yaptığımız bu çalışmada, HAD yöntemi ile PV panel soğutmasının artırılması ile verim artışı amaçlanmaktadır. Bunun için aktif rüzgârın simülasyonlara dahil edilmesi gerekmektedir. Rüzgâr hem yönü hem de şiddeti olan bir vektörel büyüklük olduğundan dolayı HAD yöntemi bize ciddi bir kolaylık sağlamaktadır. Farklı yönlerden gelen, hızı ve sıcaklığı sürekli olarak değişen rüzgâr çözümlenmesi zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Hesaplamalarda, panel sıcaklık dağılımlarının üç boyutlu sayısal analizi, HAD yöntemi tabanlı Ansys Fluent paket yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD yöntemi ile PV panel üzerindeki hız ve sıcaklık dağılımlarının hesaplanmasına ilişkin genel akış diyagramı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. HAD yöntemine ilişkin genel akış diyagramı

Hız ve sıcaklık dağılımının sayısal yöntemlerle hesaplanması sürecinde izlenen HAD yöntemine ait detaylı işlem adımları Şekil 3.2 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. HAD yöntemine ait detaylı işlem adımları (Sevilgen, 2010)

HAD yönteminin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibidir:

Avantajları:

1. **Detaylı Analiz İmkânı:** HAD, karmaşık akışkan problemlerini çözmek ve analiz etmek için çok detaylı sonuçlar sunar. Gerçek deneylerle elde edilemeyen veriler elde edilebilir.

2. **Zamandan ve Maliyetten Tasarruf:** Fiziksel deneyler yapmak yerine simülasyonlar kullanarak maliyetleri düşürür ve zaman tasarrufu sağlar. Tasarım sürecinde daha hızlı iyileştirmeler yapılmasına olanak tanır.

3. **Farklı Senaryoların Test Edilmesi:** HAD ile farklı koşullar ve senaryolar simüle edilebilir. Gerçek dünyada test edilmesi zor ya da imkânsız olan durumlar dijital ortamda kolayca incelenebilir.

4. **Tehlikeli Durumların Simülasyonu:** Patlama, yanma veya toksik gazların yayılması gibi tehlikeli durumlar simüle edilerek güvenli çalışma koşulları sağlanabilir.

5. **Optimize Tasarım:** Ürünlerin veya sistemlerin tasarımını optimize ederek, daha verimli ve performansı yüksek çözümler geliştirilmesine yardımcı olur.

Dezavantajları:

1. **Yüksek Hesaplama Gücü Gereksinimi:** Karmaşık sistemlerin simülasyonları çok fazla hesaplama gücü ve zaman gerektirebilir. Yüksek çözünürlüklü ve detaylı analizler için güçlü bilgisayarlara ihtiyaç vardır.

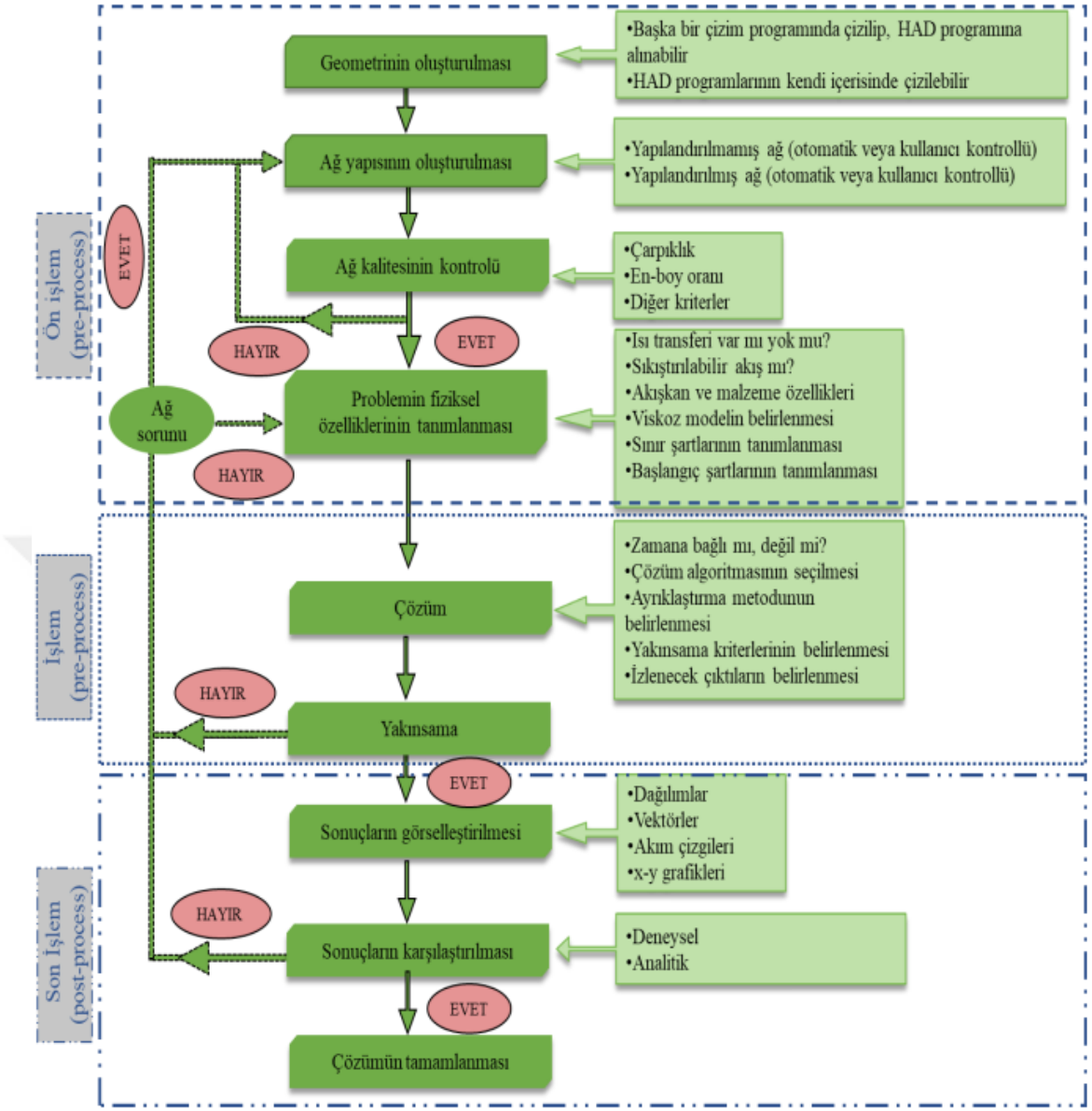
2. **Modelleme Hataları:** Simülasyonların doğruluğu kullanılan modelleme tekniklerine bağlıdır. Yanlış veya eksik bir modelleme, gerçek sonuçlardan sapmalara neden olabilir.

3. **Doğru Sonuçlar İçin Uzmanlık Gerektirir:** HAD kullanımı ve analizleri uzmanlık gerektirir. Deneyimsiz kullanıcılar, yanlış parametreler kullanarak yanıltıcı sonuçlar elde edebilirler.

4. **Veri Hazırlama Süreci Uzun Olabilir:** Simülasyonların yapılabilmesi için modelleme, sınır koşulları ve parametrelerin dikkatli bir şekilde hazırlanması gerekir, bu da zaman alıcı olabilir.

5. **Yaklaşımlar ve Basitleştirmeler:** Fiziksel gerçeklik, HAD simülasyonlarında bazı basitleştirilmiş yaklaşımlarla temsil edilir. Bu basitleştirmeler, bazı durumlarda sonuçların tam doğruluğunu etkileyebilir.

HAD, mühendislik ve bilimsel araştırmalarda oldukça güçlü bir araç olmasına rağmen, doğru kullanıldığında gerçekçi ve güvenilir sonuçlar verir. Tokgöz ve Süfer (2023), çalışmasında HAD sürecini Şekil 3.3'teki gibi özetlemektedir.

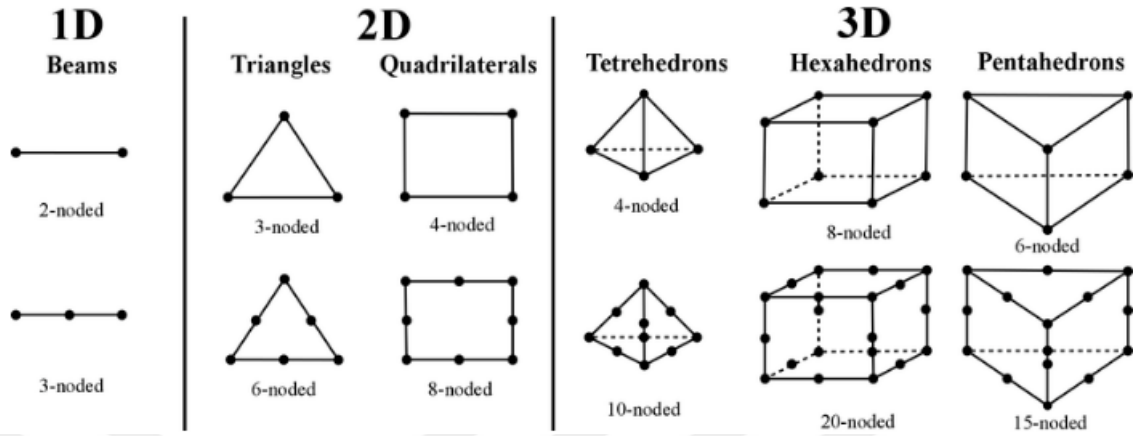


Şekil 3.3. HAD ile modelleme prosesi (Tokgöz & Süfer, 2023)

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile bir parça modellenirken, model, küçük parçalardan oluşan temel elemanlara bölünür. Bu işlem, ağ (mesh) oluşturma olarak adlandırılır. Her bir elemanın köşelerinde düğüm noktaları (node) bulunur ve hesaplamalar bu düğüm noktaları üzerinden gerçekleştirilir. Bu nedenle, fiziksel ortam önce elemanlara (element) ayrılır ve elemanların köşe noktaları, fiziksel ortamı temsil eden uzay noktaları haline gelir. Elde edilen sonuçlar, bu noktalar üzerindeki değerlerdir.

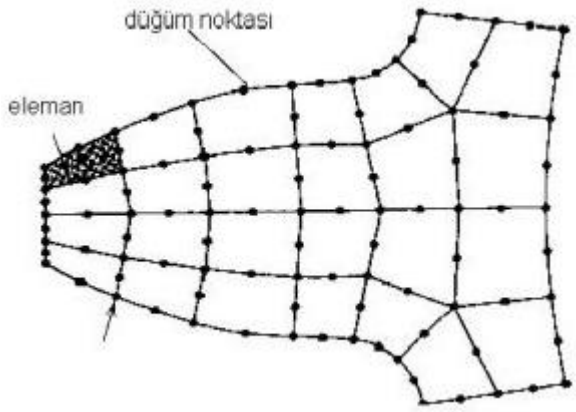
Modelleme yapılan parçanın şekline ve türüne bağlı olarak, eleman tipleri de farklılık gösterebilir. Sonlu eleman modeli, tek boyutlu (çizgisel modelleme), iki boyutlu

(düzlemsel modelleme) veya üç boyutlu (katı modelleme) olarak oluşturulabilir. Modelleme türüne göre uygun eleman tipi (bkz. Şekil 3.4) belirlenir ve atanır.



Şekil 3.4. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan temel elemanlar

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle geometrik modelin hazırlanması gerekmektedir. Daha sonra, mesh işlemi uygulanarak elemanlar (element) ve düğüm noktaları (node) oluşturulur. İki boyutta gösterilen elemanlar ve düğüm noktaları Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. İki boyutlu örnek mesh yapısı

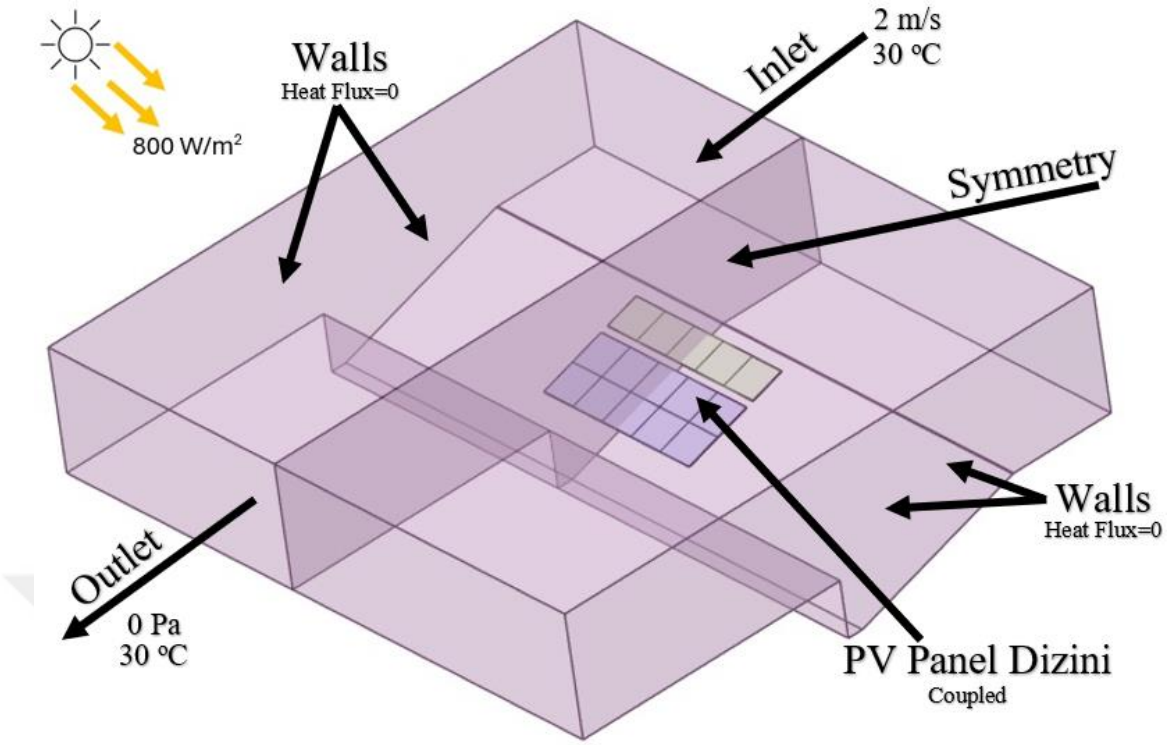
Günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi, endüstriyel ve endüstriyel olmayan uygulama alanlarında sıkça karşımıza çıkmaktadır. HAD kullanılan bazı alanlar şu şekildedir:

- İç ve dış akış analizleri
- Isıl analizler

- Çık fazlı akışlar
- Akışkan-yapı etkileşimi
- Kimyasal reaksiyonlar ve yanma
- Optimizasyon
- Aerodinamik
- İndirgenmiş model
- Turbomakine analizleri
- Türbülans modelleme
- Sağlık (solunum yolu vb.) analizleri
- Güneş enerjisi analizleri

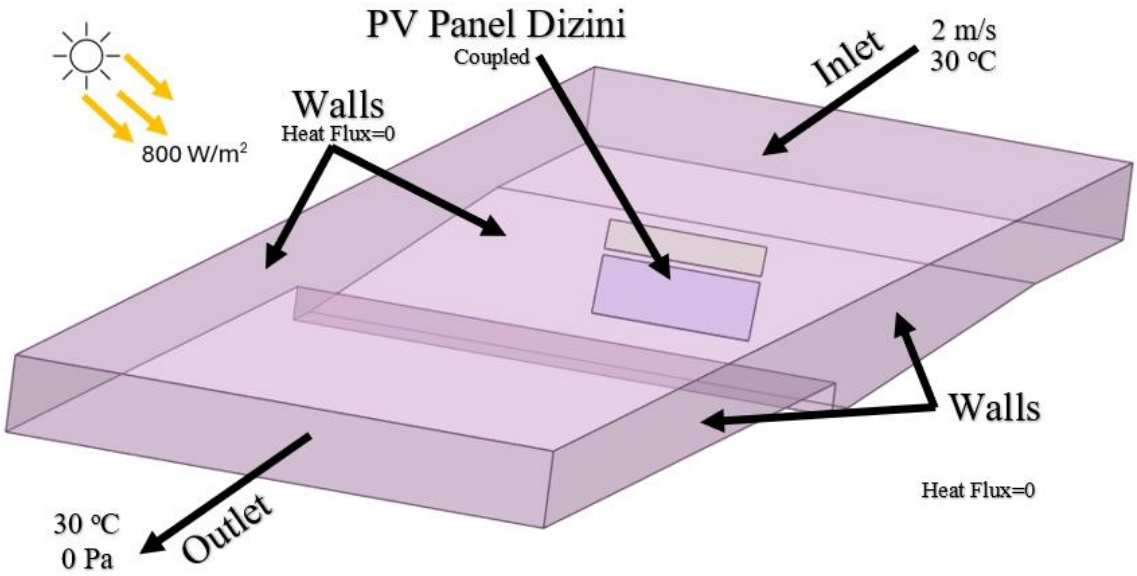
3.1. CAD Modelinin Oluşturulması

Ölçüm yapılan TOFAŞ çatı santralinin rüzgâr arkadan estiği durumdaki üç boyutlu modeli Şekil 3.6. gösterilmiştir. Verilen model orta eksenden simetrik alınarak çözüm hızlandırılmaya çalışılmıştır. Çünkü bu modelde panel arkasında çok fazla türbülans girdapları oluştuğundan dolayı mesh sayısının arttırılması gerekmiştir. Bu türbülans akımları çözümün yakınsamasını zorlaştırmaktadır.



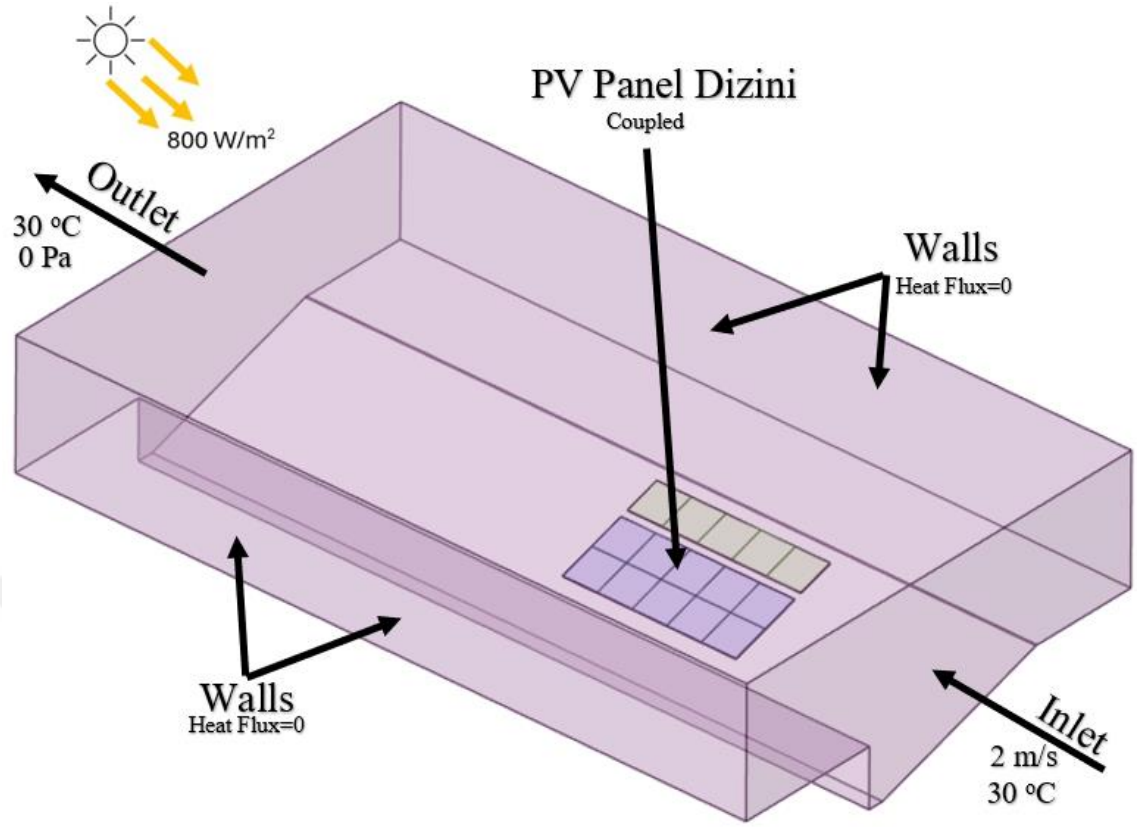
Şekil 3.6. Arka rüzgâr durumuna ait CAD modeli ve sınır şartları

Şekil 3.7.'de TOFAŞ çatı santralinin rüzgâr arkadan 45^0 estiği durumundaki üç boyutlu modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Rüzgâr arkadan 45^0 estiği duruma ait CAD modeli ve sınır şartları

Şekil 3.8.'de TOFAŞ çatı santralinin yan rüzgâr durumundaki üç boyutlu modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yan rüzgâr durumuna ait CAD modeli ve sınır şartları

3.2. Çözücü Ayarları

Simülasyonlar için CAD modelleri oluşturulduktan sonra çözüm işlemine geçilmiştir. Space Claim ve Desing Modeler programları kullanılarak oluşturulan CAD modeline ANSYS Meshing programında tetrahedral (4 yüzlü) ve hexahedral (6 yüzlü) ağ yapısı oluşturulmuş ve çözüm için ANSYS Fluent programı kullanılmıştır. Kullanılan çözücü ayarları Çizelge 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Çözücü ayarları ve kullanılan modeller

Çözüm Ayarları	
Çözücü ayarları	3D – Paralel (48 çekirdek)
Zaman	Sürekli rejim
Çözücü	Basınca bağlı (Pressure based / Coupled)
Hız Formülasyonu	Mutlak (Absolute)
Gradyan seçeneği	Hücre tabanlı (least squares cell based)
Formülasyon	2. Dereceden (second order upwind)
Denklemler	Akış (türbülans), enerji ve ışınım
Türbülans Modeli	k-ω/SST
Işınım Modeli	Kullanılmadı
Güneş yükü (Solar Load)	Güneş ışınımı izleme

Sayısal hesaplamalarda, deneysel verilerle karşılaştırılan sonuçların doğruluğu ve hassasiyeti üzerinde etkili olan iki ana faktör vardır: ağ yapısının hassasiyeti ve sınır koşulları. Çözüm süresince farklı sınır şartları kullanmak gerekmiştir. Güneş'ten gelen sabit ısı akısı, PV panel yüzeylerinde taşınım sınır şartı, akış alanın sınırlarında simetri ve duvar sınır şartı kullanılmıştır. Ağ yapısı olarak hava akış hacminde tetrahedral (4 yüzlü) ağ yapısı kullanılmışken, PV elemanlarda hexahedral (6 yüzlü) ağ tercih edilmiş ve PV yüzeyi ile çatı yüzeyine inflation uygulanmıştır. Kullanılan sınır şartlarının ve ağ yapısının özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Ağ yapısı ve sınır şartları

Ağ Yapısı	
Ağ yapısı	Tetrahedral, Hexahedral
Hacim elemanı sayısı	
Arka rüzgâr	10.807.901
45^0 arka rüzgâr	13.233.502
Yan rüzgâr	12.016.423
Düğüm noktası sayısı	
Arka rüzgâr	3.854.356
45^0 arka rüzgâr	5.900.989
Yan rüzgâr	2.426.522
Sınır Şartları	
Giriş	Sabit hız, sabit sıcaklık (2 m/s – 30 ^oC)
Çıkış	Sabit sıcaklık, sabit basınç (30 ^oC – 0 Pa)
PV paneller	Rüzgâra bağlı taşınım sınır şartı (Coupled) Güneş ışınımına bağlı sabit ısı akısı sınır şartı (Opaque / Semi - transparent) Panel malzemesi kalınlığı boyunca iletim sınır şartı (Coupled)
Kapsama hava hacmi	Duvar sınır şartı (Heat flux=0)
Simetri eksenleri	Simetri sınır şartı

Bu çalışmada ortam havasının başlangıç sıcaklığı 30 °C alınmıştır. Başlangıç koşulları ve yakınsama kriterine ilişkin temel bilgiler Çizelge 3.3'te, çözücü özellikleri Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Başlangıç koşulları ve yakınsama kriteri

Başlangıç Koşulları ve Yakınsama Kriteri	
Ortam havası sıcaklığı	30 °C
Yakınsama kriteri:	
Süreklilik, momentum, k, ω ve enerji	10^{-4} / 10^{-4} / 10^{-4} / 10^{-4} / 10^{-6}
Basınç-hız ilişkilendirilmesi	Coupled
Ayrıklaştırma metodu	Rhie Chow: Mesafe bazlı
Ayrıklaştırma metodu(Akış, enerji ve diğ.)	2. Dereceden (Second order upwind)

Çizelge 3.4. Çözüm metodu ve iş istasyonu

Çözüm Metodu ve İş İstasyonu	
Çözüm metodu	3D Paralel
İş istasyonu	
İşlemci (CPU)	56 x Intel® Xeon® CPU E5-2690 v4 @ 2.60 GHz
RAM	64 GB 2400 MHz
Ekran kartı (GPU)	8 GB Nvidia Quadro P4000
Hesaplama süresi	Yaklaşık 1 hafta

Çözüm metodu belirlendikten çözüm işlemlerine başlanabilir.

3.3. Korunum Denklemleri ve Türbülans Modeli

Çözüm için kütlenin korunumu, momentum ve enerji denklemlerinin beraber çözülmesi gerekir. Kütlenin korunumu denklemi aşağıdaki gibi verilebilir

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\left(\rho \vec{V}\right) = S_m \tag{3.1}$$

Denklem 3.1 kütle korunum denkleminin genel biçimidir ve sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir akışlar için geçerlidir. Bu denklemde yer alan ρ yoğunluğu ve $\vec{V}$ hız vektörünü temsil ederken, S_m kaynak terim şeklinde ifade edilir ve dağılmış ikinci fazdan (örneğin, sıvı damlacıklarının buharlaşması nedeniyle) ve kullanıcı tarafından tanımlanan kaynaklardan sürekli faza eklenen kütleyi ifade eder. Momentum ve enerji denklemleri ise Denklem 3.2 – 3.5 şeklinde ifade edilir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla\left(\rho u \vec{V}\right) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) + S_{M_x} \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla\left(\rho v \vec{V}\right) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{M_y} \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla\left(\rho w \vec{V}\right) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + S_{M_z} \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla\left(\rho e \vec{V}\right) = -p\nabla \vec{V} + \nabla(k \nabla T) + \Phi + S_e \tag{3.5}$$

Yukarıda kartezyen koordinat sisteminde ifade edilen denklemlerde; ρ yoğunluğu, $\vec{V}$ hız vektörünü, *u, v* ve *w* hız vektörlerinin sırasıyla *x, y* ve *z* bileşenlerini, S_m kütle kaynak

terimini, S_M momentum kaynak terimini, p basıncı, S_e enerji kaynak terimini, Φ ise yayınım terimini temsil etmektedir. Yayınım terimi enerji kaybını ifade eder ve Denklem 3.6'daki gibi yazılabilir (Sevilgen, 2010).

$$\Phi = \mu \begin{bmatrix} 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} + \lambda(\nabla\vec{V})^2 \qquad (3.6)$$

Sayısal hesaplama yapabilmek için mevcut çatı yapısı ve PV paneller, Ansys yazılımı içerisinde bulunan Space Claim ve Desing Modeler yazılımları kullanılarak modellenmiştir. Modelin ağ yapısını oluşturmak için Ansys Meshing yazılımı kullanılmıştır. Ağ yapısının oluşturulmasından sonra Ansys Fluent yazılımında sınır şartları belirlenmiş ve çözüm aşamasına geçilmiştir.

3.3.1. k-ω Türbülans modeli

Ansys Fluent programı 2024 R1 sürümünde k-ω modeli için şu seçenekler sunulmuştur:

- Standart
- GEKO
- BSL
- SST
- WJ-BSL-EARSM

Bu modeller içerisinde en çok kullanılanlar Standart ve SST modeller olarak ön plana çıkmaktadır. Her iki model de k ve ω için taşınım denklemleri benzer formlara sahiptir. SST modelinin standart modelden farklı olduğu başlıca yollar şunlardır:

- Sınır tabakasının iç bölgesindeki standart k-ω modelinden, sınır tabakasının dış kısmındaki k-ε modelinin yüksek Reynolds sayılı versiyonuna kademeli geçiş,
- Ana türbülanslı kesme geriliminin taşıma etkilerini hesaba katmak için modifiye edilmiş türbülanslı viskozite formülasyonu

SST k-ω modeli, Menter tarafından yakın duvar bölgesindeki k-ω modelinin sağlam ve doğru formülasyonunu uzak alandaki k-ε modelinin serbest akış bağımsızlığıyla etkili

bir şekilde harmanlamak için geliştirilmiştir. Bunu başarmak için k-ε modeli bir k-ω formülasyonuna dönüştürülür. SST k-ω modeli Standart k-ω modeline benzerdir, ancak aşağıdaki iyileştirmeleri içerir (Ansys, 2009):

- Standart k-ω modeli ve dönüştürülmüş k-ε modelinin her ikisi de bir harmanlama fonksiyonu ile çarpılır ve her iki model de birbirlerine eklenir. Harmanlama fonksiyonu, standart k-ω modelini aktive eden yakın duvar bölgesinde bir ve dönüştürülmüş k-ε modelini aktive eden yüzeyden uzakta sıfır olacak şekilde tasarlanmıştır.
- SST modeli, ω denkleminde sönümlü bir çapraz difüzyon türev terimi içerir.
- Türbülanslı viskozitenin tanımı, türbülanslı kayma geriliminin taşınmasını hesaba katmak için değiştirilir.
- Modelleme sabitleri farklıdır.

Bu özellikler, SST k-ω, Standart k-ω modelden daha geniş bir akış sınıfı (örneğin, ters basınç gradyan akışları, kanat profilleri, transonik şok dalgaları) için daha doğru ve güvenilir hale getirir. Diğer modifikasyonlar, ω denklemine bir çapraz difüzyon teriminin eklenmesini ve model denklemlerinin hem yakın duvar hem de uzak alan bölgelerinde uygun şekilde davranmasını sağlamak için bir karıştırma fonksiyonunu içerir (Ansys, 2009).

SST k-ω modeli, Standart k-ω modeline benzer bir forma sahiptir ve (Ansys, 2009) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \tag{3.7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \tag{3.8}$$

Bu denklemlerde, $\tilde{G}_k$ hesaplanan ortalama hız gradyanlarına bağlı türbülans kinetik enerjisinin üretimini temsil eder. G_ω hesaplanan ω'nın üretimini temsil eder. Γ_k ve Γ_ω sırasıyla ω ve k'nın etkin yayılımını temsil eder ve bunlar aşağıda açıklandığı gibi hesaplanır. Y_k ve Y_ω hesaplanan türbülansın nedeniyle oluşan k ve ω'nın dağılımını

temsil eder. D_ω aşağıda açıklandığı gibi hesaplanan çapraz difüzyon terimini temsil eder. S_k ve S_ω kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^* k\omega) \tag{3.9}$$

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\upsilon_t}\tilde{G}_k \tag{3.10}$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \tag{3.11}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \tag{3.12}$$

Burada σ_k ve σ_ω sırasıyla k ve ω için türbülanslı Prandtl sayılarıdır. μ_t ise türbülanslı viskozitedir.

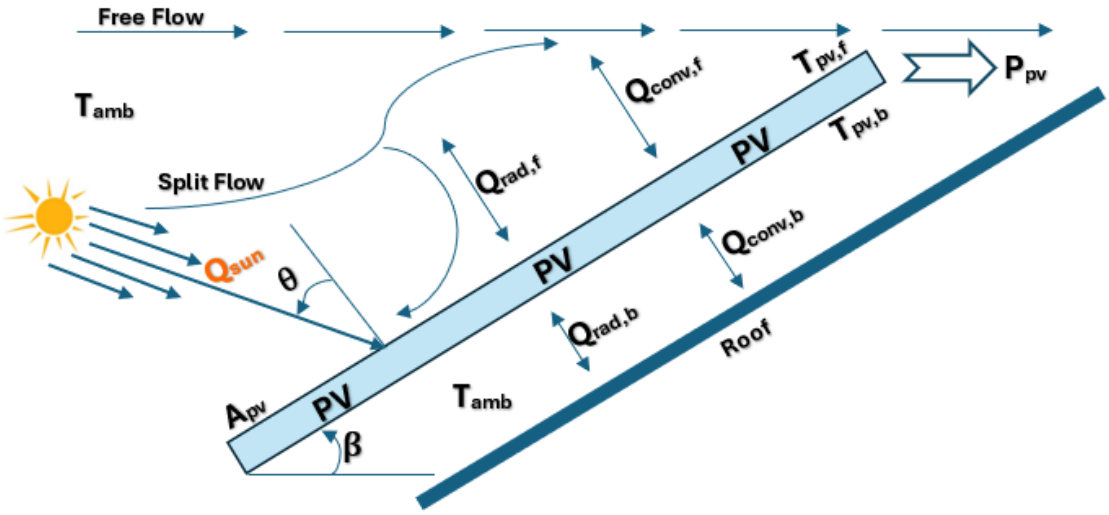
$$Y_k = \rho\beta^* k\omega \tag{3.13}$$

$$Y_\omega = \rho\beta\omega^2 \tag{3.14}$$

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \qquad \sigma_{\omega,2} = 1{,}168 \tag{3.15}$$

3.4. Taşınım Denklemleri

Güneşten gelen kısa dalga boylu ışınım (Q_{rad}) ve elektrik üretimiyle ilişkili direnç (Joule) etkileri ısı yaratırken, elektrik üretimi (P_{pv}) ile doğal ve zorlanmış taşınım (Q_{conv}) panellerden ısıyı dağıtır. Sakin rüzgarlar altında, daha sıcak PV panel yüzeyi (T_{pv}) ile daha soğuk ortam havası (T_{amb}) arasındaki termal farklardan kaynaklanan doğal taşınım hakim olurken, daha güçlü rüzgarlar genellikle daha etkili bir ısı transferi aracı olan zorlanmış taşınımla ilişkilidir (Waterworth & Armstrong, 2020). PV paneller üzerinde etkili olan ısı transferi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Güneş panelinde ısı transferi (radyasyon (Q_{rad}), konveksiyon (Q_{conv})) şeması. Çıkış gücü (P_{pv}), PV sıcaklığı (T_{pv}), ortam sıcaklığı (T_{amb}), PV yüzey alanı (A_{pv}). β ve θ sırasıyla panel eğim açısı ve gelen doğrudan güneş enerjisi bileşenidir (Q_{sun}).

Bir PV hücresi, Güneş ışığının fotonlarını emerek, termal enerji (Q_t) üretirken, belirli bir voltaj ve akımda elektrik çıkışı sağlayarak PV enerjisi üretebilir. PV panelleri tarafından emilen termal enerji (Q_t) şu şekilde tasvir edilebilir (Du, Tao, Liu, Jiang, & Huang, 2017):

$$Q_t = \left(1 - \eta_{pv}\right).Q_{sun}.A_{pv}.T_{\%} \tag{3.16}$$

Burada (Q_t), PV yüzeyine gelen güneş ışığı enerjisinin (Q_{sun}), PV verimliliğinin (η_{pv}), PV yüzey alanının (A_{pv}) ve panel yüzeyine ulaşan ışık oranının ($T_{\%}$) ürünüdür. ($Q_{sun}.A_{pv}.T_{\%}$) PV hücreleri tarafından tamamen emilen güneş ışınımıdır. PV modül verimlilik modeli şu şekilde verilmiştir (Gökmen et al., 2016):

$$\eta_{pv} = \eta_{inv}.\eta_{loss}.\eta_{ref}.\left[1 - k_T\left(T_{pv} - T_{ref}\right)\right] \tag{3.17}$$

Burada (η_{ref}), 25 °C (T_{ref}) hücre sıcaklığındaki referans PV modül verimliliğidir ve (k_T) sıcaklık katsayısıdır. Bu parametreler güneş pili malzemesine bağlıdır ve üreticilerin veri sayfalarında bulunabilir. (T_{pv}) PV modül çalışma sıcaklığı, (η_{inv}) invertör verimliliği, (η_{loss}) kayıplardır.

