



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARAZİLERE SOLAR PANELLER DİZİSİNİN RÜZGAR YÜKÜ ALTINDA SİMÜLASYONU

KHALED ADAMEH

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2019

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARAZİLERE SOLAR PANELLER DİZİSİNİN
RÜZGAR YÜKÜ ALTINDA SİMÜLASYONU

KHALED ADAMEH

Bu tez,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2019

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Khaled ADAAMEH tarafından hazırlanan “ARAZİLERE SOLAR PANELLER DİZİSİNİN RÜZGAR YÜKÜ ALTINDA SİMÜLASYONU” adlı bu tez, jürimiz tarafından 03/07/2019 tarihinde oy birliği / oy çokluğu ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE (DANIŞMAN)

.....

İnşaat Müh.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Abdulkadir ÇEVİK (ÜYE)

.....

İnşaat Müh.

Gaziantep Üniversitesi

Prof. Dr. MEHMET ÜNSAL (ÜYE)

.....

İnşaat Müh.

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Khaled ADAMEH



Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No:.../.-... YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ARAZİLERE SOLAR PANELLER DİZİSİNİN RÜZGÂR YÜKÜ ALTINDA SİMÜLASYONU (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

KHALED ADAMEH

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hızla artmaktadır. Bu eğilimin ardından, geniş alanlı güneş enerjisi sistemlerinin uygulanmasının bir zorunluluk olduğu düşünülmektedir. Maksimum toplam verimin elde edilmesi için taşıyıcı sistemlerin birkaç tasarım yaklaşımı sunulmuştur. Genelde aerodinamik kuvvetlerle yüklenir. Uluslararası yönetmelikler ve endüstriler arasındaki rekabet, büyük rüzgâr hızlarından kaynaklanan muazzam yüklere dayanmaları gerektiğini tanımlamaktadır. Ayrıca, 20 yıldan daha uzun bir ömürleri olmalıdır. Gerilme analizi taşıyıcı sistemleri optimize etmede önemli rol oynar. Bilgisayar tabanlı sonlu elemanlar yazılımındaki gelişmeler nedeniyle tasarım süreci, yapılanmış modellerin hızlı bir şekilde değiştirilmesi ve test edilmesini kolay simülasyon yöntemleriyle kolaylaştırmıştır.

Bu çalışmadaki güneş sisteminin modeli, Şanlıurfa-Siverek ilçesinde yapılan elektrik üretim projesinden alınmıştır. Model, beton temeller ile araziye tespit edilmiş tek ayaklı bir taşıyıcı sisteme monte edilmiş 30° açıyla eğilmiş iki sıradaki 22 güneş panelinden oluşur. Arazi eğiminin güneş sisteminin davranışına etkisini incelemek için, model önce düz arazi üzerine daha sonra 10, 20, 30 derece ile eğilmiş arazilere yerleştirilmiş. Buna göre toplam yapısal analiz modeli sayısı dört olmuştur. İlk önce simülasyon Ansys Workbench programında 28 m/s rüzgâr hızlarında Spalart-Allmaras türbülans modeliyle Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımını elde etmek için HAD analizi ve daha sonra yapısal analizde bir yük olarak kullanılabilmek için basınç dağılımının Excel dosyası olarak çıkarılması içermiştir. Burada, enerji santrallerine yerleştirilen güneş panelleri üzerinde ardışıklığın etkisini göz önünde bulundurmak için, dört modelin her bir modeli için panellere arka arkaya beş sıra kadar eklenmiş ve toplam simülasyon modellerinin sayısı yirmi olmuştur. Son olarak, yapısal analiz sırasında güneş panellerine uygulanacak basınç yükü elde edildikten sonra, dört temel modelin doğrusal statik analizi yapılmıştır.

HAD simülasyonu yapıldıktan sonra güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımı elde edilmiştir; buradaki ilk güneş panelleri sırasının, rüzgârın bir sonraki sıralara ilerlemesini

önleyen bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Arazi eğiminin arttırılmasının, rüzgâr yükünü azalttığı da gözlenmiştir. Arazi eğimi arttıkça, her iki güneş paneli yüzeyindeki basınç pozitif hale gelmiştir. Diğer bir deyişle, panellerin arka yüzdeki basınç ön yüzdeki basıncı azaltarak

direnç gösterir. Bu nedenle, panellerin yüzeyleri arasındaki basınç farkları daha düşük olur, bu da taşıyıcı sistem üzerinde daha düşük bir yük durumu anlamına gelir ki bunu da statik analizin sonuçlarıyla doğrulanmıştır (yer değiştirme, gerilme, güvenlik faktörü vb.).

Anahtar Kelimeler: Ansys/Workbench Programı, Arazinin Eğim Açısı, Ardışıklık Etkisi, Doğrusal Statik Analizi, HAD Simülasyonu, Solar paneller

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Temmuz / 2019

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE

Sayfa sayısı: 154

**SIMULATION OF SOLAR PANEL'S ARRAY MOUNTED ON GROUND UNDER
WIND LOAD
(M.Sc. THESIS)**

KHALED ADAMEH

SUMMARY

The use of renewable energy resources is increasing rapidly. Following this trend, the implementation of large area solar arrays is considered to be a necessity. Several design approaches of the supporting structures have been presented in order to achieve the maximum overall efficiency. They are loaded mainly by aerodynamic forces. International regulations as well as the competition between industries define that they must withstand the enormous loads that result from large air velocities. Furthermore, they must have a life expectancy of more than 20 years. Stress analysis plays important role in optimizing the structure. Due to the advances in computer based finite element software's design process is made simple by easier simulation methods fast replacing prototype built up and testing.

In the current study, the model of the solar system was taken from the power generation project carried out in the Sanliurfa state in the city of Siverek. The model consists of 22 solar panels in two rows tilted at a 30° angle on the horizon and mounted on a single-legged support structure installed on the ground with concrete bases. In order to study the effect of ground's inclination on the behavior of the solar system, the model was once placed on flat ground and again on inclined grounds with a tilt of 10, 20 and 30 degrees on the horizon. Accordingly, the total number of structural analysis models has become four. Firstly, the simulation was carried out in the Ansys Workbench program on wind speeds of 28 m/s using the Computational fluid dynamics (CFD) method with Spalart-Allmaras turbulence model. The simulation includes the CFD analysis to get the pressure distribution over the solar panels and then extract the pressure distribution to use it as a load in the structural analysis. Here, to consider the effect of the consecutiveness on the solar panels placed in the power plants, up to 5 rows of panels were added behind each other for each model of the four models, bringing the total number of simulation models twenty. Finally, after obtaining the pressure load to be applied to the solar panels during the structural analysis, the linear static analysis of the four basic models was performed.

According to the CFD simulation were reached to the distribution of pressure on solar panels where observed that the first row of solar panels plays a role of impediment that prevents the wind from advancing towards the next rows. It was also observed that increasing the ground's tilt reduces wind load. As the ground's tilt increases, the pressure on both solar panel faces becomes positive. That is, the pressure on the back of the panels will resist the pressure on the front face in an attempt to reduce it. Thus, lower pressure differentials between the sides of the panels, which means a lower load state on the supporting structure and this has been confirmed by the results of the static analysis (deformation, stress, safety factor, etc.).

Key words: Ansys / Workbench Program, Ground's Tilt Angle, Consecutiveness Effect, Linear Static Analysis, CAD Simulation, Solar Panels

University of Kahramanmaraş Sütçü İmam
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering, July / 2019

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE

Page Numbers: 154

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve çalışmamın her aşamasında sağladığı bilimsel katkılardan dolayı Prof. Dr. Mehmet Metin KÖSE'ye, her fırsatta bilgi ve birikimlerinden yararlandığım tüm bölüm hocalarıma, tüm çalışmalarım süresince değerli görüş ve fikirlerini benimle paylaşanlara ve bana her konuda destek olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bu günlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteklerini gördüğüm aile büyüklerime, kardeşlerime, eşime ve kızlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	i
SUMMARY	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Güneş Enerjisi	1
1.2 Güneş Enerjisi Sistemleri (GES).....	2
1.2.1 Arazi uygulamalı GES	2
1.2.2 Çatı uygulamalı GES	4
1.3 Güneş Panelleri ve Rüzgâr Yüğü	4
2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
3 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE TÜRBÜLANS MODELLERİ	10
3.1 Temel Kavramlar.....	10
3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Çözüm Adımları	10
3.2.1 Ağ yapısının oluşturulması	11
3.2.1.1 Yapılandırılmış bir ağ.....	11
3.2.1.2 Yapılandırılmamış bir ağ	11
3.2.2 Sınır şartları.....	11
3.2.2.1 Duvar şartları	11
3.2.2.2 Giriş ve çıkış sınır şartları.....	12
3.2.2.3 Diğer sınır şartları	12
3.3 Navier-Stokes Denklemleri	12
3.4 Türbülans Modelleri	13
3.4.1 Spalart-Allmaras modeli	15
3.4.1.1 Taşıma denklemi.....	16
3.4.1.2 Türbülans viskozitesi modellenmesi.....	16
3.4.1.3 Türbülans üretimi modellenmesi	17
3.4.1.4 Türbülans yıkımı modellenmesi	18
3.4.1.5 Model sabit sayıları.....	18
4 DOĞRULAMA ÇALIŞMASI.....	19

Sayfa No

4.1	Deneysel Çalışmalar.....	19
4.2	Rüzgâr Tüneli Testinde kullanılan gövdenin HAD Analizi	20
4.3	Karşılaştırma.....	21
5	HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİNİN (HAD) İŞLEMİNİN ADIMLARI	26
5.1	Rüzgâr Tüneli Mantığının Oluşturulması.....	27
5.1.1	Düz arazi uygulamalı	29
5.1.1.1	Ardışık paneller.....	30
5.1.2	Düz olmayan arazi uygulamalı	33
5.1.2.1	Ardışık paneller.....	35
5.2	Sonlu Elemanlara Bölme İşlemi	37
5.3	Sınır Şartlarının Belirlenmesi	43
5.3.1	Türbülans modelinin belirlenmesi	44
5.3.2	Akışkan ve özelliklerinin belirlenmesi	44
5.3.3	Sınır koşullarının girilmesi	45
5.4	Analiz Yöntemi	47
6	DOĞRUSAL STATİK ANALİZİ İŞLEM ADIMLARI	50
6.1	Malzemelerin Tanımı	54
6.2	Bağlantılar	56
6.3	Sonlu Elemanlar Bölme İşlemi.....	58
6.4	Sınır Şartları.....	61
6.5	Yük Şartları.	63
6.6	Analiz Çıktılarının Belirlenmesi.....	66
7	SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMA.....	72
7.1	HAD Simülasyonu Sonuçları	73
7.2	Statik Analizi Sonuçları.....	84
7.3	Karşılaştırma.....	95
7.3.1	Türk standardı (TS-498)	95
7.3.2	Avrupa standardı (EN 1991-1-4)	95
7.3.3	Amerikan standardı (ASCE7)	97
7.3.4	HAD sonuçlarına göre	100
	KAYNAKLAR.....	103
	EKLER	105
	ÖZGEÇMİŞ	134

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Fotovoltaik panellerin genel şekli	1
Şekil 1.2	Konsantre güneş enerjisinin türleri	2
Şekil 1.3	Arazi uygulamalı bazı GES türleri.....	3
Şekil 1.4	Güneş paneli üzerindeki rüzgâr basınç dağılımı, (a) rüzgâr yönü panel ön yüzüne (b) rüzgâr yönü panel arka yüzüne [4].....	6
Şekil 3.1	Ani hızın zamanla değişimi [10]	15
Şekil 4.1	Rüzgâr tüneli deneyinin mesh hali [3]	21
Şekil 4.2	Bu çalışmaya göre rüzgâr tüneli.....	22
Şekil 4.3	Bu çalışmaya göre son mesh hali	22
Şekil 4.4	Aerodinamik kuvvetler [26].....	23
Şekil 5.1	Analiz modülünün seçilmesi	27
Şekil 5.2	Temsili güneş enerji sisteminin modeli	28
Şekil 5.3	Taşıyıcı sistemin kaldırılması	29
Şekil 5.4	Düz arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli	30
Şekil 5.5	Düz arazi uygulamalı iki sıra için rüzgâr tüneli	31
Şekil 5.6	Düz arazi uygulamalı üç sıra için rüzgâr tüneli	31
Şekil 5.7	Düz arazi uygulamalı dört sıra için rüzgâr tüneli.....	32
Şekil 5.8	Düz arazi uygulamalı beş sıra için rüzgâr tüneli	32
Şekil 5.9	10° ile eğimli arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli.....	33
Şekil 5.10	20° ile eğimli arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli.....	34
Şekil 5.11	30° ile eğimli arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli.....	34
Şekil 5.12	10° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller	35
Şekil 5.13	20° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller	36

Şekil 5.14	30° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller	37
Şekil 5.15	Düz olan rüzgâr tüneli kenarlarının mesh detayları	38
Şekil 5.16	Düz olmayan rüzgâr tüneli kenarlarının mesh detayları	38
Şekil 5.17	Güneş panelleri kenarlarının mesh detayları	39
Şekil 5.18	Düz arazi uygulamalı modelin meshlenmiş hali	40
Şekil 5.19	Düz olmayan arazi uygulamalı modelin meshlenmiş hali	40
Şekil 5.20	Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli girişi	41
Şekil 5.21	Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli çıkışı	42
Şekil 5.22	Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli yan duvarları	42
Şekil 5.23	Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli güneş panelleri	43
Şekil 5.24	Çözümleme yönteminin seçilmesi	43
Şekil 5.25	Türbülans modelinin seçilmesi	44
Şekil 5.26	Akışkanın tanımlanması	45
Şekil 5.27	Giriş koşulunun girilmesi	46
Şekil 5.28	Çıkış koşulunun girilmesi	46
Şekil 5.29	Giriş kısmı için tanımlanmış değerler	47
Şekil 5.30	Çözümlemede kullanılan yöntemi	48
Şekil 5.31	Çözüm başlangıç durumuna getirmesi	48
Şekil 5.32	İterasyon sayısı girilmesi ve heaplama çalıştırılması	49
Şekil 6.1	Analizde kullanılan güneş panelleri ve taşıyıcı yapı	51
Şekil 6.2	Analiz modülünün seçilmesi	53
Şekil 6.3	Basınç dosyası eklenmesi ile birimlerin ve verilerin uyumluluğu	53
Şekil 6.4	Malzemelerin eklenmesi	54
Şekil 6.5	Alüminyum elemanları tanımlanması	55
Şekil 6.6	Yapışkan yüzeyler bağlaması	56

Şekil 6.7	Güneş panelleinin aşıklar ile bağlanması.....	57
Şekil 6.8	Aşıkların girişler ile bağlanması	57
Şekil 6.9	Girişlerin kolonlar ile bağlanması.....	58
Şekil 6.10	Kolonların çarpaz profiller ile bağlanması.....	58
Şekil 6.11	Meh yöntemi seçilmesi	59
Şekil 6.12	Sonlu elemanların boyutlandırılması	60
Şekil 6.13	Modelin meshlenmiş hali	61
Şekil 6.14	Sınır şartlarının tanımlama işlemi	62
Şekil 6.15	Modeldeki mesnetlerin hali.....	62
Şekil 6.16	Basınç yükünün harici dosyadan içeri aktarılması.....	63
Şekil 6.17	Tanımlanmış basınç yükünün hali	64
Şekil 6.18	Basıncının uygulandığı yüzeyler tanımlaması	64
Şekil 6.19	Yük şartlarının tanımlama işlemi	65
Şekil 6.20	Panellerin ön yüzeylerindeki basınç dağılımı	65
Şekil 6.21	Panellerin arka yüzeylerindeki basınç dağılımı	66
Şekil 6.22	Toplam yer değiştirme sonucunun ekleme işlemi.....	66
Şekil 6.23	Toplam yer değiştirme sonucunu görmek için elemanın belirlenmesi	67
Şekil 6.24	Gerilme sonucunun ekleme işlemi	67
Şekil 6.25	Eşdeğer gerilme sonucunu görmek için elemanın belirlenmesi.....	68
Şekil 6.26	Reaksiyon sonuçlarının ekleme işlemi.....	68
Şekil 6.27	Reaksiyon sonucunu görmek için mesnet belirlenmesi	69
Şekil 6.28	Güvenlik faktörünün ekleme işlemi	69
Şekil 6.29	Güvenlik faktörünü bulmak için kullanılan çözüm yönteminin seçilmesi	70
Şekil 6.30	Güvenlik faktörünü görmek için elemanın belirlenmesi.....	70
Şekil 6.31	Eklenen ya da değiştirilen sonuçlarının değerlendirilmesi	70