Örnek olarak PV panel sıcaklığının rüzgâr etkisi ile 60 °C'den 50 °C'ye düştüğünü varsayarak her iki durumda verimi Denklem 3.17'den hesaplarsak;

T_{pv}= 60 °C için $\eta_{pv} = 0{,}98 \,.\, 0{,}211 \,.\, [1 - 0{,}0035 \,.\, (60 - 25)] = 0{,}1814 = \%\ 18{,}14$

T_{pv}= 50 °C için $\eta_{pv} = 0{,}98 \,.\, 0{,}211 \,.\, [1 - 0{,}0035 \,.\, (50 - 25)] = 0{,}1886 = \%\ 18{,}87$

Yapılan hesaplamada η_{loss} ihmal edilir ve η_{inv} ürün kataloğundan % 98 olarak, η_{ref} ürün kataloğundan % 21,1 olarak, k_T ürün kataloğundan -0,35 %/°C olarak, T_{ref} sıcaklığı ürün kataloğundan 25 °C olarak alınır.

Hesaplandığı üzere PV panellerin her 10 °C soğuması PV panel veriminde 0,73 puanlık (% 18,87 − % 18,14) bir verim artışına tekabül etmektedir. Buda ilk duruma (% 18,14 → %18,87) göre % 4,02 bir verim artışına karşılık gelmektedir.

Herhangi bir zaman dilimi içerisinde PV hücre sıcaklığı ve ortam sıcaklığı arasındaki ilişki Denklem 3.18'te verilmektedir (Gökmen et al., 2016).

$$T_{pv} = T_{amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800}\right) . G \tag{3.18}$$

Burada verilen G Güneş ışınımı (W/m^2) değerini gösterirken, NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) sıcaklığı, Nominal İşletme Hücre Sıcaklığını göstermektedir.

NOCT, STC'ye göre gerçek dünya koşullarına daha uygun bir dizi koşul altında güneş panelinin ulaştığı sıcaklık olarak tanımlanır. Genellikle, NOCT, güneş hücresinin verimliliğini ve performansını değerlendirmek için kullanılır.

NOCT, şu koşullar altında ölçülür:

- Güneş ışınımı: 800 W/m²
- Hava sıcaklığı: 20°C
- Rüzgâr hızı: 1 m/s
- Güneş paneli eğimi: 45^0

NOCT, güneş panellerinin gerçekçi çalışma koşullarını yansıtan bir test yöntemidir ve çoğu zaman panelin etiketinde yer alır. Bu test, güneş panellerinin ısı ve rüzgâr gibi çevresel faktörler altında ne kadar ısındığını ölçerek, panellerin verimliliğini daha gerçekçi bir biçimde değerlendirir. Önemli bir nokta, NOCT testinde hücre sıcaklığının değil, ortam hava sıcaklığının dikkate alınmasıdır.

NOCT koşulları, özellikle STC değerlerine sahip farklı panellerin performanslarını karşılaştırmak için faydalıdır. Ancak, bir güneş enerjisi sistemi tasarlarken NOCT değerini kullanmamıza genellikle gerek yoktur. NOCT testleri, farklı güneş panellerinin standart dışı sıcaklık koşullarında nasıl performans göstereceğini kıyaslamaya olanak sağlar.

Özetle, STC testleri bir güneş panelinin ideal koşullarda nasıl çalıştığını gösterirken, NOCT testleri panellerin daha gerçek dünya koşullarında, yani gerçek güneş ışığı altında, nasıl enerji üretebileceğini tahmin etmek için kullanılır. Bu sayede, sisteminizin gerçek koşullarda ne kadar verimli olacağını daha doğru bir şekilde öngörebilirsiniz.

NOCT değeri ne kadar düşükse, o güneş hücresinin yüksek sıcaklıklarda daha verimli çalıştığı anlamına gelir. Bu, özellikle sıcak iklimlerde güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini değerlendirmek için kritik bir parametredir.

Bu parametrelere dayanarak, (A_{pv}) alana sahip bir PV dizisinin çıkış gücü şu şekilde verilir (Gökmen vd., 2016):

$$P_{pv} = \eta_{pv}.A_{pv}.G_{\beta} \tag{3.19}$$

Burada (G_{β}), eğik modül yüzeyindeki toplam güneş radyasyonudur. PV panellerin termal enerjisi şu şekilde verilir (Du vd., 2017):

$$Q_t = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{\Delta T} \tag{3.20}$$

$(Q_{\Delta T})$ güneş ışığının emilmesi nedeniyle PV panelinin geçici sıcaklık artışını temsil eder ve bu ısı, PV modülü içinde iletim yoluyla aktarılır.

(Q_{rad}) çevredeki havaya geri dönen termal radyasyondur ve Stefan–Boltzmann Kanunu ile şu şekilde tanımlanır:

$$Q_{rad} = \varepsilon.\sigma.\left(T_{pv}^4 - T_{amb}^4\right).A_{pv} \quad (3.21)$$

Burada, (ε) PV yüzeyinin emisyonu, (σ) Stefan-Boltzmann sabiti ve (T_{pv}) ve (T_{amb}) sırasıyla PV panelinin ve çevresindeki havanın sıcaklığıdır. Isı hem serbest hem de zorlanmış konveksiyonla modül çevresine de aktarılır.

$(Q_{conv,f})$ ve $(Q_{conv.b})$ sırasıyla PV panelin ön ve arka yüzünden çevreleyen atmosfer havasına konveksiyon ısı kaybını temsil eder ve Newton'un Soğutma Kanunu ile şu şekilde tanımlanır:

$$Q_{conv,f} = h.\left(T_{pv,f} - T_{amb}\right).A_{pv} \quad (3.22)$$

$$Q_{conv,b} = h.\left(T_{pv,b} - T_{amb}\right).A_{pv} \quad (3.23)$$

Burada, (h) konveksiyonla ısı transfer katsayısıdır.

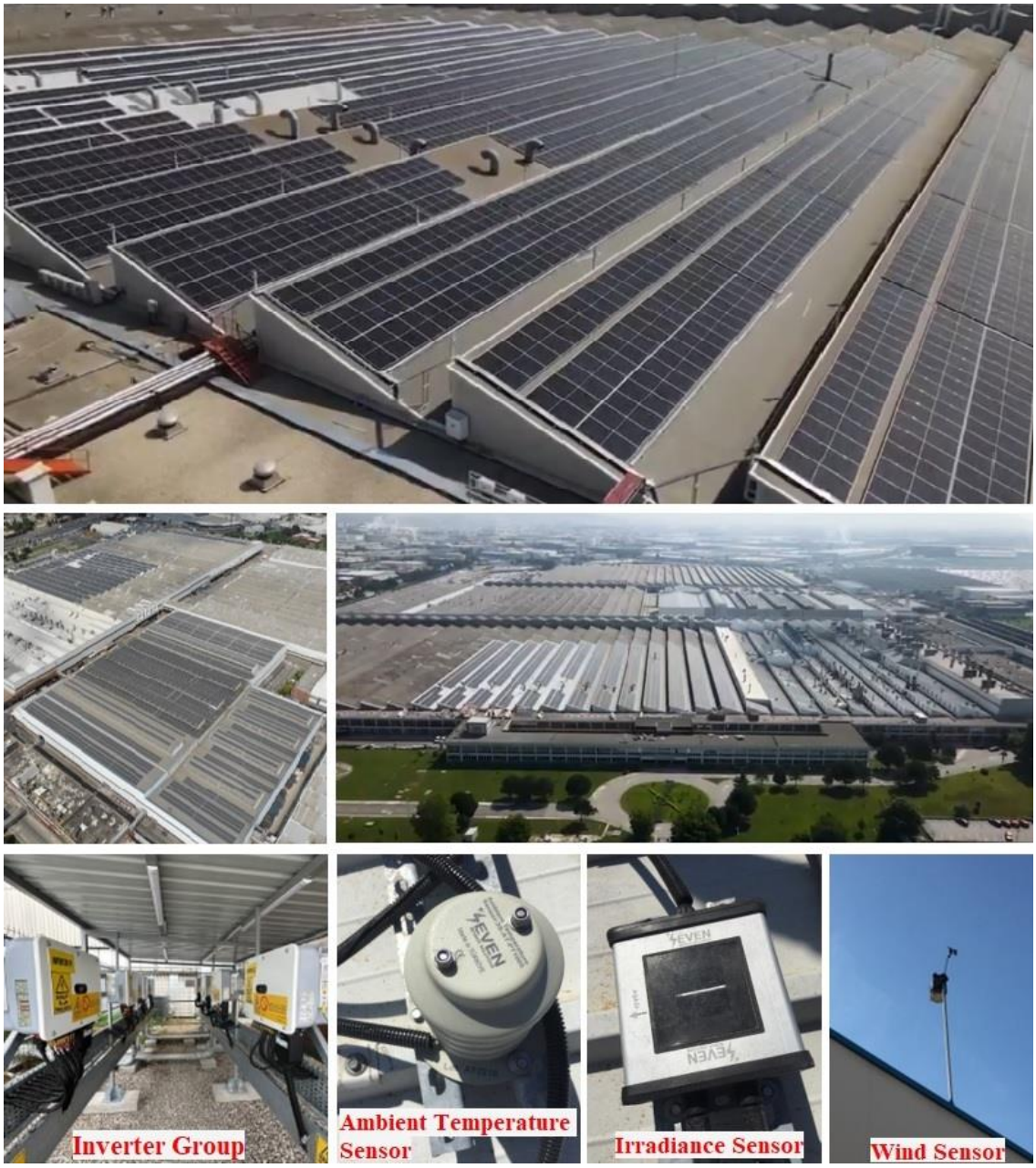
Yapılan çalışmada PV panel ile çatı arasındaki mesafenin (15 cm) yetersizliği nedeniyle rüzgârın, panelin arka kısmında yeterince etkili olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle arka rüzgâr durumlarına nazaran, yan rüzgâr durumlarında hava panelin arkasında daha rahat hareket edebilecektir ve bu durum $(Q_{conv,b})$ ile gösterilen panel arkasındaki konveksiyonu artıracaktır. Bu nedenle yeterli yan rüzgâr durumlarında artan $(Q_{conv,b})$ ile daha düşük PV panel sıcaklığı beklenmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Deneysel Çalışmalar

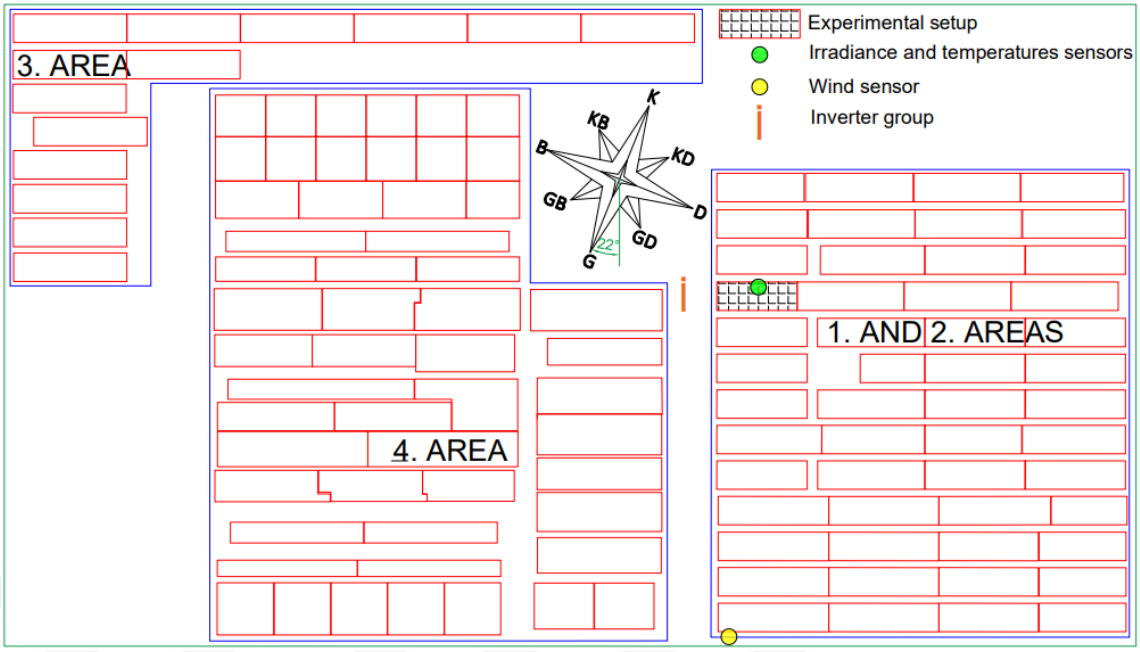
Bu tez kapsamında Bursa TOFAŞ fabrikası çatısına kurulmuş 5,9 MW'lık santrale ait PV panellerin rüzgâr altında soğutulması incelenmiştir. Bunun için santralde yaz döneminde meteorolojik ölçümler yapılmıştır.

Şekil 4.1'de gösterilen, nominal kapasitesi yaklaşık 5,9 MW olan Tofaş Bursa Fabrikası güneş enerjisi çatı PV tesisi bu çalışmanın test durumu olarak seçilmiştir. Tesis Türkiye'nin Bursa ilinde (40°15'51'' Kuzey enlemi, 29°03'55" Doğu boylamı, 89 m rakımda) bulunmaktadır.



Şekil 4.1. Araştırma yapılan çatı PV santrali ve sensörleri içeren ölçüm alanı görseli.

Yaklaşık 57 dönümlük bir çatı alanına kurulan bu güneş PV tesisi, her biri 545 W kapasiteye sahip 10.806 PV paneli içermektedir. Bu paneller çatı üzerinde 3 farklı alana Şekil 4.2'de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Paneller çatı yapısından dolayı güney yönünden 22° doğu yönüne dönük olarak yerleştirilmiş, panel eğim açısı 17.8° ve panellerle çatı arasındaki mesafe 15 cm'dir.



Şekil 4.2. Tofaş Bursa Fabrikası güneş enerjisi çatı PV tesisi düzeni. Paneller çatı üzerinde üç farklı alana yerleştirilmiştir.

Tesis kullanılan panel sayıları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Tofaş çatı PV sistemi panel ve güç detayı

	1. ve 2.Alan	3.Alan	4.Alan	**Toplam**
PV Panel Sayısı (adet)	4.466	1.156	5.184	10.806
DC Güç (kWp)	2.433,97	630,02	2.825,28	5.889,27
AC Güç (kWe)	2.050	550	2.400	5.000

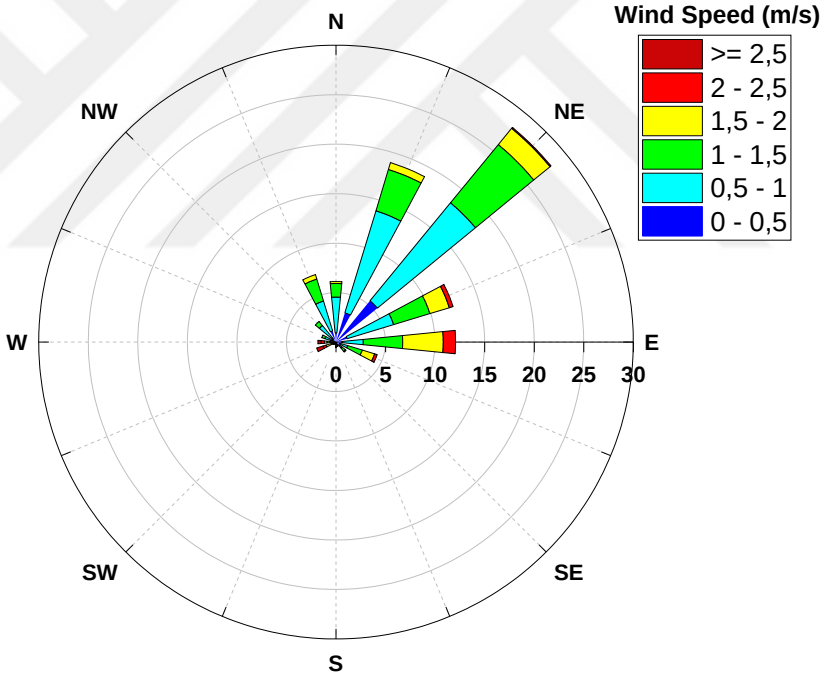
Ölçülen tüm verilerin 15'er dakikalık ortalamaları alınmış ve yalnızca PV santralinin çalışma aralığı olan gündüz saatleri (09:00-17:00) analizlerde değerlendirilmiştir. Ayrıca, referans olarak STC (Standard Test Conditions) değeri kabul edilmiş ve yalnızca PV panel sıcaklığının 25 °C'nin üzerinde olduğu durumlar dikkate alınmıştır. Bunun nedeni, PV panel performansının 25 °C için belirtilmiş olması ve sıcaklık bu değerin üzerine çıktığında performansta bir düşüş beklenmesidir. Bu nedenle, panel verimliliğinin üretici katalog verileriyle aynı şekilde gözlemlenmesi beklenemez (Elibol vd., 2017).

4.1.1. TOFAŞ güneş enerjisi santrali ölçümleri

Bursa ili genel olarak ılıman bir iklime sahip olmakla birlikte, iklim koşulları bölgelere göre farklılık göstermektedir. Kuzeyde Marmara Denizi'nin yumuşak ve ılıman iklimi

hakimken, güneyde Uludağ'ın sert iklimi etkisini göstermektedir. İlin en sıcak ayları Temmuz - Ağustos, en soğuk ayları ise Ocak - Şubat'tır. Bursa'nın yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.515 saat (günlük ortalama 6,9 saat) ve ortalama güneş yoğunluk 1.393 kWh/m^2–yıl (günlük ortalama 3,8 kWh/m^2)'dır (Gnssolar, 2023).

Şekil 4.3'te TOFAŞ çatı PV tesisinde 1 Temmuz 2023-1 Ekim 2023 tarihleri arasında yapılan ölçümler sırasında aktif rüzgârın büyük oranda kuzeydoğu yönlü estiği (% 28,07) görülmektedir. Tüm yönlerden gelen ortalama rüzgâr hızı yaklaşık 1 m/s'dir. Ortalama rüzgâr hızının 1,49 m/s olduğu doğu yönü en şiddetli rüzgârların geldiği yön olmuştur. Gelen rüzgarlar kuzey-güney yönlü incelendiği zaman, Bursa bölgesinde yaz mevsiminde güneyden gelen rüzgarların sıcak hava dalgası getirdiği, buna nazaran kuzey rüzgarlarının daha serin estiği bilinmektedir.

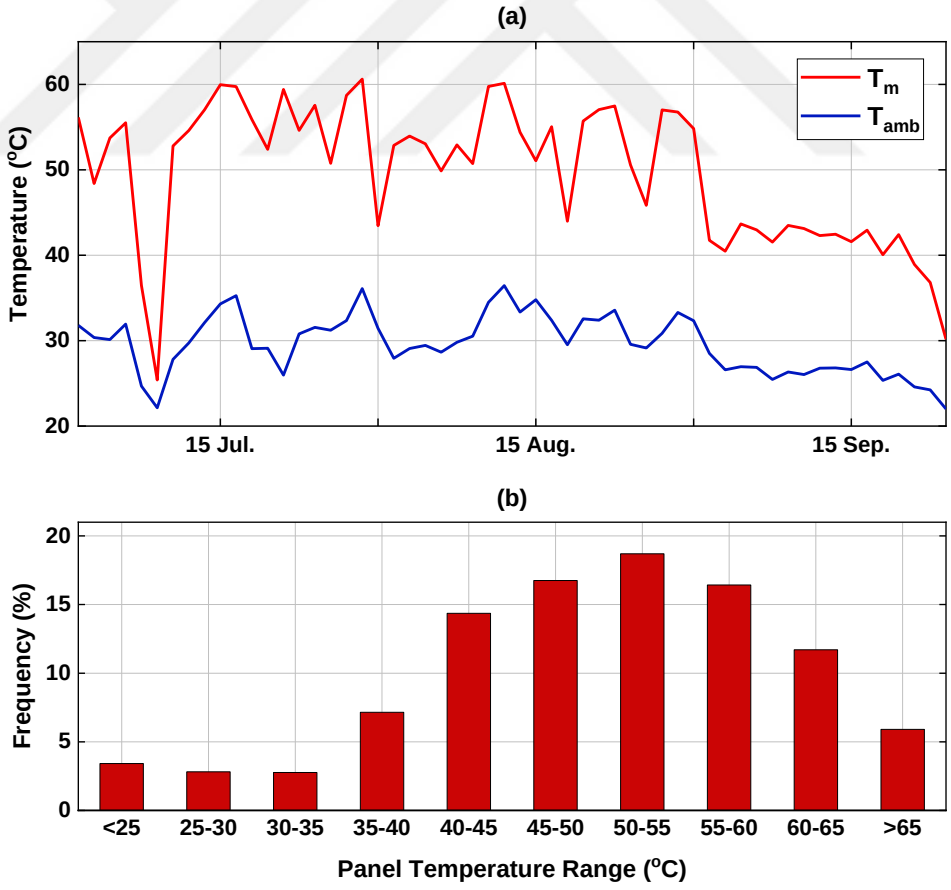


Şekil 4.3. Çalışma alanımız için rüzgâr gülü. (1 Temmuz 2023-1 Ekim 2023)

Çalışma yapılan santralde, çatı geometrisinin kısıtlamaları nedeniyle panellerin tam güney yönüne doğru yerleştirilemediği ve panel eğim açısının çatı eğimine (17.8°) uymak zorunda kalındığı görülmüştür. Panellerin sıkışık düzenle yerleştirilmesi, çatı geometrisiyle birleştiğinde rüzgârın soğutma etkisinin sınırlı kaldığı düşünülebilir. Özellikle TOFAŞ çatı PV tesisinin, şehir içinde yer alan büyük bir organize sanayi

bölgesinde bulunması, güçlü rüzgârlara erişimi kısıtlamakta ve durum soğutma performansını etkilemektedir. Bunun yanı sıra, sanayi bölgesindeki hava kirliliği ve egzoz gazları gibi etkenler, ortam havasındaki partikül miktarını artırarak panellerin daha sıcak hava akımlarıyla karşılaşmasına yol açmış ve güneş ışınımı şiddetini azaltmıştır.

Panel sıcaklıklarının analizinde, PV panel sıcaklığı (T_m) ve ortam sıcaklığı (T_{amb}) verileri kullanılmıştır. Şekil 4.4-(a)'da 1 Temmuz-1 Ekim tarihlerinde 09:00-17:00 saatleri arasındaki (T_m) ve (T_{amb}) sıcaklıklarının günlük ortalama değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.4-(a)'da görüldüğü üzere (T_m) ve (T_{amb}) benzer bir eğilime sahiptir. Bu da bize PV panel sıcaklığındaki değişimin hava sıcaklığından ciddi oranda etkilendiğini göstermektedir. Temmuz ve Eylül arasında yapılan ölçümler sırasında (T_m) değerleri için; günlük ortalama en küçük (T_m) = 25,4 °C (9 Temmuz'da ölçülen) ve günlük ortalama en yüksek (T_m) = 60,6 °C (26 Temmuz'da ölçülen) arasında değişmiştir.

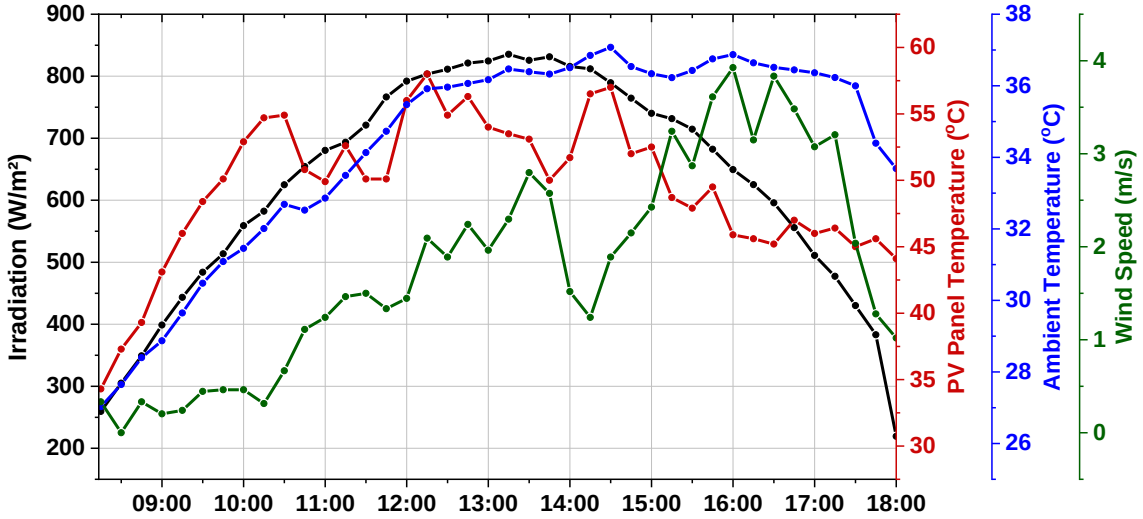


Şekil 4.4. 1 Temmuz-1 Ekim arasında yapılan sıcaklık ölçümleri. (a) Günlük ortalama (T_m) ve (T_{amb}) sıcaklıkları, (b) 15 dakika aralıklarla panel sıcaklığının frekans dağılımı.

Deney periyodu boyunca (T_m)'nin değişimini daha iyi anlayabilmek için, saatlik (T_m) ölçümlerinin frekans dağılımı Şekil 4.4-(b)'de sunulmuştur. Fark edilebileceği gibi, yapılan ölçümler sırasında incelenen PV panel, güneş ışınımına maruz kaldığı sürenin yalnızca % 3,5'inden daha azında STC optimum sıcaklığının altında çalışmıştır. Çalışma süresinin yaklaşık % 84'ünde 40 °C'nin üzerinde bir panel sıcaklığında çalışmak zorunda kalmıştır. Bu durum PV panellerin değerlendirmesinde STC değerlerini kullanmanın makul sonuçlar vermeyeceğini göstermektedir.

Tesiste yapılan rüzgâr ölçümlerinde 0-2 m/s aralığındaki rüzgâr hızlarının ölçüm periyodu boyunca yapılan ölçümler içerisinde yaklaşık % 90'lık bir paya sahip olduğu görülmüştür (bkz Şekil 4.3). Ölçüm yapılan tesiste rüzgâr hızları genelde bu şekilde düşüş olarak gözlemlendiğinden dolayı (T_m)'deki düşüş sınırlı olmuştur. 2,5 m/s'nin üzerindeki rüzgâr hızlarında ise (T_m), bir vaka hariç her zaman 50 °C'nin altında kalmıştır.

PV panellerin performansı ortam sıcaklığı, güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve hücre sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.5, bir gün boyunca (06.08.2023) güneş ışınımı şiddeti, PV panel sıcaklığı, ortam sıcaklığını ve rüzgâr hızını göstermektedir. İncelenen gün boyunca ortam sıcaklığı (T_{amb}) 27,03 - 37,07 °C aralığında değişirken PV panel sıcaklığı (T_m) 34,3 - 58 °C arasında değişmiştir. Saat 13:15'te maksimum güneş ışınımı 835 W/m^2 olup aynı anda panel sıcaklığı (T_m) 53,5 °C olarak ölçülüyorken, ortam sıcaklığının 35,91 °C olduğu saat 12:15'te en yüksek panel sıcaklığı 58 °C olarak bulunmuştur.

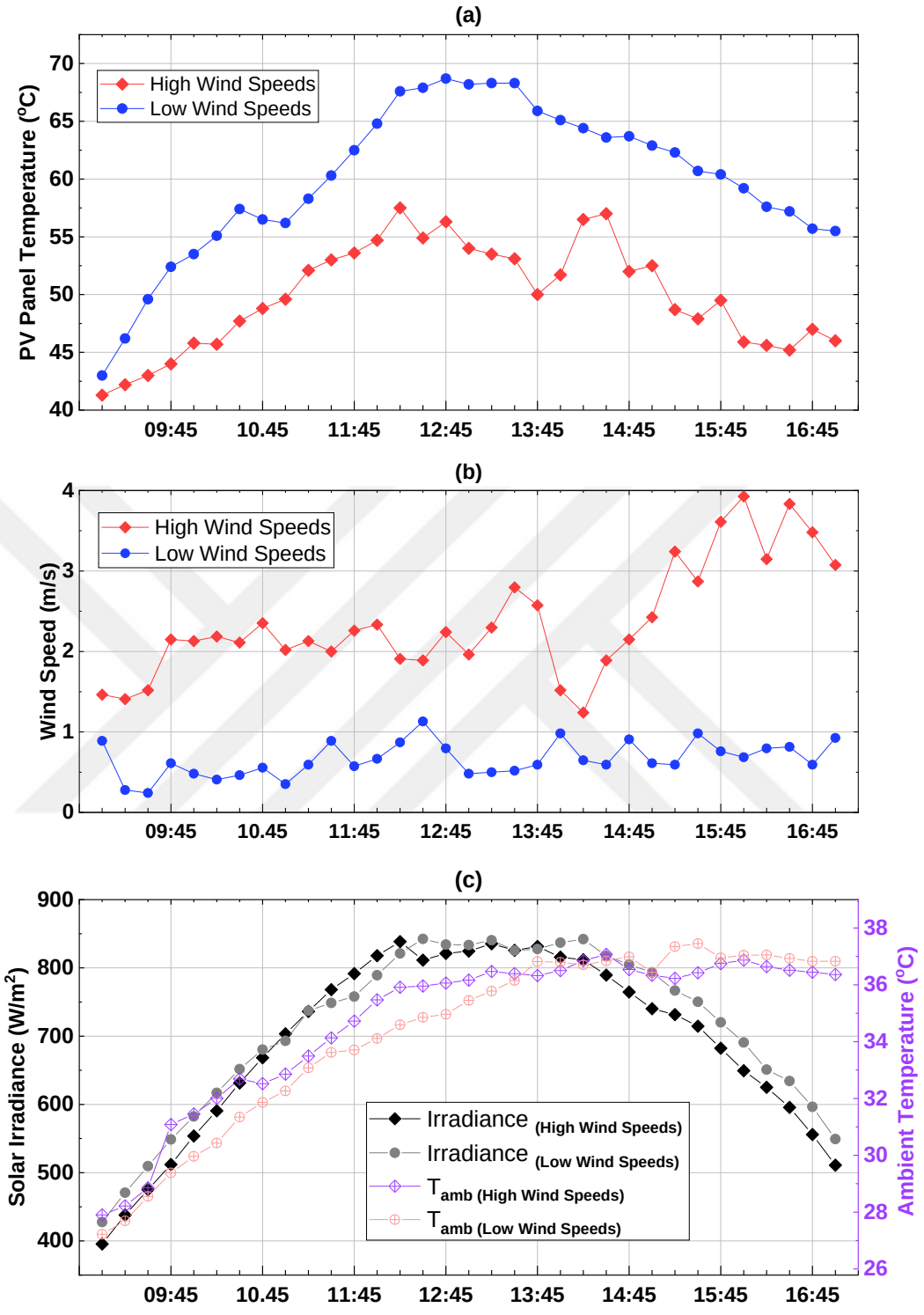


Şekil 4.5. Gün boyunca güneş ışınımı, panel sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı (06.08.2023).

Şekil 4.5 incelendiğinde saat 12:00'de 1,44 m/s olan rüzgâr hızı düzenli olarak artmış ve saat 13:30'da 2,80 m/s, saat 13:45'te 2,57 m/s hıza erişmiştir. Bu süre zarfında güneş radyasyonu ve ortam sıcaklığı da hafif bir atış eğiliminde (saat 12:00'de 792 W/m² - 35,47 °C, saat 13:45'te 831 W/m² - 36,33 °C) olmasına rağmen saat 12:00'de panel sıcaklığı 56 °C'den, saat 13:45'te 50 °C'ye düşmüştür. Bu durum bize güneş radyasyonun da ve ortam sıcaklığın da belli bir artış olmasına rağmen, rüzgâr hızının 1,36 m/s artmasının PV panel sıcaklığı üzerinde 6 °C'lik bir soğutma sağladığını göstermektedir. Saat 13:45'ten sonra rüzgâr hızındaki düşmeye, PV panel sıcaklığındaki artış eşlik etmiştir. Saat 14:30'dan sonra rüzgâr hızının 2,04 m/s artması (saat 16:00'da 3,93 m/s ile günlük en yüksek rüzgâr hızı ölçülmüştür) ile PV panel sıcaklığında 11,1 °C'lik (PV panel sıcaklığı saat 14:30'da 57 °C'den, saat 16:00'da 45,9 °C'ye düşmüştür) günün en yüksek soğutma etkisi gözlemlenmiştir. Bu büyük soğutma etkisinin bir kısmının ise güneş radyasyondaki düşmeden kaynaklandığı göz ardı edilmemelidir.

Rüzgârın PV panel soğutulması üzerindeki etkisini açıkça göstermek için, güneş ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığının (T_{amb}) aynı olduğu (bkz. Şekil 4.6-(c)), ancak rüzgâr hızlarının düşük ve yüksek olarak karakterize edildiği iki gün (bkz. Şekil 4.6-(b) ve Çizelge 4.2) seçildi. Çizelge 4.2'den 13 Temmuz da düşük rüzgâr hızlarının olduğunu (ortalama rüzgâr hızı 0,66 m/s değerinde iken, en yüksek rüzgâr hızı 1,13 m/s

ölçülmüştür) gözlemlenmişken, 6 Ağustos tarihinde yüksek rüzgâr hızları (ortalama rüzgâr hızı 2,37 m/s değerinde iken, en yüksek rüzgâr hızı 3,93 m/s ölçülmüştür) gözlemlenmiştir. Düşük rüzgârların görüldüğü 13 Temmuz'da en yüksek PV panel sıcaklığı 68,7 °C iken, yüksek rüzgârların görüldüğü 6 Ağustos'ta en yüksek PV panel sıcaklığı 57,5 °C olarak ölçülmüştür (bkz. Şekil 4.6-(a)). Bu durumda, sadece rüzgâr hızlarının farklı olduğu iki gün arasında, yüksek rüzgâr koşullarının PV panel sıcaklığında 11,2 °C'lik bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, (Mehdi vd., 2023) yaptığı çalışmada ortaya koydukları iki farklı günde meydana gelen rüzgâr hızı farklılıkları nedeniyle yüksek rüzgârların sağladığı 9 °C'lik soğutma etkisi ile benzer sonuçlar göstermiştir.



Şekil 4.6. Güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve PV panel sıcaklığı şu tarihlerde ölçülmüştür. Düşük rüzgâr hızlarıyla karakterize edilen 13 Temmuz'da ve yüksek rüzgâr hızlarıyla karakterize edilen 6 Ağustos'ta. Düşük ve yüksek rüzgâr hızları için (a) PV panel sıcaklığındaki saatlik değişim, (b) Rüzgâr hızındaki saatlik değişim , (c) Güneş ışınımı ve ortam sıcaklığındaki saatlik değişim

Çizelge 4.2. 13 Temmuz - 6 Ağustos tarihlerinde rüzgâr hızındaki saatlik değişim

Saat	**09:00**	**09:15**	**09:30**	**09:45**	**10:00**	**10:15**	**10:30**	**10:45**	**11:00**	**11:15**	**11:30**
Yüksek Rüzgâr Hızları (m/s) (6 Ağustos)	1.46	1.41	1.52	2.15	2.13	2.19	2.11	2.35	2.02	2.13	2.00
Düşük Rüzgâr Hızları (m/s) (13 Temmuz)	0.89	0.28	0.24	0.61	0.48	0.41	0.46	0.56	0.35	0.59	0.89
Saat	**11:45**	**12:00**	**12:15**	**12:30**	**12:45**	**13:00**	**13:15**	**13:30**	**13:45**	**14:00**	**14:15**
Yüksek Rüzgâr Hızları (m/s) (6 Ağustos)	2.26	2.33	1.91	1.89	2.24	1.96	2.30	2.80	2.57	1.52	1.24
Düşük Rüzgâr Hızları (m/s) (13 Temmuz)	0.57	0.67	0.87	1.13	0.80	0.48	0.50	0.52	0.59	0.98	0.65
Saat	**14:30**	**14:45**	**15:00**	**15:15**	**15:30**	**15:45**	**16:00**	**16:15**	**16:30**	**16:45**	**17:00**
Yüksek Rüzgâr Hızları (m/s) (6 Ağustos)	1.89	2.15	2.43	3.24	2.87	3.61	3.93	3.15	3.83	3.48	3.07
Düşük Rüzgâr Hızları (m/s) (13 Temmuz)	0.59	0.91	0.61	0.59	0.98	0.76	0.69	0.80	0.81	0.59	0.93

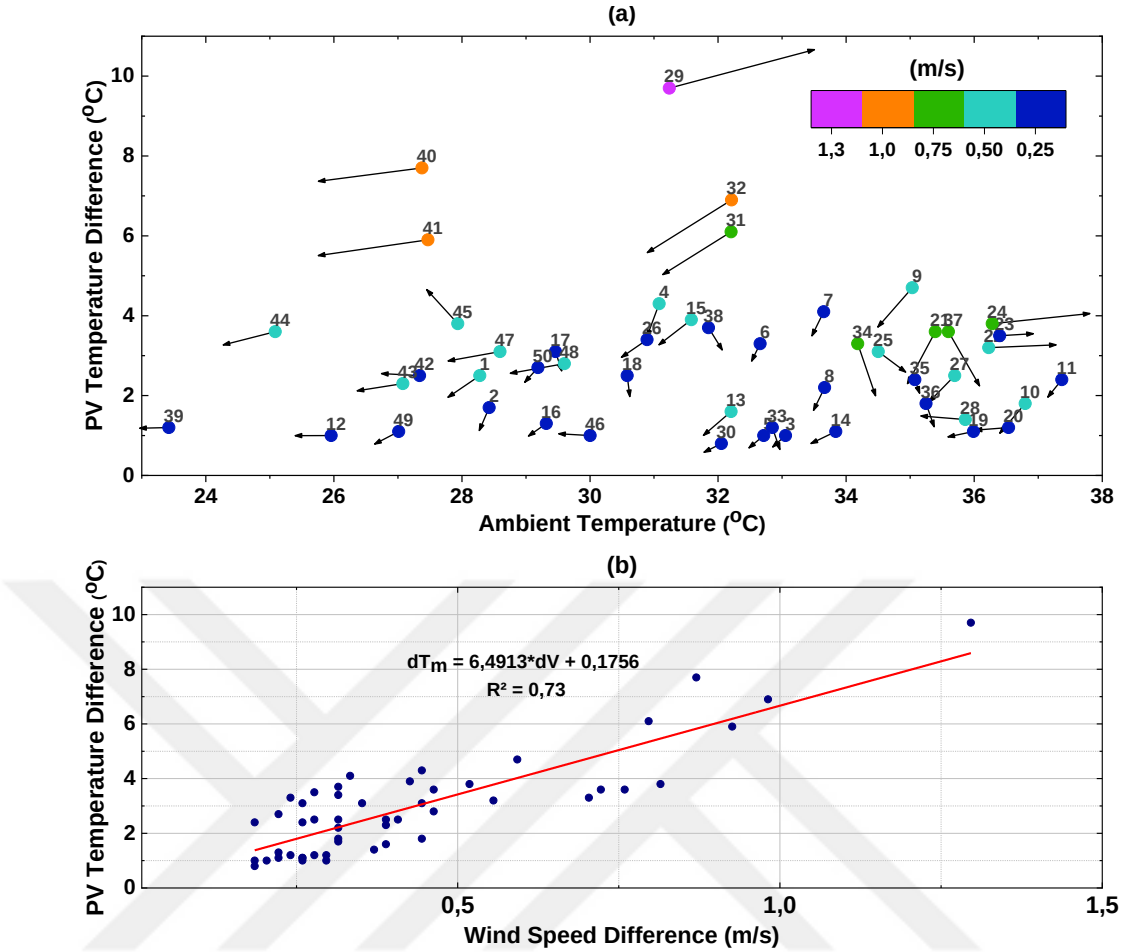
Şekil 4.6 rüzgâr hızı artışının iyi bir soğutma etkisi sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. Konuyu daha kapsamlı incelemek için aynı gün içerisinde gerçekleşen; ışınım şiddeti, rüzgâr yönü ve ortam sıcaklığı yaklaşık aynı olan, fakat rüzgâr hızlarının farklı olduğu iki farklı ölçüm çifti bulunarak karşılaştırılmıştır. Bu örnek çiftler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Çizelge 4.3'te yer alan tüm değerler, saha ortalaması olarak hesaplanmıştır. Her örnek durum için verilen güneş ışınımı şiddeti, PV panellerin yanına koyulan ışınım sensörü tarafından ölçülmüş olup verilen bu değerler, dizi düzleminde ölçülen küresel ışınımı temsil etmektedir. Dolayısıyla, herhangi bir aktarma modeli veya ek hesaplamaya ihtiyaç duyulmamaktadır.

Çizelge 4.3. Eşleştirilmiş 50 çift olay için Güneş radyasyonu, rüzgâr yönü, (T_{amb}), rüzgâr hızı ve (T_m) değerleri.

	Yüksek rüzgâr hızı olan vakalar						Düşük rüzgâr hızı olan vakalar					
Vaka	Tarih, y-a-g s:d	Radyasyon (W/m²)	Rüzgâr Yönü	T_{amb} (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	T_m (°C)	Tarih, y-a-g s:d	Radyasyon (W/m²)	Rüzgâr Yönü	T_{amb} (°C)	Rüzgâr Hızı (m/s)	T_m (°C)
1	2023-06-25 12:15:00	850	42,13	28,29	1,44	51,6	2023-06-25 12:00:00	841	43,00	28,27	1,06	54,1
2	2023-06-26 12:30:00	855	15,00	28,59	1,00	64,3	2023-06-26 12:15:00	846	15,00	28,26	0,69	66,0
3	2023-07-05 15:15:00	768	35,00	32,84	0,80	57,3	2023-07-05 15:30:00	763	35,00	33,26	0,61	58,3
4	2023-07-06 13:00:00	718	13,00	30,78	1,00	55,4	2023-07-06 13:15:00	713	13,00	31,38	0,56	59,7
5	2023-07-07 12:30:00	833	36,53	32,68	0,91	63,7	2023-07-07 12:15:00	830	37,00	32,75	0,70	64,7
6	2023-07-12 13:00:00	860	17,00	32,54	1,20	54,8	2023-07-12 13:15:00	864	17,00	32,78	0,96	58,1
7	2023-07-12 13:45:00	859	17,00	33,56	1,20	59,4	2023-07-12 14:00:00	851	17,00	33,74	0,87	63,5
8	2023-07-13 11:30:00	749	17,00	33,62	0,89	60,3	2023-07-13 11:45:00	758	17,00	33,71	0,57	62,5
9	2023-07-14 12:15:00	817	29,40	34,74	1,56	56,3	2023-07-14 12:30:00	824	28,00	35,32	0,96	61,0
10	2023-07-14 13:00:00	854	28,00	36,60	0,91	67,1	2023-07-14 13:15:00	845	28,13	37,00	0,46	68,9
11	2023-07-14 14:15:00	844	25,07	37,74	0,72	66,5	2023-07-14 13:15:00	845	28,13	37,00	0,46	68,9
12	2023-07-17 12:15:00	853	88,33	26,11	1,06	71,1	2023-07-17 12:30:00	858	91,07	25,80	0,76	72,1
13	2023-07-18 13:15:00	903	36,00	32,32	0,89	59,4	2023-07-18 13:30:00	896	35,80	32,09	0,50	61,0
14	2023-07-19 13:15:00	893	51,87	33,79	0,98	63,1	2023-07-19 13:30:00	891	52,47	33,89	0,72	64,2
15	2023-07-24 13:15:00	916	34,33	31,40	1,43	52,8	2023-07-24 13:30:00	918	43,60	31,77	1,00	56,7
16	2023-07-30 12:30:00	864	42,27	29,60	0,98	59,8	2023-07-30 12:15:00	852	41,00	29,03	0,76	61,1
17	2023-07-31 13:15:00	863	340,67	29,27	1,63	54,8	2023-07-31 13:00:00	863	356,67	29,66	1,37	57,9
18	2023-08-02 12:30:00	827	356,33	30,37	1,52	49,7	2023-08-02 12:45:00	827	355,00	30,80	1,24	52,2
19	2023-08-03 13:15:00	854	66,60	35,93	1,72	68,1	2023-08-03 13:30:00	850	76,07	36,05	1,50	69,2
20	2023-08-03 13:45:00	844	80,07	36,39	1,56	68,0	2023-08-03 14:00:00	837	85,73	36,69	1,28	69,2
21	2023-08-05 14:15:00	809	18,93	35,30	1,57	57,8	2023-08-05 14:30:00	801	18,00	35,49	0,85	61,4
22	2023-08-06 13:30:00	826	266,93	36,39	2,80	53,1	2023-08-06 12:45:00	821	265,27	36,06	2,24	56,3
23	2023-08-06 13:45:00	831	263,20	36,33	2,57	50,0	2023-08-06 13:15:00	835	265,93	36,47	2,30	53,5
24	2023-08-06 15:15:00	732	259,20	36,23	3,24	48,7	2023-08-06 15:00:00	740	261,73	36,34	2,43	52,5
25	2023-08-07 15:45:00	687	320,00	34,58	1,00	52,8	2023-08-07 16:00:00	684	320,00	34,43	0,65	55,9
26	2023-08-08 11:45:00	849	42,80	31,20	1,00	51,5	2023-08-08 11:30:00	844	41,53	30,58	0,69	54,9
27	2023-08-24 14:15:00	698	27,27	35,82	1,04	60,9	2023-08-24 14:00:00	708	35,33	35,57	0,63	63,4
28	2023-08-26 13:45:00	732	91,87	35,82	1,00	69,4	2023-08-26 13:30:00	731	102,67	35,91	0,63	70,8
29	2023-08-27 14:15:00	687	252,40	31,12	1,76	51,8	2023-08-27 13:45:00	697	241,47	31,36	0,46	61,5
30	2023-08-29 13:15:00	724	51,00	32,04	0,76	65,1	2023-08-29 13:30:00	721	51,00	32,06	0,57	65,9
31	2023-08-29 13:45:00	720	38,87	32,36	1,56	59,0	2023-08-29 13:15:00	724	51,00	32,04	0,76	65,1
32	2023-08-29 13:45:00	720	38,87	32,36	1,56	59,0	2023-08-29 13:30:00	721	51,00	32,06	0,57	65,9
33	2023-08-30 12:15:00	686	348,00	33,03	1,13	58,7	2023-08-30 12:00:00	674	348,00	32,67	0,83	59,9
34	2023-08-30 13:00:00	693	348,00	34,38	1,33	57,8	2023-08-30 12:45:00	680	348,00	33,98	0,63	61,1
35	2023-08-30 14:00:00	694	348,00	35,23	1,30	57,2	2023-08-30 13:30:00	691	348,00	34,91	1,11	59,6
36	2023-08-30 14:15:00	684	347,60	35,39	1,56	58,1	2023-08-30 13:45:00	693	348,00	35,11	1,24	59,9
37	2023-08-30 14:30:00	665	341,67	35,48	1,41	57,6	2023-08-30 14:45:00	652	339,00	35,71	0,65	61,2
38	2023-08-31 11:45:00	681	339,00	31,66	1,30	55,4	2023-08-31 12:00:00	686	339,00	32,04	0,98	59,1
39	2023-09-08 09:00:00	112	83,93	23,29	1,63	27,0	2023-09-08 09:15:00	117	91,47	23,56	1,39	28,2
40	2023-09-08 11:15:00	806	82,33	27,18	2,04	46,1	2023-09-08 12:15:00	810	74,40	27,57	1,17	53,8
41	2023-09-08 16:30:00	210	74,53	27,27	1,96	36,9	2023-09-08 12:45:00	203	79,53	27,67	1,04	42,8
42	2023-09-08 13:45:00	409	100,67	27,31	2,06	46,9	2023-09-08 11:45:00	420	89,00	27,36	1,74	49,4
43	2023-09-08 17:15:00	154	76,60	26,75	2,04	32,7	2023-09-08 16:45:00	163	74,87	27,41	1,65	35,0
44	2023-09-13 12:00:00	628	67,73	25,33	0,81	47,0	2023-09-13 11:45:00	622	68,00	24,84	0,35	50,6
45	2023-09-14 13:15:00	670	148,87	27,80	1,28	46,6	2023-09-14 13:30:00	681	151,93	28,07	0,76	50,4
46	2023-09-14 14:15:00	654	95,13	30,10	0,94	54,5	2023-09-14 14:00:00	661	95,00	29,91	0,69	55,5
47	2023-09-15 13:30:00	662	74,00	28,83	0,89	49,8	2023-09-15 13:15:00	659	74,00	28,36	0,44	52,9
48	2023-09-15 13:45:00	669	74,00	29,13	1,06	50,7	2023-09-15 14:00:00	660	74,00	30,07	0,59	53,5
49	2023-09-16 12:15:00	619	50,00	26,77	0,70	48,7	2023-09-16 12:30:00	617	50,00	27,26	0,44	49,8
50	2023-09-16 14:15:00	623	28,07	29,15	1,06	48,9	2023-09-16 14:00:00	632	30,73	29,23	0,83	51,6

Şekil 4.7-(a), her bir eşleştirilmiş veri noktası için yüksek ve düşük rüzgâr koşullarında X ekseninde ortam sıcaklığını, Y ekseninde ise artan rüzgâr hızına bağlı olarak PV panel sıcaklığındaki farkı (daha yüksek rüzgâr hızlarının soğutma etkisi) göstermektedir. Okların yönü ortalama rüzgâr yönünü gösterirken, okların uzunluğu ve rengi her bir eşleştirilmiş veri seti için rüzgâr hızlarındaki farkı temsil etmektedir. Büyük oklar ve pembe renkler yüksek rüzgâr hızı farklarındaki soğutma etkisini gösterirken, küçük oklar ve mavi renkler düşük rüzgâr hızı farklarındaki soğutma etkisini göstermektedir. Şekil 4.7-(a)'da görülebileceği gibi, rüzgâr hızı 0,5 m/s'nin altında olduğunda PV panelin soğuması 1-3 °C arasında kalırken, rüzgâr hızı 0,5 m/s'yi aştığında soğutma etkisi 3-7 °C arasında değişmektedir. İncelenen durumlarda en büyük soğuma etkisi 1,30 m/s rüzgâr hızı farkıyla 9,7 °C'de ölçülmüştür. Bu, rüzgâr hızı ile PV panel sıcaklığındaki azalmayı temsil eden soğutma etkisi arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

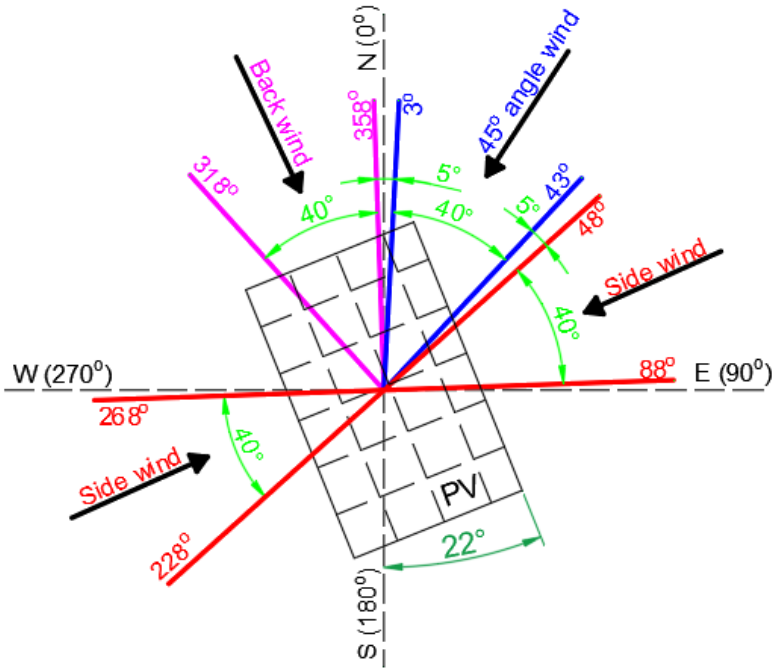
Durumu daha iyi değerlendirmek için, Şekil 4.7-(b), rüzgâr hızı farkı ile PV paneldeki soğutma etkisi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 4.7-(b), rüzgâr hızı farkı arttıkça, benzer eşleştirilmiş olaylardan türetilen doğal soğutma etkisinin orantılı olarak arttığını göstermektedir.



Şekil 4.7. Rüzgâr hızı artışının PV panel soğutması üzerindeki etkisi. (a) 50 eşleşen verinin şematik gösterimi, (b) Rüzgâr hızı farkı ile soğutma arasındaki ilişki.

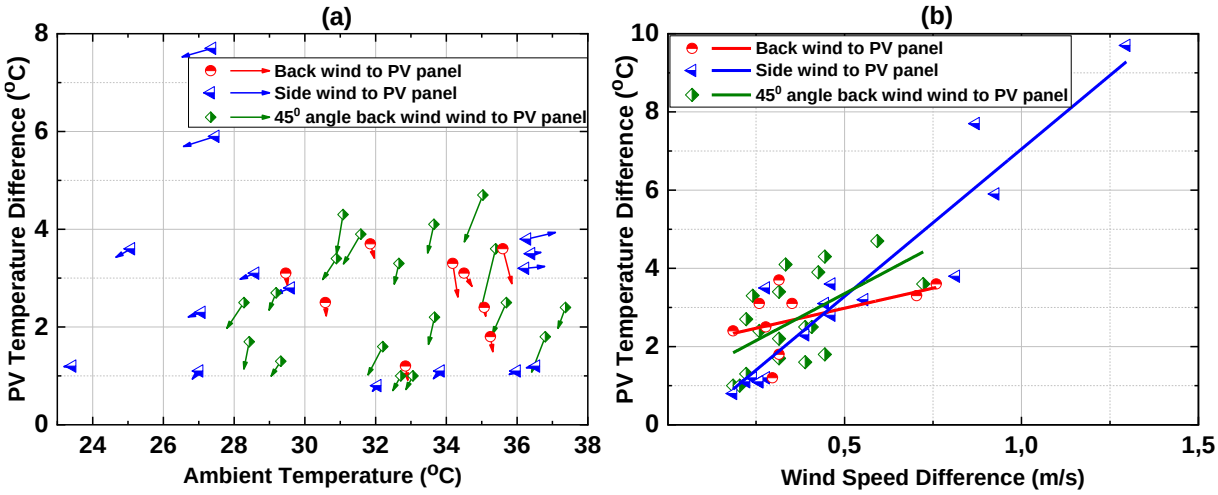
Rüzgâr yönleri, Şekil 4.3'te ki rüzgâr gülünde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, rüzgârın N (Kuzey) yönünde 0^0, E (Doğu) yönünde 90^0, S (Güney) yönünde 180^0 ve W (Batı) yönünde 270^0 açılarında estiği görülmektedir. Rüzgâr gülünden anlaşılacağı gibi, hâkim rüzgâr yönü ağırlıklı olarak kuzeydoğudan (% 60) gelmektedir. Bu nedenle, PV paneline çarpan rüzgâr, panelin ya arkasından ya sağ yanından ya da arka taraftan 45^0'lik bir açıyla esmektedir. Bu duruma göre, örnek koşullar üç ana rüzgâr yönüne göre yeniden değerlendirilecektir. Çatı yapısı nedeniyle paneller, güney yönünden 22^0 doğuya bakacak şekilde yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 4.8). Buna göre, rüzgâr yönü 318^0 ile 358^0 arasında olduğunda panelin arkasından, 3^0 ile 43^0 arasında olduğunda arkasından 45^0 açıyla, 48^0 ile 88^0 arasında olduğunda sağ yanından ve 228^0 ile 268^0 arasında olduğunda sol yanından esmektedir (bkz. Şekil 4.8). Yönler arasında 5^0'lik bir tampon bölge de göz önünde bulundurulmuştur (Waterworth & Armstrong, 2020). Bu değerlendirmeye göre, 50 eşleştirilmiş örnek olaydan (bkz.

Çizelge 4.3) 9'unda rüzgâr PV panelinin arkasından, 18'inde 45^0 açıyla arkadan ve 16'sında PV panelinin yanından estiği görülmüştür.



Şekil 4.8. PV panelin çatı üzerindeki yerleşimi ve rüzgâr geliş açıları

Şekil 4.9, PV panelin arkasından, panelin arkasından 45^0 açı ile ve yandan gelen rüzgâr çifti olaylarının analizini içermektedir. Şekil 4.9-(a)'da üç farklı yönden gelen rüzgâr durumları için benzer soğutma etkileri farklı renklerle gösterilmiştir. Okların yönü ortalama rüzgâr yönünü göstermektedir. Şekil 4.9-(b)'de üç farklı yöne göre rüzgâr hızı farklılıklarının soğutmaya etkisi gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.9-(b) incelendiğinde düşük rüzgâr hızlarında panelin arkasından gelen rüzgârlar daha iyi bir soğutma sağlarken, rüzgâr hızının artışıyla beraber yan rüzgârlar daha iyi bir soğutma performansı göstermektedir. Böylece yüksek yan rüzgârlarda santral veriminde bir artış beklenmektedir. Bu durum TOFAŞ PV santralinin çatı yapısından kaynaklanmaktadır (bkz. Şekil 4.1). Arkadan gelen rüzgârlar çatı eğiminin etkisi (17.8^0) ve paneller ile çatı arasındaki mesafenin (15 cm) çok düşük olmasından dolayı PV panellerin arkasına girerken etkisini yitirmektedir. Aynı zamanda rüzgâr arkadan geldiğinde, çatı geometrisinden dolayı bir ön sıraya geçerken akışın bozulması ve her sıra geçişinde rüzgârın etkisinin azalması muhtemeldir. Yan rüzgârlarda ise panel yüzeylerinden akışta bir zorluk yaşanmayacak, fakat yine panellerin arkasından geçerken uzun panel sıraları dolayısıyla rüzgâr akışının olumsuz etkilenmesi olasıdır.



Şekil 4.9. Farklı yönden gelen rüzgârın, PV panel soğutmasına etkisi. (a) rüzgâr geliş yönüne göre eşleştirilmiş örnek olaylar, (b) PV panel soğutması ile yöne göre rüzgâr hızı farklılıkları arasındaki ilişki.

4.1.2. Ölçüm aletleri

Aşağıdaki bölümlerde, bu çalışmada verileri ölçmek için kullanılan ana cihazların özellikleri, tanıtılmaktadır. Ölçüm yapılan tesis aktif olarak kullanılmaktadır ve tesis yetkilileri tek bir noktadan ölçüm almaktadır (bkz. Şekil 4.2). Ölçüm aletleri Şekil 4.1'de görülmektedir. PV sıcaklık sensörü panelin altına monte edilmiştir. Rüzgâr ölçüm verileri 1 dakikalık, diğer tüm veriler 15 dakikalık aralıklarla alınmaktadır.

4.1.2.1. Rüzgâr ölçümü

Hava durumu istasyonu iki bileşen içerir: sensör paketi ve konsol. Sensör paketi, pasif veya aspire edilmiş bir radyasyon kalkanı içindeki sensör arayüzünü, anemometreyi, sıcaklık ve nem sensörlerini içerir. Çalışma sıcaklığı -40 °C ila +65 °C aralığındadır ve ±0.1 °C doğrulukta ölçümler yapabilmektedir. Rüzgâr hızı sensörü katı hal manyetik sensör, rüzgâr yönü sensörü ise potansiyometreli rüzgâr gülüdür. Rüzgâr güncellemelerini 2.5 saniye, sıcaklık güncellemelerini 10 saniye aralıkla yapmaktadır. Ayrıca sensör paketi içerisinde sıcaklık sensörlerini güneş radyasyonundan ve yayılan veya yansıyan ısı kaynaklarından korumak için bir adet pasif radyasyon koruması mevcuttur. Hava durumu istasyonu çatının en üst noktasından yaklaşık olarak 3 m yükseğe yerleştirilmiştir. Ölçülen veriler 1 dakika aralıklar ile sürekli kayıt altına alınmaktadır.

Ortam sıcaklığını ölçmek için IEC 60751:2022'ye göre A Sınıfı bir ortam sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Fakat ortam sıcaklık sensörü PV panelin hemen yanına yerleştirildiğinden sensörden alınan ölçümler PV panele çarpıp ısınan havanın sıcaklığını göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada hava durumu istasyondan alınan sıcaklık verileri, ortam sıcaklığı (T_{amb}) olarak kullanılmıştır.

4.1.2.2. Sıcaklık ölçümü

Panel sıcaklığını ölçmek için kullanılan panel sıcaklık sensörü, bir PT1000 probu kullanarak güneş panellerinin sıcaklığını (°C) cinsinden ölçer. Kullanılan sensör IP67 koruma sınıfında olup, ölçüm aralığı -40 °C ila +85 °C, doğruluk ise ± 0.1 ºC'dir. Panel sıcaklık sensörü güneş panelinin arka tarafına yerleştirilmiştir. Bu çalışmada panel sıcaklık sensöründen alınan veriler PV panel sıcaklığı (T_m) olarak gösterilmektedir. Kullanılan PT1000 probu, iki tabaka arasında EVA kaplamanın içine monte edilmiştir. Böylece IEC 61724 standardında belirtildiği gibi panel arka yüz malzemesi ile aynı ısı transfer özelliklerine sahip olunacağı için daha doğru bir ölçüm yapılmasına imkân vermektedir.

4.1.2.3. Işınım ölçümü

PV santralinin ışınımı ölçmek için bir ışınım sensörü kullanılmaktadır. Işınım sensörü dahili sıcaklık sensörü de içermektedir. Fotovoltaik referans hücreli PV piranometre olarak adlandırılan ışınım sensörü, PV santralin performans oranını hesaplamak için kullanıcıya (W/m²) cinsinden ışınım verileri sağlar. Işınım Sensörü, IEC 61724 ve IEC 60904 standartlarına dayalı olarak üretilmiştir. Bu sensörlerin ışınım aralığı 0-1600 W/m², belirsizlik 2 %'den az, çözünürlük 0.1 W/m², tepki süresi 1 s ve çalışma sıcaklığı -40 °C ila +85 °C'dir.

4.1.2.4. PV Paneller

Kullanılan PV paneller IEC 62804 standardında IP 68 koruma sınıfında üretilmiştir. Hücre tipi monocrystal PERC half-cut, kullanılan cam tipi 3.2 mm AR coated tempered glass olup 144 hücreden oluşmaktadır. Panellerin maksimum gücü 545 Wp, güç toleransı 0/+5 Wp, maksimum güç gerilimi 42.13 V, maksimum güç akımı 12.96 A, hücre çalışma sıcaklığı -40 °C ila +85 °C ve maksimum sistem gerilimi DC 1500 V'dir.

Tesiste kullanılan PV panellerin özellikleri ürün kataloğunda görüldüğü şekliyle Şekil 4.10'da verilmektedir.

Mekanik Özellikler

Boyutlar	2,279 x 1,134 x 35 mm
Ağırlık	27.0 kg
Hücre Tipi	Monokristal PERC 182x 91 mm (144 adet)
Busbar Sayısı	10 adet
Cam	3.2 mm AR Kaplamalı Tamperli Cam
Çerçeve	Eloksallı Alüminyum Alaşım
Bağlantı Kutusu	IP68, 3 diyotlu - MC4 Uyumlu
Çıkış Kabloları	4.0 mm^2
Mekanik Dayanım	Ön Taraf 5,400 Pa / Arka Taraf 2,400 Pa
Paketleme Adedi	Bir palette 31 adet panel

Elektriksel Özellikler	STC	NOCT
Maksimum Güç (Pmax)	545 Wp	412 Wp
Açık Devre Gerilimi (Voc)	49.75 V	46.55 V
Kısa Devre Akımı (Isc)	13.93 A	11.13 A
Maksimum Güç Gerilimi (Vmax)	41.80 V	39.20 V
Maksimum Güç Akımı (Imax)	13.04 A	10.51 A
Modül Verimi	21.10%	
Güç Toleransı	+5 W	
Maksimum Sistem Gerilimi	1,500 V	
Maksimum Seri Sigorta Değeri	25 A	

STC: Işınım 1000 W/m^2, Hava Kütlesi 1.5, Hücre Sıcaklığı 25 °C
NOCT: Işınım 800 W/m^2, Ortam Sıcaklığı 20 °C, Hava Kütlesi 1.5, Rüzgar Hızı 1m/s

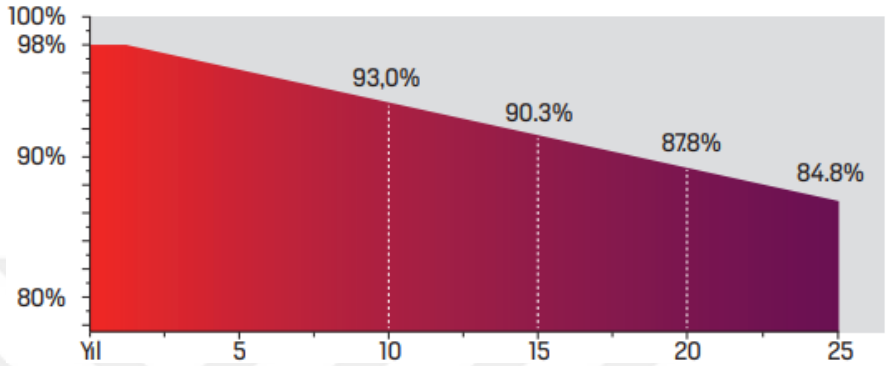
Termal Özellikler

Pmax Sıcaklık Katsayısı	-0.35 %/ °C
Voc Sıcaklık Katsayısı	-0.27 %/ °C
Isc Sıcaklık Katsayısı	+0.05 %/ °C
İşletme Sıcaklığı	-40~+85 °C
NOCT (Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı)	45±2 °C

Şekil 4.10. Arçelik PV panel özellikleri (Arçelik, 2021)

Paneller, güneş ışığına maruz kaldıkça yıllık olarak belirli bir oranda verim kaybeder. Bu oran, tipik olarak yılda % 0,5 ila % 1 arasında değişir. Örneğin, ilk yıl % 100 verimle çalışan bir panel, 20 yılın sonunda % 80-90 seviyelerine kadar düşebilir. Bu

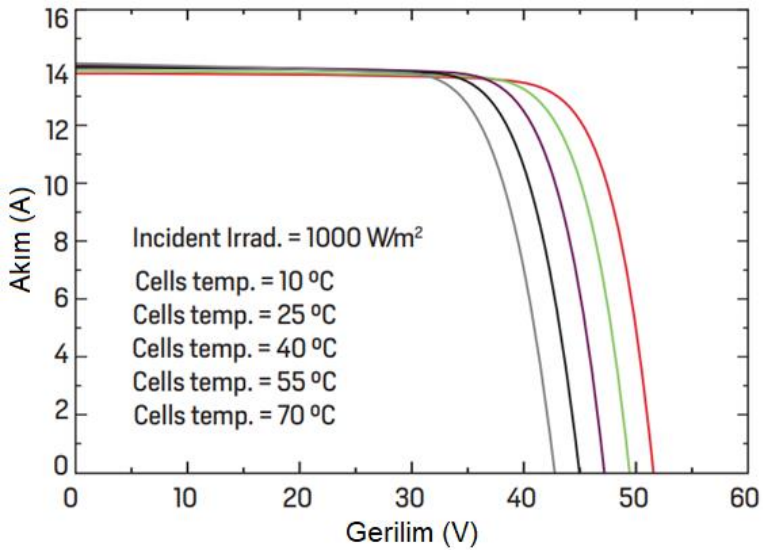
kayıp oranı, panel kalitesine ve çevresel etmenlere göre değişebilir. Kirlenme, tozlanma, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler de verim kaybına neden olabilir. Örneğin, yüksek sıcaklıklar panel verimini düşürürken, düzenli temizlenmeyen paneller de güneş ışığını yeterince alamayarak verimsiz hale gelir. PV panel verimlerinin yıllar içerisindeki değişimi Şekil 4.11'da verilmiştir.



Şekil 4.11. Arçelik PV panel veriminin yıllara göre değişimi (Arçelik, 2021)

Bu faktörlere bağlı olarak, 20-25 yıllık ömrü olan PV panellerde yıllar içinde kademeli bir verim düşüşü yaşanır, ancak doğru bakım ve çevresel koşullarda panellerin ömrü boyunca kabul edilebilir seviyelerde verim sunması mümkündür.

Tesiste kullanılan Arçelik marka PV panellerin akım-gerilim eğrisinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.12'da gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Arçelik PV panellerin akım-gerilim değerlerinin hücre sıcaklığı ile değişimi (Arçelik, 2021)

4.1.2.5. İnverter (50 kW)

İnverterler IEC 61727 standardında IP 66 koruma sınıfında üretilmiştir. MPPT çalışma gerilim aralığı 200 V ~ 1000 V, nominal giriş gerilimi 600 V, nominal AC aktif güç 50 kW, nominal çıkış gerilimi 400 Vac/480 Vac, , 3 W+(N)+PE, nominal AC şebeke frekansı 50 Hz/60 Hz, nominal çıkış akımı 72,2 A @ 400 Vac, 60.1 A @ 480 Vac, çalışma sıcaklığı aralığı -25 °C ~ 60 °C'dir. İnverter maksimum verimliliği % 98,5 ve Avrupa verimliliği % 98'dir.

4.2. HAD Analizleri

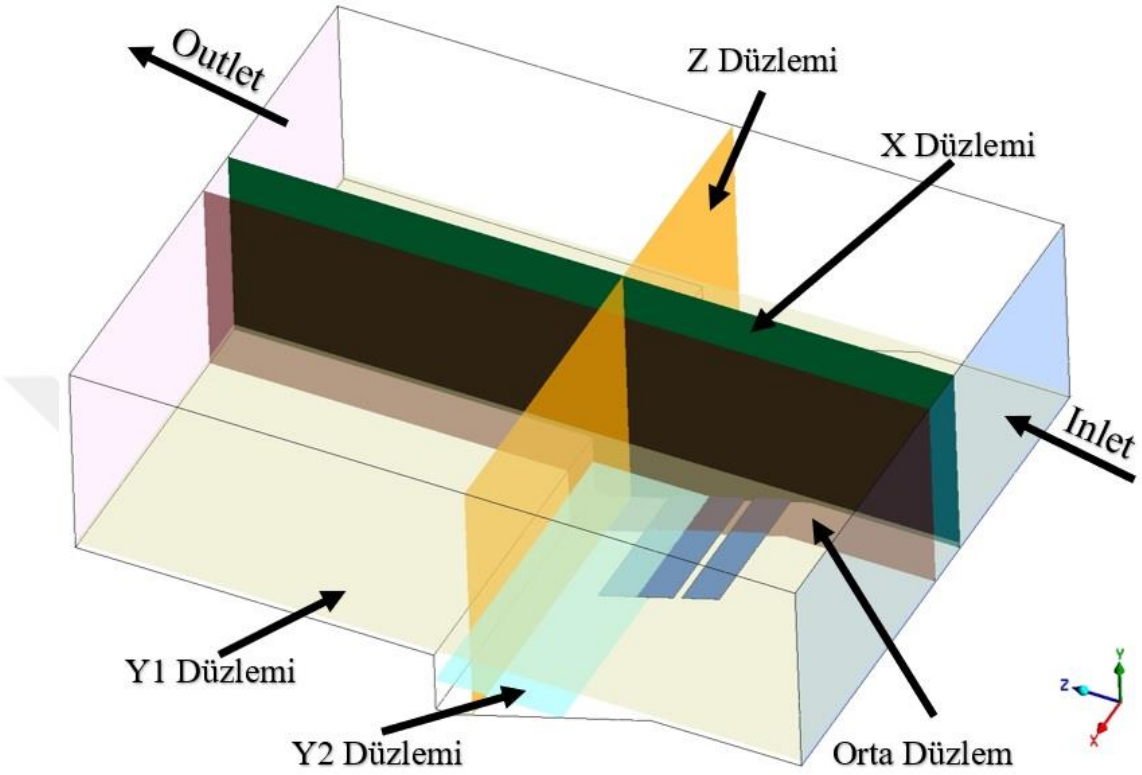
HAD analizlerinin yapıldığı termal model için gerekli PV panel kalınlıkları ve özellikleri literatürden alınarak Çizelge 4.4'te verilmiş ve aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Üstteki yansıma önleyici katman çok ince olduğundan termal analizde dikkate alınmamıştır.
- Bu çalışmada panelin cam ve PV olarak iki malzemeden oluştuğu düşünülerek çözüm yapılmıştır. PV malzeme için dört ayrı katmanın kalınlık toplamları (eva üst + PV + eva alt+ tedlar) kalınlık olarak alınmıştır. Yoğunluk, ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerleri için ağırlıklı aritmetik ortalama değerleri hesaplanmış ve modelde kullanılmıştır (Yigit, Arslanoglu, & Gul, 2023). (L_{PV} = 1,55 mm, ρ_{PV} = 2075,5 kg/m^3, k_{PV}= 59,19 W/mK, Cp_{PV} = 2594,95 J/kgK).
- Panel etrafındaki hava için ρ = 1.225 kg/m^3 , Cp = 1006.43 J/kgK, k = 0.0242 W/mK, μ = 1.7894 *10^{-5} kg/ms alınmıştır.