Şekil 6.32	Analizin başlatılması.....	71
Şekil 7.1	Düz arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	73
Şekil 7.2	Düz arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	74
Şekil 7.3	Düz arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	74
Şekil 7.4	Düz arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	75
Şekil 7.5	Düz arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	75
Şekil 7.6	Düz arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi	76
Şekil 7.7	Düz arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi	76
Şekil 7.8	Düz arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi	77
Şekil 7.9	Düz arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi.....	77
Şekil 7.10	Düz arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi.....	78
Şekil 7.11	Düz arazi; maksimum ve minimum basınç farkları	80
Şekil 7.12	10° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları.....	81
Şekil 7.13	20° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları.....	81
Şekil 7.14	30° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları.....	82
Şekil 7.15	Tek başına duran panellerde oluşan basınç farkları	83
Şekil 7.16	Arazinin eğim açısına göre basınç farkından, tek başına duran panellerin payı	83
Şekil 7.17	Düz arazi; toplam yer değiştirme	84
Şekil 7.18	10° eğimli arazi; toplam yer değiştirme.....	84
Şekil 7.19	20° eğimli arazi; toplam yer değiştirme.....	85
Şekil 7.20	30° eğimli arazi; toplam yer değiştirme.....	85
Şekil 7.21	Yer değiştirmedeki değişimi	86
Şekil 7.22	Düz arazi; eşdeğer gerilme.....	87
Şekil 7.23	10° eğimli arazi; eşdeğer gerilme	87
Şekil 7.24	20° eğimli arazi; eşdeğer gerilme	88

Şekil 7.25	30° eğimli arazi; eşdeğer gerilme	88
Şekil 7.26	Maksimum eşdeğer gerilmedeki değişimi	89
Şekil 7.27	Düz arazi; güvenlik katsayısı	90
Şekil 7.28	10° eğimli arazi; güvenlik katsayısı.....	90
Şekil 7.29	20° eğimli arazi; güvenlik katsayısı.....	91
Şekil 7.30	30° eğimli arazi; güvenlik katsayısı.....	91
Şekil 7.31	Minimum güvenlik katsayısındaki değişimi	92
Şekil 7.32	Mesnetlere göre reaksiyon kuvvetlerindeki değişimi	93
Şekil 7.33	Mesnetlere göre reaksiyon momentlerindeki değişimi	94
Şekil 7.34	Avrupa standardına göre yüzeydeki basınç katsayısı dağıtımı [23]	97
Şekil 7.35	Amerikan standardına göre yüzeydeki basınç katsayısı dağıtımı [24]	99
Şekil A1.1	10° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	106
Şekil A1.2	10° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	106
Şekil A1.3	eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	107
Şekil A1.4	10° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	107
Şekil A1.5	10° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	108
Şekil A2.1	10° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	109
Şekil A2.2	10° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	109
Şekil A2.3	10° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	110
Şekil A2.4	10° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	110
Şekil A2.5	10° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	111
Şekil B1.1	20° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	112
Şekil B1.2	20° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	112
Şekil B1.3	20° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	113
Şekil B1.4	20° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	113

Şekil B1.5	20° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	114
Şekil B2.1	20° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	115
Şekil B2.2	20° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	115
Şekil B2.3	20° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	116
Şekil B2.4	20° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	116
Şekil B2.5	20° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	117
Şekil B2.6	30° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	118
Şekil B2.7	30° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	118
Şekil B2.8	30° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı.....	119
Şekil B2.9	30° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	119
Şekil B2.10	30° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı	120
Şekil C2.1	30° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	121
Şekil C2.2	30° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	121
Şekil C2.3	30° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	122
Şekil C2.4	30° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri.....	122
Şekil C2.5	30° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1 Deneysel çalışmalar sonuçları.....	20
Çizelge 4.2 USLU'ya göre HAD analizi sonuçları.....	21
Çizelge 4.3 Bu çalışmaya göre HAD analizi sonuçları.....	23
Çizelge 4.4 Deney ve analizlere göre toplam aerodinamik kuvvetler.....	24
Çizelge 6.1 Profiller detayları	52
Çizelge 6.2 Malzemelerin özellikleri	55
Çizelge 6.3 Basınç yükü uyguladığında değişik oranı	60
Çizelge 7.1 Düz arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa).....	78
Çizelge 7.2 10° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)	79
Çizelge 7.3 20° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)	79
Çizelge 7.4 30° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)	80
Çizelge 7.5 Statik analizi sonuçları	86
Çizelge 7.6 Reaksiyon kuvvetleri (N).....	92
Çizelge 7.7 Reaksiyon momentleri (N.mm).....	93
Çizelge 7.8 Tüm modeller için panellerdeki net basıncı.....	100
Çizelge 7.9 Türk standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları	100
Çizelge 7.10 Avrupa standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları	101
Çizelge 7.11 Amerikan standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları	101

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	: Computational Fluid Dynamics (İngilizce)
PV	: Fotovoltaik Paneli
CSP	: Konsantre Güneş Enerjisi
GES	: Güneş Enerjisi Sistemleri
ASCE	: Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği
EN 1991	: Avrupa Standardı
TS	: Türk Standardı
SKE	: Standard K-Epsilon Türbülans Modeli
RNG	: Yeniden Normalleştirme Grubuna göre K-Epsilon Türbülans Modeli
RKE	: Gerçekleştirilebilir K-Epsilon Türbülans Modeli
SKW	: Standard K-Omega Türbülans Modeli
SST K-ω	: Kayma Gerilmesi Taşınımına göre K-Omega Türbülans Modeli
RSM	: Reynolds Gerilme Modeli
DES	: Bağımsız Girdap Simülasyonu
LES	: İri Girdap Simülasyonu
FEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
ρ	: Kütle Yoğunluğu (Özgül Kütle)
v	: Akışkanın Hızı
f	: Bünye Kuvvetler
τ	: Viskoz Gerilmeleri
p	: Basınç
δ_{ij}	: Kronecker Deltası
μ	: Akışkanın O Noktadaki Dinamik Viskozitesi

Φ	: Dissipasyon Fonksiyonu
Q	: Isı Transferi Katsayısı
h	: Entalpi Katsayısı
k	: Isı İletim Katsayısı
e	: Partikülün Birim Kütle Başına İç Enerjisi
C_v	: Türbülanslı Viskozitenin Üretimi
Y_v	: Türbülanslı Viskozitenin Yıkımının Terimi
ν	: Moleküler Kinematik Viskozite
$S_{\tilde{\nu}}$	: Kaynak Terimi
μ_t	: Türbülanslı Viskozite
f_{ν_1}	: Viskoz Sönümleme Fonksiyonu
G_v	: Üretim Terimi
S	: Yer Değiştirme Tensörünün Skaler Ölçümü
Ω_{ij}	: Rotasyon Tensörünün Oranı

1 GİRİŞ

1.1 Güneş Enerjisi

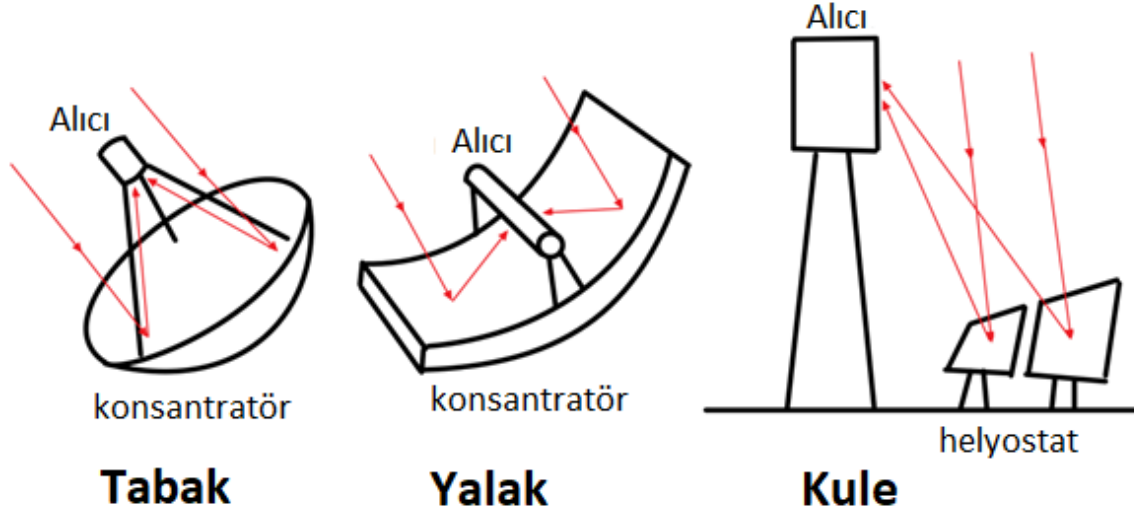
Kullandığımız enerjinin çoğu, yavaş yavaş tükenmekte olan petrol, gaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan gelmektedir. Bu yakıtların kullanılması havayı kirletir ve karbondioksit üretir. Bu şartlarda yaşamaya devam etmek istiyorsak, daha temiz ve daha yeşil yakıt kaynaklarına bilindiği üzere "yenilenebilir enerji" geçmemiz gerekmektedir. Güneş enerjisi tartışmasız bilinen en iyi yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. 19. yüzyılda, kömürün tükeneceğini anlayan insanlar güneş enerjisi ile ilgilenmeye başladılar. Ayrıca artan çevre bilinciyle insanlar güneş enerjisi gibi daha temiz enerjiler aramaya başladılar. Genelde güneş enerjisi iki temel türü vardır:

- Fotovoltaik (PV): Bunlar en yaygın şeklidir. Her hücre güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür ve daha sonra elektrikli cihazlara güç sağlamak için kullanılır (Bkz. Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Fotovoltaik panellerin genel şekli

- Konsantre Güneş Enerjisi (CSP): PV'ye benzer görünebilir, ancak farklı şekilde çalışırlar. Yoğunlaştırılmış güneş ışığı ayna sisteminden yansıtılır. PV ışıktan, CSP ısıdan enerji üretir (Bkz. Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Konsantre güneş enerjisinin türleri

1.2 Güneş Enerjisi Sistemleri (GES)

Güneş enerjisi sistemi, birkaç fotovoltaiik (PV) panelden ve PV panellerini yerinde tutan çelik profillerden oluşur. Güneş Fotovoltaiik (PV) paneller genellikle çatıya veya araziye monte edilir. Paneller güneşin aktif yönüne yönlendirilmeli ve panellere çarpan güneş ışığı miktarını en üst düzeye çıkarmak için belirli açılarda yatırılmalıdır. PV sistemleri; çatılara monte edilen küçüğünden, enerji üretim tesislerinde monte edilen büyüğüne kadar farklı büyüklüklerde olabilir.

Her PV sistemi, yapısı ve montaj tipleri açısından diğerlerinden farklıdır. Bunun nedeni, PV sistemlerinin alan kısıtlı olması ve montaj gereksinimlerinin yerden yere değişmesidir. Bu nedenle yere, direğe ve çatıya montaj gibi farklı ihtiyaçları karşılamak için birçok yapısal çözüm geliştirilmiştir. Her türün, iyi bir tasarımcının her belirli PV sistemi için en uygun kararı vermesini sağlayan avantaj ve dezavantajları vardır. Güneş enerjisi sistemleri (GES) genel anlamda ikiye ayrılıyor denilebilir.

1.2.1 Arazi uygulamalı GES

Arazi uygulamalı GES'ler için en büyük problemlerin başında tarıma elverişli olmayan, uygun açığa sahip, gölgelenmeyen, güneşe bakan bir arsa bulunması, ikinci önemli sorun da şebekede gerekli kapasitenin olmaması oluyor. Eğer bu iki sorun aşılsın da bağlantı izni alınabilirse teknik anlamda yapılacak iş çok basit denilebilir [1].

Arazi uygulamalı GES'lerin taşıyıcı sistemi için çoğunlukla soğukta şekillendirilmiş C profiller kullanılmaktadır. 3-5 mm arasında kalınlığa sahip bu profiller zeminin uygunluğuna göre çakılabilir veya betonarme temellere oturabilirler.

Bu tip, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi çoklu modül dizilerinin yere monte edilmesini sağlar. Yere monte PV panelleri, birim başına modül sayısına bağlı olarak yere dayalı montaj yapısına bağlı aşıklar veya çerçeveler tarafından tutulan PV Modüllerinden oluşur. Geliştirilen her yapı iyi bir optimizasyon ve uyarlamamanın karışımıdır, yani bu yapılar her türlü PV modülüne uyacak şekilde özelleştirilebilir ve değişen çeşitli toprak tipleri için optimize edilebilir. Modüllerin düzenlemesi Yatay veya Dikey Yönde olabilir. Ayrıca Bakım ve havalandırmayı kolaylaştırmak amacıyla paneller yerden 0,5 ila 1,5 m yüksekte kurulmalıdır [2].



Şekil 1.3 Arazi uygulamalı bazı GES türleri

Avantajlar;

- Soğutucu modül sıcaklığı.
- Güvenli kurulum.
- Bakım / sorun giderme için kolay erişim.
- Çatı penetrasyonu (nüfuz) yok.
- Maksimum üretim için esnek konumlandırma.

Dezavantajlar;

- Kolay erişim (Hırsızlık, Vandalizm, Hasar).
- Taban yapım işi gerektirir (Beton, Temel, Hendek açma).
- Mekân gereksinimi.
- Sıralar arası gölgeleme hususları, PV modülleri sıralara takıldığında birbirlerini gölgeleyebilir.

1.2.2 Çatı uygulamalı GES

Çoğu binada çatı kullanılmayan alan olarak kabul edilir. PV dizisi bu alanları kullanabilir ve bina için elektrik üretebilecek yararlı alanlara aktarabilir. Çatı uygulamalı güneş enerjisi sistemleri, aşıklar veya çerçeveler ile yerinde tutulan güneş panellerinden oluşur. Mevcut bir yapı üzerine yapılması planlanıyorsa normal şartlarda o yapının tamamının performans analizi yapılarak üzerine gelecek bu ilave yükü taşıyıp taşımadığı değerlendirilmelidir [1].

1.3 Güneş Panelleri ve Rüzgâr Yükü

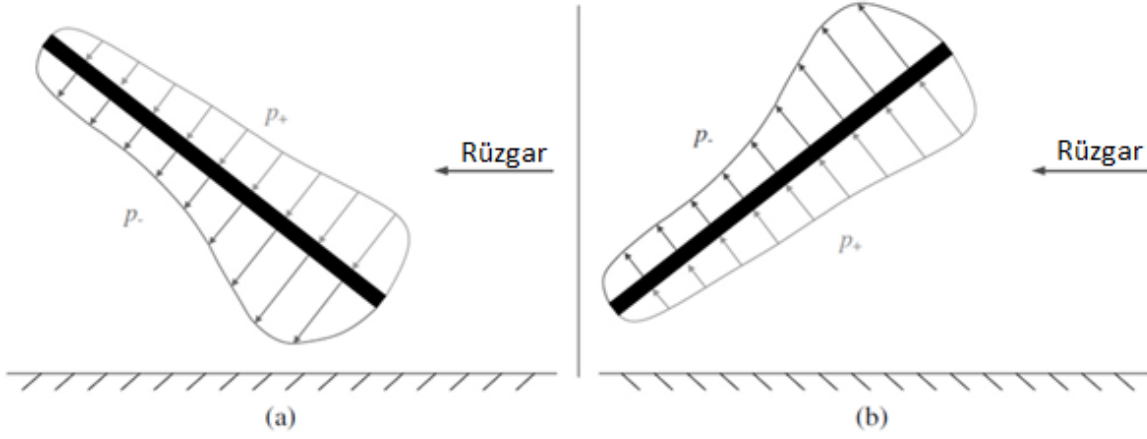
GES Yapıları fiziksel ve iklimsel şartlardan dolayı sürekli bazı yüklere maruz kalırlar. Bu yüklerden en önemlisi rüzgâr yüküdür. Panellerin diğer boyutlarına göre geniş yüzeyleri nedeniyle rüzgâr yükünün bunlara etkisi büyük olacaktır. Bu nedenle rüzgâr yüküne karşı güneş panellerinin yapısını incelemek ve analiz etmek önemlidir.