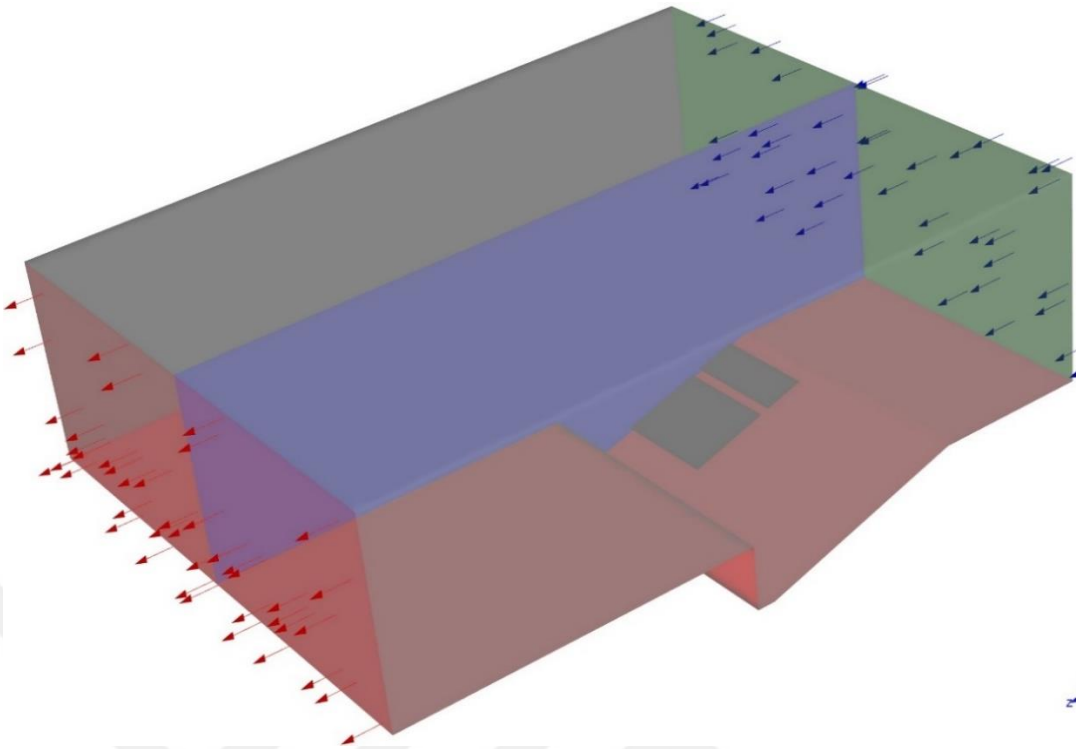
Çizelge 4.4. PV panel katmanlarının kalınlığı ve özellikleri

Malzeme	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (kg/m^3)	Isıl iletkenlik (W/m K)	Özgül Isı (J/kg K)
Cam	3	3000	1,8	500
Eva üst	500*10^{-3}	960	0,35	2090
PV	350*10^{-3}	2330	148	677
Eva alt	500*10^{-3}	960	0,35	2090
Tedlar	200*10^{-3}	1200	0,2	1250

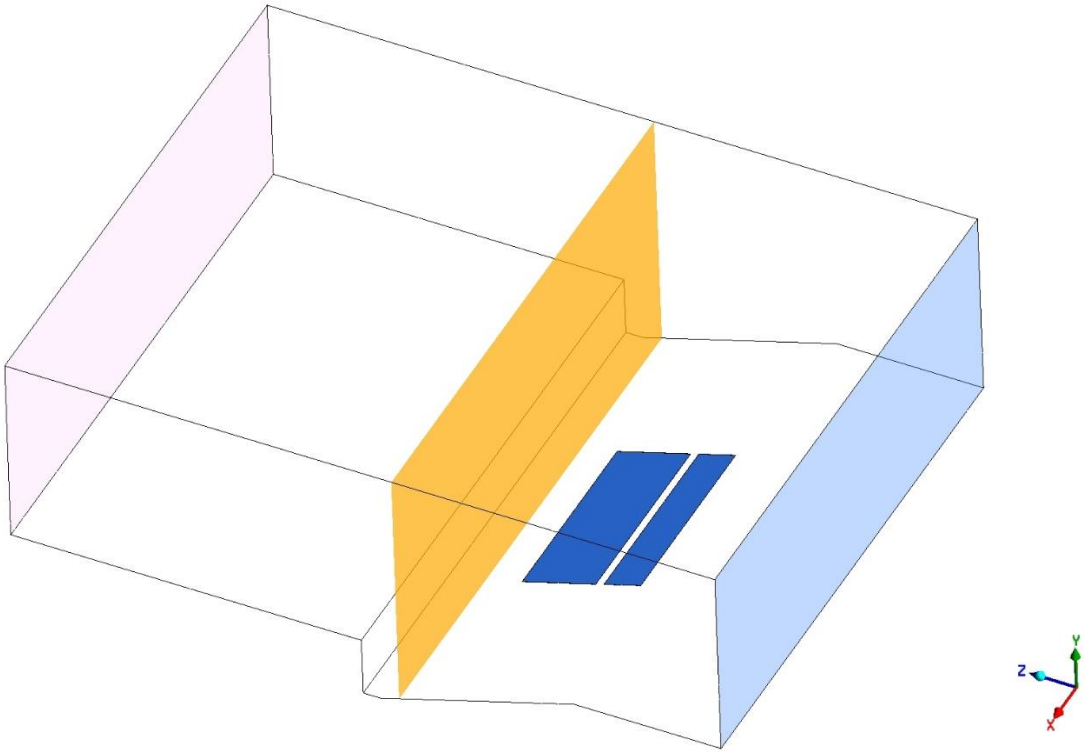
Analiz sonucunda elde edilen sayısal sonuçları değerlendirebilmek amacıyla model içerisinde düzlemler tanımlanmıştır. Tanımlanan tüm düzlemler Şekil 4.13 - Şekil 4.18 aralığında görülmektedir.



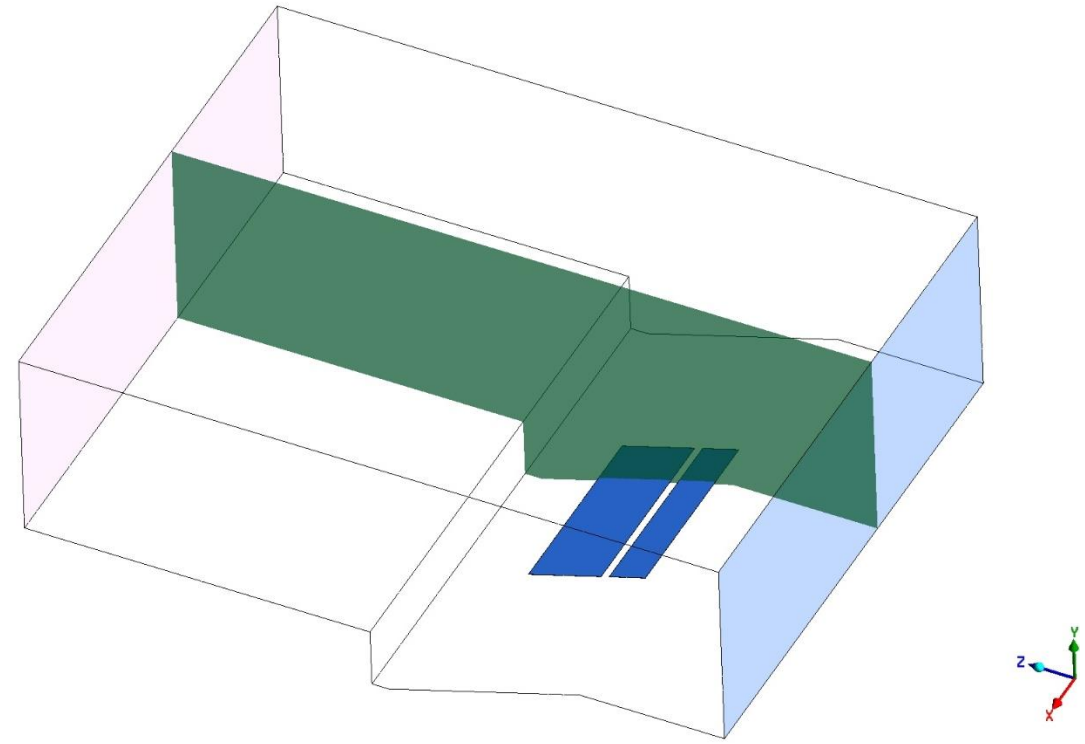
Şekil 4.13. Model üzerinde tanımlanan tüm düzlemler



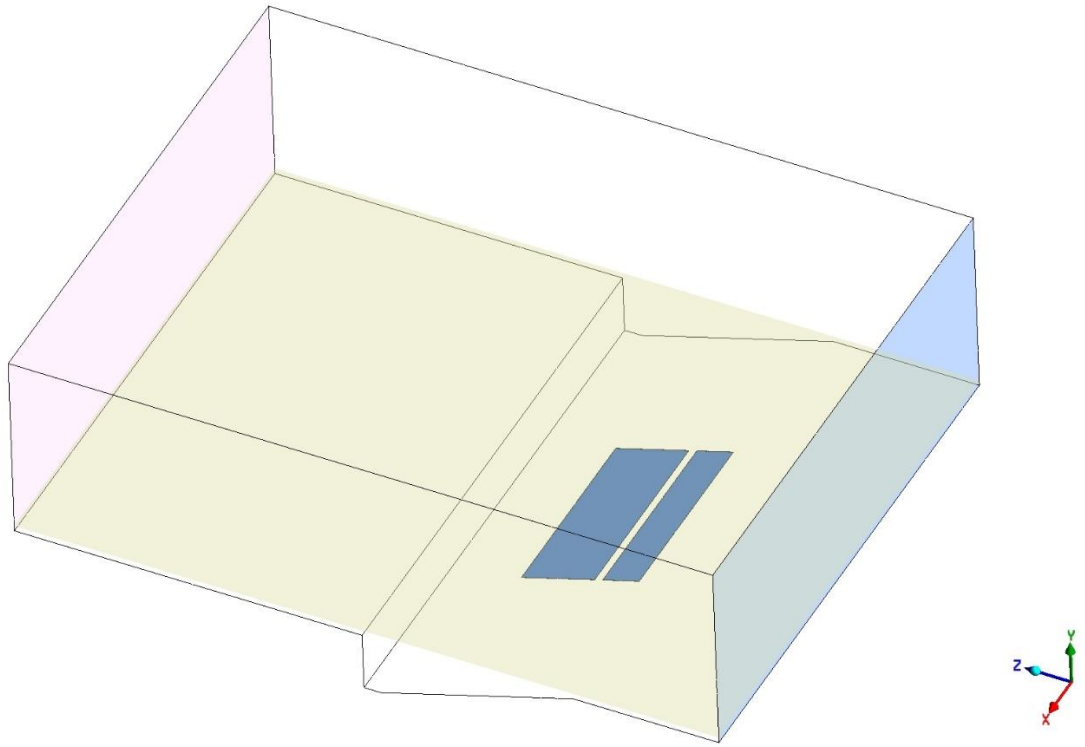
Şekil 4.14. Model üzerinde tanımlanan orta düzlemin konumu



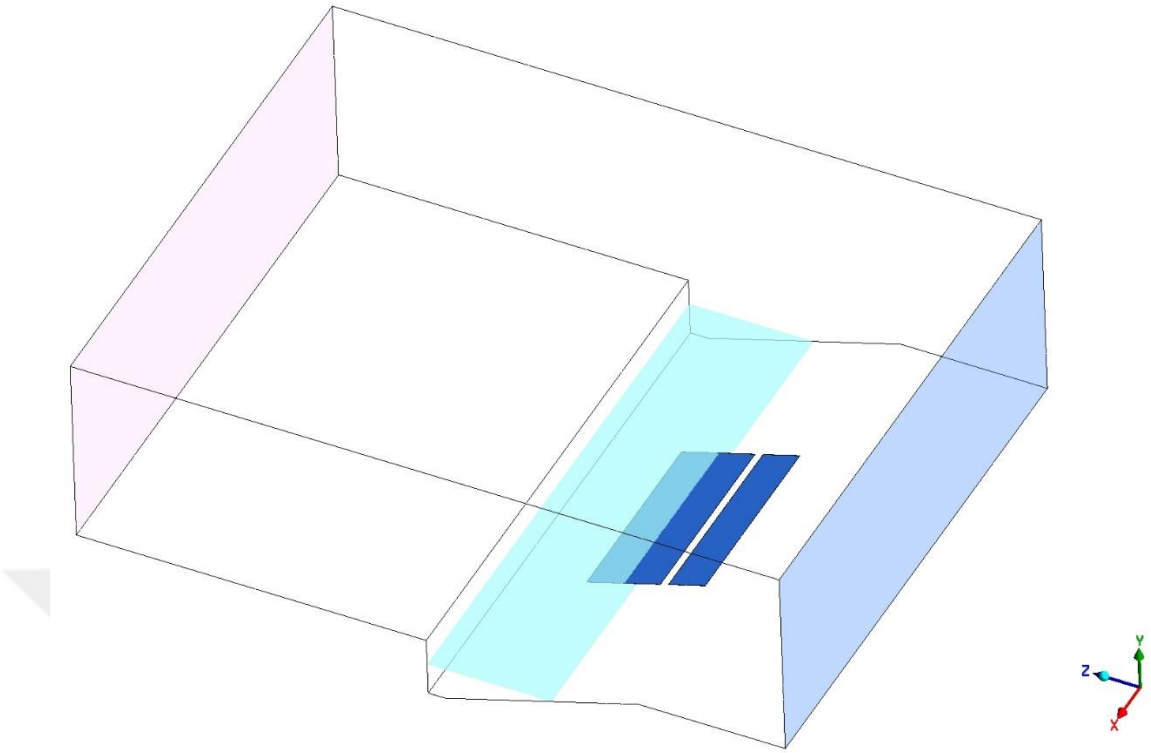
Şekil 4.15. Model üzerinde tanımlanan Z düzleminin konumu



Şekil 4.16. Model üzerinde tanımlanan X düzleminin konumu



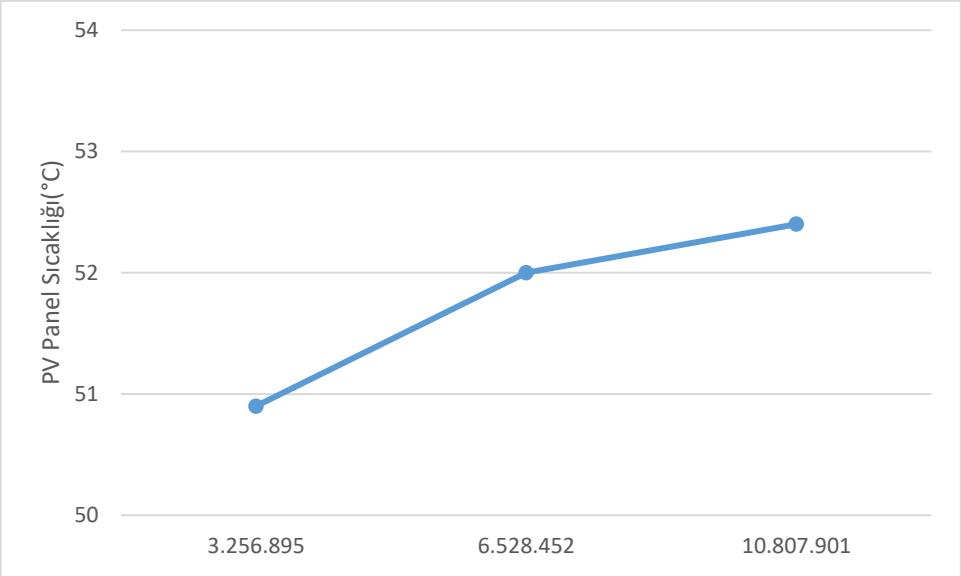
Şekil 4.17. Model üzerinde tanımlanan Y1 düzleminin konumu



Şekil 4.18. Model üzerinde tanımlanan Y2 düzleminin konumu

4.2.1. Optimum Çözüm Ağı Yapısının Elde Edilmesi

Yapılan HAD analizlerini doğrulamak için ağ hassasiyeti çalışması yapılmıştır. Örnek olarak gösterilen ve arka rüzgâr durumunda yapılan bu çalışma, 3.256.895, 6.528.452 ve 10.807.901 hücreden oluşan üç farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.19'de bu üç farklı ağ elemanı ile elde edilen PV panel sıcaklığı değerleri verilmiştir. En kaba ağ yapısı ile yapılan çalışmadaki değerler, orta ve en ince hassasiyetteki ağ yapısında çıkan değerlere göre % 2 - % 3 farklı çıkmıştır. En ince ve orta hassasiyetteki ağ yapısı arasındaki değerlerde kayda değer bir fark olmadığından dolayı en ince ağ sayısına sahip olan 10.807.901 hücreli ağ yapısı ile analizler yapılmıştır. Böylece çözümün ağ yapısından bağımsız olduğu gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Üç farklı ağ yapısı ile yapılan ağ doğrulama çalışması

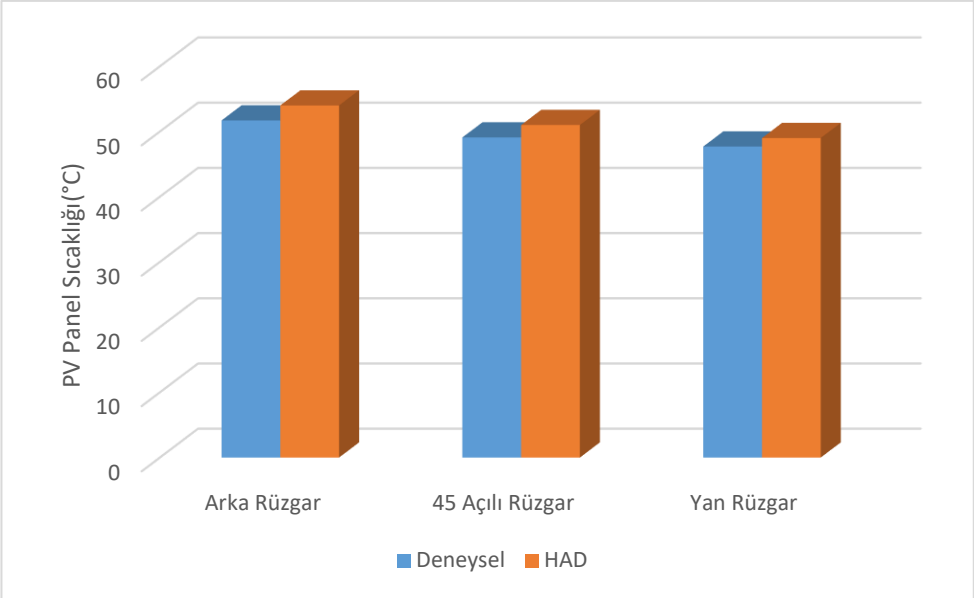
4.2.2. Simülasyonların Doğrulanması

Çizelge 4.5'te TOFAŞ çatı PV tesisinde 1 Temmuz 2023-1 Ekim 2023 tarihleri arasında üç farklı yönden gelen rüzgâr durumlarında yapılan ölçümlerde güneş ışınımının 800 W/m^2, ortam sıcaklığının 30 °C, rüzgâr hızının 2 m/s olduğu tüm durumlara ait PV panel sıcaklığının aritmetik ortalamaları ile aynı şartlar altında üç farklı rüzgâr geliş yönünde yapılan HAD analizleri sonucu bulunan PV panel sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 4.5. Deneysel veriler ve HAD analizlerinde bulunan PV panel sıcaklık değerleri

	Ölçüm Sonuçların Ortalaması (°C)	HAD Analizleri (°C)
Arka Rüzgâr Durumu	51,7	54
45^0 Açılı Rüzgâr Durumu	49,1	51
Yan Rüzgâr Durumu	47,7	49

Yapılan HAD analizlerini doğrulamak için zamandan bağımsız PV sıcaklık değerleri ve bu değerlerin deneysel verilerle karşılaştırılması Şekil 4.20'de gösterilmektedir.



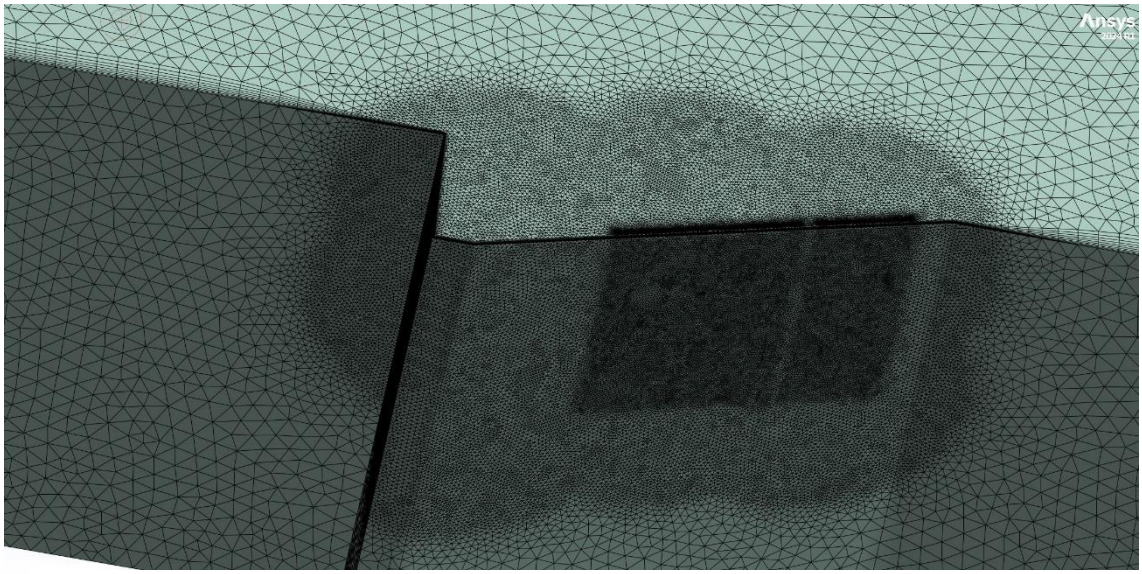
Şekil 4.20. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması çalışması

Hesaplamalar sonucu elde edilen sıcaklık eğrileri deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık eğrileri ile benzer karakteristikler göstermektedir. Hesaplanan sıcaklık değerleri ile deneysel ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri arasındaki fark genel olarak 5 °C'den daha azdır. Bu farkın temel nedenlerinden biri 15 dakikalık veriler kullanılarak ölçümler alındığından dolayı, rüzgârın anlık değişimlerinin alınan ölçümlere tam olarak yansımamış olmasıdır.

4.2.3. Arka rüzgâr durumu

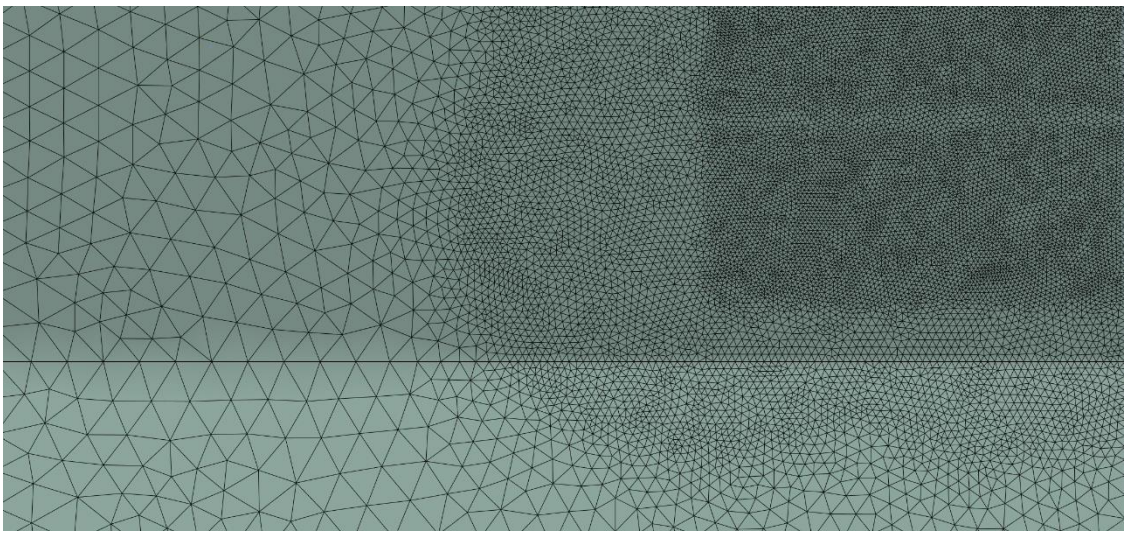
4.2.3.1. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısı

Laminer veya türbülanslı fark etmeksizin, akışkan akışı problemlerini çözmek hesaplama açısından oldukça yoğun bir hesap yapmayı gerekli kılmaktadır. Bu tür problemler için ince bir ağ yapısı ve birçok değişkenin çözülmesi gerekir. İdeal olarak, bu tür analizlerde çok güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulur. Ancak, daha büyük üç boyutlu modellerde simülasyonlar saatler, hatta günler sürebilir. Bu nedenle, akışın tüm ayrıntılarını yakalayacak şekilde mümkün olduğunca basit bir ağ yapısı kullanmalıyız. Bu nedenle akış alanında Tetrahedral (4 yüzlü) ağ yapısı tercih edilmiştir. Arka rüzgâr durumundaki ağ yapısı Şekil 4.21 – Şekil 4.26 aralığında görülmektedir.



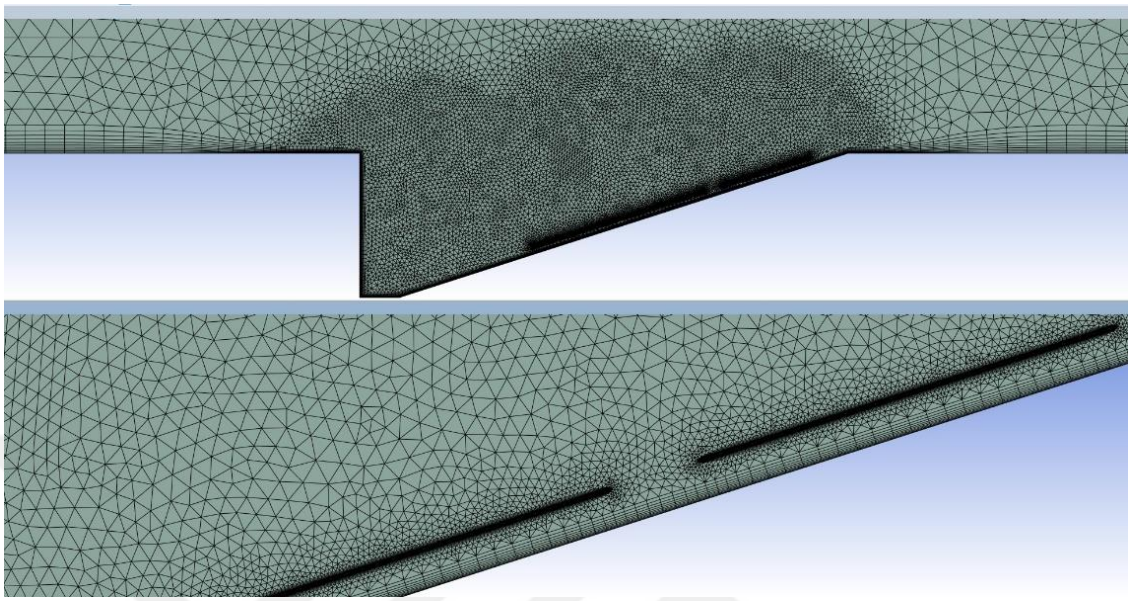
Şekil 4.21. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısı-1

Arka rüzgâr durumunda çatı geometrisinden dolayı rüzgâr akışı aşırı türbülanslı bir hal almaktadır. Böyle bir akışı çözmek için çok sık bir ağ yapısına gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle arka rüzgâr durumundaki HAD çalışmasında panel etrafındaki türbülans bölgelerinde ağ yapısı daha da sıkılaştırılmıştır. Bu durum, ağ elemanı sayısını çözümü çok zorlaştıracak şekilde arttırdığından dolayı panel orta düzlemi simetrik olarak modellenmiş ve böylece kullanılan ağ elemanı sayısı yarıya düşürülmüştür. Bu şartlar altında dahi en zor çözüm arka rüzgâr durumunda ortaya çıkmıştır.



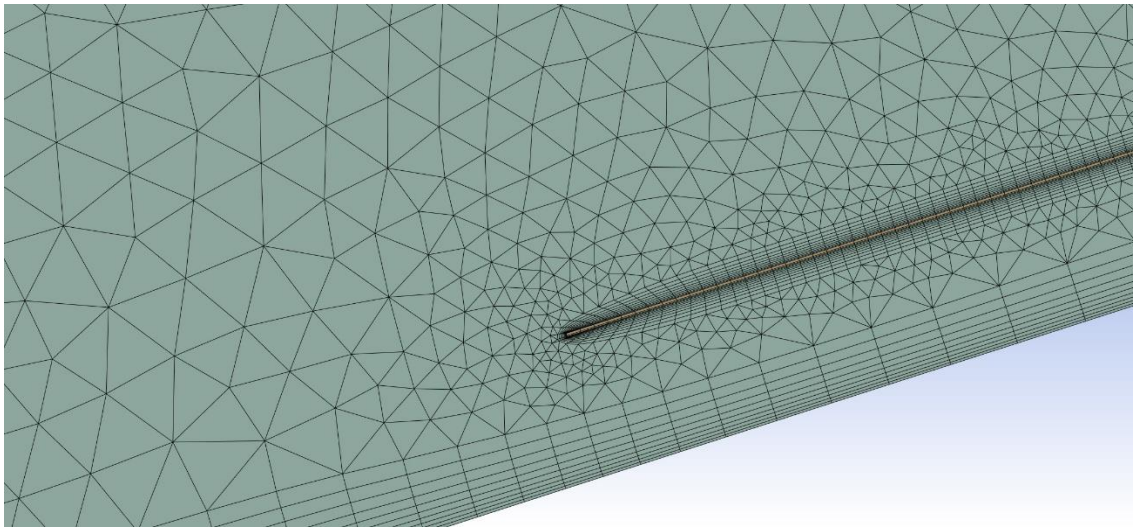
Şekil 4.22. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısı-2

Arka rüzgâr durumunda Tetrahedral (4 yüzlü) ağ yapısı tercih edilmiş ve 10.807.901 hücreli hacim elemanı kullanılarak analizler yapılmıştır.



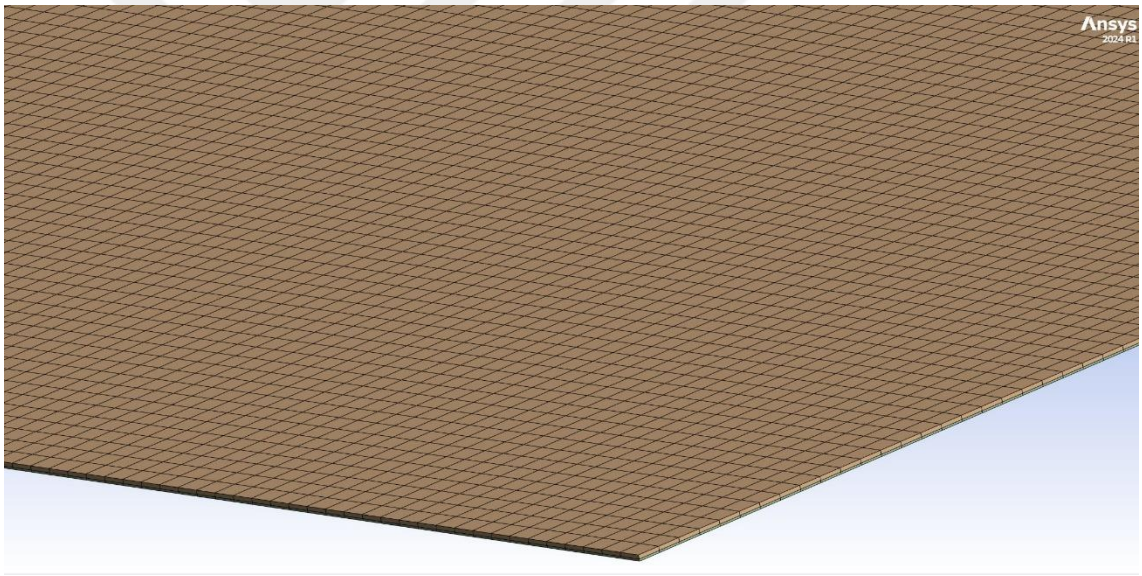
Şekil 4.23. Arka rüzgâr durumunda ağ yapısının kesit görüntüsü

Birçok akış probleminde, hız alanının duvara paralel yönde yavaşça değiştiğini, ancak duvara dik yönde daha hızlı değişim gösterdiğini gözlemleyebiliriz. Özellikle geçiş bölgesinde bu etki daha belirgindir. Bu nedenle sınıra yakın bölgelerde sınır tabakası ağlarının kullanılması gerekir. Sınır tabakası ağları, duvar yüzeylerine yakın bölgelerde ince ve uzun hücreler ekler: iki boyutlu analizlerde ince dikdörtgenler, üç boyutlu analizlerde ise üçgen prizmalar kullanılır. Bu yüksek en-boy oranına sahip elemanlar, sınıra paralel yöndeki hesaplama noktalarının sayısını azaltırken, dik yöndeki akış hızındaki değişimleri çözmek için yeterli çözünürlüğü sağlar.

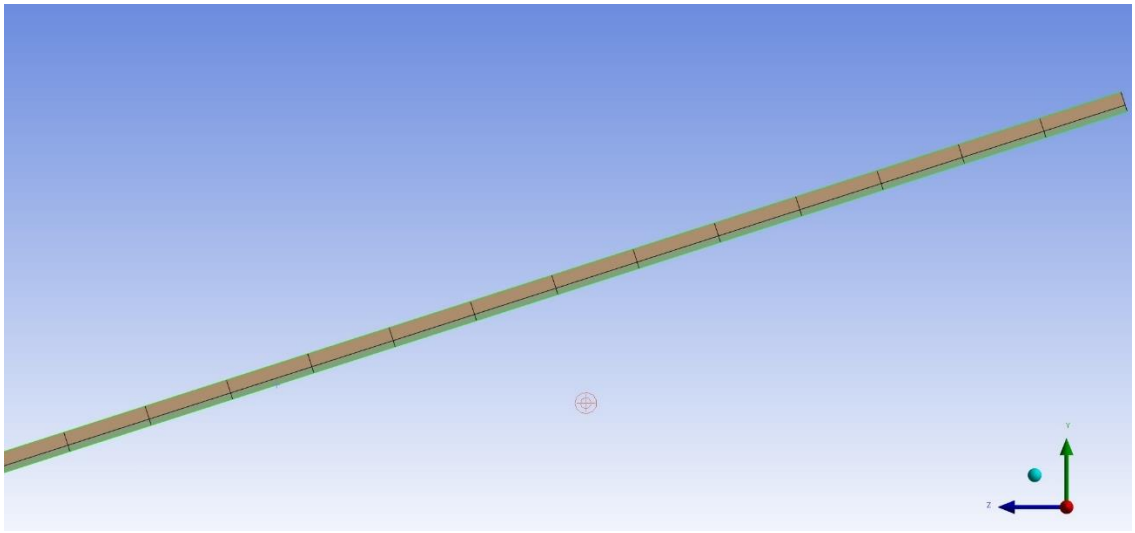


Şekil 4.24. Arka rüzgâr durumunda sınır tabakası ağları (İnflation)

PV panelde tasarımında Hexahedral (6 yüzlü) mesh yapısı tercih edilmiştir.



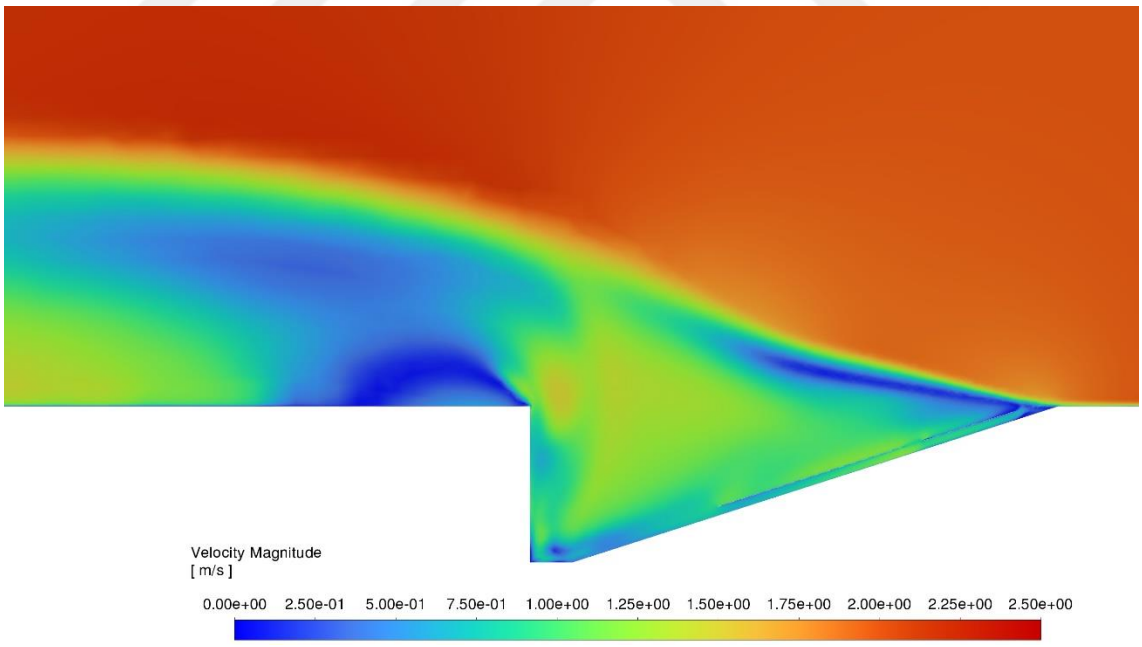
Şekil 4.25. PV panel ağ yapısı



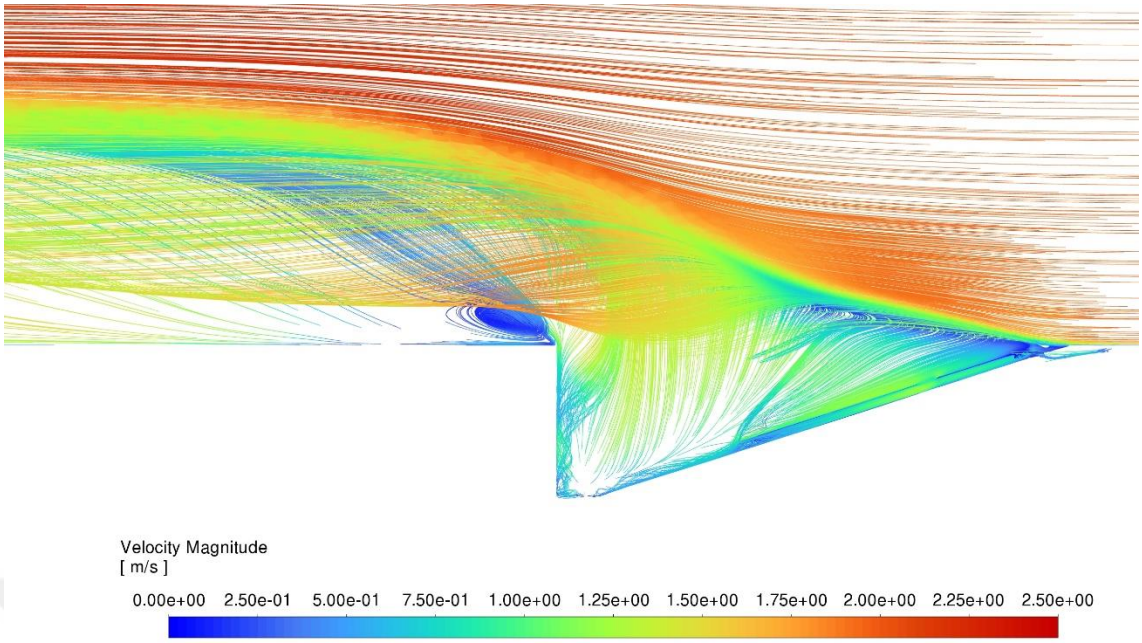
Şekil 4.26. PV panel ağ yapısı kesit görüntüsü

4.2.3.2. Arka rüzgâr durumunda sonuçlar

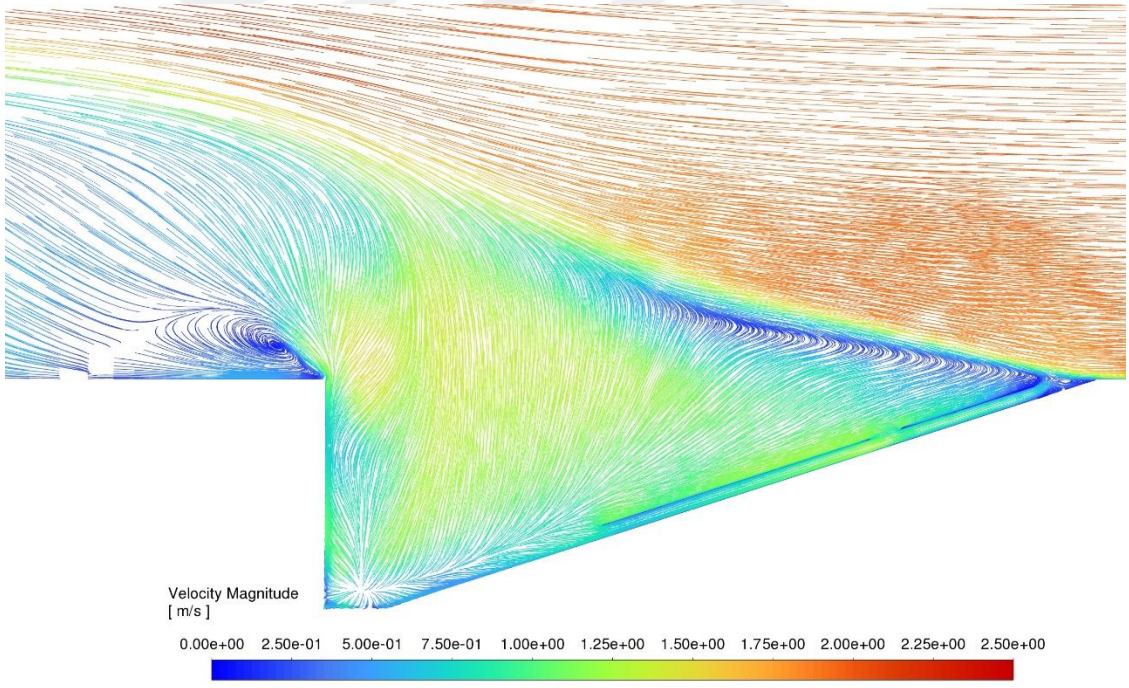
Arka rüzgâr durumunda yapılan HAD analizlerine ait hız dağılımları Şekil 4.27 – Şekil 4.32 aralığında görülmektedir.



Şekil 4.27. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı



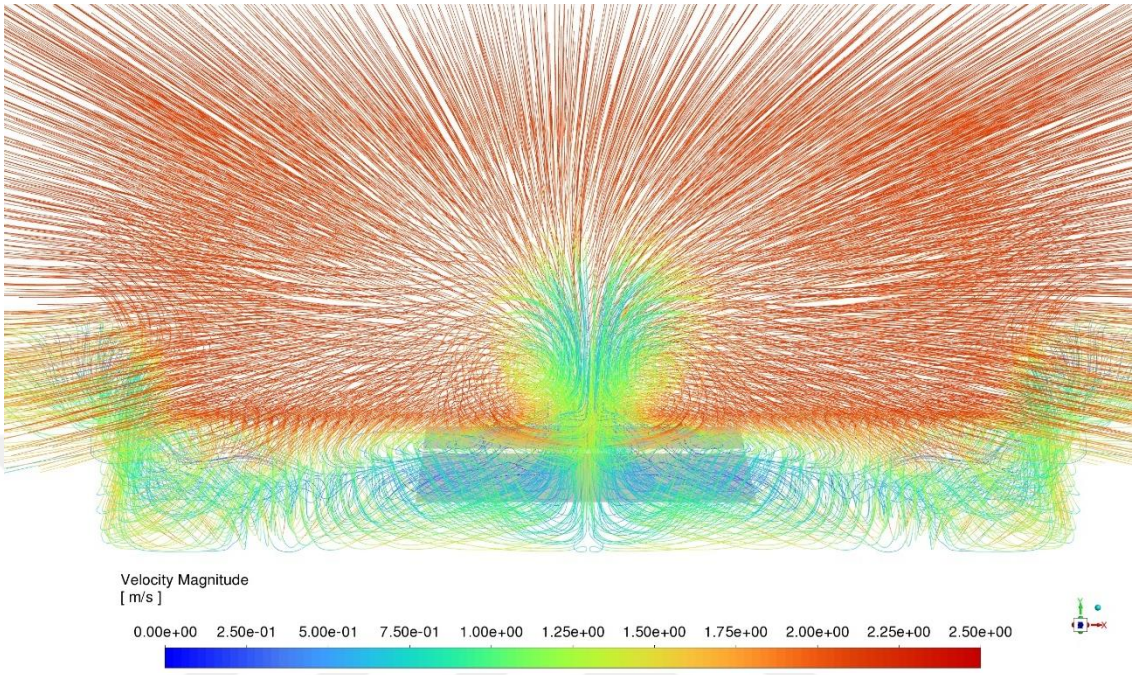
Şekil 4.28. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1



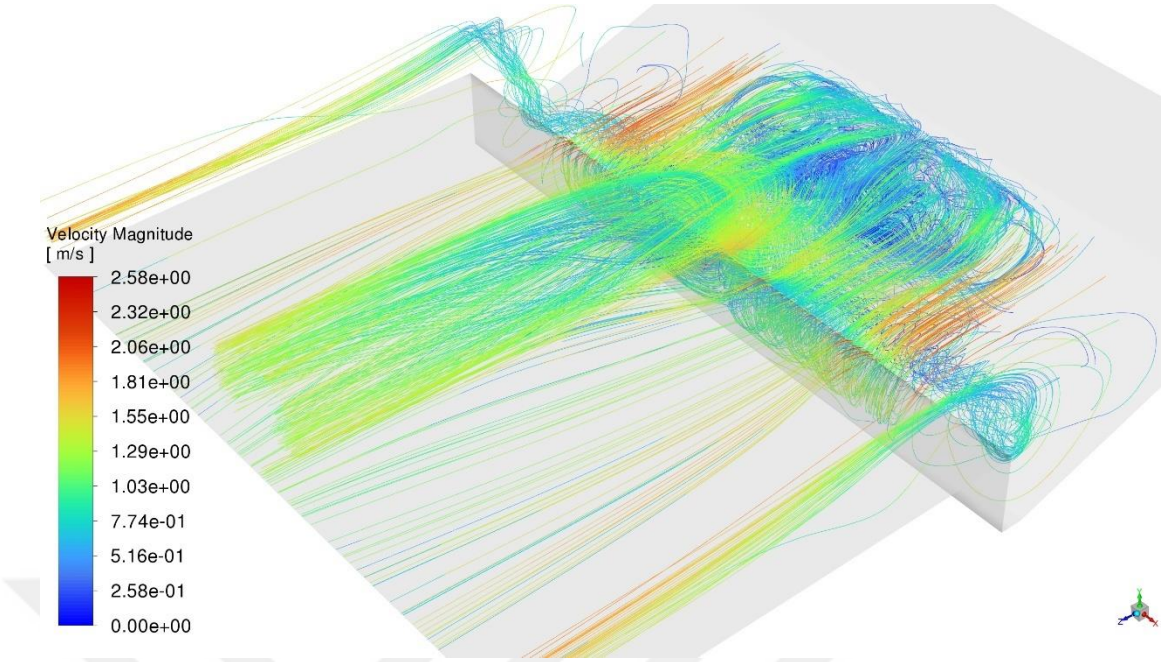
Şekil 4.29. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2

Arka rüzgâr durumunda oluşan türbülanslar Şekil 4.28 – Şekil 4.32 aralığında görülmektedir. Çözümler incelendiğinde arka rüzgâr durumunun en fazla türbülansa sebep olduğu görülecektir. Türbülans oluşumu ısı transferini artırması yönünden olumlu

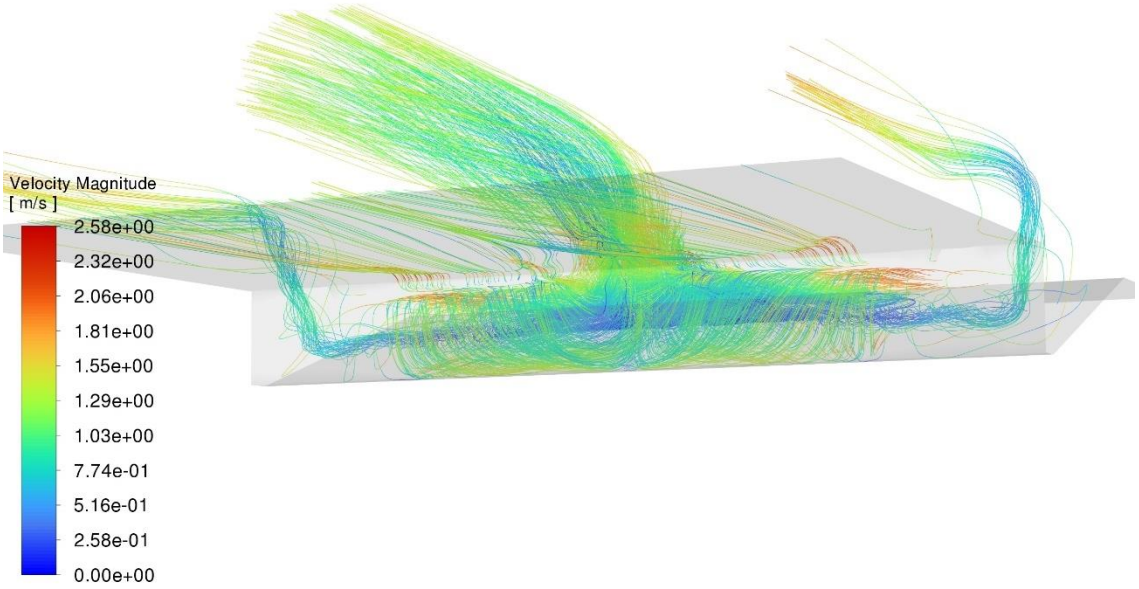
olmakla beraber bazı bölümlere rüzgârın yeterince ulaşamaması veya düşük rüzgâr hızları PV paneller üzerindeki ısı transferini olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.30. Arkadan gelen rüzgâr durumunda girişten, çıkışa kadar hız dağılımına ait akış çizgileri



Şekil 4.31. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri-1

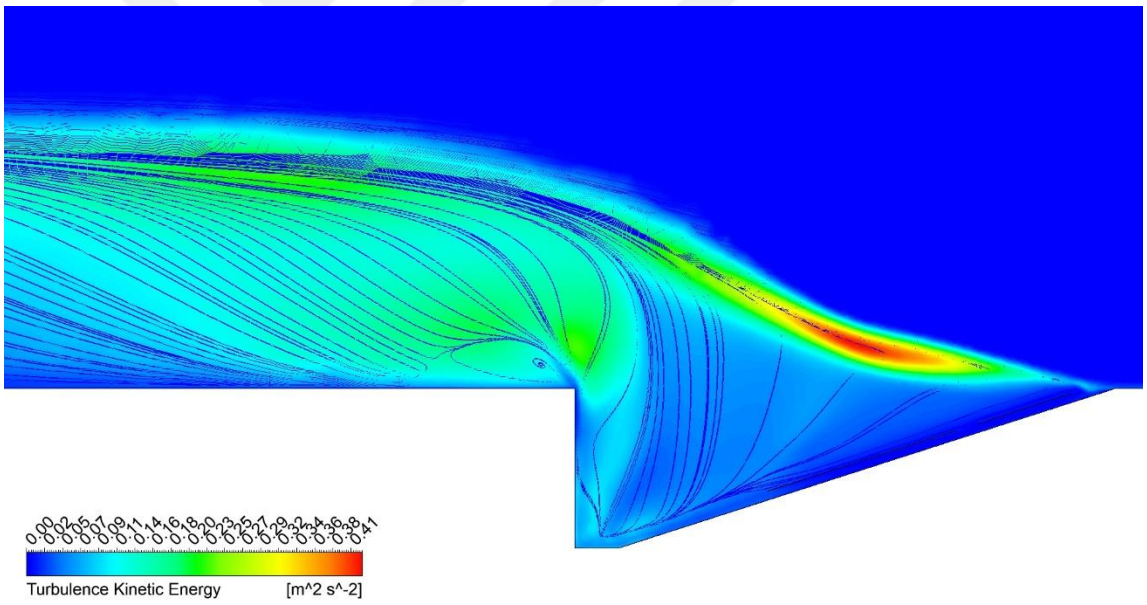


Şekil 4.32. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri-2

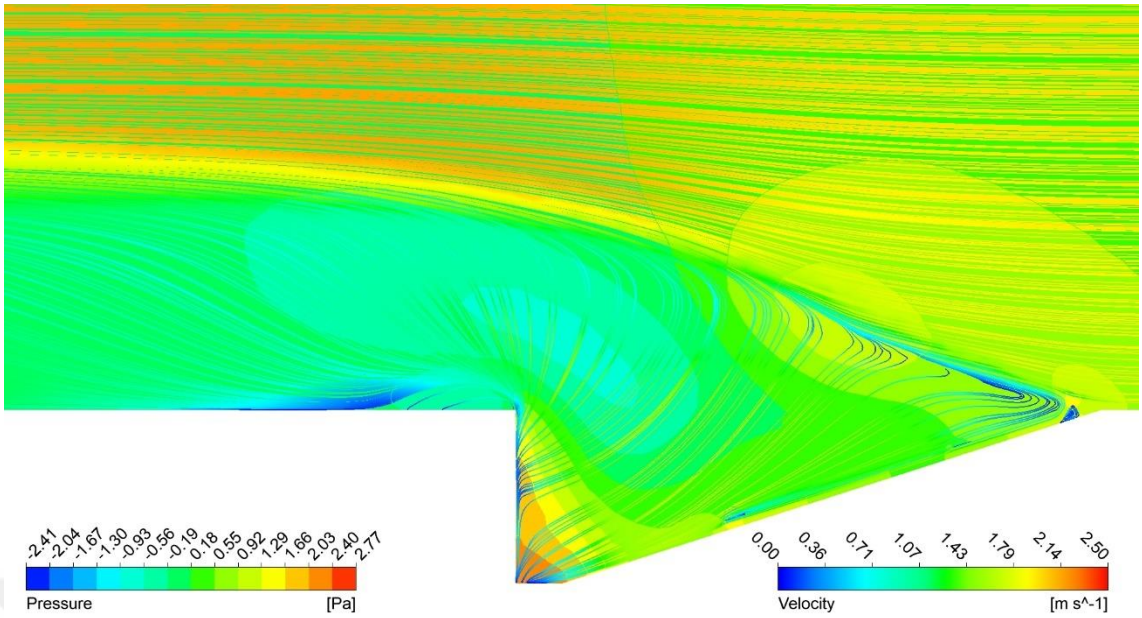
Akışkanlar mekaniğinde, türbülans kinetik enerjisi, türbülanslı akıştaki girdaplarla ilişkili birim kütle başına ortalama kinetik enerjidir. HAD analizlerinde türbülans kinetik enerjisi, akışın nasıl karıştığını ve ısının nasıl yayıldığını anlamamıza yardımcı olur. Türbülans, rüzgârın hızındaki düzensiz hareketlerden kaynaklanan kinetik enerjiyi ifade eder ve genellikle laminer akıştan farklı olarak hız değişimlerini, girdapları ve

küçük ölçekli düzensizlikleri içerir. Türbülans kinetik enerjisi, akıştaki düzensiz hareketlerin büyüklüğünü gösterir ve rüzgârın hızındaki anlık değişiklikleri yansıtır. Bu türbülans, atmosferdeki sıcaklık ve nem farklarının karışmasına ve enerji transferine katkıda bulunur. Türbülans enerjisi, genellikle daha yüksek ısı transferine yol açar.

Arkadan gelen rüzgâr durumunda hız dağılımına baktığımızda çatının çukur bölümlerinde ve PV panellerin etrafında ciddi bir türbülanslı akış bölgesi oluştuğu gözlemlenmektedir. Bahse konu bölümlerde rüzgâr hızları düşmesine rağmen büyük girdaplar oluşmaktadır. Oluşan bu girdaplar akış alanının orta düzleminde ve köşelerinde yoğunlaşarak akış hacmini terk etmektedir. Bu türbülanslı bölgeye temas halinde olan PV panellerin alt kısımlarında ve kenarlarında diğer panel bölgelerine göre soğutmanın daha etkin olduğunu görmekteyiz. Şekil 4.33 bize türbülans kinetik enerjiyi gösterirken, Şekil 4.34 basınç dağılımını vermektedir.

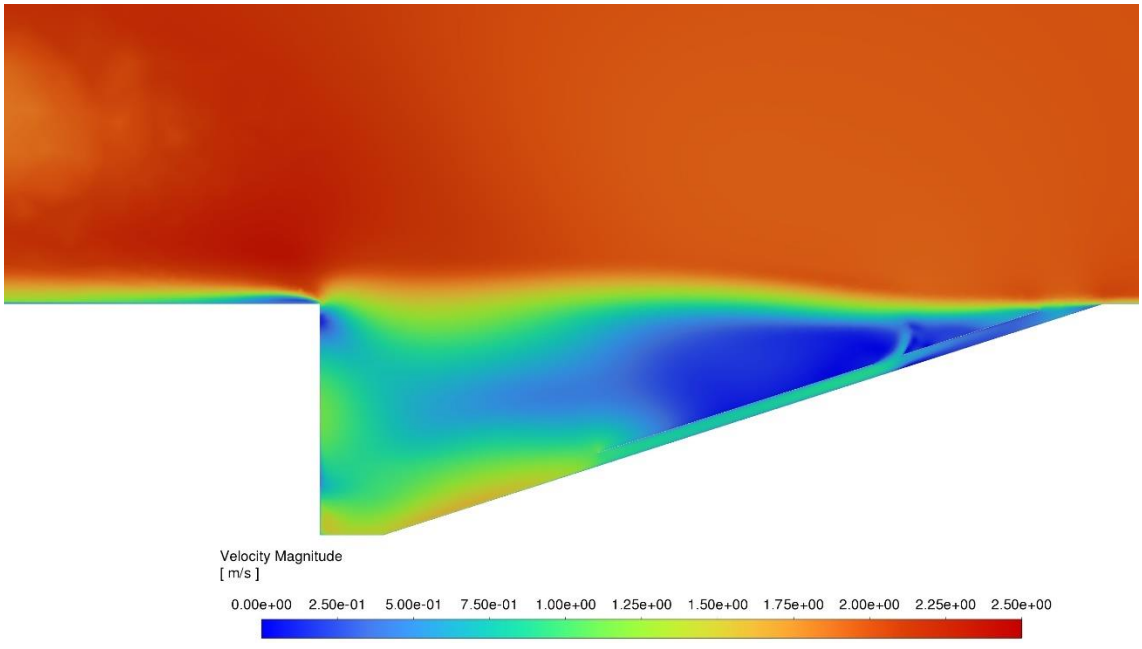


Şekil 4.33. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde türbülans kinetik enerji

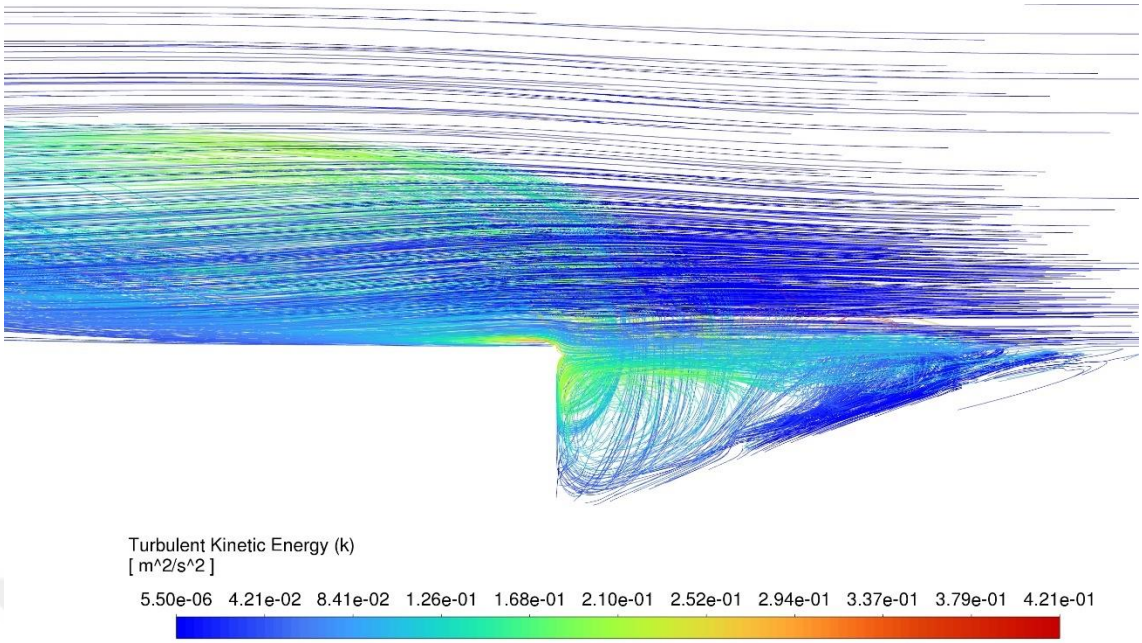


Şekil 4.34. Arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı

Şekil 4.35'te orta düzlem ile panel kenarlarının ortasından geçen X düzlemindeki hız dağılımını görmekteyiz. Şekil 4.35 ile Şekil 4.27 karşılaştırıldığında orta düzlemden kenarlara doğru gidildikçe akışın artık daha düzenli bir hal aldığı görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4.36'te orta düzlemden uzaklaştıkça türbülans kinetik enerjinin de azaldığını gözlemliyoruz.

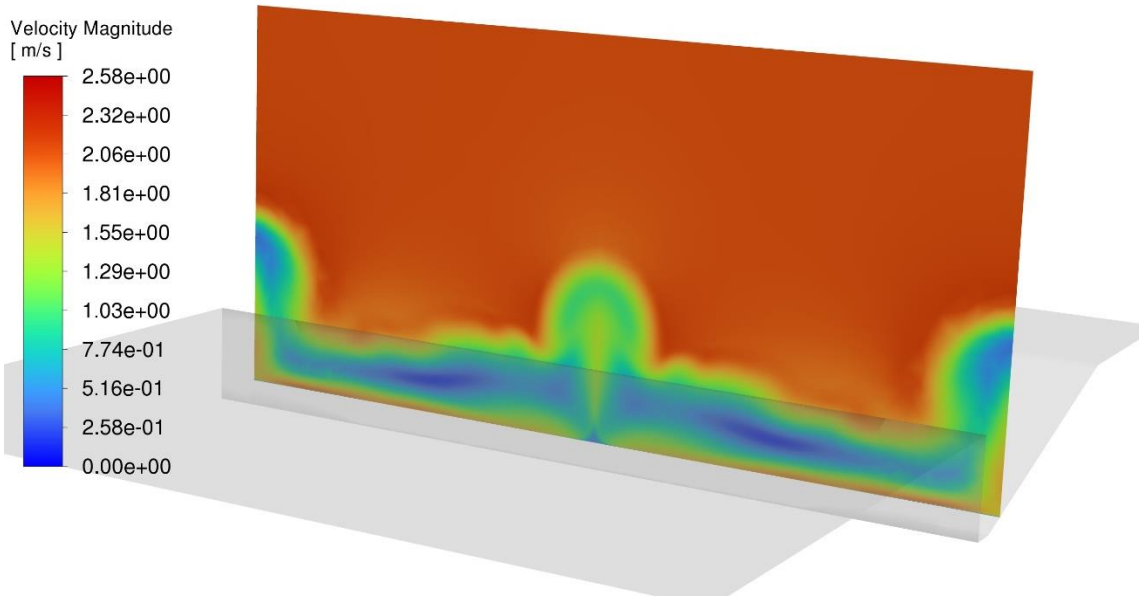


Şekil 4.35. Arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki hız dağılımı



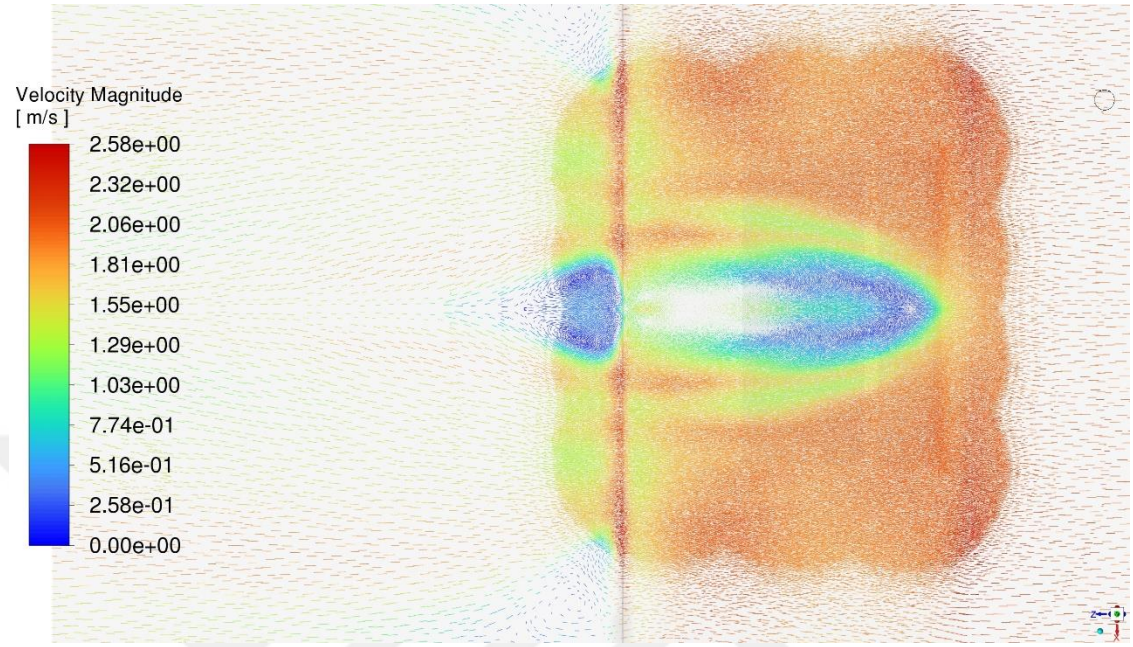
Şekil 4.36. Arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki türbülans kinetik enerji dağılımı

Şekil 4.37 hız dağılımının merkezden kenarlara doğru gidildikçe nasıl değiştiğinin göstermektedir. Rüzgâr çatı çukurunda girdaplar oluşturarak merkezden kenarlara doğru yönelmektedir.

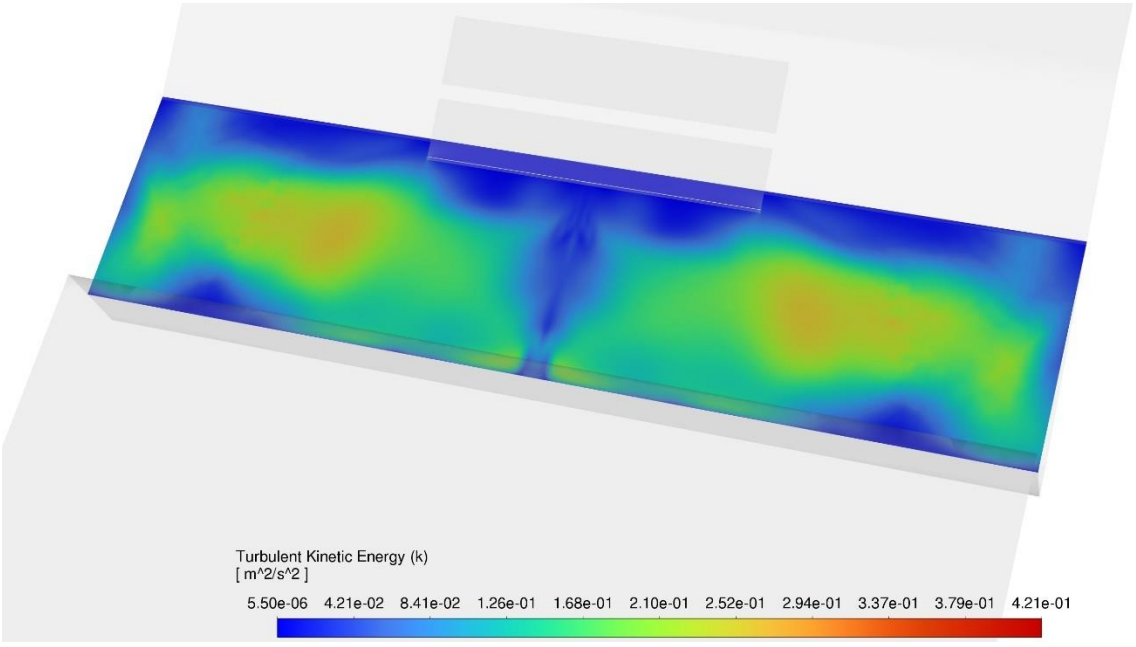


Şekil 4.37. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39'de akışın daha iyi anlaşılması için diğer düzlemlerden kesitler alınmıştır.