Rüzgâr yükleri üzerinde deneysel veya sayısal araştırma çalışmaları yapmak için, belirsizliklerin çok yüksek olduğu meteorolojik koşullar, atmosfer ve yeryüzü yapısının göz önünde bulundurarak ayrıntılı bir çalışma yapılması gerekmektedir (Holmes, 2001). Rüzgâr yüklerinin yapılar üzerindeki etkileri, aşağıdaki yapısal kategori türlerine göre değişmektedir:

- Az katlı binalar
- Yüksek binalar (münferit olarak veya diğer yapılarla birlikte)
- Büyük çatılı yapılar: stadyumlar, havaalanları vb.
- TV ve radyo kuleleri, bacalar gibi hassas yapılar.
- Köprüler.
- Elektrik iletim hatları.
- Diğer yapılar: duvarlar, çatılar, mevcut binalara yeni eklemeler vb.

Her yapı şekli ile benzersizdir, bu nedenle benzersiz geometri rüzgâr yüklerinin değişken etkilerine neden olur. Bazen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi, problemin multifizik analizini gerektiren titreşimlerin katılımı ile daha zor olur. Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği'nin "Binalar ve Diğer Yapılar için Minimum Tasarım Yükleri" yönetmeliği (ASCE, 2010) yukarıda listelenen yapılar için en önemli ve ayrıntılı rüzgâr yükü hesaplamalarından birini içerir. Avrupa Birliği de rüzgâr yükü hesaplamaları ile ilgili "Eurocode-1 (EN 1991-1-4, 2004)" olarak adlandırılan bir yönetmelik yayınlamıştır. Önceki belgeler dışında, birçok ülkelerin, kurumların ve şehirlerin bile ek yönetmelikleri vardır. Türkiye'de yapılardaki rüzgâr yüklerini belirlemek için "TS498- Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri" 'nin yönetmeliği kullanılır ancak, bu yönetmeliğin yukarıdaki belirtilen kategorileri kapsamaması bakımından yetersiz olduğu iddia edilmektedir [3]. Avrupa ve Kuzey Amerika standartları daha ayrıntılı bir şekilde hazırlanmasına rağmen, bu yönetmeliklerde güneş enerjisi santrallerinde yerleştirilen panellere etkileyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi ile ilgili hiçbir şey yoktur [3].

Güneş panelleri için en uygun rüzgâr yükü hesabı; “açık binalar / tek yönde eğimli serbest çatılar” adı altında Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği'nin yönetmeliğinde bulunur. Bununla birlikte, güneş panelleri tek bir eğimli çatıdan sadece geometrik şekil, kullanım ve PV panellerin maliyeti açısından değil, aynı zamanda bu panellerin bir güneş enerjisi santrallerinin içine ardışık ve sık yerleştirilmesi bakımından da çok farklıdır. Panellere etkileyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesinde; yerden net yükseklik, panellerin uzunluğu ve genişliği, eğim açısı, ardışık yerleştirilen panellerin aralıkları ve paneller arasındaki açıklık rüzgâr yüklerinin seviyesini etkiler. Ayrıca Şekil 1.4'te görüldüğü gibi rüzgâr yönünün de etkisi vardır.



Şekil 1.4 Güneş paneli üzerindeki rüzgâr basınç dağılımı,
(a) rüzgâr yönü panel ön yüzüne (b) rüzgâr yönü panel arka yüzüne [4]

Geniş yüzey alanı göz önüne alındığında bu modüller üzerine aynı anda etki eden rüzgâr kuvvetleri bu sistemlerde ciddi mekanik sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, rüzgâr akışını ve panellerle etkileşimini iyi anlamak potansiyel zararları en aza indirmek için çok önemlidir. Uluslararası yönetmeliklerin yanı sıra endüstriler arasındaki rekabet, güneş sisteminin 120 km/s üzerindeki hava hızlarından kaynaklanan muazzam yüklere dayanması gerektiğini tanımlamaktadır. Ayrıca, 20 yıldan daha uzun ömürlü olmalıdır [5].

2 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Güneş panelleri üzerine etkileyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesi ile ilgili birçok araştırma ya da çalışma yapılmasına rağmen şimdiye kadar, basınç dağılımı mekanizmasını belirlemek için belirli bir yaklaşıma ulaşılmamıştır. Burada, bu alanda bazı yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

Chevalier, H L ve Norton, D J (1979) tarafından yapılan "wind loads on güneş collector panels and support structure" başlıklı çalışma çatıya monte güneş panelleri ve taşıyıcı yapıları için rüzgâr yükü sorununu ele almaktadır. Amaç, çeşitli biçimler ve rüzgâr koşulları için oluşan kuvvet ve moment katsayılarını sağlamaktır. Çalışma sonucunda, rüzgârın estiği yöndeki dizilerin paneli, tek duran eşdeğerli panelden daha az kuvvet aldığını gözlemlenmiştir.

Peterka, Sinau ve Cermak (1980) tarafından yapılan "mean wind forces on parabolic-trough güneş collectors" başlıklı çalışmanın amacı, rüzgâr çiti olan ve olmayan parabolik yalak güneş kolektörlerinin çeşitli biçimlerinde ve çevresinde hava akımı tarafından üretilen ortalama rüzgâr yüklerinin özelliklerini araştırmaktır. Bu çalışmada çeşitli hâkim değişkenlerin etkileri incelenmiştir: rüzgâr -azimut, yalak yüksekliği açısı, dizi alanı düzenlemesi ve rüzgâr çiti özellikleri.

Son on yılda, araştırmacılar çatı uygulamalı güneş panellerine daha fazla odaklanmışlar. Kopp, Surry ve Chen (2002), farklı açılardan etkileyecek rüzgârlar nedeniyle panellerin köşelerinde ve kenarlarında oluşturulan girdap etkileri üzerine deneyler yapmıştır. Binaların çatısına yerleştirilen güneş enerjili su ısıtıcılarına etki eden şiddetli tropik fırtınaların etkisini azaltmak için, Chung, Chang ve Liu (2008) kaldırma kuvvetlerini azaltmak için deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir.

Mihailidis, Panagiotidis ve Agouridas (2009) "analysis of solar panel support structures" başlıklı bir araştırma sundu. Bu çalışmada, güneş paneli taşıyıcı yapılarının iki farklı tasarım yaklaşımının analizi sunulmuştur. Birincisi belirli bir konuma monte edilmiş sabit sistem diğeri ise iki eksen etrafında otomatik olarak döndürülmesini sağlayan mekanizmalara sahip ayarlanabilir bir sistemdir.

Başka bir çalışmada, Bitsuamlak, Dagnew ve Erwin (2010), yere montaj güneş panelleri üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapmışlar. Bu çalışmada, güneş panellerine etkileyen rüzgâr basıncının 180° rüzgâr yönünde maksimum olacağını bulunmuş

ve ardışık panellerin yerleştirilmesi de incelenmiştir. Bu çalışmanın en önemli sonucu, ilk sıra panelin diğer diziler üzerinde korunaklılık etkisi sağlamasıydı.

Kopp (2013) farklı rüzgâr yönü açısının etkisinin ve az katlı bina çatılarının üzerine yerleştirilmiş panellerin ardışık yerleştirilmesinin etkisini incelemiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, Schellenberg, Maffei, Telleen ve Ward (2013), rüzgâr yüklerinin titreşimli etkisi altında güneş panellerinin doğrusal olmayan yapısal davranışını belirlemek için zaman serisi davranış analizi yapmışlardır.

Maffei, Telleen, Ward, Kopp ve Schellenberg (2014), düşük eğimli çatılara yerleştirilmiş güneş panelleri için öneriler sunmuşlar. ASCE 07/10 yönetmeliğinin, çatılara yerleştirilen güneş panellerine etkileyen rüzgâr yüklerinin hesaplanmasında rehberlik sağlama açısından yetersiz olduğunu bildirmişlerdir.

Hong Li, Dongxu Zhang, Zhongwen Qin, Li Li ve Enguo Zhang (2015), "analysis of deformation and strength of güneş module support under wind-wave load" başlıklı bir araştırma sundu. Bu çalışmadaki PV yapısı modülünün tasarımı, güverte üzerindeki şiddetli rüzgâr yükleri ve dalga yükleri altındaki deniz ortamı için uygundur.

Raghuvendra Singh Som, Rishabh Sharma ve Harshit Tripathi (2016), "stability and stress analysis of solar array structure" başlıklı bir araştırma sunmuştur. Bu çalışmada, güneş paneli üzerindeki basınç dağılımını belirlemek için ön işlemci olarak ANSA ve çözücü olarak ANSYS-CFX kullanılarak hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) basit bir modelinin oluşturulmasını içeren yük hesaplama analizi yapılmıştır.

Kao-Chun Su ve Kung-Ming Chung (2018) "numerical simulation of wind loads on güneş panels" başlıklı bir araştırma sundu. Bu çalışma, hesaplamalı akışkan dinamiğini (HAD) kullanarak güneş panellerindeki rüzgâr yüklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Dört en-boy oranlı güneş panellerine etkileyen rüzgâr kaldırma kuvvetleri değerlendirilmiş. Bir güneş panelinin eğimli açısının ve açıklığının (veya yüksekliğinin) etkisi ele alınmıştır.

Rüzgârın, güneş panelleri ve taşıyıcı yapılar üzerindeki etkisi ile ilgilenen, düz arazi uygulamalı pek çok GES çalışması incelendikten sonra, bu tür projelerin bazı şartlara ihtiyaç duyduğunu belirtmiştir:

- Geniş alanlar.
- Bu alanlar tarımsal kullanım için uygun olmamalı.
- Alan güneşe açık olmalı.

Bununla birlikte, bilimin gelişimi sayesinde toprak geri dönüştürülebilir ve tarım için kullanılabilir. Ayrıca, arıtma tesisleri ve konutlar gibi düz olmayan arazilerde uygulanması

zor olan projeler için düz arazilerin kullanması daha uygun görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada yayla ve dağ etekleri gibi düz olmayan alanlara uygulanan güneş panelleri sistemini incelenmiştir. Bu araziler güneş ışığına maruz kalan geniş alanlara ve düşük yatırımlara sahiptir. Bu arazilerde böyle projelerin uygulanması, sadece düz arazilerde uygulanabilecek diğer projeler için daha fazla alan sağlayacaktır. Ek olarak, düz olmayan arazilerde güneş sistemi uygulaması maliyeti daha uygun olabilir. Düz olmayan arazi uygulamalı güneş sistemlerindeki rüzgâr yükünü azaltabileceği ve dolayısıyla rüzgâr kuvvetlerine karşı daha fazla dirence sahip olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, Şanlıurfa ilinde bulunan düz arazi uygulamalı bir güneş taşıyıcı yapısı alınmıştır ve düz olmayan bir araziye yerleştirdikten sonra inceleyerek yürütülmüştür. Ayrıca düz ve düz olmayan arazilere uygulanan güneş yapısını rüzgârın etkisiyle analiz ederek yapının istikrarı ve dayanıklılığı karşılaştırılmıştır.

3 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE TÜRBÜLANS MODELLERİ

3.1 Temel Kavramlar

Analiz programlarını kullanırken verilerin doğru şekilde girilmesi elde edilecek sonuçlarında doğru olmasını sağlayacaktır. HAD programlarını kullanırken sınır şartları veya akış değerleri uygun şekilde girilmemişse veya sonlu elemanlara uygun olmayan bir şekilde bölünmüşse analizler sonucunda elde edilecek veriler doğru olmayacaktır. Bu sebeple doğru sonuçları elde etmek için verilerin doğru ve uygun girilmesi şarttır.

Akışın var olduğu sistemlerin analizini yaparken deney ve bilgisayar tabanlı hesaplama olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Deney aşamasında rüzgâr tünelleri içerisindeki sistem üzerine hava şeklinde akışkan gönderilerek akışkanın sistem üzerindeki etkisi ölçülmektedir. Bilgisayar tabanlı hesaplama kısmı ise sistemin çözümlemesinde kullanılan diferansiyel denklemlerin analitik veya sayısal olarak çözülmesi ile elde edilen sonuçlarıdır.

Bilgisayar programlarının geliştirilmesiyle HAD programlarından elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bu sebeple HAD programları sayesinde deney sayısının azaltılarak deneysel olarak incelenmesi zor, pahalı, imkânsız olan endüstriyel koşulların analizi için iyi bir yöntem sağlanmaktadır [6].

3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Çözüm Adımları

HAD analizi yaparken akışın olduğu bölge belirlenmektedir. Burada üçgen dörtgen şekillerinde iki boyutlu bölgeler için alan olarak, üç boyutlu bölgeler için hacim olarak ağ yapısı oluşturulmaktadır. Her ağ hücresi korunum denklemlerinin çözüldüğü yapılar olarak düşünülebilir. Bu hücreler ne kadar küçükse yapılan analizden alınacak sonuçların da o oranda doğruluğu yüksek olmaktadır.

HAD analizi yaparken dikkat edilmesi gereken diğer bir husus çözümleme yapılacak kontrol hacminin sınır şartlarının programa girilmesidir. Başlangıç ve sınır şartları değerleri girildikten sonra oluşturulan her bir ağ hücresi için, hangi çözüm metodu kullanılacaksa (Spallart-Allmaras, $k-\epsilon$, $k-\omega$, Reynolds Stress) program bu denklemleri iteratif (tekrarlı) olarak çözer. Navier-stokes denklemlerinde eşitliğin her iki tarafı birbirine eşit olmalı başka bir deyişle eşitliğin her iki tarafı toplanması durumunda sonuç “0” çıkmalıdır. Lakin HAD

simülasyonu çözümünde iterasyon sonuçları toplamı sıfır olmaz ancak ilerleyen iterasyonlarda sonuç sifira çok yakın olacaktır [7].

3.2.1 Ağ yapısının oluşturulması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlemesinde kullanılan programlarda dikkat edilmesi gereken sınır değerleri doğru şekilde girilmelidir. Program girilen bu değerlere göre geometriyi sonlu elemanlara ayıracak ve iterasyonla çözümleme yapacaktır.

HAD programları genellikle iki ağ türü ile modelleri çözmektedir. Bunlardan biri yapılandırılmış diğeri ise yapılandırılmamış ağdır [8].

3.2.1.1 Yapılandırılmış bir ağ

Dört kenarlı düzlemsel hücrelerden (iki boyutlu) veya altı yüzlü (üç boyutlu) hacimsel hücrelerden oluşmaktadır. Hücrelerin dikdörtgen şekilleri bozulabilir ancak tüm hücreler mutlaka i-j-k indekslerine göre numaralandırılmaktadır.

3.2.1.2 Yapılandırılmamış bir ağ

Değişik şekillerde hücreler oluşmaktadır. Ancak genelde üçgen/dörtgen iki boyutlu şeklinde düzlemsel hücreler veya dörtyüzlü/altıyüzlü üç boyutlu hacimsel hücreler kullanılmaktadır. Bu iki ağ arasında çeşitli farklılıklar vardır. Bunların arasındaki önemli farklardan biri yapılandırılmış bir ağ, yapılandırılmamış bir ağdakine göre daha az sayıda hücrelere sahiptir. Akış değişkenlerinin çepere dik olarak çok hızlı değiştiği ve çeper civarında yüksek çözünürlüklü ağların gerektiği sınır tabakada, aynı sayıda hücre için, yapılandırılmış ağ yapılandırılmamış ağdan daha iyi çözünürlük sağlar.

3.2.2 Sınır şartları

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde doğru sonuçları alabilmek için sınır şartlarının doğru ve eksiksiz girilmesi gerekmektedir. Sınır şartları ne kadar doğru tanımlanırsa elde edilecek sonuçların da doğruluğu o kadar yükselecektir.

3.2.2.1 Duvar şartları

Duvar sınır şartları belirlenirken hızın normal bileşeni ve teğetsel hızın bileşeninde kaymama koşulu nedeniyle sıfırdır. Çözümlemede türbülans modeli kullanılırsa, türbülans transport denklemi çözülür ve türbülanslı sınır tabaka çeper pürüzlülüğü hesaplanarak

çözümlemelidir. Bunun için bu çalışmada tüm güneş panellerinin yüzeyleri hava küpünün yanal yüzeyleri sabit duvar olarak tanımlanmıştır.

3.2.2.2 Giriş ve çıkış sınır şartları

Çözümleme yaparken akışkanın hava küpünün içerisine giriş (inlet) ve çıkışlarının (outlet) nasıl gerçekleştiği önemlidir. Bu nedenle akışkanın hız etkisiyle sisteme girse; girişi “velocity inlet” şeklinde, çıkışı “pressure outlet” şeklinde olmalıdır. Hareket denklemleri hız ve basınca bağlı olduğu için bir değer belirtilirken diğeri belirtilmez. Örneğin hız girişinde yalnızca hız değeri girilir basınç değeri belirtilmez. Çıkışta ise basınç belirtilirken girişte hız belirtilmez. İki değer belirtilmesi yoğun matematiksel tanımlamaya sebep olur.