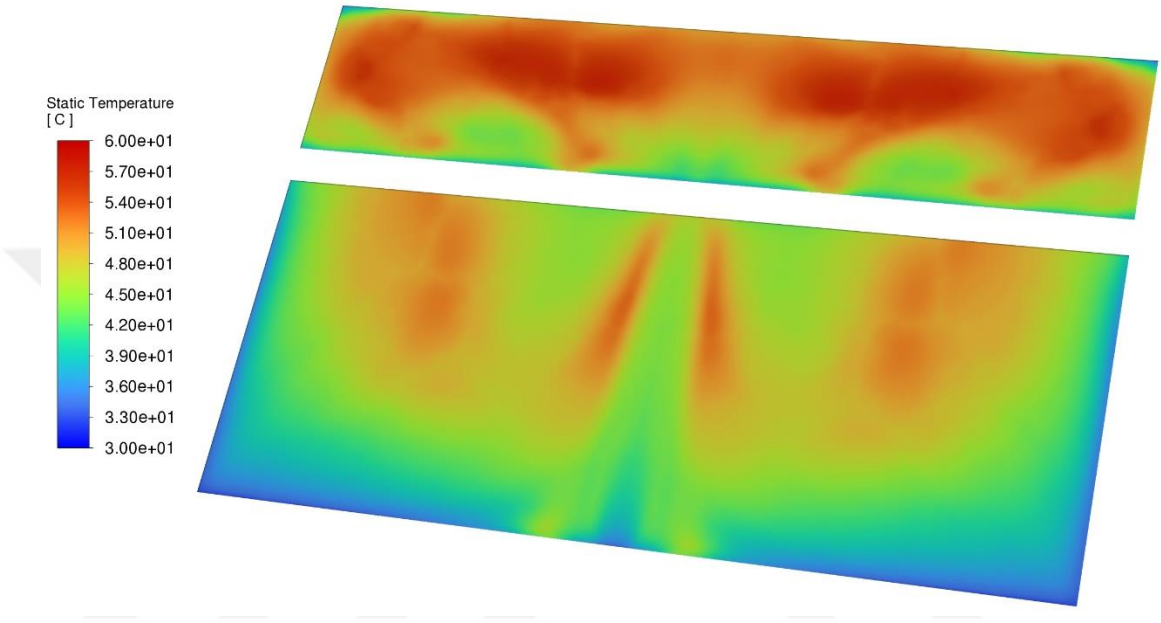


Şekil 4.38. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri



Şekil 4.39. Arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminde türbülans kinetik enerji

Şekil 4.40 incelendiğinde arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı görülmektedir. Güçlü girdapların oluştuğu alt ve yan bölgelerin diğer bölgelere nazaran daha soğuk olduğu gözlemlenmektedir. Panel dizisinin sıcaklığı 36 - 58 ^{o}C arasında değişmektedir. Nispeten en sıcak bölgeler ise panel dizisinin üst kısımlarıdır. Bu bölgeler arasındaki sıcaklık farkları yer yer 10 - 15 ^{o}C civarına çıkabilmektedir.

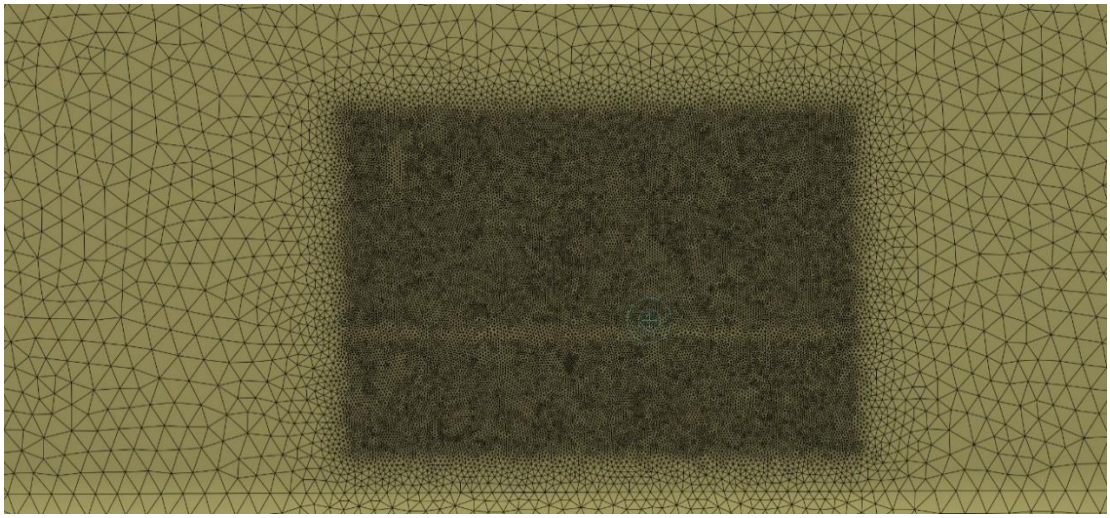


Şekil 4.40. Arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

4.2.4. Arkadan 45^{0} açıyla gelen rüzgâr durumu

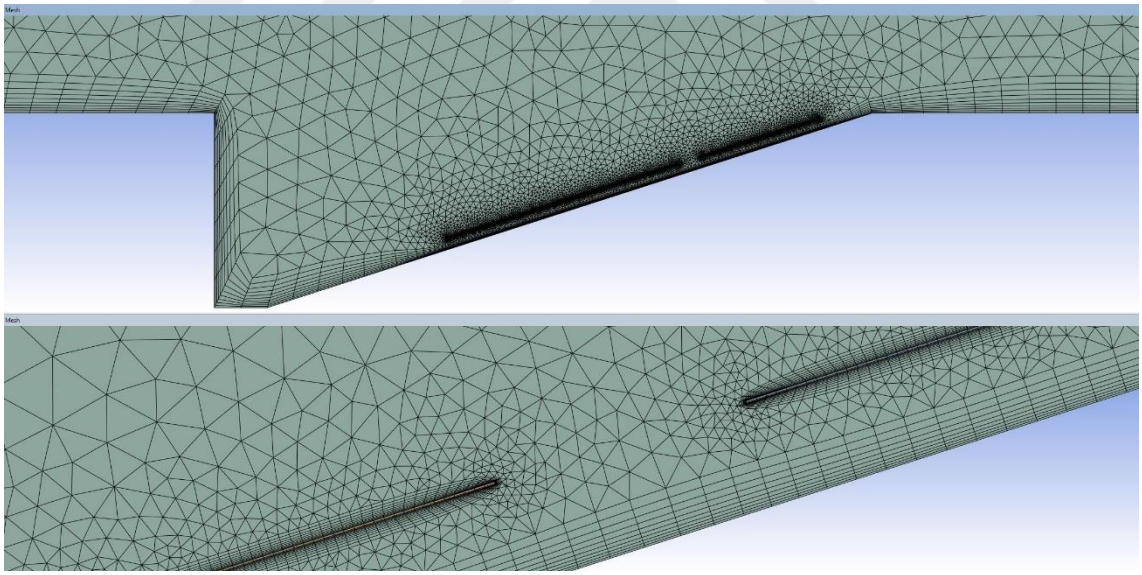
4.2.4.1. Arkadan 45^{0} açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısı

Şekil 4.41 – Şekil 4.43 aralığında arkadan 45^{0} açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısı görülmektedir.



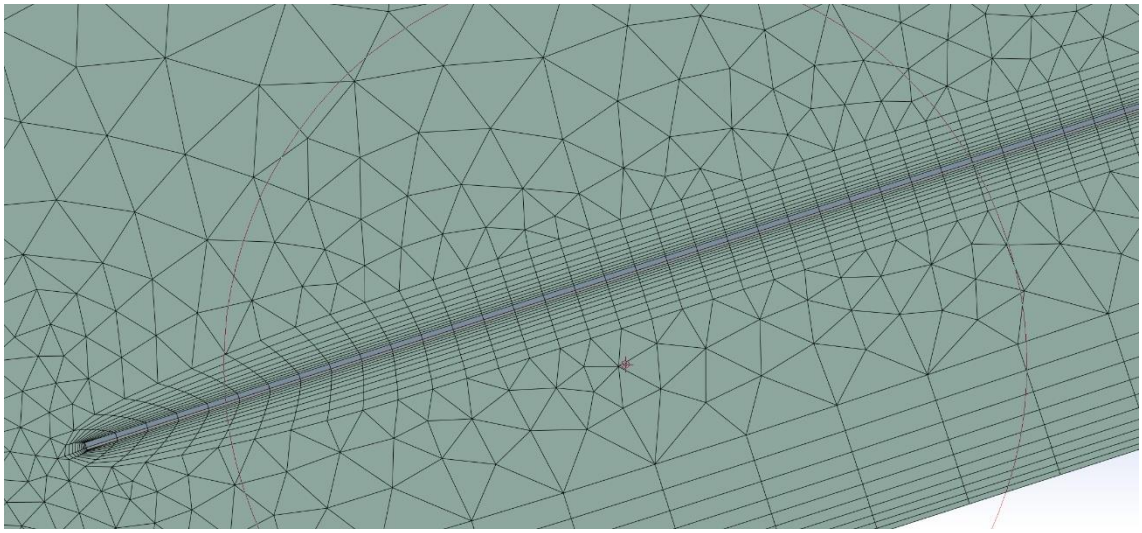
Şekil 4.41. Arkadan 45^0 derece açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısı

Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Tetrahedral (4 yüzlü) ağ yapısı tercih edilmiş ve 13.233.502 hücreli hacim elemanı kullanılarak analizler yapılmıştır (Şekil 4.42).



Şekil 4.42. Arkadan 45^0 derece açıyla gelen rüzgâr durumunda ağ yapısının kesit görüntüsü

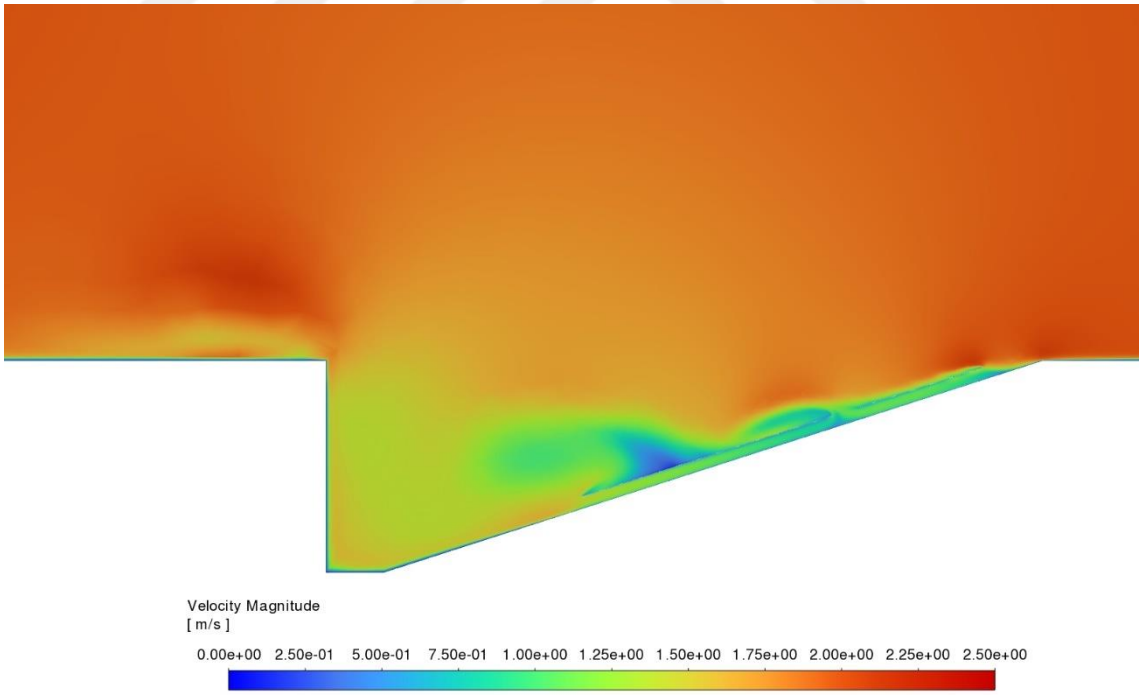
Arka rüzgâr durumunda olduğu gibi arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda da PV panellerin etrafında ve çatı yüzeylerinde sınır tabakası ağları (Şekil 4.43) kullanılmıştır. PV paneller için ise Hexahedral (6 yüzlü) ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 4.43. Arka rüzgâr durumunda sınır tabakası ağları (İnflation)

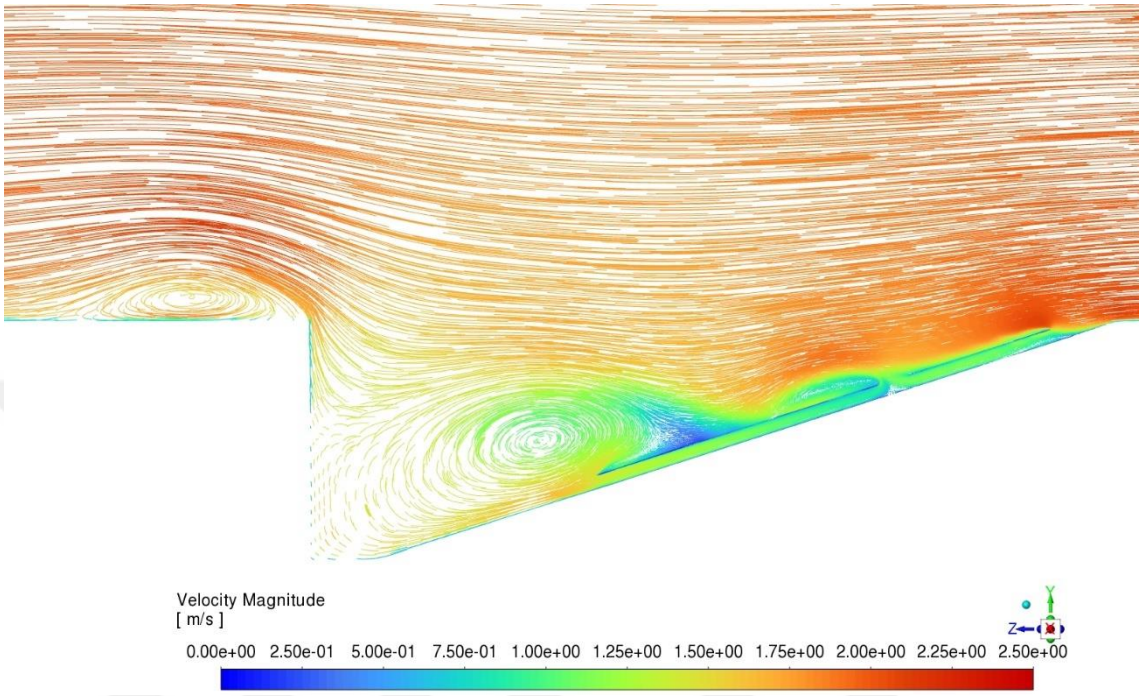
4.2.4.2. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda sonuçlar

Şekil 4.44'te arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda rüzgâr hızlarının paneller etrafında diğer bölgelere nazaran daha düşük olduğu görülmektedir.

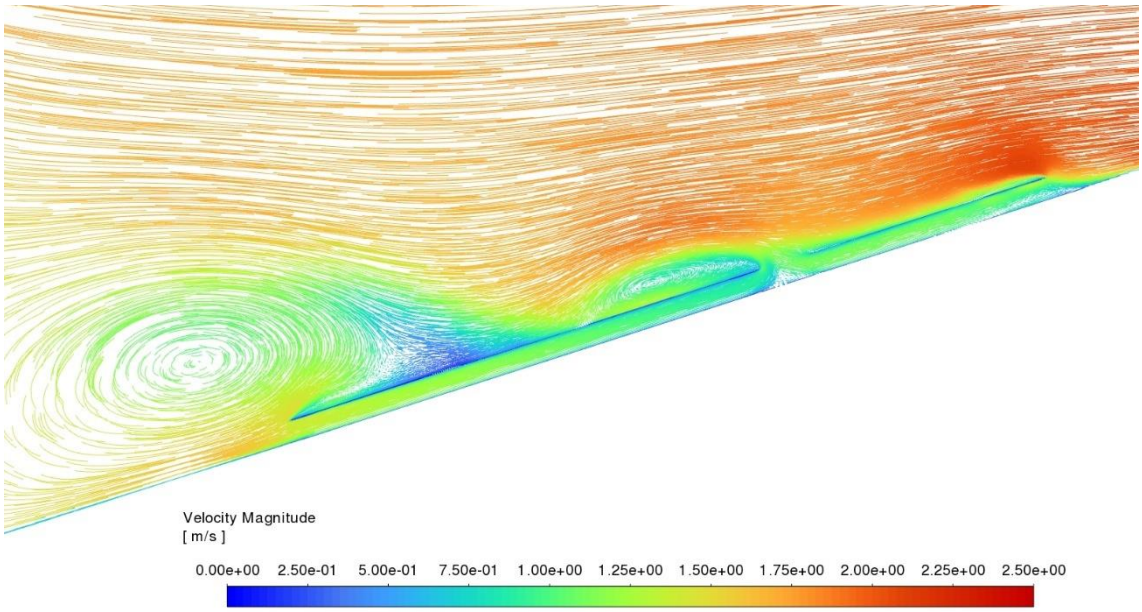


Şekil 4.44. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı

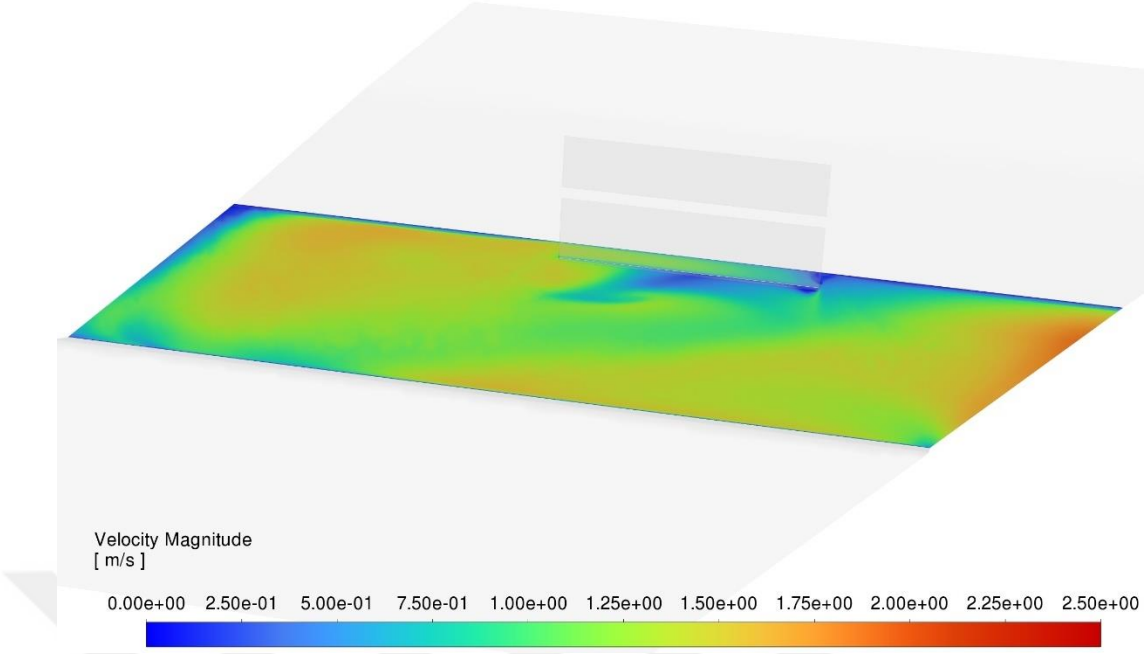
Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda çatının çukur bölgesinde oluşan türbülans Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'te açıkça görülmektedir. Diğer düzlemlerdeki hız dağılımları ise Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de verilmiştir.



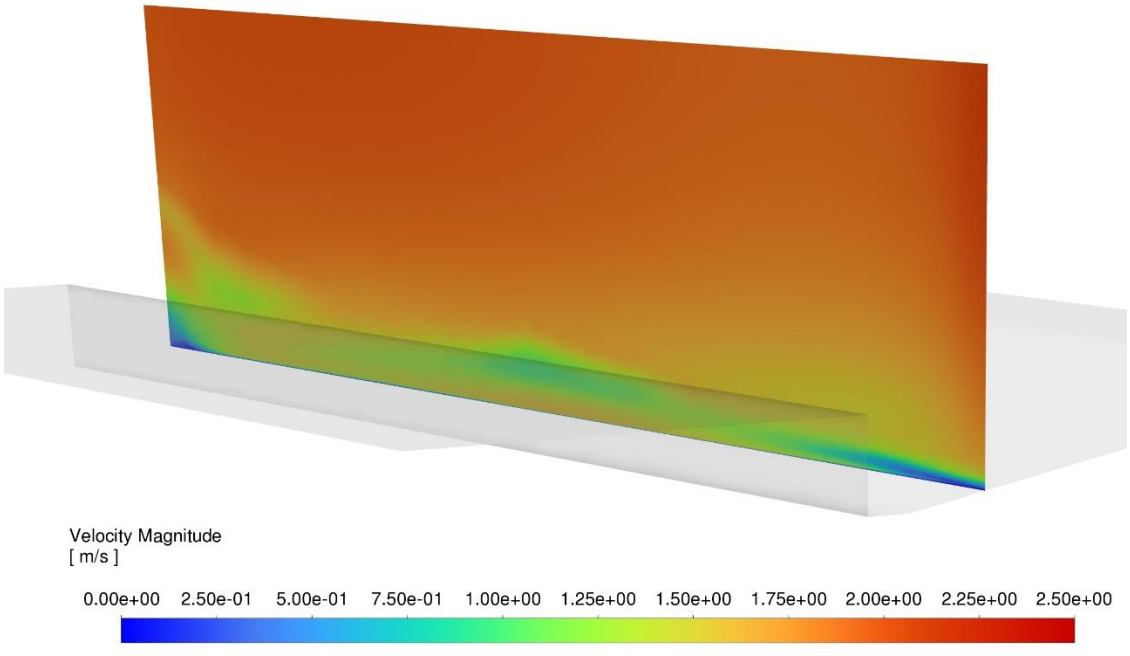
Şekil 4.45. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1



Şekil 4.46. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2

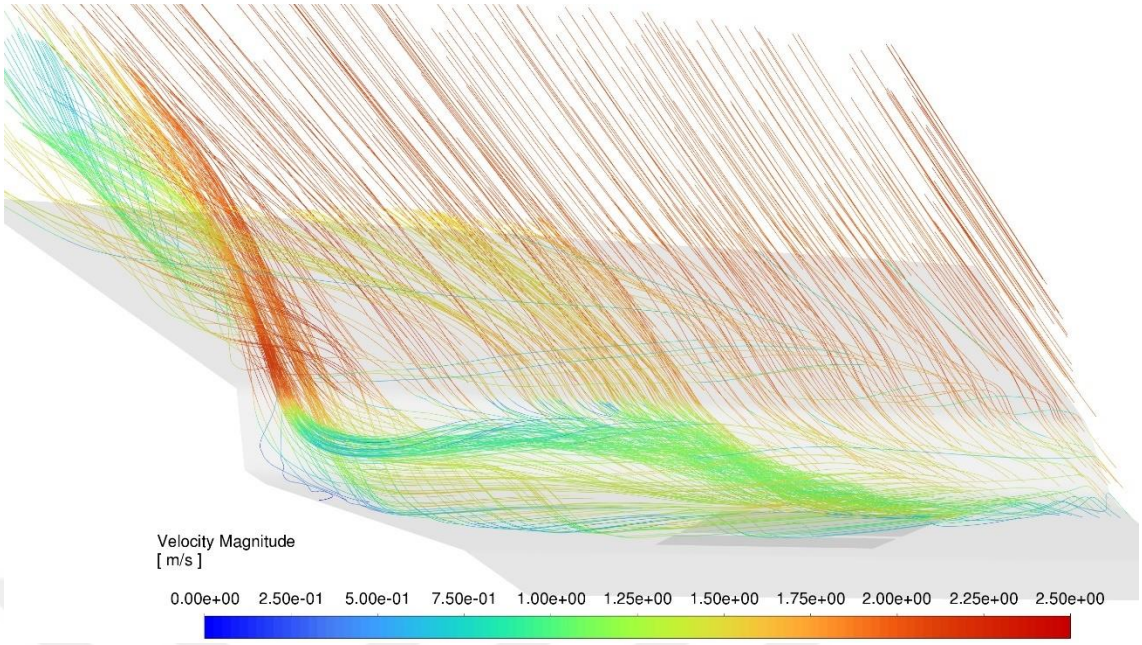


Şekil 4.47. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y2 düzlemindeki hız dağılımı



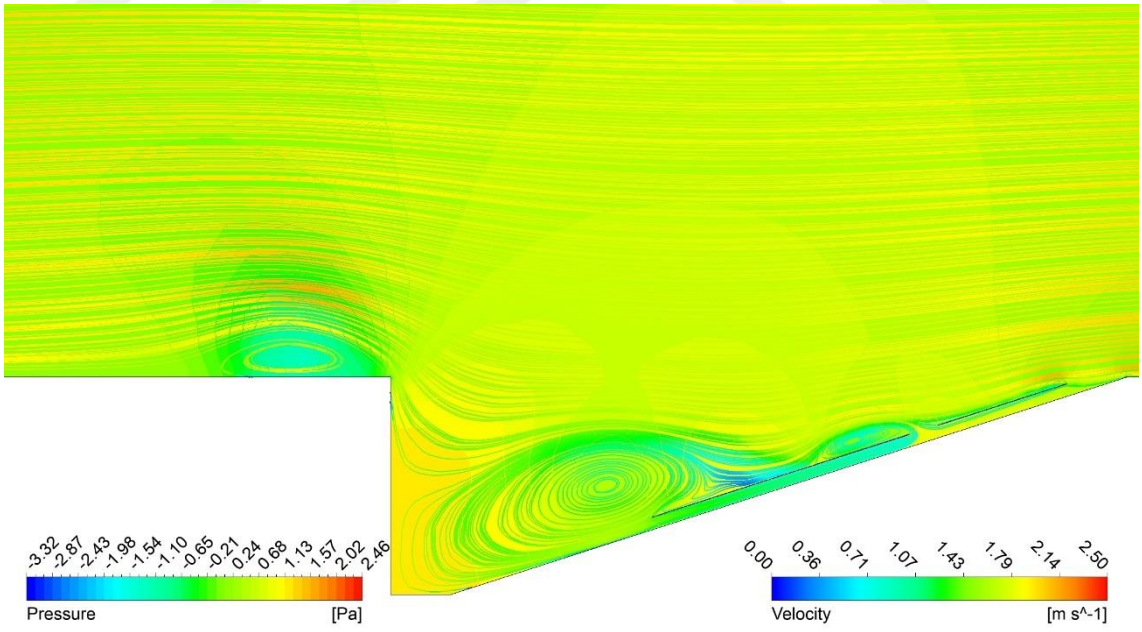
Şekil 4.48. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı

Şekil 4.49'de arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda çatı çukurunda oluşan türbülans bölgeleri görülmektedir. Bu durumda oluşan türbülans, arka rüzgâr durumunda oluşan türbülansa nazaran daha düşük ve akış arka rüzgâr durumuna göre daha durağan bir hal almıştır.



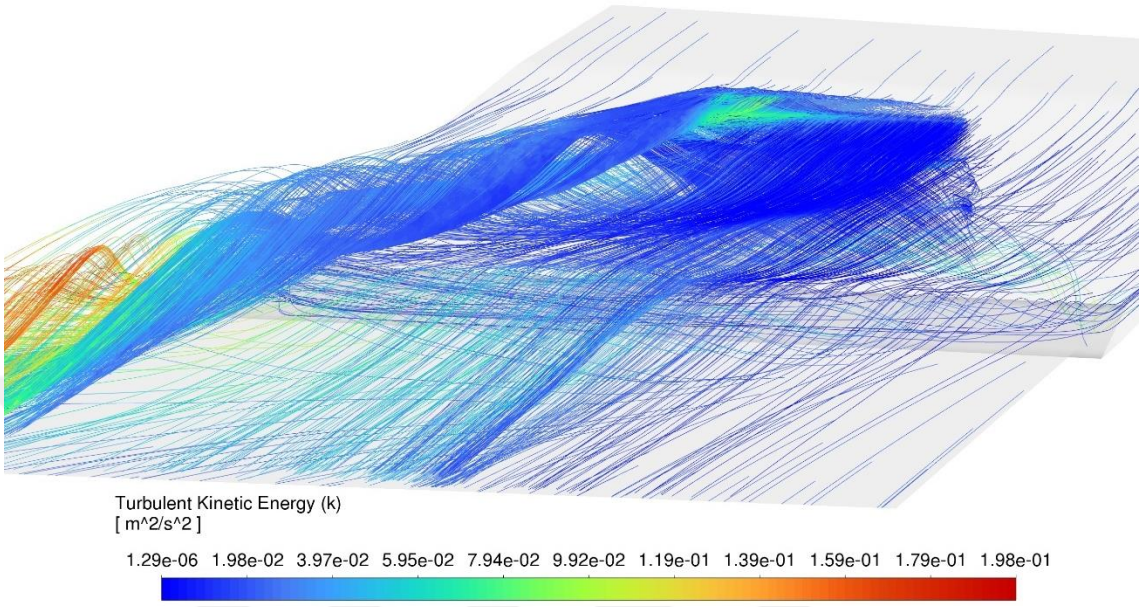
Şekil 4.49. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri

Şekil 4.50 arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda basınç dağılımını göstermektedir. Arka rüzgâr durumuna göre basınç dağılımı daha stabil hale gelmiştir.



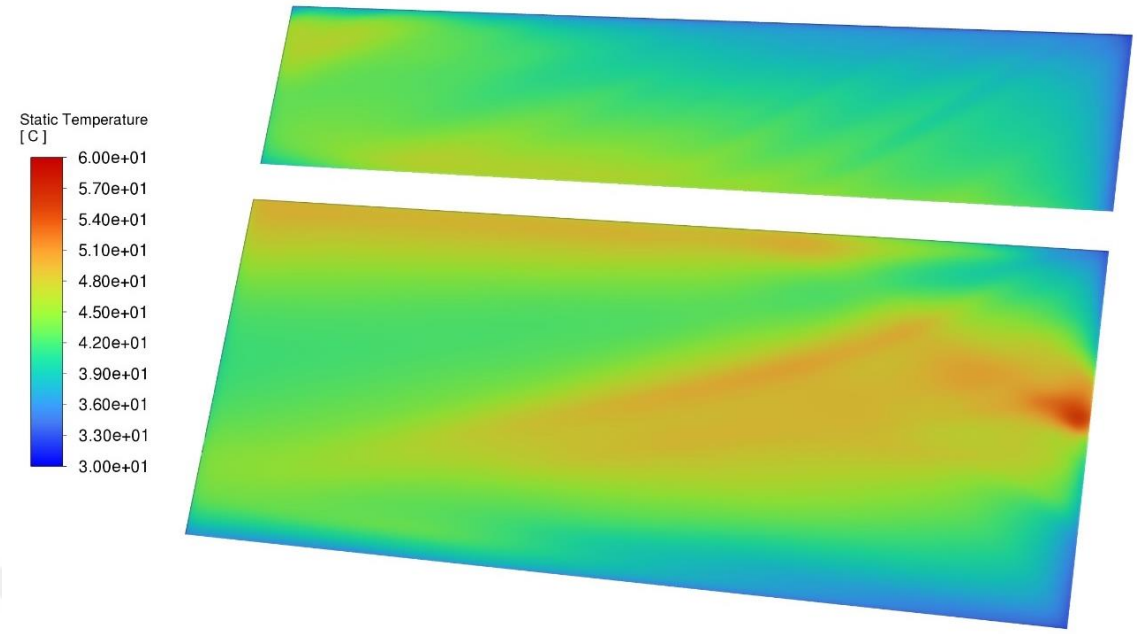
Şekil 4.50. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı

Şekil 4.51 arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda türbülans kinetik enerjiyi göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisinin arttığı bölgelerde ısı transferinin de arttığını biliyoruz.



Şekil 4.51. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda Y1 düzlemi ve PV panel yüzeyinde ortaya çıkan türbülans kinetik enerjiye ait akış çizgileri

Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı Şekil 4.52'de görülmektedir. Soğuk rüzgarlara ilk temas eden ve üst sıralarda bulunan paneller alt sıralara göre daha iyi soğutulmuştur. Panel dizisinin sıcaklığı 36 - 52 ^oC arasında değişmektedir.

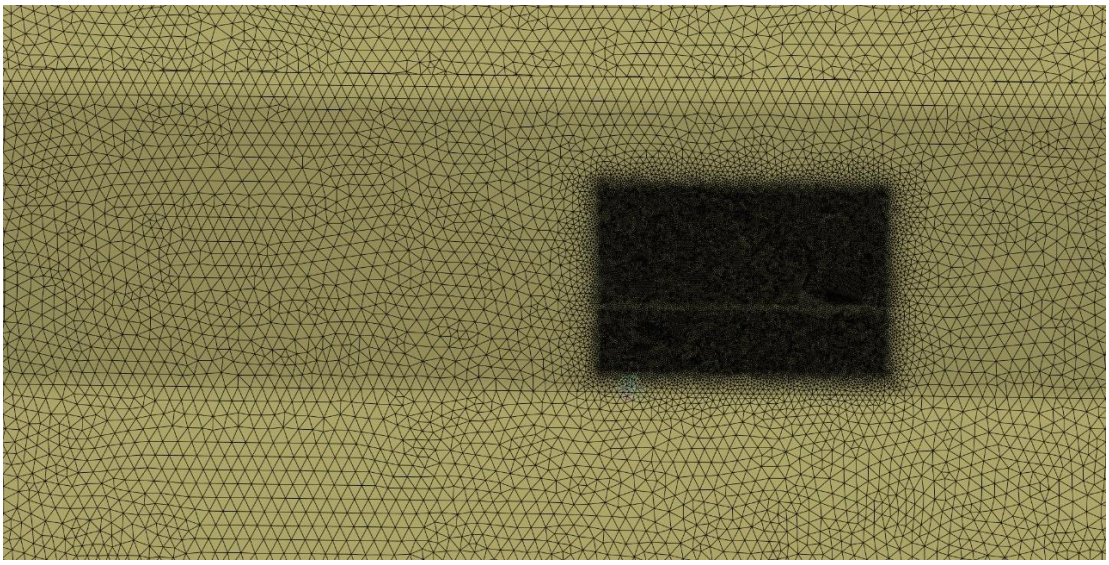


Şekil 4.52. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

4.2.5. Yan rüzgâr durumu

4.2.5.1. Yan rüzgâr durumunda ağ yapısı

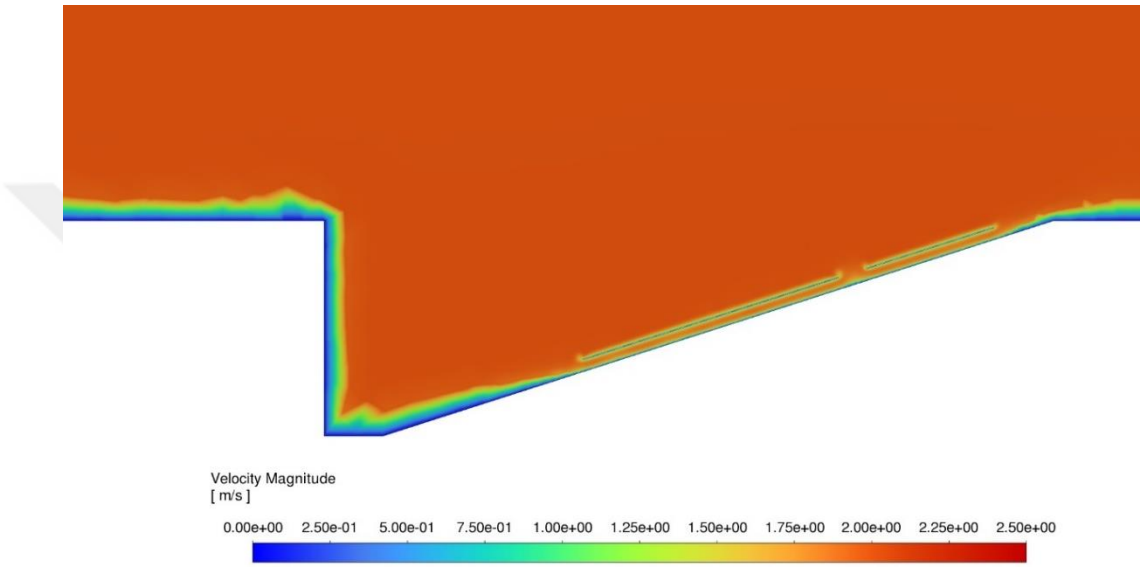
Şekil 4.53 yandan gelen rüzgâr durumunda ağ yapısını göstermektedir. Yan rüzgâr durumunda Tetrahedral (4 yüzlü) ağ yapısı tercih edilmiş ve 12.016.423 hücreli hacim elemanı kullanılarak analizler yapılmıştır.



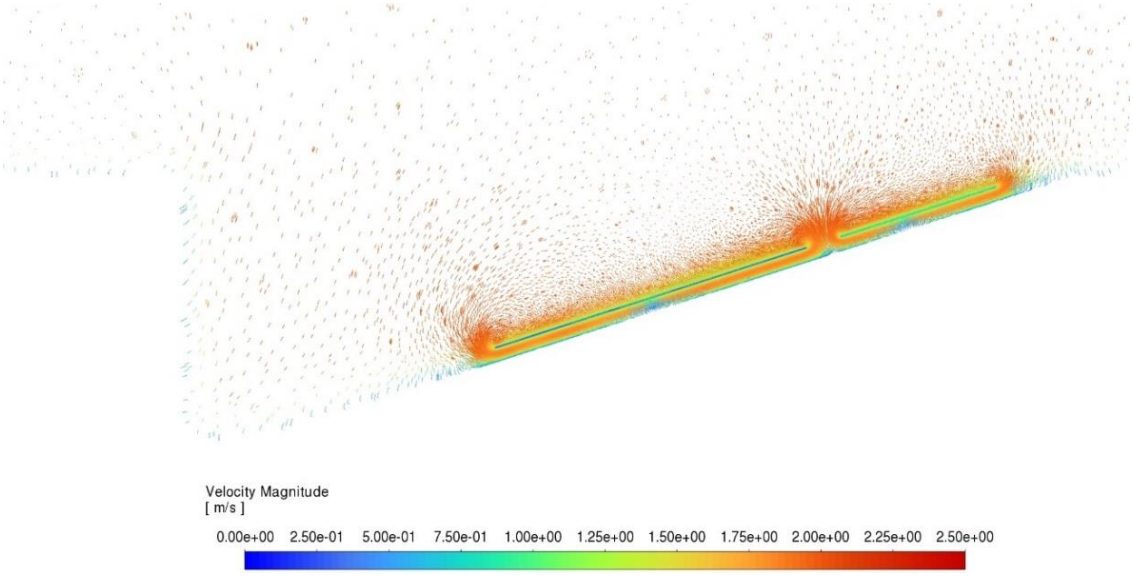
Şekil 4.53. Yan rüzgâr durumunda ağ yapısı

4.2.5.2. Yan rüzgâr durumunda sonuçlar

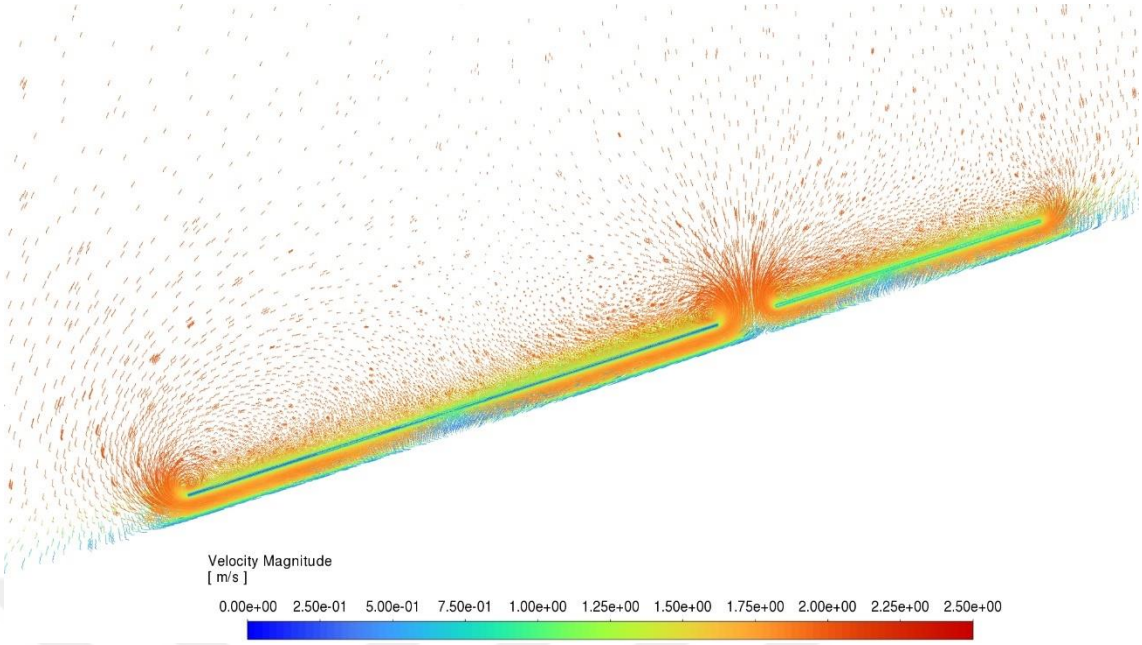
Yan rüzgâr durumunda, rüzgâr hiçbir engelle karşılaşmadığı için PV paneller etrafındaki küçük girdaplı bölge hariç tüm akış alanı içerisinde düzenli bir rüzgâr akışı gözlemlenmektedir. Düşük hızlı akış bölgeleri duvara yakın bölgeler ve PV panel yüzeyi dışında oluşmamakta, basınç dağılımı son derece düzenli bir hal almaktadır. Yan rüzgâr durumundaki HAD analizleri Şekil 4.54 - Şekil 4.57 aralığında görülmektedir.



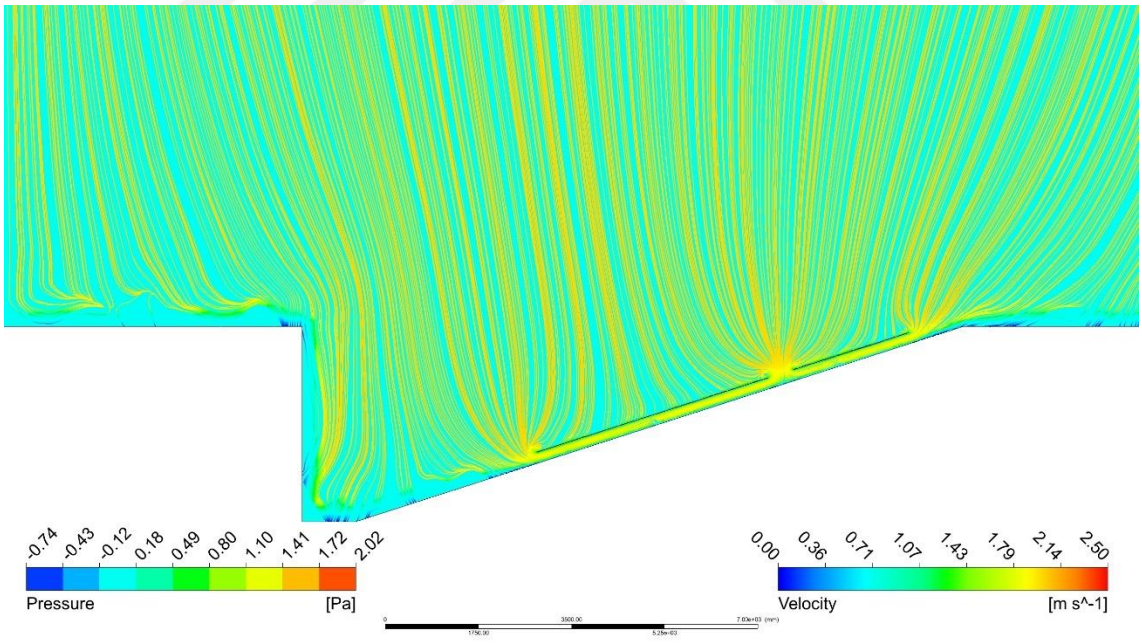
Şekil 4.54. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı



Şekil 4.55. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1



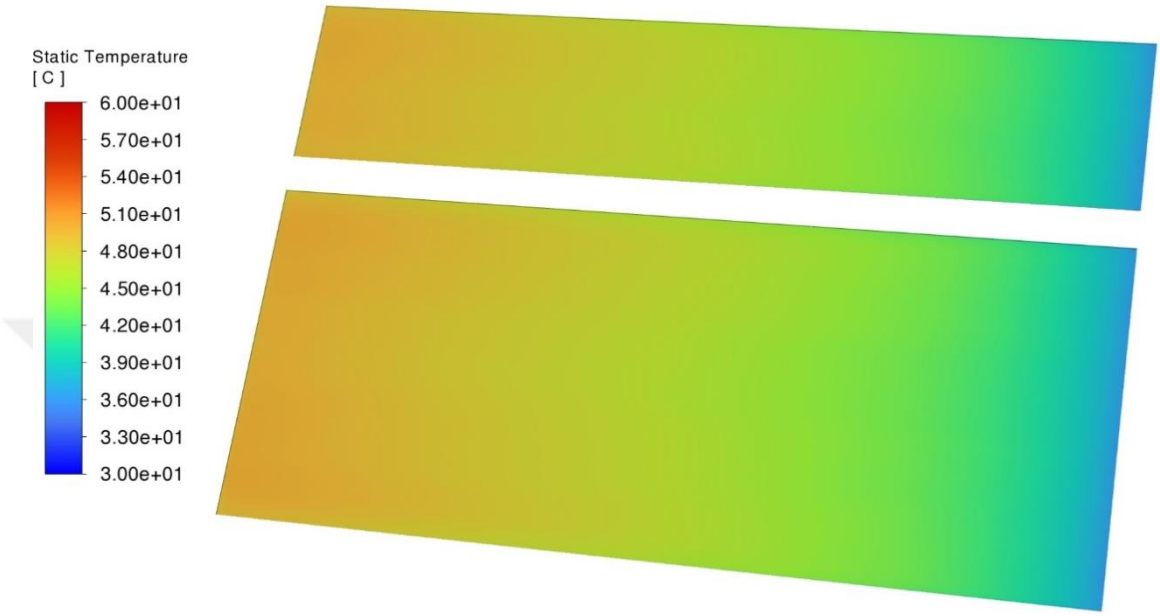
Şekil 4.56. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2



Şekil 4.57. Yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzleminde basınç ve hız dağılımı

Şekil 4.58 incelendiğinde yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı görülmektedir. Panel dizisinin sıcaklığı 36 - 50 ^{o}C arasında değişmektedir. Soğuk yan rüzgarlara ilk temas eden bölgeler nispeten daha soğuk olmakta iken panel yüzeyinde

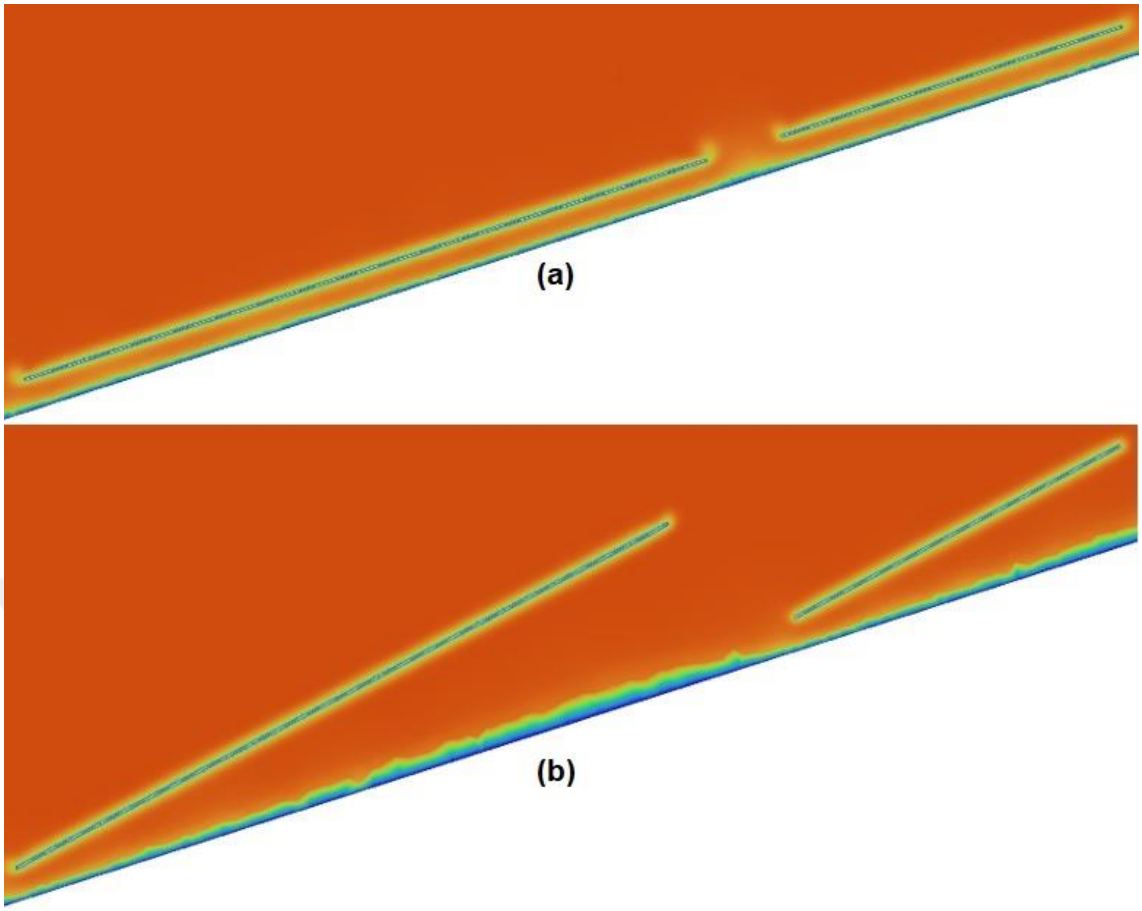
ilerleyen rüzgarlar panelden aldığı ısı ile ısınırken artık soğutma etkisi de azalmaktadır. Bu nedenle panel sıraları ne kadar uzarsa yan rüzgarların soğutma etkisi de o derecede azalacaktır. Yan rüzgarların soğutma etkisinden en yüksek derecede yararlanmak için boylu boyunca uzanan uzun panel sıralarından kaçınmak gerekmektedir.



Şekil 4.58. Yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

4.2.6. Panel Eğiminin 10^0 Arttırılması Durumu

Ölçümü alınan mevcut santral için yapılan analizlerde paneller ile çatı arasındaki mesafe çok düşük olduğundan ve mevcut çatı yapısından dolayı, rüzgâr panellerin arka tarafına rahatça ulaşamıyor ve bu durum panellerin soğumasına engel teşkil ediyordu. Bu nedenle çatı eğiminin artırılarak, rüzgârın panellerin arkasına daha rahat ulaşmasının sağlanması ile daha iyi bir soğutma yapılabileceği düşünülerek panel eğiminin 10^0 artırılması ile (eski durumda panel eğimi $17,8^0$'dir) oluşan yeni duruma dair HAD analizler bu bölümde sunulmuştur. PV panel eğiminin $17,8^0$ ve $27,8^0$ olduğu durumlar Şekil 4.59'da görülmektedir.

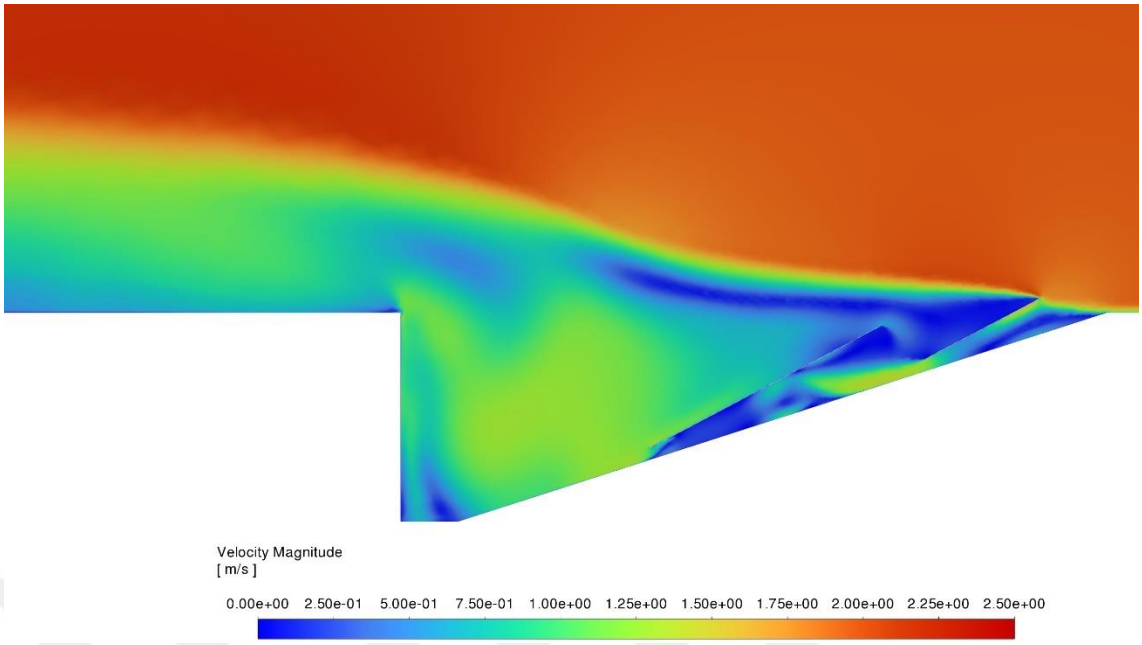


Şekil 4.59. İki farklı HAD analizi durumunda PV panel eğimleri. (a) Panel eğiminin çatı eğimi ile aynı olduğu durum ($17,8^0$), (b) Panel eğiminin 10^0 artırıldığı durum ($27,8^0$)

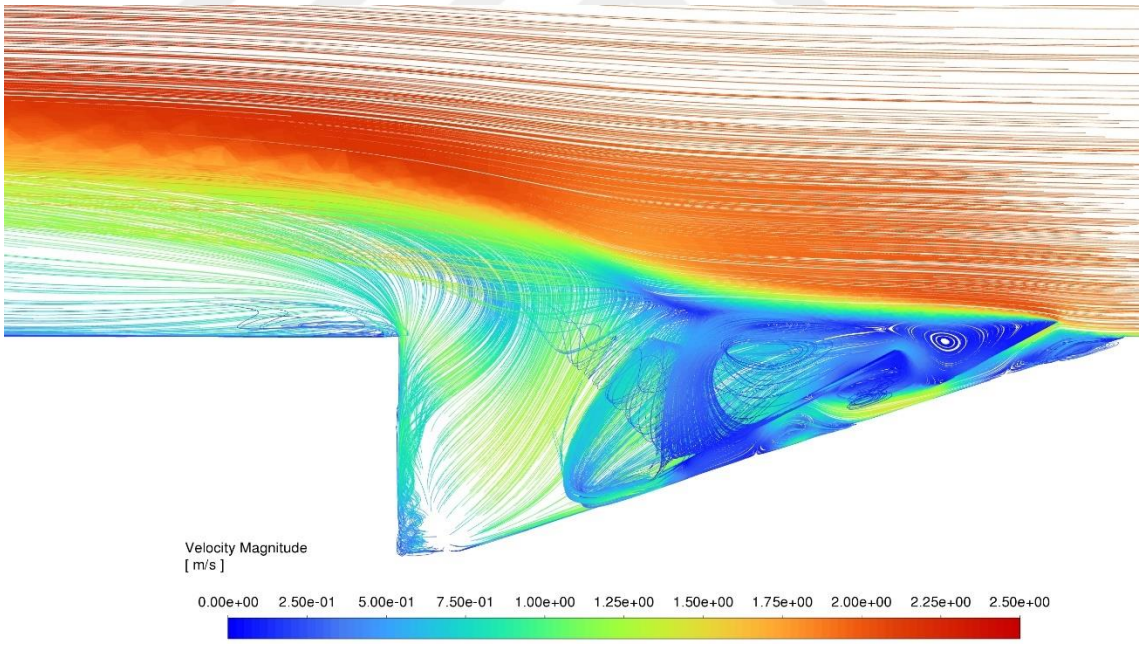
Panel eğiminin artırılması ağ yapısında büyük bir değişime neden olmadığından dolayı, ağ yapısı bu bölümde gösterilmemiştir.

4.2.6.1. Arka rüzgâr durumunda panel eğiminin 10^o Arttırılması

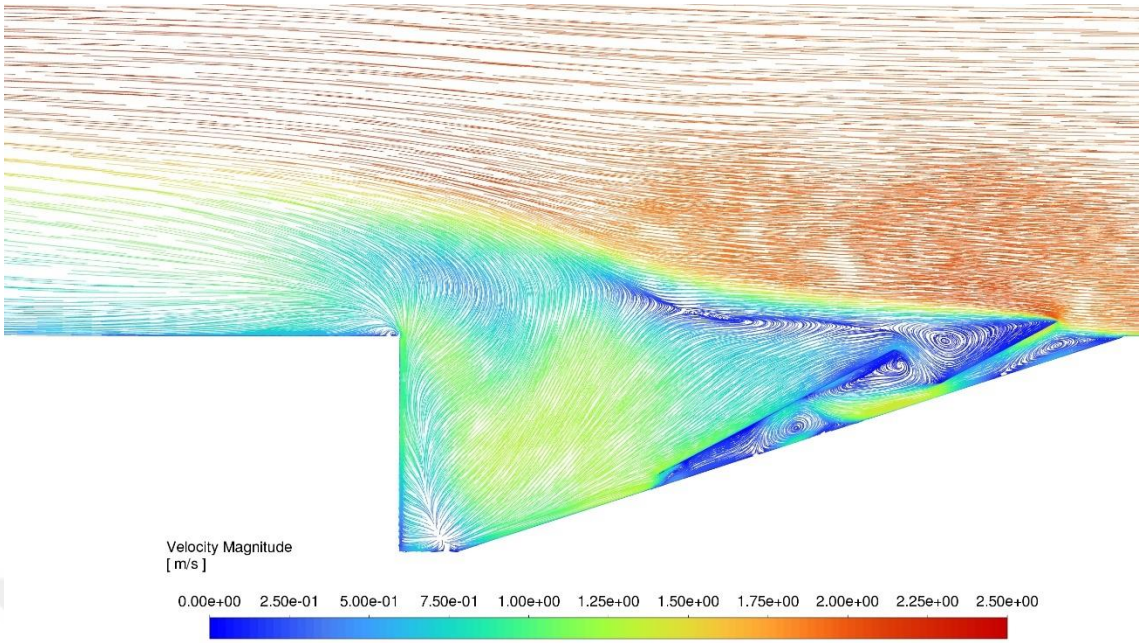
Arka rüzgâr durumunda $27,8^0$ panel eğiminde yapılan HAD analizlerine ait hız dağılımları Şekil 4.60 - Şekil 4.65 aralığında sunulmuştur.



Şekil 4.60. $27{,}8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı

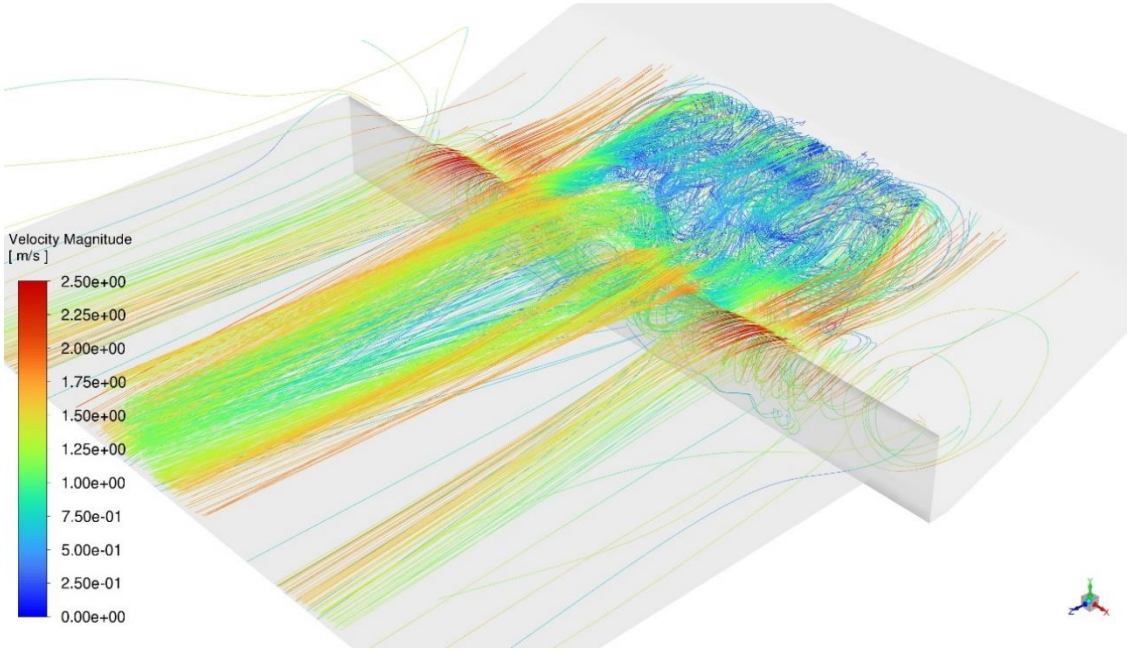


Şekil 4.61. $27{,}8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-1

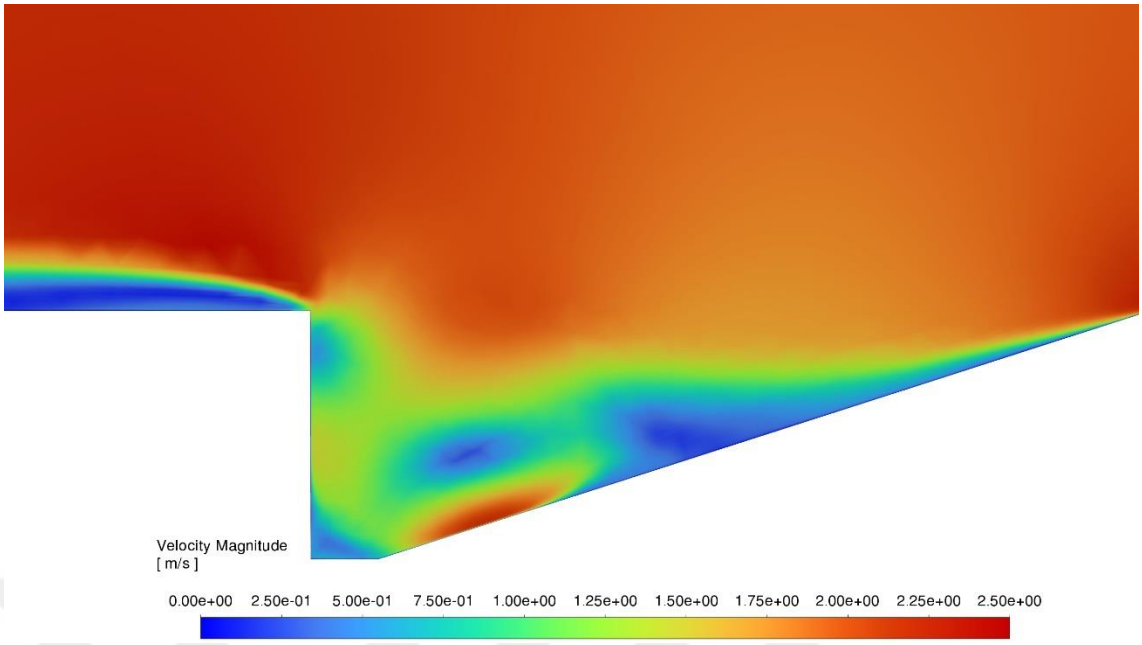


Şekil 4.62. $27{,}8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri-2

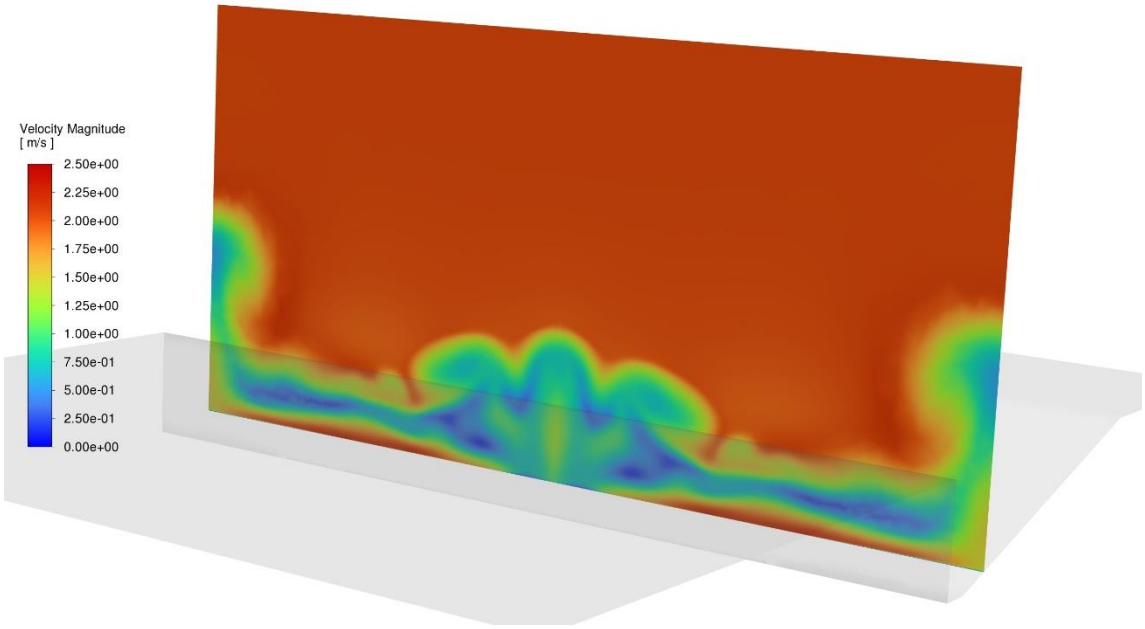
$27{,}8^0$ panel eğiminin bulunduğu Şekil 4.62, $17{,}8^0$ panel eğiminin bulunduğu Şekil 4.29 ile karşılaştırıldığında PV panel eğiminin 10^0 artırılması ile türbülans ve girdap oluşumlarının arttığı gözlemlenebilir. Bu türbülans oluşumlarının PV panel soğuması üzerinde olumlu etkileri Şekil 4.66'da görülmektedir.



Şekil 4.63. $27{,}8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda Y1 düzleminden geçen akış çizgileri



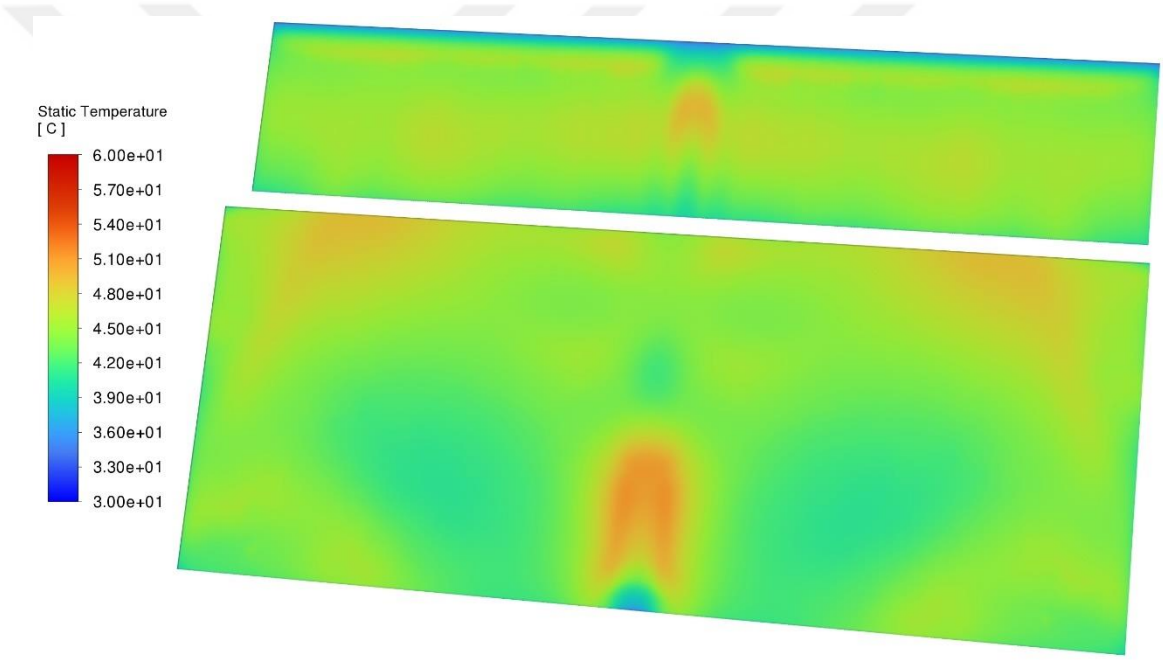
Şekil 4.64. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda X düzlemindeki hız dağılımı



Şekil 4.65. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda Z düzlemindeki hız dağılımı

Şekil 4.40'ta arka rüzgâr durumunda panel sıcaklığı görülmekte ve sıcaklıklar 36 - 58 ^oC arasında değişmektedir. Nispeten alt ve yan bölgelerin daha iyi soğuduğu, üst bölgelerin ise en sıcak bölgeler olduğu ve bölgeler arasında yer yer 10 - 15 ^oC sıcaklık

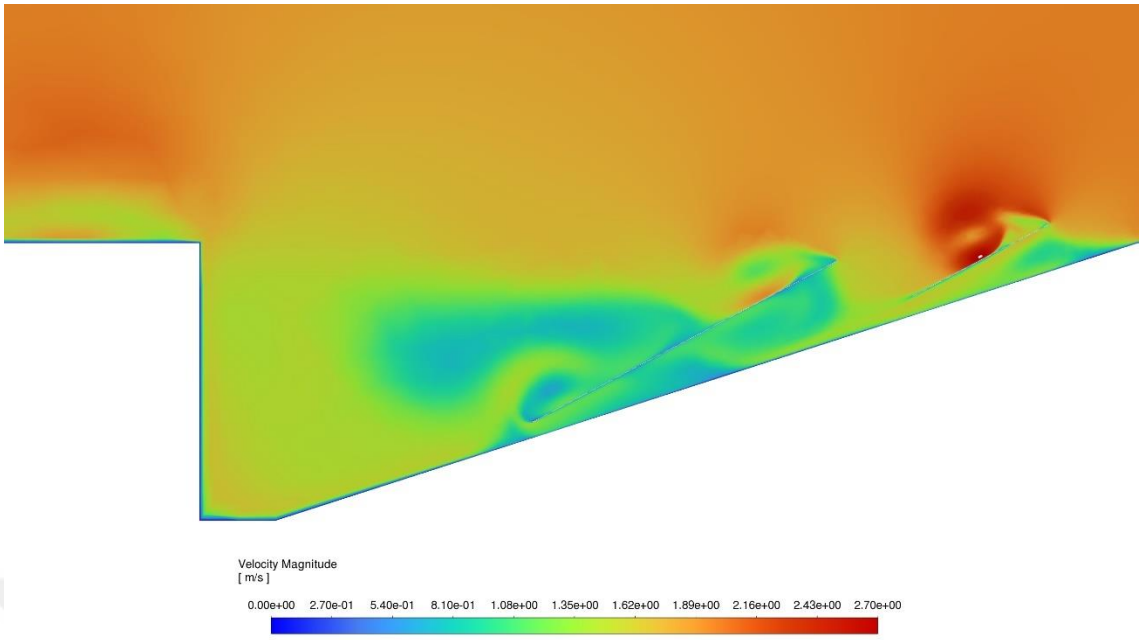
farklarının bulunduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.66'da panel eğiminin 10^o arttırılması ile arka rüzgâr durumunda oluşan PV panel dizisinin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekil 4.60 incelendiğinde panel sıcaklıklarının PV dizisi boyunca 40 - 48 ^{o}C aralığında değiştiği ve PV panellerin küçük bir kısmında maksimum 50 ^{o}C'ye çıktığı görülmektedir. PV panel eğiminin artırılması, rüzgârın PV panellerin ön ve arka yüzlerine daha iyi etki etmesine sebep olmuş ve PV panel sıcaklıkları panel dizisi boyunca yer yer 10 ^{o}C'ye kadar azalmıştır. Ayrıca sıcaklık dağılımı PV dizisi boyunca daha homojen olmuştur. Bu durum bizlere panellerin hem ön yüzünün hem de arka yüzünün güçlü rüzgârları alacak şekilde konumlandırılmasının PV panellerin soğuması üzerindeki pozitif etkilerini göstermektedir.