3.2.2.3 Diğer sınır şartları

Çözümleme bölgesinde bazı yüzeyler giriş veya çıkış sınır şartlarını karşılamayabilir. Simetri sınır şartı sayesinde akış alanı değişkenlerinin, simetri düzeyinin karşısında benzeş görüntüleri oluşturulur. Çözümleme esnasında simetrik olarak kabul edilen yüzeyler için sınır şartları bu yüzeylere dik yöndeki çoğu akış alanı değişkenlerinin gradyenleri simetri düzleminde sıfır alınır. Bu tür bölgeler genellikle simetrik yüzey olarak tanımlanır.

3.3 Navier-Stokes Denklemleri

Akış problemlerini yöneten Navier-Stokes denklemler en genel halde üç denklemden oluşur; süreklilik denklemi, momentum denklemi ve enerji denklemidir [9].

Süreklilik denklemi vektörel formda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3-1)$$

şeklinde yazılabilir.

Veya materyal türev kavramı kullanılarak

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla(\vec{V}) = 0 \quad (3-2)$$

şeklinde yazılabilir.

Momentum denklemi en genel hali vektörel formda

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{f} - \nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (3-3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada f vektörü bünye kuvvetlerini ifade etmektedir. Elektromanyetik etki ya da yer çekimi etkisinden gelmekte ve hava ile ilgili akış problemlerinde genelde ihmal edilir. τ ise viskoz gerilmeleri belirlemektedir. Hız bileşenleri cinsinden genelde

$$\tau_{ij} = -\delta_{ij} \frac{2}{3} \mu \cdot \nabla \cdot \vec{V} + \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3-4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada δ_{ij} Kronecker deltası olup değeri

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \text{ için} \\ 0 & i \neq j \text{ için} \end{cases} \quad (3-5)$$

şeklinde belirlenir.

Enerji denklemi genellikle aşağıdaki şekilde yazılır:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = \Phi - \nabla \cdot \dot{Q} \quad (3-6)$$

burada h , Φ ve Q büyüklükleri sırasıyla entalpiyi, dissipasyonu (tersini olmayan viskoz işten oluşan kayıp fonksiyonunu) ve ısı transferini temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (3-7a)$$

$$\begin{aligned} \Phi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \\ - \frac{2}{3} \mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right]^2 \end{aligned} \quad (3-7b)$$

$$\dot{Q} = -k \nabla \cdot T \quad (3-7c)$$

Genelde problemlerde herhangi bir kimyasal reaksiyonu ya da ısı kaynağı varsa (3-6) denkleminin sağ tarafına bu durum belirten ve hesaba katan bir S_h teriminin eklenmesi gerekmektedir [10].

3.4 Türbülans Modelleri

Üç yöndeki hız bileşenlerinde sürekli ve periyodik olmayan çalkalanma hareketine türbülans adı verilmektedir. Akışın atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlerinden yeterince fazla

olduğu zaman türbülanslı akışlar oluşur, diğer bir deyişle akış bölgesinin her noktasında ani hızın çalkalanmasıdır. Türbülans akışı karakterize etmektedir. Diğer bir deyişle türbülans akışkanın bir özelliği değildir. Türbülanslı akışkanlar çalkalanan hız alanıyla karakterize edilir.

Bu çalkantılar momentum, enerji ve iletme tipleri gibi taşınan niceliklerin karışımıdır. Onların küçük ölçek ve yüksek frekansta olmasından dolayı direkt olarak pratik mühendislik hesaplarında simüle edilmesi matematiksel olarak oldukça pahalıdır. Ana denklemleri kullanmak yerine denklemler üzerinde birkaç değişiklik yaparak hesaplama maliyeti ve çözümleme olayı azaltılabilir. Ancak değiştirilmiş bu denklemler ek bilinmeyen değişiklikler içerecek ve türbülans modelleri bu bilinmeyen değişiklikleri bilinen nicelikler ile hesaplayacaktır [10].

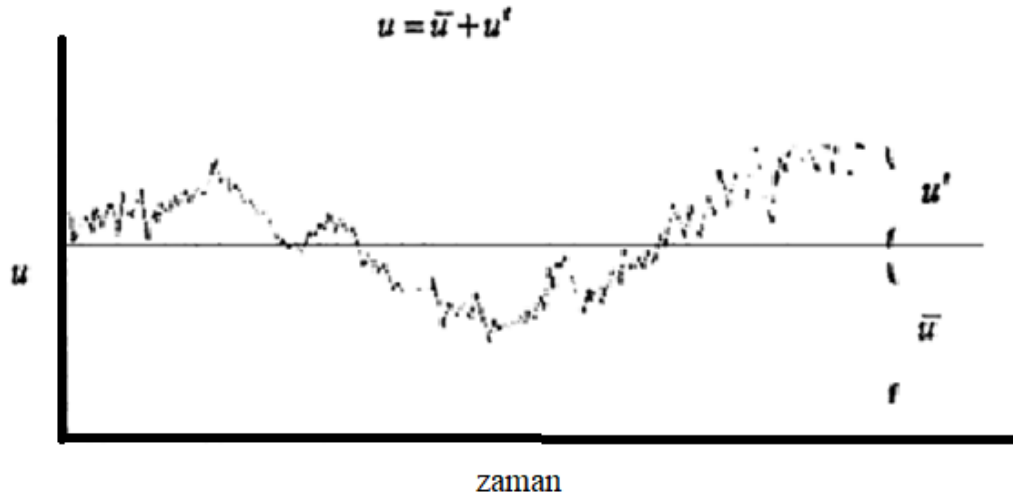
ANSYS programındaki FLUENT yazılımı aşağıdaki türbülans modellerini kullanmaktadır [11].

1. Spalart-Allmaras (Tek denklemlilik)
2. $k - \epsilon$ Modelleri (İki denklemlilik)
 - Standard $k-\epsilon$ (SKE) model
 - Renormalization group (RNG) $k-\epsilon$ model
 - Realizable $k-\epsilon$ (RKE) model
3. $k - \omega$ Modelleri (İki denklemlilik)
 - Standard $k-\omega$ (SKW) model
 - Shear Stress Transport $k-\omega$ (SSTKW) model
4. Reynolds Stress Modeli (RSM) (Beş Denklemlilik)
5. Detached Eddy Simulation Modeli (DES)
6. Large Eddy Simulation Modeli (LES)

Her akışın farklı başlangıç ve sınır şartları vardır. Ancak bütün türbülans durumlarında kullanılabilecek yetenekte kabul edilmiş bir türbülans modeli yoktur. Bu nedenle de mevcut türbülans modellerinden birinin seçilmesi gerekmektedir. Türbülans modelinin seçimi simülasyon için gerekli zamana, doğruluk seviyesine, elde edilebilen kaynaklara ve akımın çevresine bağlıdır. Uygulamalar için uygun modeli, hangi limit ve kapasitede olduğunu bilmekle seçilecektir.

Türbülanslı akışlarda hızın zamanla değişimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Ani hızı çalkantı hızıyla bir ortalama hızın toplamı ile belirtilebilir. Yani akımın herhangi bir noktasındaki hız

bileşenleri için $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$ olarak yazılabilmektedir [12]. Burada $\bar{u}$, $\bar{v}$ sırası ile x ve y yönlerindeki ortalama hız bileşenleri u' , v' ise bu doğrultulardaki çalkantı hızlarıdır.



Şekil 3.1 Ani hızın zamanla değişimi [10]

Spalart-Allmaras modeli aerodinamik akışlar için geliştirilmiştir. Bunun için güneş panelleri etrafındaki akış incelemeleri sırasında türbülans modeli olarak tek denklemlili Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır.

3.4.1 Spalart-Allmaras modeli

Spalart-Allmaras modeli kinematik türbülans viskozitesi için modellenmiş taşıma denklemi çözen bir denklem modelidir. Bu türbülans modeli tek denklemden oluşmaktadır. Diğer türbülans modellere göre tek bir taşıma denklemli olduğu için hesaplama açısından en tasarruflu modelidir. Spalart-Allmaras modeli, duvarla sınırlandırmış akışlar içeren hava-uzay uygulamaları için tasarlanmıştır. Spalart-Allmaras modelinin, olumsuz basınç gradyenlarına maruz kalan sınır tabakaları için iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [13].

Boussinesq yaklaşımının kullanıldığı türbülans modellerinde, türbülans (eddy) viskozitesinin nasıl hesaplanacağı önemlidir. Türbülans modelinin çözdüğü taşıma denklemi, kinematik viskozite tanımının modifiye edilmiş bir halidir. Spalart-Allmaras modelindeki taşıma değişkeni, viskoz etkilerin görüldüğü yakın duvar bölgesi haricinde türbülans kinematik viskozitesi ile özdeşdir [7].

Spalart-Allmaras orijinal biçimi, sınır tabakanın viskoziteden etkilenen bölgesinin olduğu düşük Reynolds sayısı modelidir. Ancak ANSYS programındaki bu türbülans modeli ağ yapısı kararlılığı yeterli düzeyde iyi olmadığında, duvar fonksiyonları kullanılarak modelin kullanılması tamamlanmaktadır.

3.4.1.1 Taşıma denklemi

Spalart-Allmaras türbülans modelindeki taşıma değişkeni, $\tilde{\nu}$, viskozite ile etkilenmiş olan yakın duvar bölgesi dışında türbülans kinematik viskozitesine benzerdir. $\tilde{\nu}$ için taşıma denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_v \\ + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{\nu}} \end{aligned} \quad (3-8)$$

olarak yazılır. Burada ki C_v , türbülanslı viskozitenin üretimidir, Y_v ise duvar engellemesi ve viskoz sönümlemesi nedeniyle duvarın yakınında bölgede meydana gelen türbülanslı viskozitenin yıkımıdır. $\sigma_{\tilde{\nu}}$ ve C_{b2} sabit sayılar, ν terimi ise moleküler kinematik viskozitedir. $S_{\tilde{\nu}}$ kullanıcı tanımlı kaynak terimidir. Spalart-Allmaras modelinde türbülans kinetik enerjisi k hesaplanmadığı için, Reynolds gerilmelerini tahmin ederken Boussinesq hipotezinde verilen denklemin son terimi dikkate alınmamıştır [14].

3.4.1.2 Türbülans viskozitesi modellenmesi

Türbülanslı viskozite, μ_t

$$\mu_t = \rho\tilde{\nu}f_{v_1} \quad (3-9)$$

denkleminde hesaplanmaktadır.

Denklemdaki viskoz sönümleme fonksiyonu, f_{v_1}

$$f_{v_1} = \frac{X_3}{X_3 + C^3_{v_1}} \quad (3-10)$$

formla verilmektedir. Buradaki X

$$X \approx \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (3-11)$$

olarak verilmektedir.

3.4.1.3 Türbülans üretimi modellenmesi

Üretim terimi, G_v , aşağıdaki şekilde modellenmektedir.

$$G_v = C_{b_1} \rho \tilde{S} \tilde{v} \quad (3-12)$$

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v_2} \quad (3-12a)$$

$$f_{v_2} = 1 - \frac{X}{1 + X f_{v_1}} \quad (3-12b)$$

Bu denklemlerdeki C_{b_1} ve κ sabit sayılardır. d duvardan olan uzaklık, S yer değiştirme tensörünün skaler ölçümüdür. Varsayılan olarak ANSYS Fluent programında, Spalart-Allmaras tarafından önerilen orijinal modelde olduğu gibi, S girdabın büyüklüğüne dayanır.

$$S = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (3-13)$$

Buradaki Ω_{ij} rotasyon tensörünün oranıdır ve

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-14)$$

ile tanımlanmaktadır. S 'in açıklaması, akış modeli formüle edildiği zaman en çok ilgilenilen duvar üzeri ve çevresindeki akışta, duvar çevresindeki bölgelerde oluşan girdap için türbülansın bulunmasıdır. Ancak, türbülans üretiminde ortalama gerilme etkisi hesaba katılması ve bir modifikasyon yapılması önerilmektedir. Bu modifikasyon S 'in tanımı içinde gerilme tensörü ve rotasyonun birleşimidir.

$$S = |\Omega_{ij}| + C_{prod} \min(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|) \quad (3-15)$$

$C_{prod} = 2.0$, $|\Omega_{ij}| \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, $|S_{ij}| \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ olarak tanımlanmaktadır.

Ortalama gerilme oranı ile S_{ij}

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3-16)$$

olarak tanımlanmaktadır. Dahil edilen rotasyonel ve gerilme tensörleri girdap viskozitesinin üretimini düşürür ve türbülanstaki dönme etkisi için doğru hesap yapmaktadır. Sadece rotasyonel tensörü ilave etmek girdap viskozitesi üretimini daha yüksek tahmin etmeye eğilimlidir.

3.4.1.4 Türbülans yıkımı modellenmesi

Yıkım terimi Y_v

$$Y_v = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 \quad (3-17)$$

olarak modellenmektedir. Bu bağıntıdaki

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6} \quad (3-17a)$$

$$g = r + C_{w2}(r^6 - r) \quad (3-17b)$$

$$r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S} \kappa^2 d^2} \quad (3-17c)$$

şeklinde. C_{w1} , C_{w2} ve C_{w3} sabit sayılardır, $\tilde{S}$ ise (3-12a) denkleminde verilmişti. S üzerindeki ortalama gerilme etkilerini içermek için yukarıdaki açıklanan modifikasyon, aynı zamanda, r 'yi hesaplamak için kullanılan $\tilde{S}$ değerini de etkileyeceğine dikkat edilmelidir.

3.4.1.5 Model sabit sayıları

Spalart-Allmaras modelindeki tanımlanan tüm sabitlerin varsayılan değerleri aşağıdaki gibidir [11].

$C_{b1} = 0.1355$	$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + C_{b2}}{\sigma_{\tilde{v}}}$	$C_{v1} = 7.1$
$C_{b2} = 0.622$	$C_{w2} = 0.3$	$\kappa = 0.4187$
$\sigma_{\tilde{v}} = \frac{2}{3}$	$C_{w3} = 2.0$	

4 DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

Bu bölümde, önceki bölümlerde sunulan sayısal modelleme ve analiz araçları literatürdeki mevcut verilerle doğrulanmıştır. Doğrulama çalışması için Veysel Emre USLU (USLU, V. E. 2014) tarafından yapılan sayısal analiz ve deneysel çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Doğrulama çalışması için, Veysel Emre USLU 'nun sayısal analizi ve deneysel çalışması dikkate alınmıştır.

4.1 Deneysel Çalışmalar

USLU tarafından eğimli güneş panellerine etkiyen rüzgâr yüklerinin belirlenmesinde yapılan sayısal analiz çalışmasının bir bölümü olarak, analiz metodolojisinin doğruluğunu değerlendirmek için deneysel bir çalışma da yapılmıştır. Deneysel çalışma Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Rüzgâr Enerjisi Merkezi'nin Aerodinamik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneysel sonuçlar da sayısal analizle doğrulanmıştır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesinde deneyler, Aerodinamik Laboratuvarı'ndaki bulunan emme tipi düşük hızlı rüzgâr tüneline yapılır. Rüzgâr tüneli, 2 m tamamen şeffaf test bölümüyle $1 \times 1 \text{ m}^2$ kesit alanına sahiptir. Tünel, hızı ayarlamak için hertz kontrol cihazı 45 kW elektrik motoruna sahiptir. Bu elektrik motoru, 1,2 m çapında bir aksiyal vantilatör kullanır. Tünel tarafından elde edilebilecek maksimum hız 24 m / s 'dir.

Eğimli bir güneş panelini benzetmek amacıyla, yeterli dayanım, sertlik ve ağırlığa sahip olan sunta bir gövde oluşturulur. Gövde $2 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 96 \text{ cm}$ boyutlarındadır ve 23N ağırlığındadır. Deneyde kullanılan gerinme ölçerler, 50 N'luk bir gövde ağırlığını taşımaya yetecek güce sahiptir.