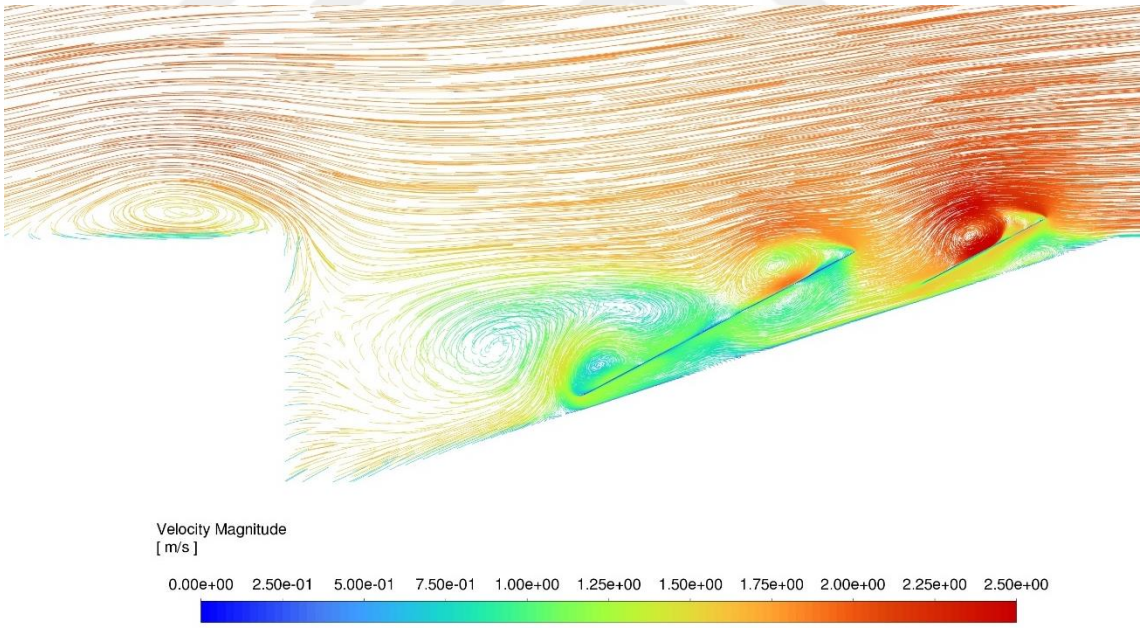
Şekil 4.66. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

4.2.6.2. Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel eğiminin 10^0 Arttırılması

Arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda $27,8^0$ panel eğiminde yapılan HAD analizlerine ait hız dağılımları Şekil 4.67 ve Şekil 4.68'de sunulmuştur. PV panellerin eğiminin artırılması ile panellerin önünde ve arkasında daha fazla türbülans bölgesi oluşmaktadır. Bu durumun soğutma performansına olumlu yansımaları oluşmuştur.



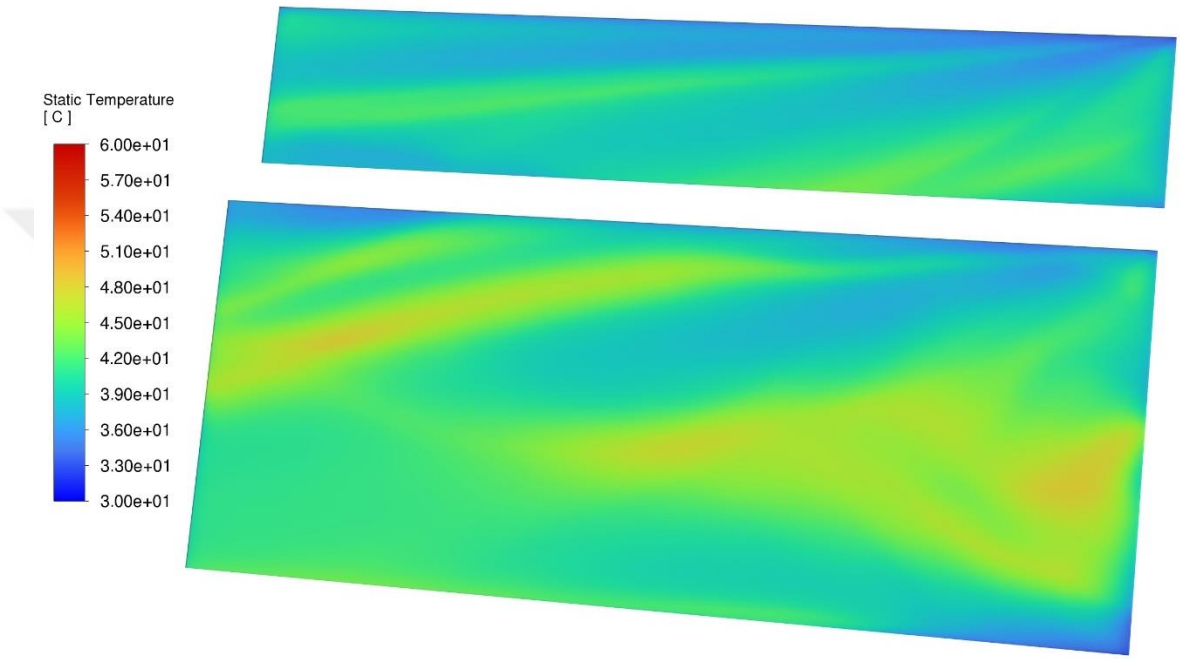
Şekil 4.67. 27,8^0 panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı



Şekil 4.68. 27,8^0 panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri

Şekil 4.52'de arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda panel sıcaklığı görülmekte ve sıcaklıklar 36 - 52 ^{o}C arasında değişmektedir. Şekil 4.69'da panel eğiminin 10^o arttırılması ile arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda oluşan PV panel dizisinin sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekil 4.69 incelendiğinde sıcaklıkların PV panellerin

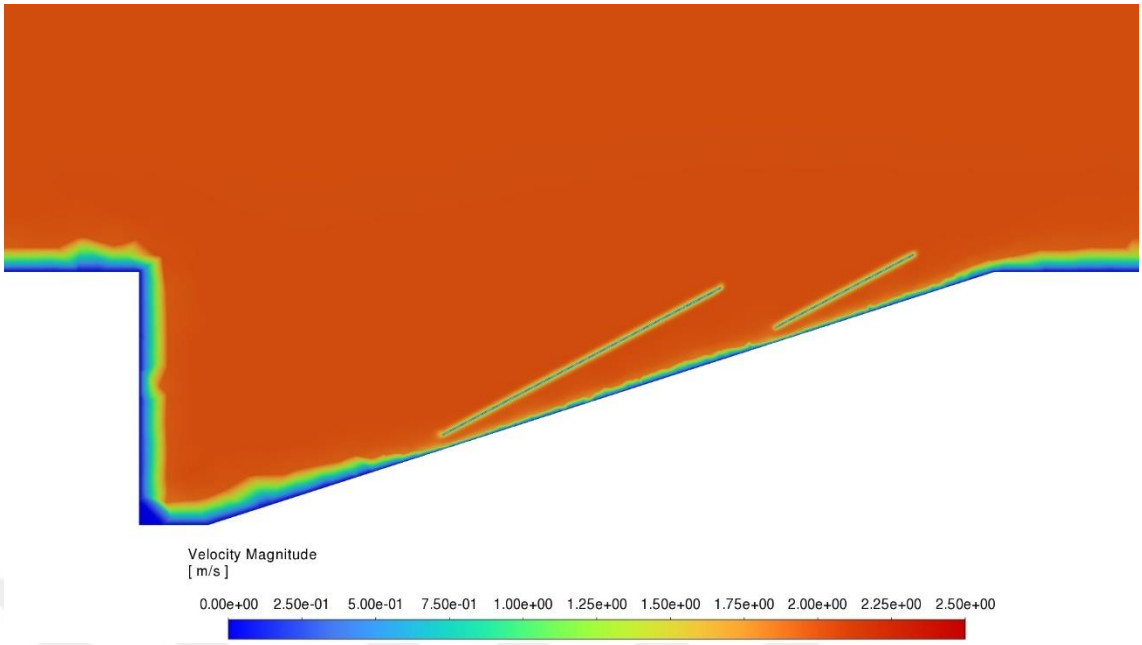
küçük bir kısmında maksimum 50 ºC'ye çıktığı görülmektedir. Genel olarak sıcaklıklar panel eğiminin $17,8^0$ olduğu duruma benzer bir dağılım göstermiş olup, üst sıralarda alt sıralara nazaran daha iyi bir soğutma etkisi görülmüştür. Panel eğiminin $27,8^0$'ye çıkarıldığı durumda tüm bölgelerde PV panel sıcaklıkları 5 ºC civarında azalma göstermiştir. Bu durum PV paneller çevresinde oluşan türbülansların artmasıyla ve daha güçlü rüzgarların panellere ulaşabilmesiyle açıklanabilir.



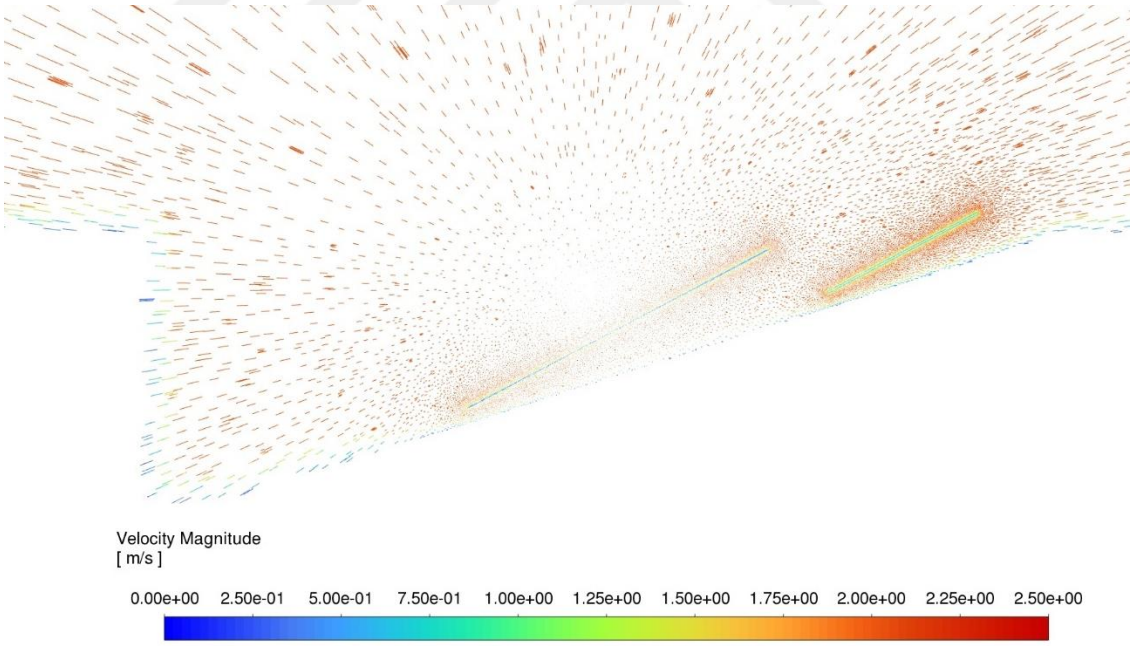
Şekil 4.69. $27,8^0$ panel eğiminde arkadan 45^0 açıyla gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

4.2.6.3. Yan rüzgâr durumunda panel eğiminin 10º Arttırılması

Yan rüzgâr durumunda panel eğiminin 10^0 arttırılmasının akış üzerinde pek bir etkisi görülmemiştir. Yan rüzgâr durumunda, rüzgâr hiçbir engelle karşılaşmadığı için PV panel eğiminin $17,8^0$ olduğu durumda PV paneller etrafında oluşan düşük türbülanslı bölgelerin daha da küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bu durumda düşük hızlı akış bölgeleri pek oluşmamakta, hız dağılımı son derece düzenli bir hal almaktadır. $27,8^0$ panel eğiminde yan rüzgâr durumundaki HAD analizleri Şekil 4.70 - Şekil 4.71 aralığında görülmektedir.



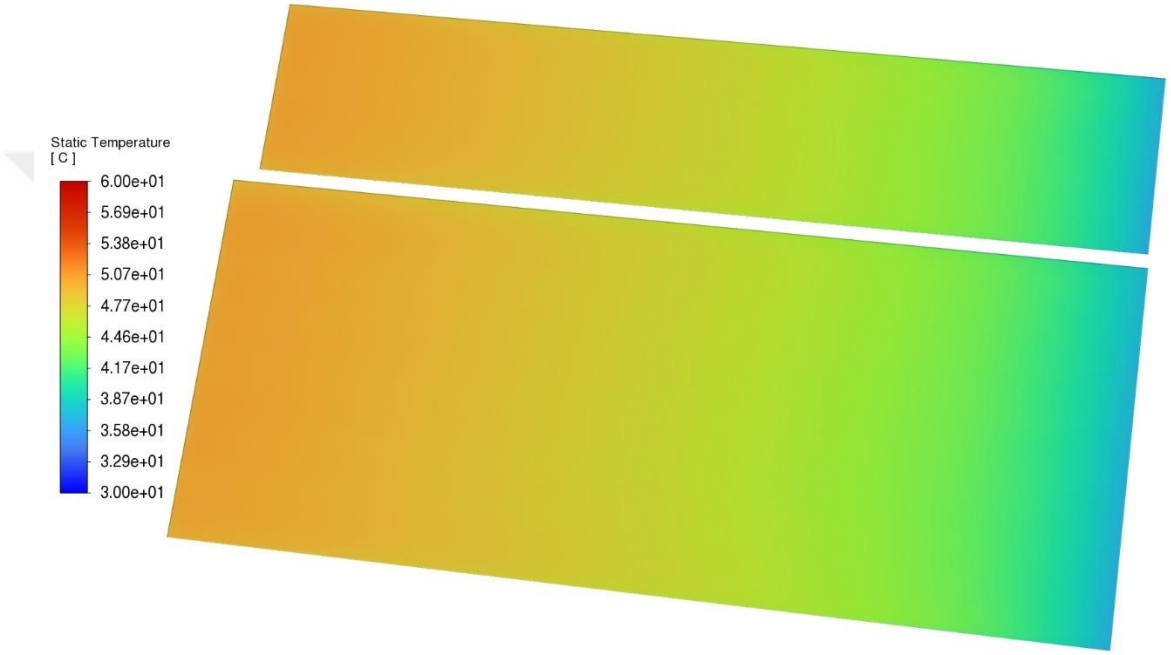
Şekil 4.70. $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımı



Şekil 4.71. $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda panel orta düzlemindeki hız dağılımına ait akış çizgileri

Şekil 4.72 incelendiğinde $27,8^0$ panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı görülmektedir. Şekil 4.72 panel eğiminin $17,8^0$ olduğu yan rüzgâr durumu ile karşılaştırıldığında sıcaklık dağılımın neredeyse aynı olduğu görülmektedir.

Sadece PV paneller etrafında oluşan düşük türbülanslı bölgelerde bir küçülme eğilimi olduğundan dolayı PV panel sıcaklıklarında önemsiz sayılabilecek çok küçük bir artış gözlemlenmiştir. Panel dizisinin sıcaklığı yine benzer şekilde 36 - 50 ^{o}C arasında değişmektedir. Soğuk yan rüzgarlara ilk temas eden bölgeler daha soğuk olurken, panel yüzeyinde ilerleyen rüzgarlar, panelden aldığı ısı ile ısınır ve soğutma etkisi azalır. Bu nedenle, panel sıraları ne kadar uzun olursa, yan rüzgarların soğutma etkisi de o kadar azalacaktır.



Şekil 4.72. 27,8^{0} panel eğiminde yandan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığı

5. SONUÇ

Bu çalışma çatı tipi bir PV güneş enerjisi santralinde rüzgârın doğal soğutma etkisinden faydalanarak, PV panel sıcaklığındaki düşüşü gözlemlemeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla monokristal PV panellerden oluşan çatı tipi bir santralin yaz dönemindeki gerçek dış ortam koşullarına dayanan ölçümleri, bu çatı tipi santralin HAD analizleri ile doğrulanmıştır. Rüzgâr yönünden bağımsız olarak yapılan değerlendirme de rüzgâr hızı farklarının 1 m/s'nin üzerine çıktığı durumlarda PV panellerdeki soğuma etkisinin 3 - 7 ^{o}C aralığında olduğunu göstermektedir.

Rüzgâr yönünün PV panel soğutma etkileri saha ölçümleri ve yapılan HAD analizleri ile incelenmiştir. Bu incelemede üç farklı yönden gelen rüzgâr hızları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırması yapılan rüzgâr yönleri olarak ölçüm alınan TOFAŞ çatı tipi PV santralinin yaz dönemi rüzgâr gülü incelenmiş ve en fazla rüzgârın Kuzey, Kuzeydoğu ve Doğu yönlerinden geldiği görülmüştür. Bu doğrultuda çatıda yerleştirilen PV panellere rüzgârın geliş yönleri olarak PV panelin arkasından gelen arka rüzgârlar, PV panelin arkasından 45^{0} açıyla doğu yönünde gelen rüzgârlar ve yandan gelen rüzgârlar ele alınmıştır. Bu üç farklı yönden gelen rüzgârlar karşılaştırılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Arka rüzgâr durumunda, panelin arkasından gelen rüzgarlar panel dizisi ile çatı arasındaki mesafe çok düşük olduğu için (15 cm) panelin arkasındaki boşluğa yeterince girememektedir. Bu yüzden arka rüzgâr durumunda panel dizisinin arkasındaki rüzgâr hızları diğer durumlara nazaran daha düşük olmaktadır ve bu durum arka rüzgâr durumundaki soğutma performansını düşürmektedir. Burada açıklanan durum çatı geometrisi dolayısıyla açığa çıkmaktadır. Rüzgârın panelin arkasına en iyi nüfuz ettiği durum olarak yan rüzgarlar ön plana çıkmaktadır. Arkadan 45^{0} açıyla gelen rüzgâr durumunda ise rüzgâr akış çizgileri incelendiğinde türbülansın arka rüzgâr durumuna göre azaldığı, yan rüzgâr durumuna göre ise artığı gözlemlenmiştir.

TOFAŞ çatı PV santralinde alınan ölçümler incelendiğinde rüzgâr geliş yönüne göre arka arkaya dizilen panel sıralarında, arkada kalan panellerin daha yüksek sıcaklıklara maruz kalacağı ve bu nedenle soğutma verimliliğinin azalacağı düşünülmektedir. Vasel ve Iakovidis (2017), İngiltere Hadley güneş PV santralinde yaptığı çalışmada

rüzgarların soğutma etkisinin en ön dizilerde en yüksek olduğunu ve rüzgarın ilerlediği yönde soğutma etkisinin git gide azaldığını bulmuşlardır. Yani eğer rüzgâr güneyden geliyorsa doğu-batı yönünde yönlendirilmiş alanlara güneş PV santralleri kurmak, akış yönünde daha az panel sırasını geçmek zorunda kalan (rüzgâr akışının daha az bozulması) ve daha az ısıtılmış (daha az panele temas eden rüzgarlar daha az ısıtılmış olarak düşünülür) bir güney rüzgarına daha fazla PV panelinin maruz kalmasını sağlar ve bu da doğal soğutmadan daha fazla yararlanmaya yardımcı olur. Örneğin, Hadley güneş PV santrali güney-kuzey yönünde yönlendirilmiş bir alana inşa edilmiştir ve bu nedenle, rüzgâr bu alanın kuzey tarafında bulunan dizilere ulaştığında sıcaklığı artar ve soğutma verimliliği azalır. Bu güneş PV santrali, batı-doğu yönünde yönlendirilmiş olsaydı daha verimli çalışırdı. Bu nedenle bir PV santral tasarımı yapılırken hâkim rüzgâr yönünün dikkate alınması gerekmektedir ve PV panellerin yerleşimi yapılırken hâkim rüzgârın geldiğin yönde panel sıraları çok uzun tutulmamalıdır. TOFAŞ çatı PV santralinde artan rüzgâr hızları ile yan rüzgarların soğutma etkisinin arka rüzgarlara nazaran daha yüksek soğutma performansı gösterdiği bulunmuştur. Bu durumun asıl nedeni ise kurulumun gerçekleştirildiği çatı geometrisidir.

Modelde görülen çatı geometrisi ve akış analizi sonuçlarına göre, rüzgâr akışında oluşan girdaplar ve türbülanslar en çok arka rüzgâr yönünde, ardından 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda ortaya çıkmaktadır. Yan rüzgâr durumlarında ise akış oldukça kararlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Türbülans ve girdap oluşumları, panel soğutması açısından istenen bir durumdur, çünkü bu tür hareketler panel yüzeyinden daha fazla ısıyı uzaklaştırır. Ancak analizler, arkadan gelen rüzgâr durumunda panel sıcaklıklarının diğer durumlara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, çatı geometrisinin arka rüzgârların panel arkasına ve çatı çukuruna yeterince nüfuz etmesini engellemesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle PV paneller, diğer durumlara kıyasla daha az soğutma etkisi almış ve daha sıcak kalmışlardır.

Analiz sonuçlarına göre, arka rüzgâr durumunda PV panel sıcaklıkları 36 - 58 °C, 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda 36 - 52 °C, yan rüzgâr durumunda ise 36 - 50 °C aralığında ölçülmüştür. Yan rüzgâr durumunda en düşük panel sıcaklıkları elde edilmesine rağmen, rüzgâr akış yönünde ilerledikçe PV panel sıcaklıklarının arttığı gözlenmiştir. Panel sıralarının uzunluğu arttıkça sıcaklıkların daha yüksek değerlere

ulaşabileceği açıktır. Bu nedenle yan rüzgâr durumunda, çok uzun panel sıralarından kaçınılmalı ve paneller soğuk rüzgârları alacak şekilde rüzgâr yönüne dik yerleştirilmelidir.

Benzer şekilde, arka ve 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumlarında, panel sıralarının sayısı arttıkça soğutma etkisinin azalacağı değerlendirilmektedir. Bunun nedeni, her panel sırasının ardına geçen rüzgârın daha sıcak hale gelmesidir. Bu durum, panellerin soğuma etkisini sınırlandırır. Dolayısıyla, arka ve 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumlarında, rüzgâr akış yönünde çok fazla panel sırasının yerleştirilmesi uygun olmayacaktır. Özellikle arka rüzgâr durumunda, panellerin rüzgâra dik uzun sıralar oluşturacak şekilde düzenlenmesi, PV panel yüzeylerinden maksimum ısının uzaklaştırılmasını sağlayacaktır.

Ayrıca HAD analizlerinde PV panellerin açısı 10^0 (PV panel açısı $27,8^0$) arttırılarak rüzgârın panelin arka kısmına daha iyi nüfuz ettiği durumlar 4. bölümde sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde PV panel eğiminin 10^0 arttırılması ile arka rüzgâr durumunda PV paneller sıcaklıkları 36 - 58 °C aralığından 40 - 48 °C aralığına düşerken, 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda PV paneller sıcaklıkları 36 - 52 °C aralığından 36 - 48 °C aralığına düşmüştür. 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda PV panel sıcaklığının 10^0 arttırılması tüm bölgelerin yaklaşık olarak 5 °C daha fazla soğumasını sağlamıştır. Bu durum PV panel açısının 10^0 arttırılması ile yeni oluşan türbülans etkilerinin en fazla 45° açıyla arkadan gelen rüzgâr durumunda olduğunu göstermektedir. Yan rüzgâr durumunda ise PV panel eğiminin 10^0 arttırılması ile PV paneller sıcaklıkları hiç değişmemiş ve 36 - 52 °C aralığında kalmıştır.

Ayrıca bu çalışma içerisinde panel sıcaklığının 60 °C'den, 50 °C'ye düşmesinin panel veriminde % 4,02'lik bir artışa karşılık geleceği hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar, bir PV santralinin tasarım aşamasında, rüzgâr hızının yüksek olduğu bölgelerin tercih edilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, rüzgârın tüm PV dizilerine etkin bir şekilde ulaşmasını sağlayacak uygun santral konfigürasyonlarının oluşturulması gereklidir. Mevcut bir santralde tasarım değişiklikleri yapmak genellikle zorlu ve maliyetli bir süreç olacağından, tasarım aşamasında gerçekleştirilecek optimum

düzenlemelerle, ciddi bir maliyet artışı olmaksızın santral performansında kayda değer iyileştirmeler sağlanabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, rüzgâr hızlarının PV paneller üzerinde belirgin bir soğutma etkisi yarattığını açıkça ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, rüzgârın bu soğutma etkisini maksimize edecek şekilde PV dizi tasarımlarının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar, bu etkinin artırılmasına yönelik olarak PV dizi tasarımlarının iyileştirilmesine odaklanmalıdır. Bu kapsamda, rüzgârın PV panellerin arkasına daha rahat ulaşabilmesi için uygun çatı konstrüksiyonları tercih edilebilir ve panel dizilerinin yerleşimi belirlenirken, santral kurulumundan önce CFD analizleri kullanılarak en uygun tasarım tespit edilebilir. Ayrıca, panel eğimi, yönelimi, türü, aralığı ve konumu gibi faktörlerin yanı sıra çatı geometrilerindeki değişimlerin türbülans, ısı iletimi, taşınım ve çevresel etkilerle birleşerek santral verimini nasıl etkilediği detaylı şekilde araştırılmalıdır.

Çatı tipi PV santraller için ise, daha yüksek panel sıcaklıkları ve daha düşük elektrik verimi gibi kritik durumlarda, farklı çatı geometrileri ve rüzgâr yönleri ile düşük rüzgâr hızlarının etkilerinin incelendiği yeni çalışmalar yapılması önerilmektedir. Ayrıca, santrallerin invertör çıkış güçlerinin incelenmesi yoluyla, rüzgârın soğutma etkisinin santral güç çıkışı ve genel verim üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi, gelecekteki tasarım ve optimizasyon çalışmaları için önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abd-Elhady, M. S., Serag, Z., & Kandil, H. A. (2018). An innovative solution to the overheating problem of PV panels. *Energy Conversion and Management*, *157*(December 2017), 452–459. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.017

Ahmed, M. S., Karal, R., Das, B. K., & Das, A. (2023). Experimental investigation of cooling, wind velocity, and dust deposition effects on solar PV performance in a tropical climate in Bangladesh. *Case Studies in Thermal Engineering*, *50*(August), 103409. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103409

Alantali, M. A., Rafiq, H., Alzarouni, S. A., Qureshi, O. A., & Rodriguez-Ubinas, E. (2023). Wind Speed Effect on the Performance of Free-Standing PV Modules in Hot Desert Climate. *2023 Middle East and North Africa Solar Conference, MENA-SC 2023 - Proceedings*, 1–5. https://doi.org/10.1109/MENA-SC54044.2023.10374470

Amr, A. A. raheim, Hassan, A. A. M., Abdel-Salam, M., & El-Sayed, A. H. M. (2019). Enhancement of photovoltaic system performance via passive cooling: Theory versus experiment. *Renewable Energy*, *140*, 88–103. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.048

Ansys. (2009). *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation*. Retrieved from https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm

Arçelik. (2021). Arçelik Solar Enerji Kataloğu. Retrieved from https://lasenmuhendislik.com.tr/wp-content/uploads/2022/08/ARCELIK-SOLAR-KATALOG.pdf

Bayrak, F. (2017). *Fotovoltaik panellere bütünleştirilmiş farklı pasif yöntemlerin sistem verimliliğine etkisinin sayısal ve deneysel analizi*. *Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat üniversitesi, Elazığ*.

Chan-Dzib, E., Bassam, A., & Carrillo, J. G. (2024). Novel curled cooler to enhance the efficiency of a photovoltaic panel system. *Applied Thermal Engineering*, *249*(April), 123317. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123317

Chowdhury, M. G., Goverde, H., Manganiello, P., Voroshazi, E., Poortmans, J., & Catthoor, F. (2019). Sensitivity analysis of the effect of forced convection on photovoltaic module temperature and energy yield. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1237–1241. https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980517

Cuce, E., Bali, T., & Sekucoglu, S. A. (2011). Effects of passive cooling on performance of silicon photovoltaic cells. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *6*(4), 299–308. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctr018

Cuce, E., Cuce, P. M., & Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*, *111*, 374–382. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.025

Dabaghzadeh, N., & Eslami, M. (2019). Temperature distribution in a photovoltaic module at various mounting and wind conditions: A complete CFD modeling. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *11*(5). https://doi.org/10.1063/1.5114895

Du, Y., Tao, W., Liu, Y., Jiang, J., & Huang, H. (2017). Heat transfer modeling and temperature experiments of crystalline silicon photovoltaic modules. *Solar Energy*, *146*, 257–263. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.049

Dwivedi, P., Sudhakar, K., Soni, A., Solomin, E., & Kirpichnikova, I. (2020). Advanced

cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, *21*(December 2019), 100674. https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674

Elibol, E., Özmen, Ö. T., Tutkun, N., & Köysal, O. (2017). Outdoor performance analysis of different PV panel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 651–661. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051

EMBER. (2024). *Türkiye Elektrik Görünümü 2024*. Retrieved from https://ember-energy.org/tr/analizler/turkiye-elektrik-gorunumu-2024/

Ertürk, G. (2018). *Enerji Depolamali Fotovoltaik Güneş Panellerinde Gölgelendirmenin Enerji Ve Ekserji Verimliliği Üzerine Etkisinin Araştirilmasi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Gedik, E. (2016). Experimental Investigation of Module Temperature Effect on Photovoltaic Panels Efficiency Modül Sı cakl ığı n ı n Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *19*(4), 569–576.

Gnssolar. (2023). Bursa. Retrieved from https://www.gnssolar.com/icerik/860/turkiye-gunes-haritasi

Gökmen, N., Hu, W., Hou, P., Chen, Z., Sera, D., & Spataru, S. (2016). Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations. *Renewable Energy*, *90*, 283–290. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.017

Hasanuzzaman, M., Malek, A. B. M. A., Islam, M. M., Pandey, A. K., & Rahim, N. A. (2016). Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review. *Solar Energy*, *137*, 25–45. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.010

Homadi, A. M. (2016). Effect of Elevation and Wind Direction on Silicon Solar Panel Efficiency. *International Journal of Energy and Power Engineering*, *2016*(9), 1205–1212.

International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2023 | Enhanced Reader, 23–28. Retrieved from https://www.iea.org/news/the-energy-world-is-set-to-change-significantly-by-2030-based-on-today-s-policy-settings-alone

IRENA. (2024). *Renewable Power Generation Costs In 2022 - Executive Summary*. *International Renewable Energy Agency*. Retrieved from www.irena.org

Jaszczur, M., Teneta, J., Hassan, Q., Majewska, E., & Hanus, R. (2021). An Experimental and Numerical Investigation of Photovoltaic Module Temperature Under Varying Environmental Conditions. *Heat Transfer Engineering*, *42*(3–4), 354–367. https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1699306

Jubayer, C. M., Siddiqui, K., & Hangan, H. (2016). CFD analysis of convective heat transfer from ground mounted solar panels. *Solar Energy*, *133*, 556–566. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.027

Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Ahmed, A. A., & Wan Nor Roslam, W. I. (2023). Enhancement of photovoltaic module performance using passive cooling (Fins): A comprehensive review. *Case Studies in Thermal Engineering*, *49*(January), 103316. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103316

Kerem, A., Atik, M., & Bayram, A. (2020). Experimental Investigation of the Effect of Surface Cooling on Photovoltaic (Pv) Panel System for Electricity Production. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 565–578. https://doi.org/10.29137/umagd.659347

Leow, W. Z., Irwan, Y. M., Asri, M., Irwanto, M., Amelia, A. B., Syafiqah, Z., & Safwati, I. (2016). Investigation of solar panel performance based on different wind velocity using ANSYS. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and*

Computer Science, *1*(3), 456–463. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v1.i3.pp456-463
Malik, A. Q., & Damit, S. J. B. H. (2003). Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. *Renewable Energy*, *28*(9), 1433–1445. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00255-0
Mehdi, M., Ammari, N., Alami Merrouni, A., Benazzouz, A., & Dahmani, M. (2023). Experimental investigation on the effect of wind as a natural cooling agent for photovoltaic power plants in desert locations. *Case Studies in Thermal Engineering*, *47*(April), 103038. https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103038
Mondol, J. D., Yohanis, Y., Smyth, M., & Norton, B. (2006). Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. *Energy Conversion and Management*, *47*(18–19), 2925–2947. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.026
Naghavi, M. S., Esmaeilzadeh, A., Singh, B., Ang, B. C., Yoon, T. M., & Ong, K. S. (2021). Experimental and numerical assessments of underlying natural air movement on PV modules temperature. *Solar Energy*, *216*(February), 610–622. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.007
Nahani, P., Eslami, M., & Hamzehzarghani, R. (2024). Effects of wind on cooling and performance of photovoltaic arrays: A case study CFD modeling. *Energy*, *293*(September 2023), 130596. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130596
Özen, Y. (2015). *II-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi Ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
Öztürk, H. H. (2012). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
Park, K. E., Kang, G. H., Kim, H. I., Yu, G. J., & Kim, J. T. (2010). Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. *Energy*, *35*(6), 2681–2687. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.019
Rehman, S., & El-Amin, I. (2012). Performance evaluation of an off-grid photovoltaic system in Saudi Arabia. *Energy*, *46*(1), 451–458. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.004
REN21. (2024a). Renewables 2024 Global Status Report, Energy supply 2024. *REN21 Secretariat*. Retrieved from https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/01_global_trends/
REN21. (2024b). Renewables 2024 Global Status Report, Global Overview. *REN21 Secretariat*. Retrieved from https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/global_overview/
Robsys Robotic Systems. (2018). Güneş Enerjisi Paneli Temizlik Makinesi. Retrieved from https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=8UUdC1tw8Ho
Saygılı, R. (2024). Türkiye Güneş Enerjisi Haritası, 2022. Retrieved from http://cografyaharita.com/turkiye_enerji_haritalari.html
Sevilgen, G. (2010). *Otomobil Kabininde Hız ve Sıcaklık Dağılımının Üç Boyutlu Sayısal Analizi*. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
Sudhakar, K., & Srivastava, T. (2014). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*, *35*(1), 51–57. https://doi.org/10.1080/01430750.2013.770799
Syafiqah, Z., Amin, N. A. M., Irwan, Y. M., Majid, M. S. A., & Aziz, N. A. (2017). Simulation study of air and water cooled photovoltaic panel using ANSYS. *Journal of Physics: Conference Series*, *908*(1). https://doi.org/10.1088/1742-

6596/908/1/012074
TEİAŞ. (2024). 2023 yılı Elektrik üretim Tüketim Raporları. Retrieved from https://www.teias.gov.tr/
Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, *90*(1), 309–315. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017
Tokgöz, N., & Süfer, Ö. (2023). 10.47495-Okufbed.1191498-2718195, *6*(3), 2392–2408.
Vasel, A., & Iakovidis, F. (2017). The effect of wind direction on the performance of solar PV plants. *Energy Conversion and Management*, *153*(September), 455–461. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.077
Waterworth, D., & Armstrong, A. (2020). Southerly winds increase the electricity generated by solar photovoltaic systems. *Solar Energy*, *202*(August 2019), 123–135. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.085
Yigit, A., Arslanoglu, N., & Gul, H. (2023). Transient thermal modeling and performance analysis of photovoltaic panels. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *42*(4). https://doi.org/10.1002/ep.14052