Sayısal analizleri doğrulamak için, 5 m/s ve 10 m/s rüzgâr hızında farklı açılar ile eğimli gövde üzerinde deneyler yapılmıştır. Ancak inceleme amacıyla; 0° , 15° , 25° ve 30° açı ile eğimli gövde sonuçları kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen ve bahsedilmiş açılar ile eğimli gövdedeki sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

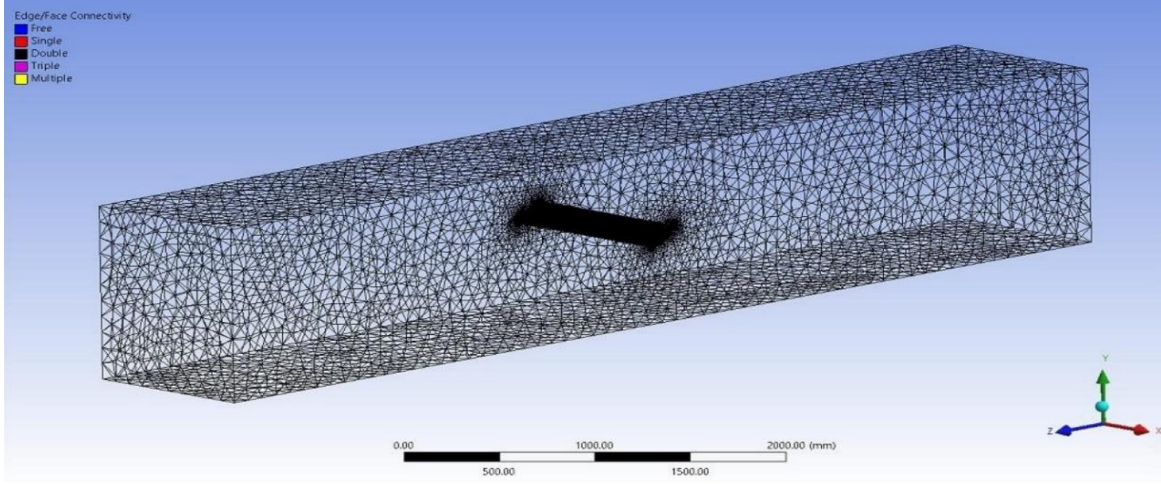
Çizelge 4.1 Deneyisel çalışmalar sonuçları

Rüzgâr hızı	5 m/s		10 m/s	
Eğim açısı (°)	Sürüklenme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)	Sürüklenme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)
35	2.61	-3.08	11.53	-12.97
30	2.21	-2.88	9.61	-11.97
25	1.77	-2.47	7.73	-10.90
15	0.95	-1.87	4.44	-8.36
0	0.29	-0.55	1.24	-2.53

Yukarıdaki çizelgeye göre, gövdenin eğim açısı 0 olduğunda beklenen değerler sonuçlanmamıştır. Kaldırma kuvvetinin sıfıra yaklaşması beklenmiştir. Ancak kaldırma kuvvetinin sürüklenme kuvvetinden daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, suntaların fiziksel geometrisi ya da muhtemelen yüzeyinde mevcut hafif düzensizlikler olabilir. Ayrıca, rüzgâr tüneli testlerinde bu aşırı eğim durumlarını kurmadaki ufak yanlış hizalamaların, bu durumlarda da artan hatalara neden olabileceği de mümkündür.

4.2 Rüzgâr Tüneli Testinde kullanılan gövdenin HAD Analizi

Rüzgâr tüneline yapılan deneyin nümerik analizini gerçekleştirmek için, deney düzeneği ANSYS FLUENT'te modellenmiştir. Rüzgâr alanı, gövdenin öncesi ve sonrası akacak yeterli hava mesafesine sahip 1m x 1m rüzgâr tüneline kesitini temsil etmek üzere yaratılmıştır. Sunta gövdesini temsil etmek için 96 cm x 20 cm x 2 cm boyutlarında bir model oluşturulur. Bu gövde her taraftan 2 cm uzağa yerleştirilmiş ve sayısal rüzgâr tüneline kesitinin ortasına ortalanmıştır (Bkz. Şekil 4.1) [3].



Şekil 4.1 Rüzgâr tüneli deneyinin mesh hali [3]

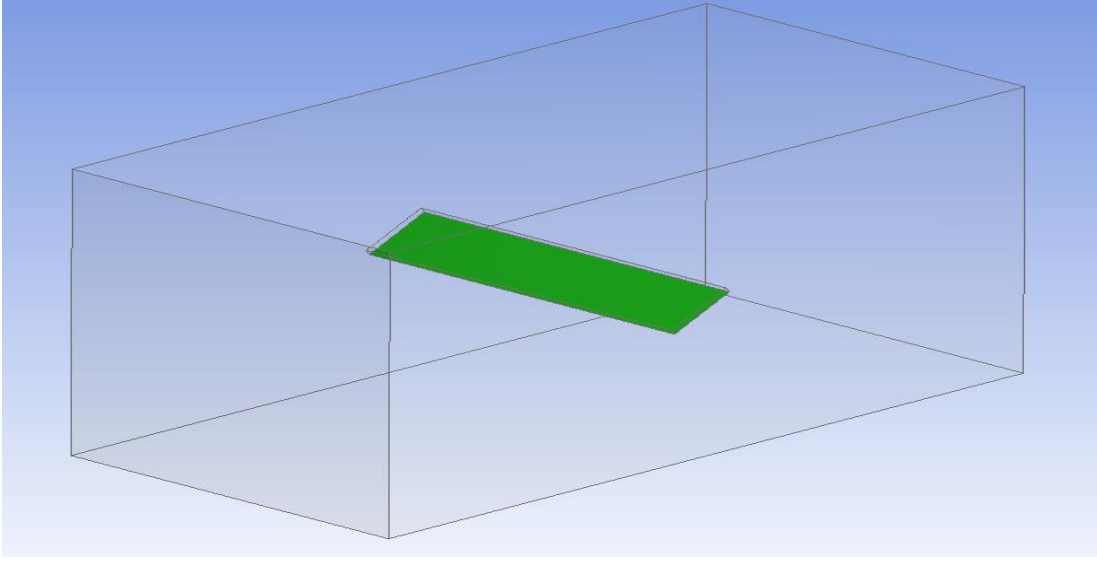
Hız girişinde 5 m/s ve 10 m/s rüzgâr hızları için nümerik analiz yapılmıştır. Model SST k- ω metodu ile çalıştırılmıştır. HAD analizlerinin sonuçları Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 USLU'ya göre HAD analizi sonuçları

Rüzgâr hızı	5 m/s		10 m/s	
Eğim açısı (°)	Sürüklenme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)	Sürüklenme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)
35	2.84	-3.56	11.45	-14.33
30	2.39	-3.41	9.61	13.72
25	1.93	-3.16	7.74	-12.69
15	1.14	-2.67	4.57	-10.61
0	0.33	0	1.32	0

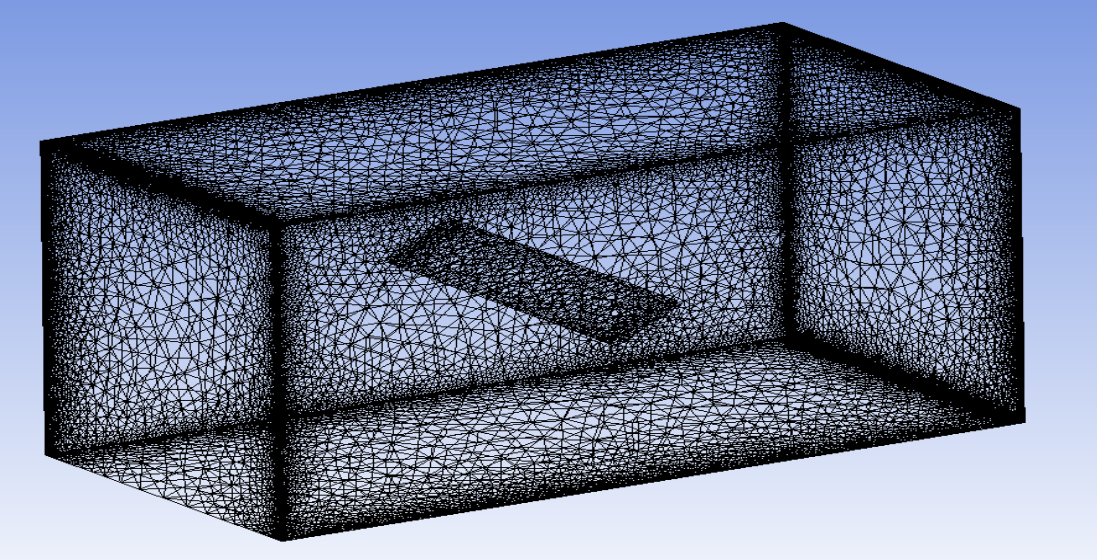
4.3 Karşılaştırma

Bu çalışmada kullanılan ve bölüm 3'te açıklanan yöntemi doğrulamak için deneyde USLU tarafından kullanılan aynı model tasarlanmıştır. 2 metrelik bir rüzgâr tüneli, 1m x 1m kesite sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. 96 cm x 20 cm x 2 cm boyutlarında bir güneş panelinin modeli oluşturulmuştur (Bkz. Şekil 4.2). Model rüzgâr tünelinin ortasına yerleştirilmiştir. Model, deneyde kullanılan aynı açılarla da yatırılmıştır.



Şekil 4.2 Bu çalışmaya göre rüzgâr tüneli

Sonlu elemanlara bölme işleminde gövdenin küçük kalınlıklarından dolayı kenar boyutlandırma teknikleri kullanılmıştır. Prizma şeklindeki rüzgâr tüneli modelinin kenarları, her kenar başına bölünmeler sayısı 200'e bölünmüştür. Gövdenin kenarları elemanın büyüklüğüne göre 20 ve 30 mm'ye bölünmüştür. Tüm model parçaları katı elemanlar olarak modellenmiştir. Modelin son mesh halleri Şekil 4.3'te bulunur.



Şekil 4.3 Bu çalışmaya göre son mesh hali

Sınır şartlarının ve analiz yöntemi belirlenmesi için Bölüm 3'te açıklandığı gibi aynı veriler girilmiştir. Çözümleme için iterasyon sayısı 1500 olarak belirlenmiştir. Analiz tamamlandıktan sonra, Çizelge 4.3'te sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

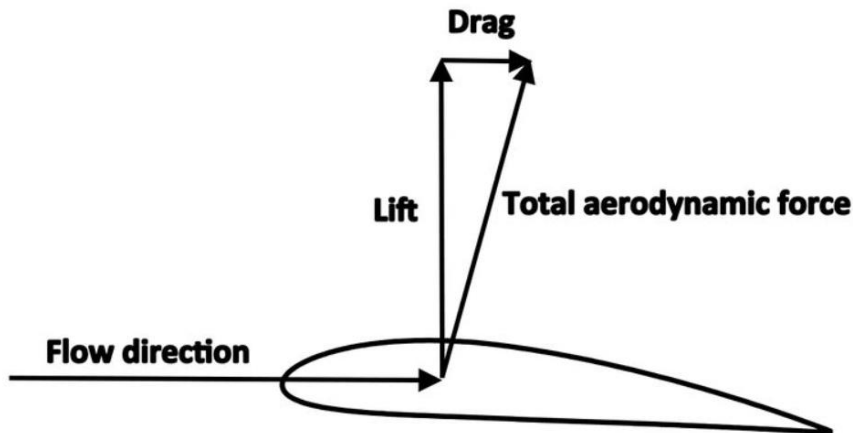
Çizelge 4.3 Bu çalışmaya göre HAD analizi sonuçları

Rüzgâr hızı	5 m/s		10 m/s	
Eğim açısı (°)	Sürükleme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)	Sürükleme kuvveti (N)	Kaldırma kuvveti (N)
35	2.61	-3.70	10.39	-14.78
30	2.03	-3.49	8.03	-13.84
25	1.53	-3.26	6.12	-13.02
15	0.76	-2.77	2.98	-10.91
0	0.03	-0.03	0.11	-0.13

Bu çalışmada elde edilen analitik sonuçlar ile USLU tarafından elde edilen sonuçlar arasındaki karşılaştırdığında, sonuçların bir dereceye kadar yakın olduğunu fark edilmiştir.

DeneySEL sonuçlarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada elde edilen kaldırma kuvvetlerinin deneyde elde edilen değerlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Fakat sürüklenme kuvvetlerinin deneyde elde edilen değerlerden daha küçük olduğu görülmüştür. Ancak USLU tarafından elde edilen sonuçlar, hep deneySEL sonuçlardan daha büyüktür.

Kaldırma, akış yönüne dik toplam aerodinamik kuvvetin bileşeni olarak tanımlanır ve sürüklenme akış yönüne paralel olan bileşendir [26]. Böylece iki kuvvetin toplamını bularak toplam aerodinamik kuvvetleri elde edilir. Şekil 4.4'e göre, Pisagor teoremi (toplam aerodinamik kuvveti = $\sqrt{(\text{Sürüklenme kuvveti})^2 + (\text{Kaldırma kuvveti})^2}$) toplam aerodinamik kuvvetleri elde etmek için kullanılabilir. Toplam aerodinamik kuvveti hesaplanarak, Çizelge 4.4'teki değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.4 Aerodinamik kuvvetler [26]

Çizelge 4.4 Deney ve analizlere göre toplam aerodinamik kuvvetler

Rüzgâr hızı	Eğim açısı (°)	Deney 'in toplam aerodinamik kuvvetleri (N)	Bu çalışmanın toplam aerodinamik kuvvetleri (N)	USLU'nun toplam aerodinamik kuvvetleri (N)	Bu çalışmadaki % hata	USLU'nun çalışmasında % hata
5 m/s	35	4.04	4.53	4.56	12.13	12.83
	30	3.63	4.03	4.16	11.04	14.60
	25	3.07	3.60	3.71	18.43	21.99
	15	2.10	2.87	2.90	36.58	38.11
	0	0.62	0.04	0.33	-93.01	-47.02
10 m/s	35	17.35	18.07	18.34	4.16	5.69
	30	15.35	16.00	16.75	4.24	9.14
	25	13.37	14.38	14.86	7.61	11.16
	15	9.47	11.32	11.55	19.51	21.98
	0	2.82	0.17	1.32	-94.12	-53.01

Burada, kaldırma kuvvetlerinin negatif işaretinin panellerin kaldırmaya değil basınca maruz kalacağı anlamına gelmektedir. Buna göre, toplam aerodinamik kuvvetleri basınçtır (üst yüze basınç ve alt yüze emme).

Toplam aerodinamik kuvvetler ışığında, bu çalışmada kullanılan akış koşullarına göre elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara USLU tarafından elde edilen sonuçlardan daha yakın olduğu fark edilmiştir. Ancak, iki çalışmanın analitik sonuçları göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile %20 'ye kadar bir fark ortaya çıkmıştır. Ayrıca bu oran, gövdenin eğim açısı sıfırken %20'den fazladır. Gövdenin eğim açısı 0 olduğunda, kaldırma kuvvetinin sıfıra yaklaşması gerekiyordur. Ancak deneysel sonuçlar biraz farklı çıkmıştır. Bu durum, deneyin hatalarına bağlanabilir. Dolayısıyla bu durumdaki sıfıra daha yakın olan analitik sonuçlar daha doğru çıkmıştır.

Sonuçlarda gözlenen farklılıklar ışığında, bunların nedenlerini de tartışmak önemlidir. Öncelikle, deneysel kurulumun sayısal ortamda tam olarak modellenmemiş olabileceğini belirtmek gerekir. İnsan hatası ve ölçüm hataları, özellikle rüzgâr tüneline yapılan testlerde her zaman mevcuttur. Ayrıca, çevresel koşullar ve öngörülemeyen faktörler

sayısal modelde dikkate alınmaz. Sayısal analizde, koşullar idealin yanındadır. Deneydeki gövdenin, malzeme kusurundan ve bağlantı çubuklarının yerleştirmesinden dolayı yanlarında ek bir sürtünme yoktur. Ayrıca, suntaların uç bağlantı çubukları ile rüzgâr tünelinin gerinme ölçerleri de sonuçlarda ufak bir değişiklik ile sonuçlanmış olabilir.

Bu potansiyel kararsızlıklar ışığında, deney ve sayısal analizlerin bulunan sonuçları yeterince kabul edilebilir. Bu analizlerle, bölüm 3'te verilen Spallart-Allmaras modelinin ve analizinin, rüzgâr tüneline yapılan deneylere kıyasla gövdelere etki eden rüzgâr yüklerinin hesaplanmasında güvenilir bir yöntem sağladığı görülmüştür.



5 HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİNİN (HAD) İŞLEMİNİN ADIMLARI

Bu bölümde, hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) analizi, HAD modellemesi ve pratik arka plan hakkında genel bilgiler sunulmuştur. Güneş panellerinin rüzgâr tüneli testlerini kullanarak deneysel araştırma çalışmaları yapmak, çoğunlukla araştırma laboratuvarlarının fiziksel kısıtlamaları nedeniyle çok zor bir iştir. Rüzgâr etkisini değerlendirmek için, rüzgâr tünellerine güneş sistemleri yerleştirilmelidir. Ölçekli maketlerin kullanılması her zaman mümkün olsa da ölçekli maketlerin kullanılması bile normal rüzgâr tünellerinde güvenilir rüzgâr tüneli testlerinin yapılmasına izin vermeyebilir. Bu nedenle, böyle bir testi yapmanın fiziksel gerekliliklerini telafi edecek kadar büyük bir rüzgâr tüneli test tesisine sahip olmak önemlidir. Bu bakımdan, böyle büyük test tesisleri sadece çok az sayıda laboratuvarında bulunmaktadır [3].

Rüzgâr tüneli testleri yapmak yerine, mühendislik problemlerinin çözümünü gerçekleştirmek için HAD analizi araçlarını kullanmak da popüler olmuştur. Bu tez çalışmasında ANSYS FLUENT, rüzgâr kuvvetlerinin güneş panelleri üzerindeki etkilerini modellemek için kullanılmıştır. Elimizdeki fiziksel problemin modellenmesi açısından, problemin 2 boyutlu (2D) ve 3 boyutlu (3D) modellenmesi mümkündür. Bu bölümde, öneriler temel olarak 3D HAD analizi için verilmiştir; ancak, 2D HAD analizi için de geçerlidirler. Bu nedenle, 2D HAD analiz önerileri burada gösterilmemiştir. Bu iki seçenek arasındaki tek fark, geometri ve ağ örgüsüdür.

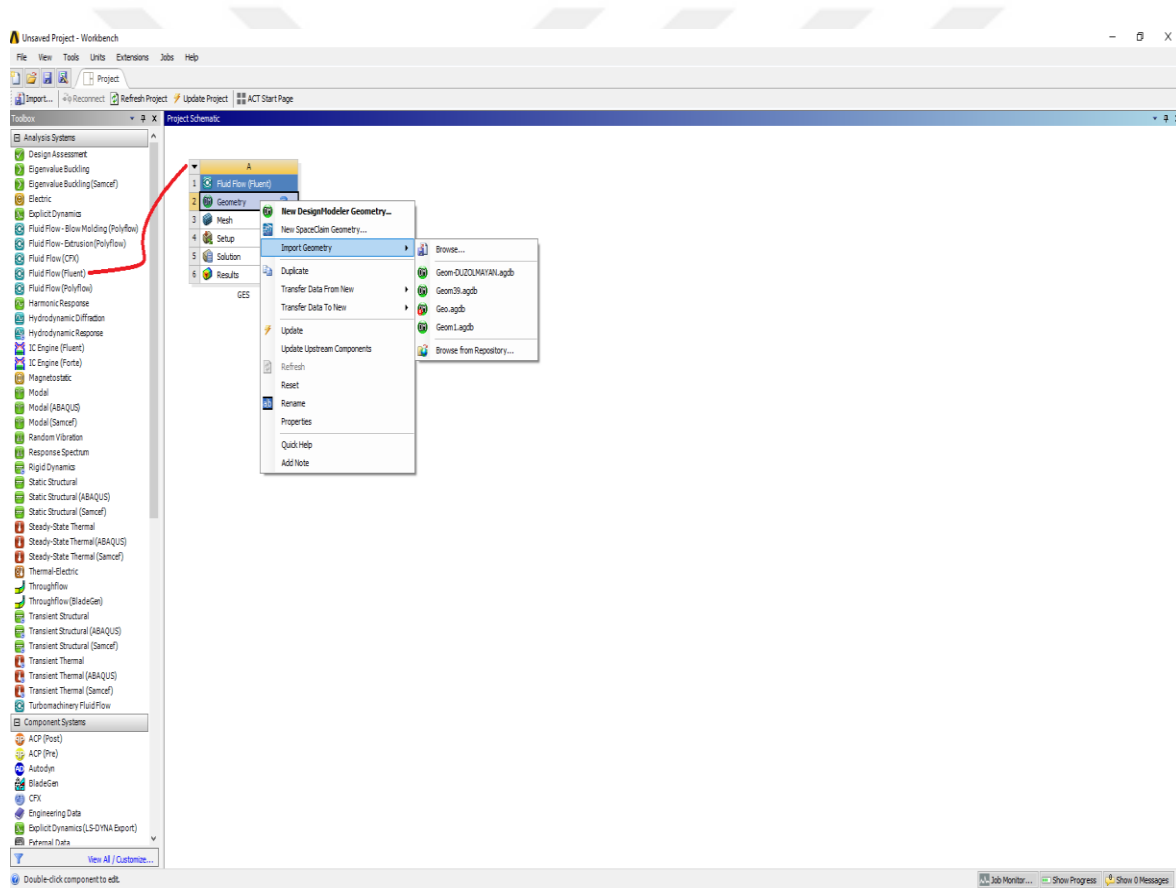
HAD terimi, üç boyutlu ve zamana bağlı karmaşık akış problemlerini çözmek için kullanılan geniş spektrumlu bir sayısal yöntemleri ifade etmek için kullanılır. Bu bilimsel alan, aslında Navier-Stokes denklemini sayısal olarak çözmek için ilkel yaklaşımlardan geliştirildi. Bu denklemin çözülmesi, bugüne kadar sayısal fizikte en zorlu problemlerden biridir. Bu çalışmada ANSYS Workbench 17.1 programı kullanılarak HAD analizi yapılmıştır. Model, ANSYS Tasarım Modelleyicisi kullanılarak HAD analizine uyacak şekilde değiştirilmiştir.

Rüzgâr kuvvetinin etkisi paneller üzerinde en büyük olduğu için rüzgârın sadece paneller üzerindeki etkisini simüle edilmiştir. Simülasyon sayesinde paneller üzerindeki rüzgâr yükünün dağılımını bulunabilir, daha sonra tüm güneş sistemi analiz etmek için elde edilen rüzgâr yükünü basınç yükü olarak kullanılabilir. Bunun için HAD simülasyonunda paneller hariç tüm sistem elemanları kaldırılmıştır.

Analiz ilk önce düz arazi uygulamalı paneller için yapılmış ve bu kısımda analiz adımları tek tek anlatılmıştır. Daha sonra düz olmayan arazi (10, 20 ve 30 dereceyle eğik) uygulamalı paneller için, tekrar analiz yapılmıştır. Panellerin ardışık etkisini incelemek için panellerin birkaç kopyası (Beşe kadar) her model için arka arkaya yerleştirilmiştir. Ardışık kopyalar arasındaki yatay aralık 3 metredir. İşlem adımları aynı olduğu için adımlar bir kez anlatılmıştır.

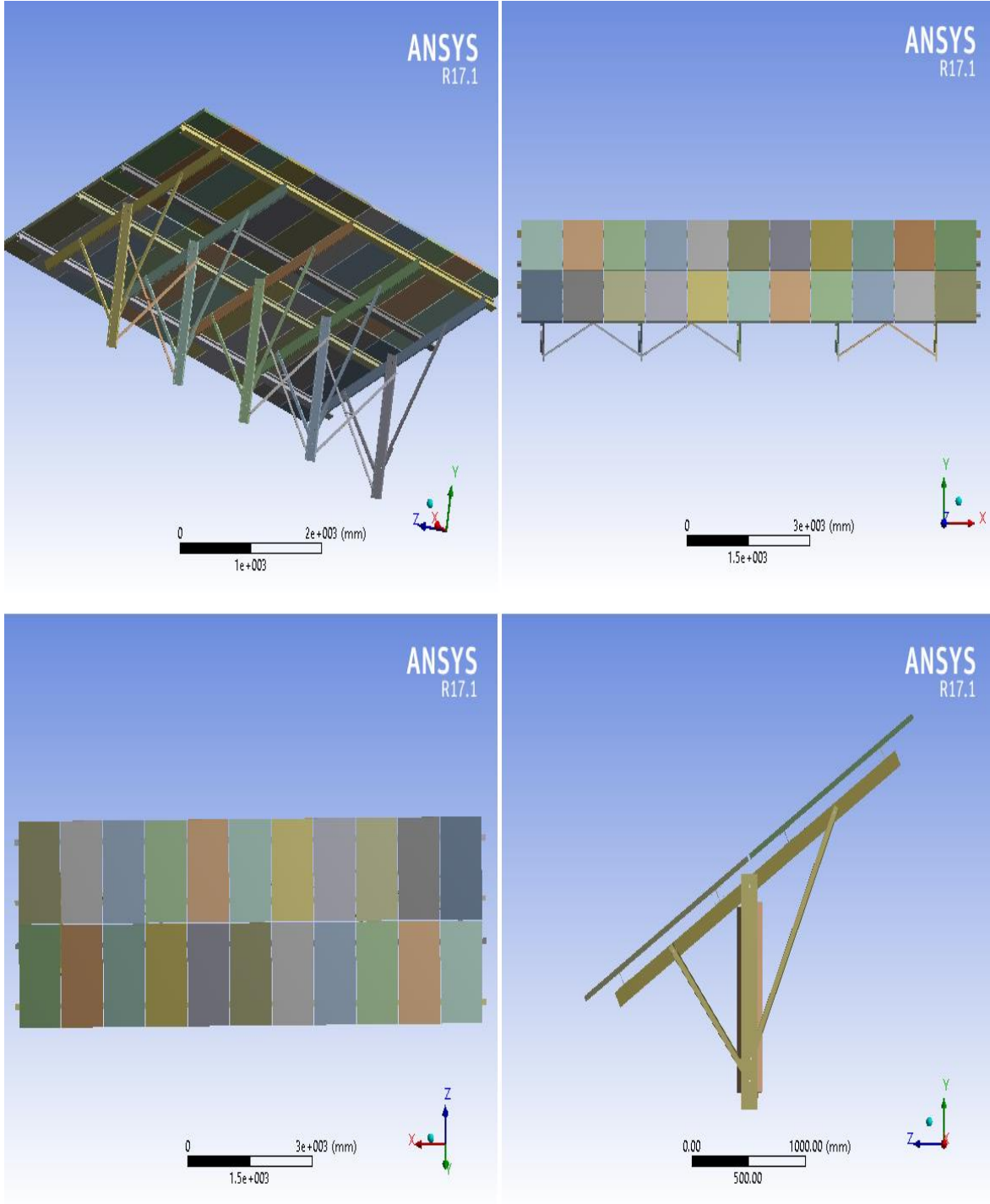
5.1 Rüzgâr Tüneli Mantığının Oluşturulması

Ansyes Workbench programı açılır ve Fluent modülü seçilir. Geometry > Import Geometry > Browse adımları takip edilerek model yüklenir (Bkz. Şekil 5.1).



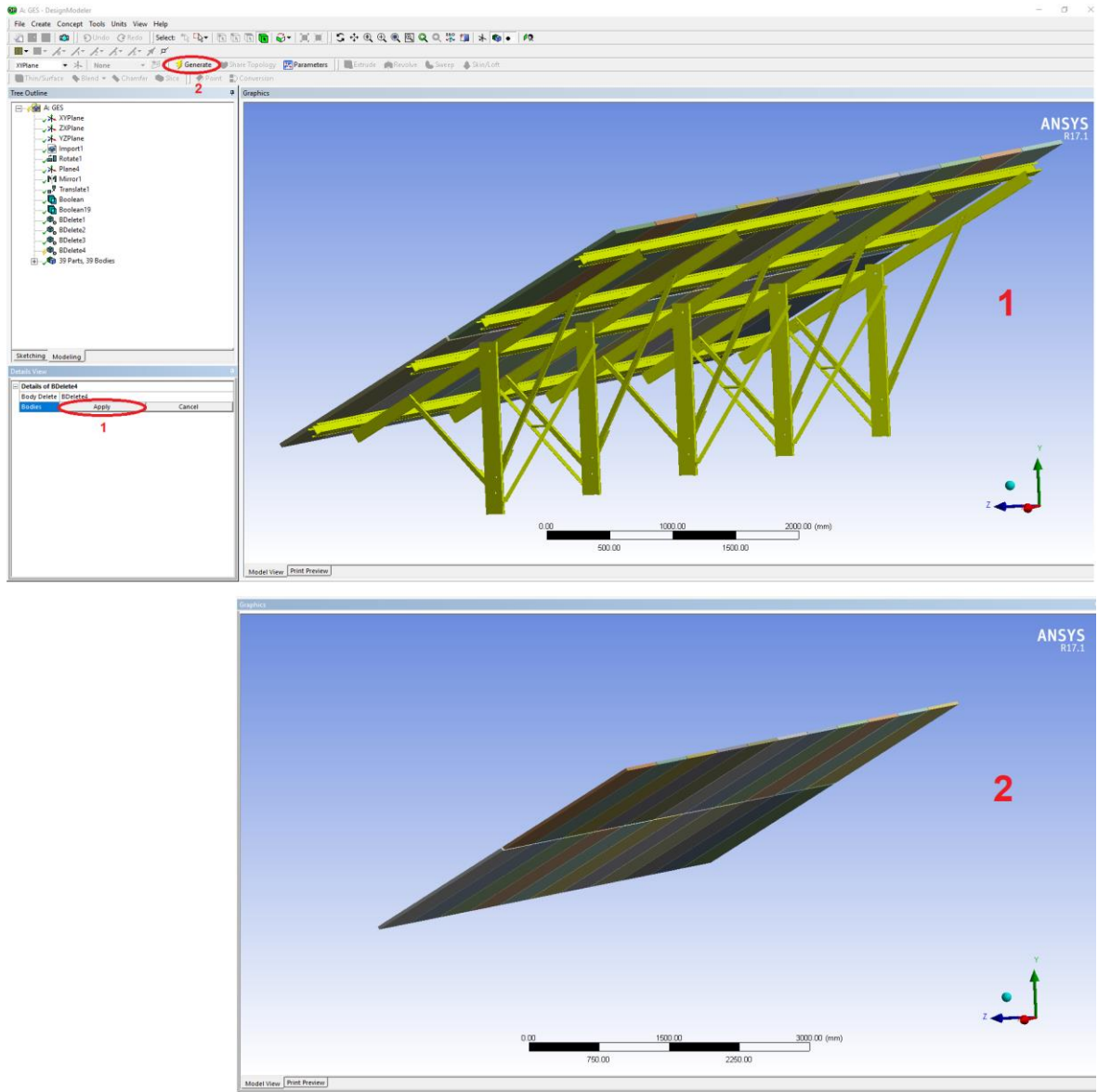
Şekil 5.1 Analiz modülünün seçilmesi

Solidworks programında çizilen model, Ansys programında okunabilmesi için STEP (*.step) olarak kaydedilmiştir. “Geometry” tuşuna çift tıklayarak DesignModeler programı ile çizilen model açılır (Bkz. Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Temsili güneş enerji sisteminin modeli

Rüzgâr etkisi paneller üzerinde baskın olduğu için rüzgârın sadece paneller üzerindeki etkisi simüle edilmiştir. Bunun için HAD simülasyonu esnasında paneller hariç tüm sistem elemanları Create > Delete Body adımları takip edilerek kaldırılmıştır (Bkz. Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Taşıyıcı sistemin kaldırılması

5.1.1 Düz arazi uygulaması

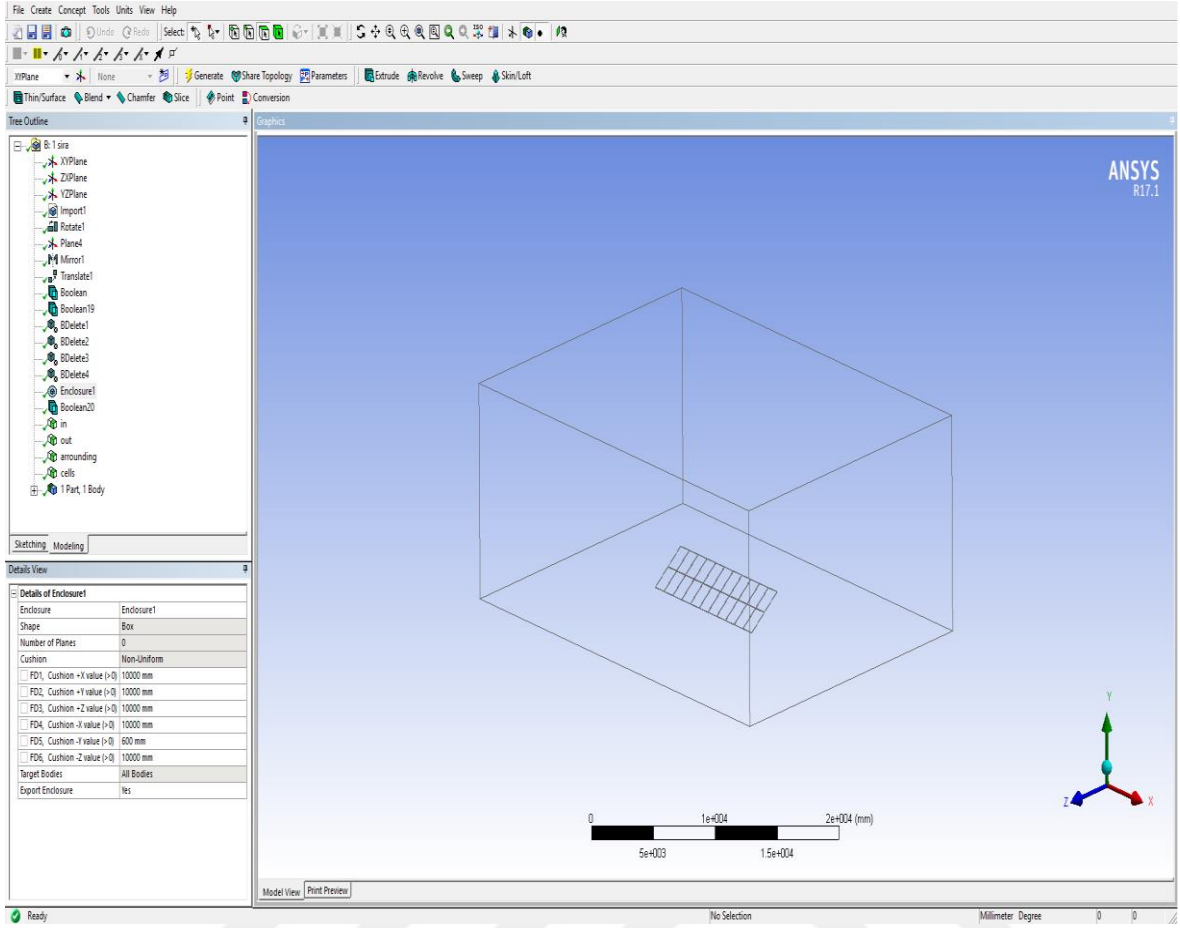
Tools > Enclosure adımları takip edilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;

Shape = Box, Cushion = Non-Uniform

+X value = 10m, +Y value = 10m, +Z value = 10m

- X value = 10m, - Y value = 0,6m, - Z value = 10m

değerleri girilerek “Generate” tuşuna basılır ve paneller etrafında yeterince hava akımı sağlayacak kadar dikdörtgen prizması şeklinde rüzgâr tüneli modeli oluşturulur (Bkz. Şekil 5.4).

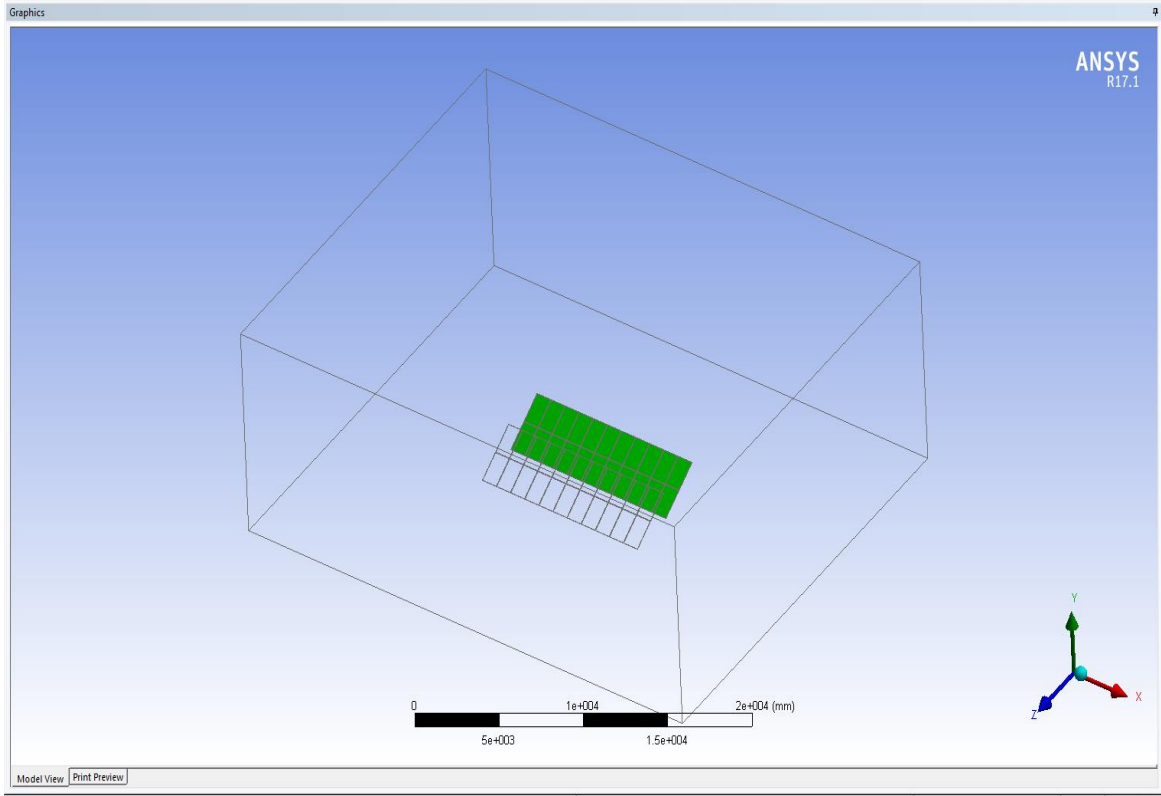


Şekil 5.4 Düz arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli

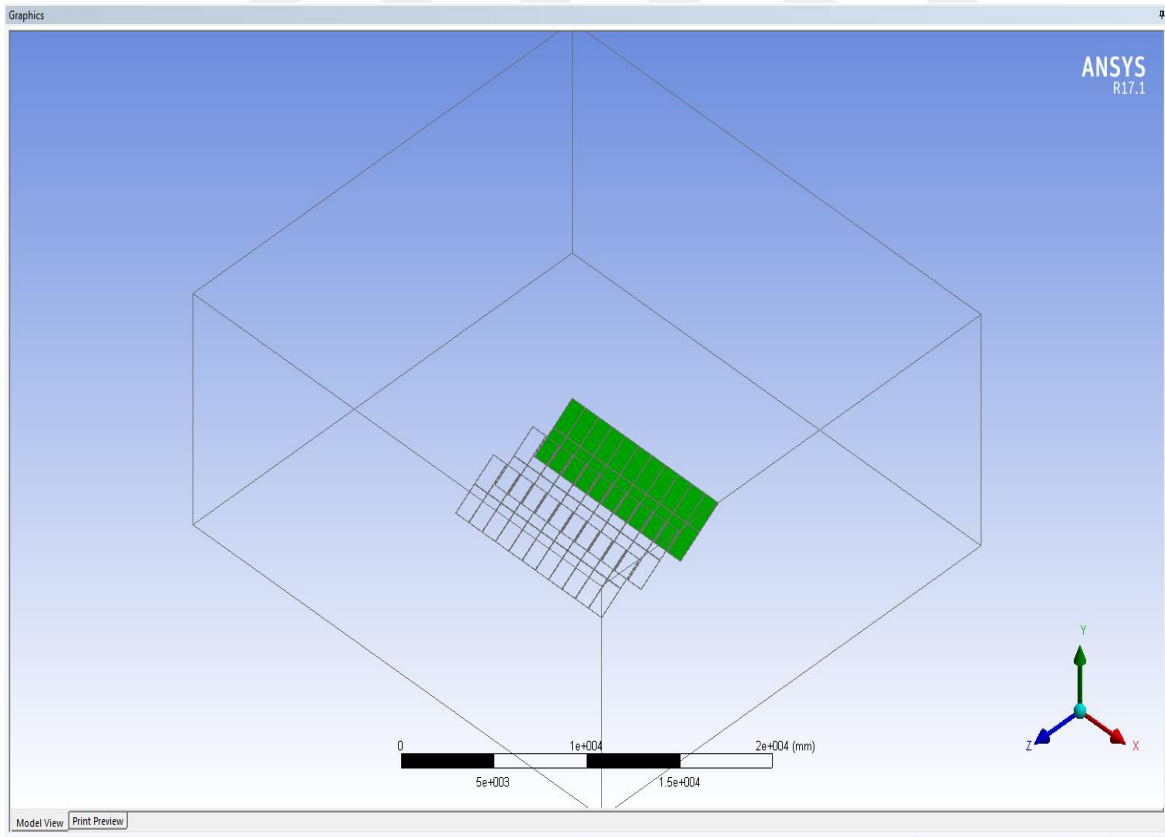
5.1.1.1 Ardışık paneller

Bu aşamada paneller üzerindeki ardışık etkisini incelemek için Create > Body Transformation > Translate adımları takip edilerek 3 metre yatay aralıkla aşağıdaki gibi beş model oluşturulmuştur:

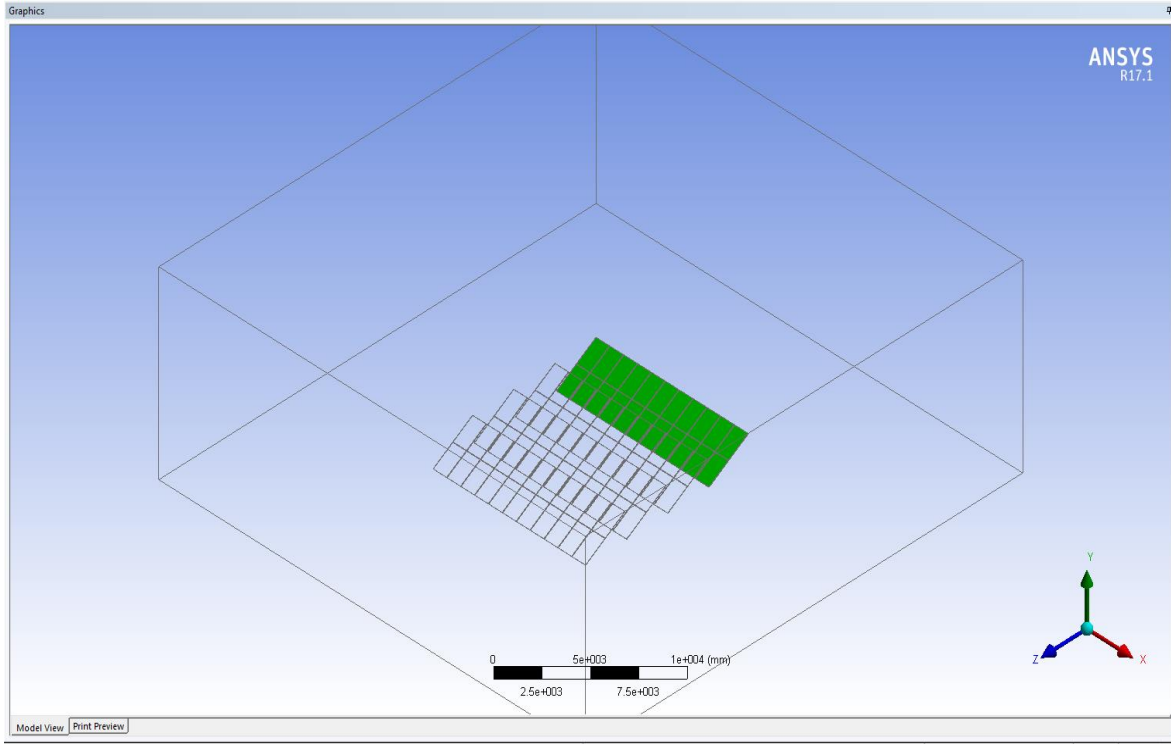
1. Tek sıra (ana model).
2. Arka arkaya iki sıra (Bkz. Şekil 5.5).
3. Arka arkaya üç sıra (Bkz. Şekil 5.6).
4. Arka arkaya dört sıra (Bkz. Şekil 5.7).
5. Arka arkaya beş sıra (Bkz. Şekil 5.8).



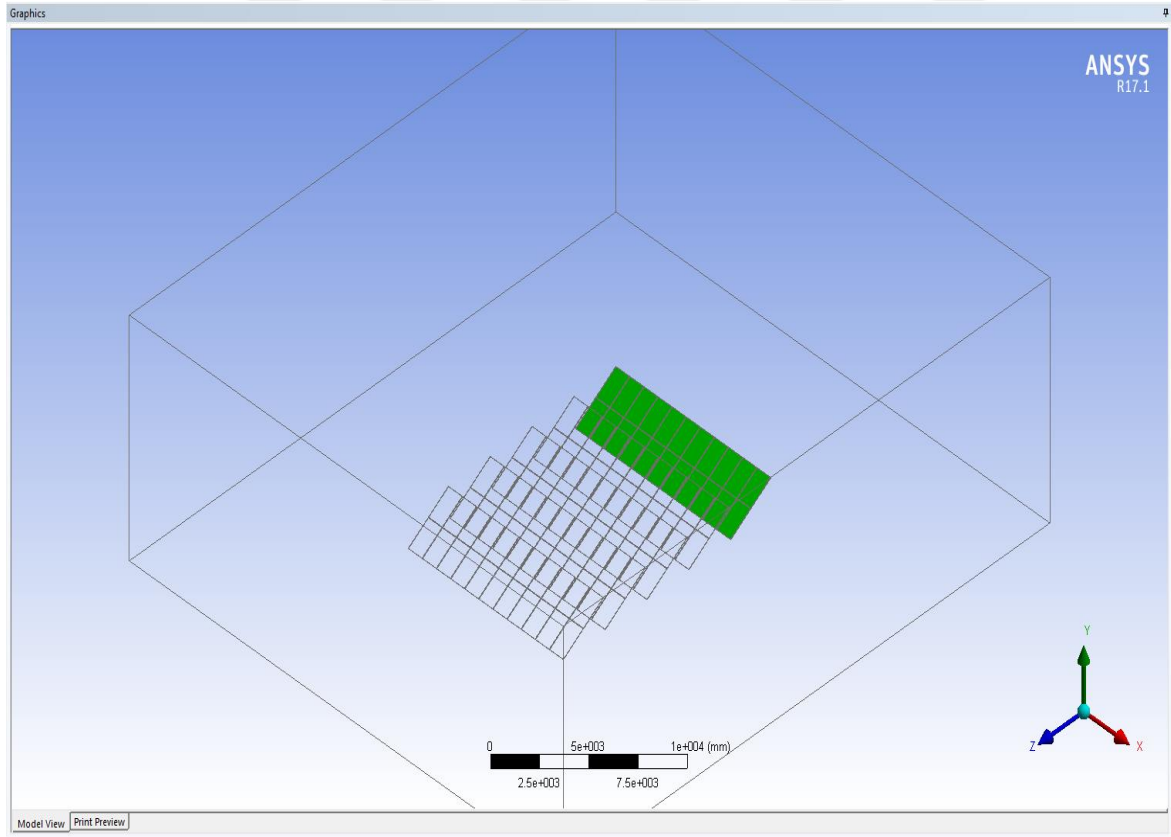
Şekil 5.5 Düz arazi uygulamalı iki sıra için rüzgâr tüneli



Şekil 5.6 Düz arazi uygulamalı üç sıra için rüzgâr tüneli



Şekil 5.7 Düz arazi uygulamalı dört sıra için rüzgâr tüneli



Şekil 5.8 Düz arazi uygulamalı beş sıra için rüzgâr tüneli

Create > Boolean adımları takip edilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;

Operation = Subtract

Target Bodies = Rüzgâr tüneli modeli

Tool Bodies = Panellerin modeli seçilerek “Generate” tuşuna basılır.

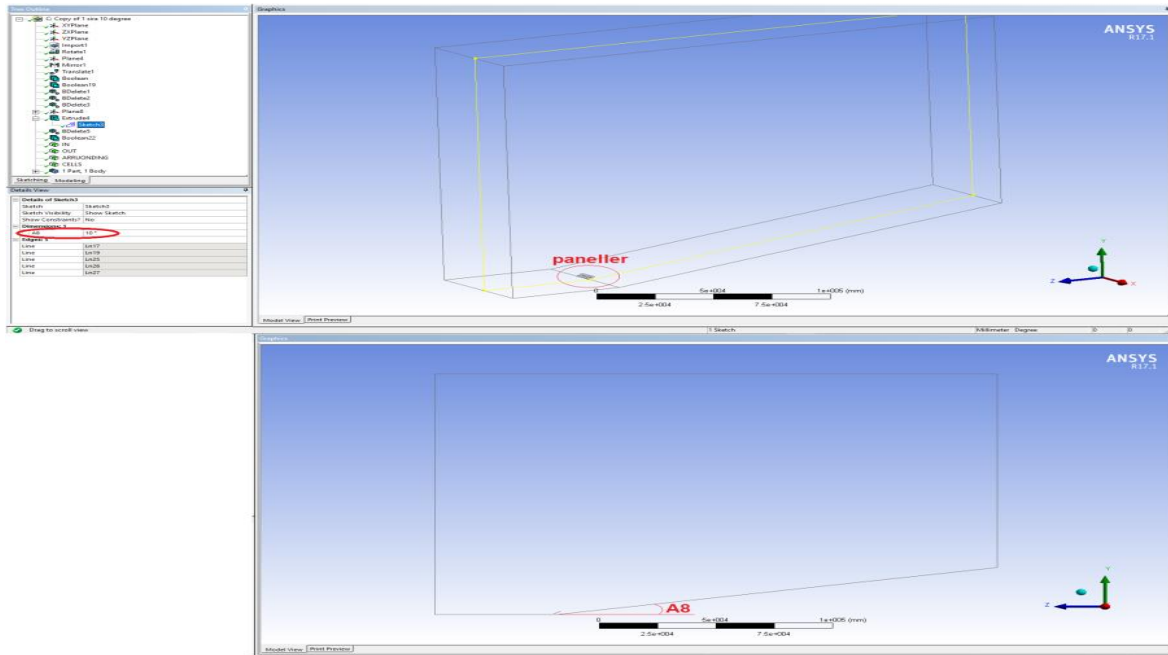
Böylece, rüzgâr tüneli modelinden paneller modelinin alanı çıkarılmış olur. Hava akışı geri kalan alan üzerinden olacaktır ve boş kalan alan paneller modelinin alanı olduğu için, o hacim içinden herhangi bir akış gerçekleşmeyerek rüzgâr tüneli mantığı oluşturulmuş olacaktır.

5.1.2 Düz olmayan arazi uygulaması

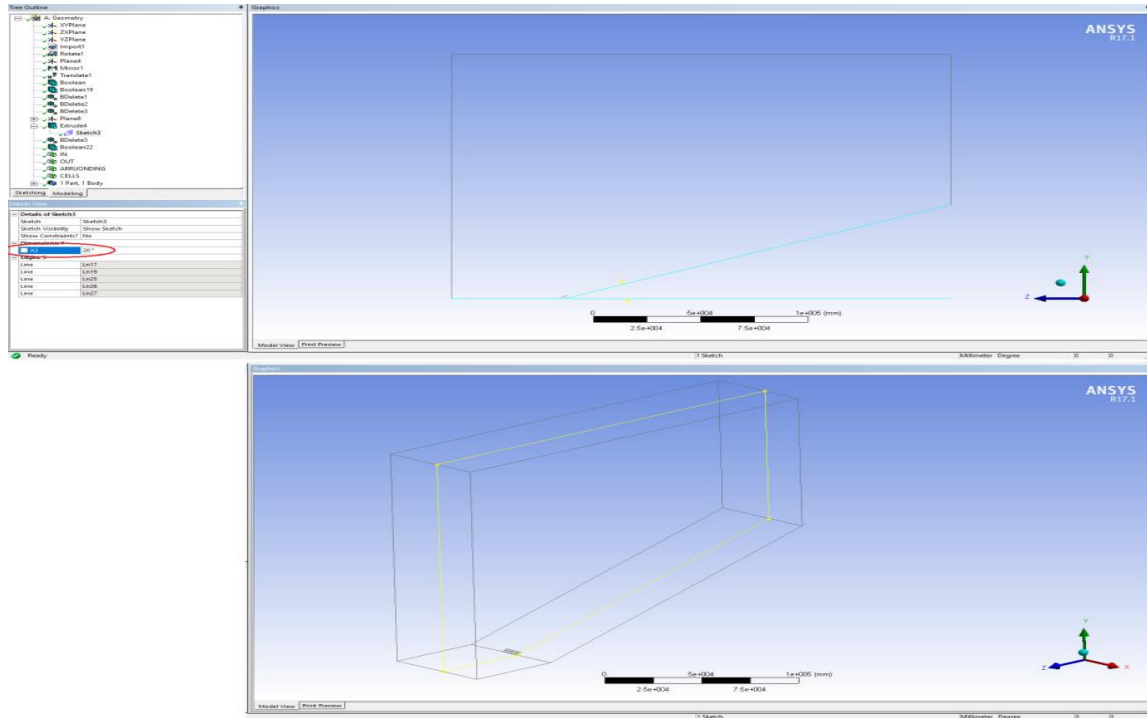
Burada, önceki dikdörtgen prizması şeklindeki rüzgâr tüneli modelinin alttaki düzeyinin bir kısmı 10° , 20° ve 30° açı ile eğilmiştir. Bunu yapmak için, boyutları yeterince büyük olan bir beşgen çizilmiştir. Sonra Create > Extrude adımları takip edilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;

Geometry = Çizilen beşgen, Direction = Both-Asymmetric, Extent Type = Fixed

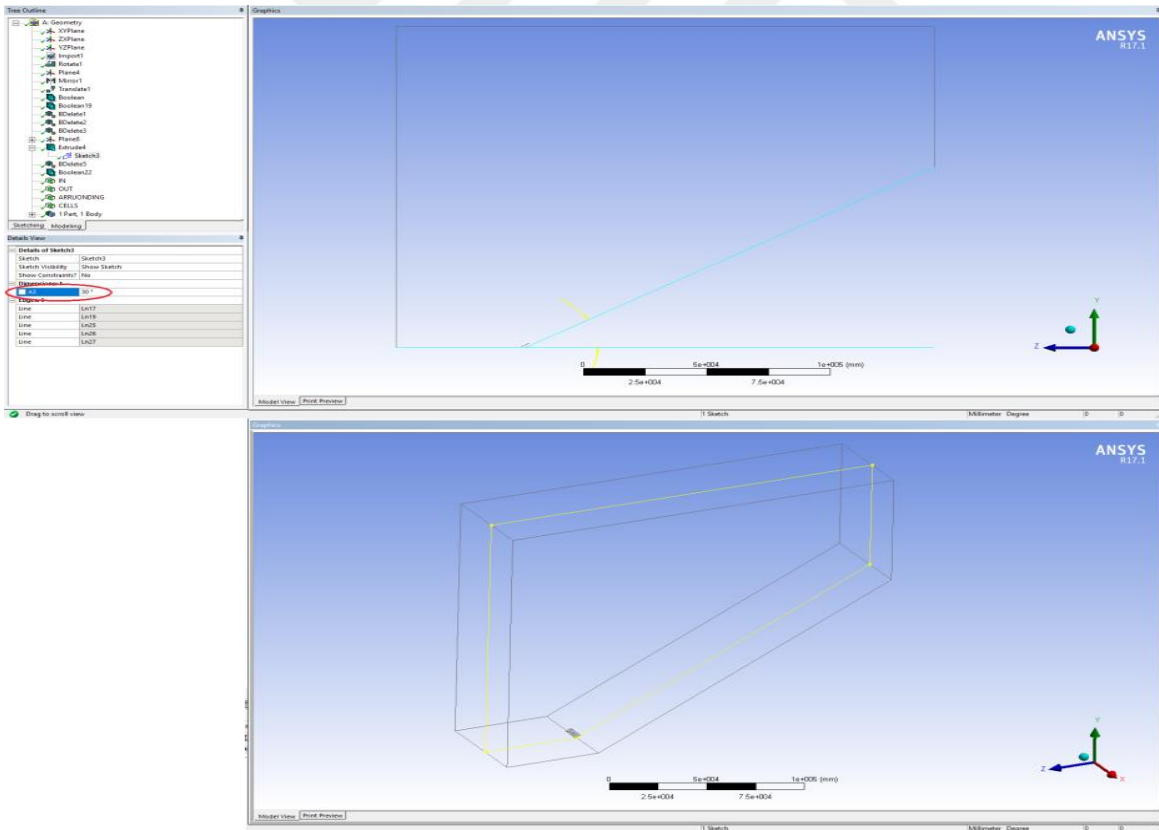
Depth = 25m, Depth 2= 35m değerleri girilerek “Generate” tuşuna basılır ve paneller etrafında yeterince hava akımı sağlayacak kadar beşgen prizması şeklinde rüzgâr tüneli modeli oluşturulur (Bkz. Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11).



Şekil 5.9 10° ile eğimli arazi uygulaması için rüzgâr tüneli



Şekil 5.10 20° ile eğimli arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli



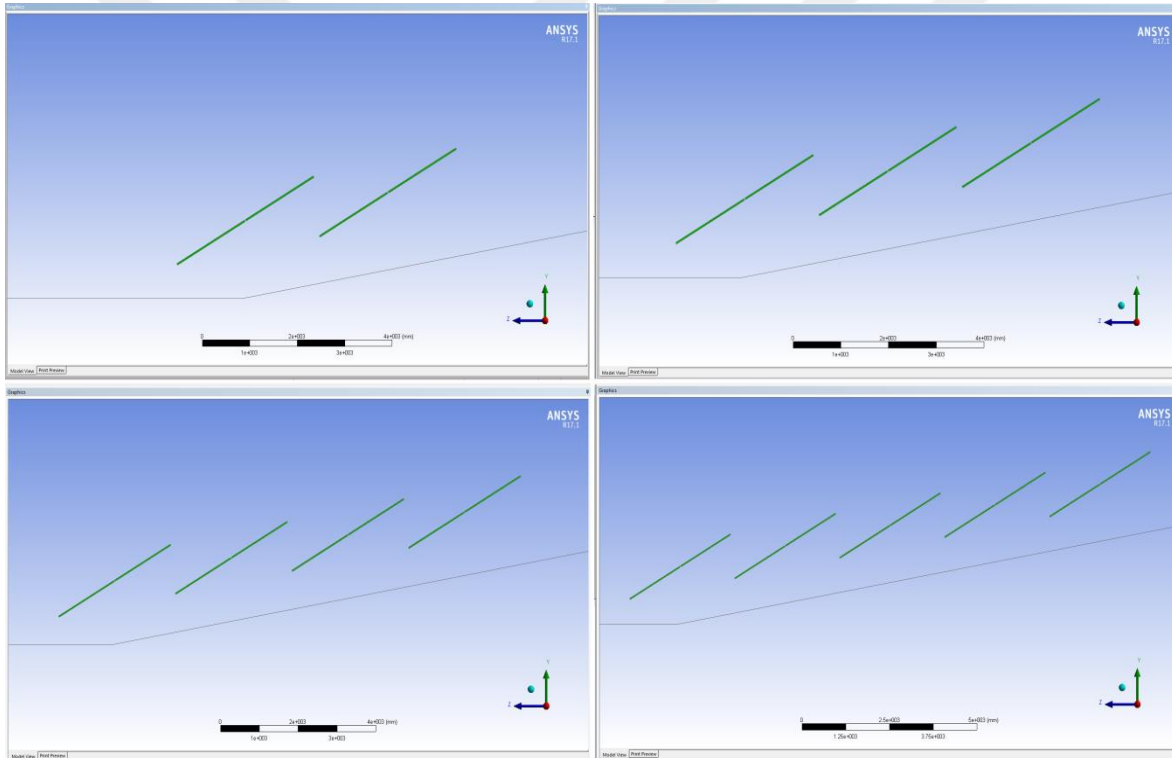
Şekil 5.11 30° ile eğimli arazi uygulamalı için rüzgâr tüneli

5.1.2.1 Ardışık paneller

Bu aşamada da paneller üzerindeki ardışıklık etkisini incelemek için güneş paneli sistemi yatay olarak 3 metre ve dikey olarak eğik araziye oturuncaya kadar aralıklar ile taşınmıştır. Create > Body Transformation > Translate adımları takip edilerek aşağıdaki gibi on beş model oluşturulmuştur:

1. 10° eğimli arazi (Bkz. Şekil 5.12).

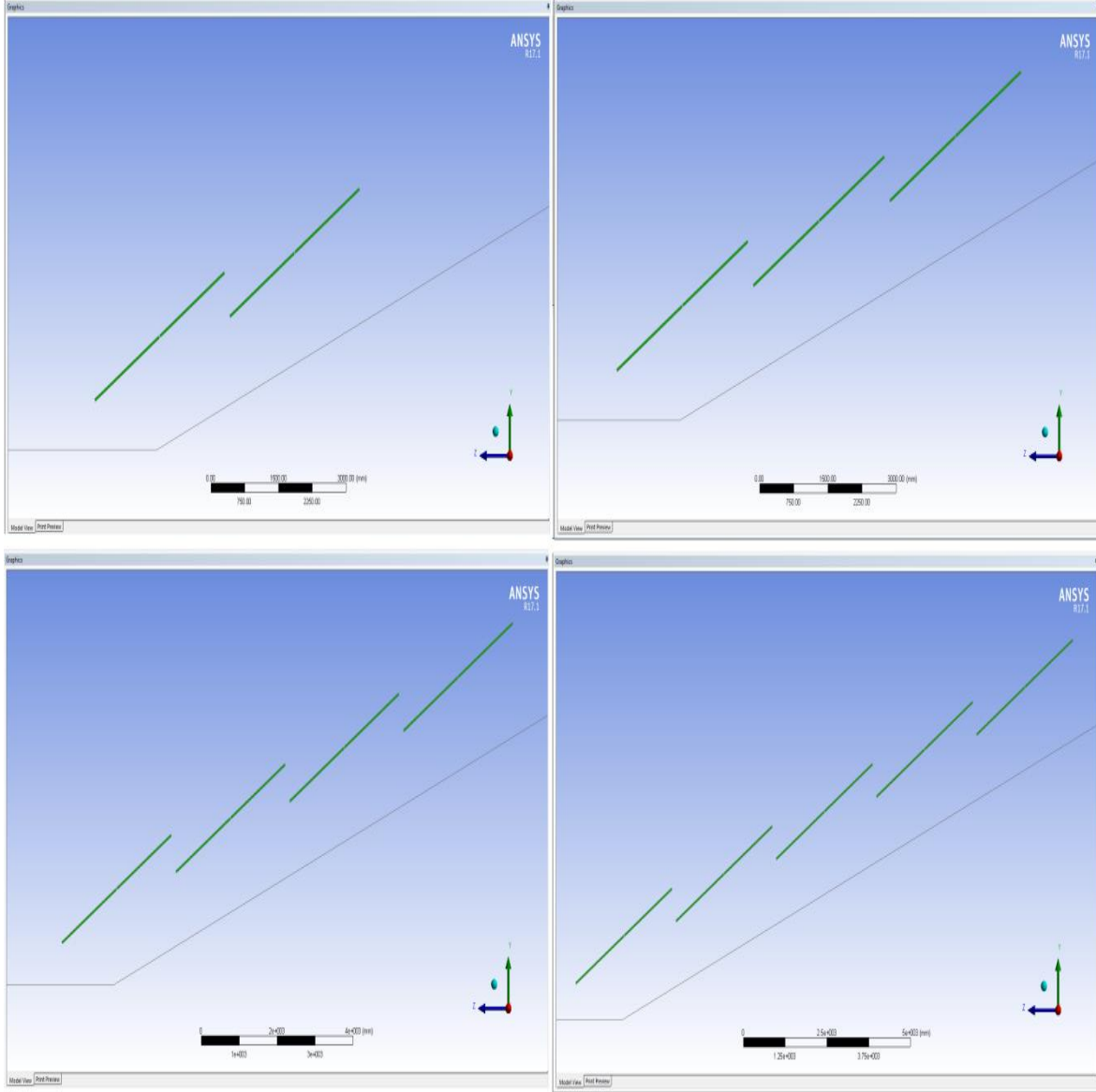
- Tek sıra (ana model).
- Arka arkaya iki sıra.
- Arka arkaya üç sıra.
- Arka arkaya dört sıra.
- Arka arkaya beş sıra.



Şekil 5.12 10° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller

2. 20° eğimli arazi (Bkz. Şekil 5.13).

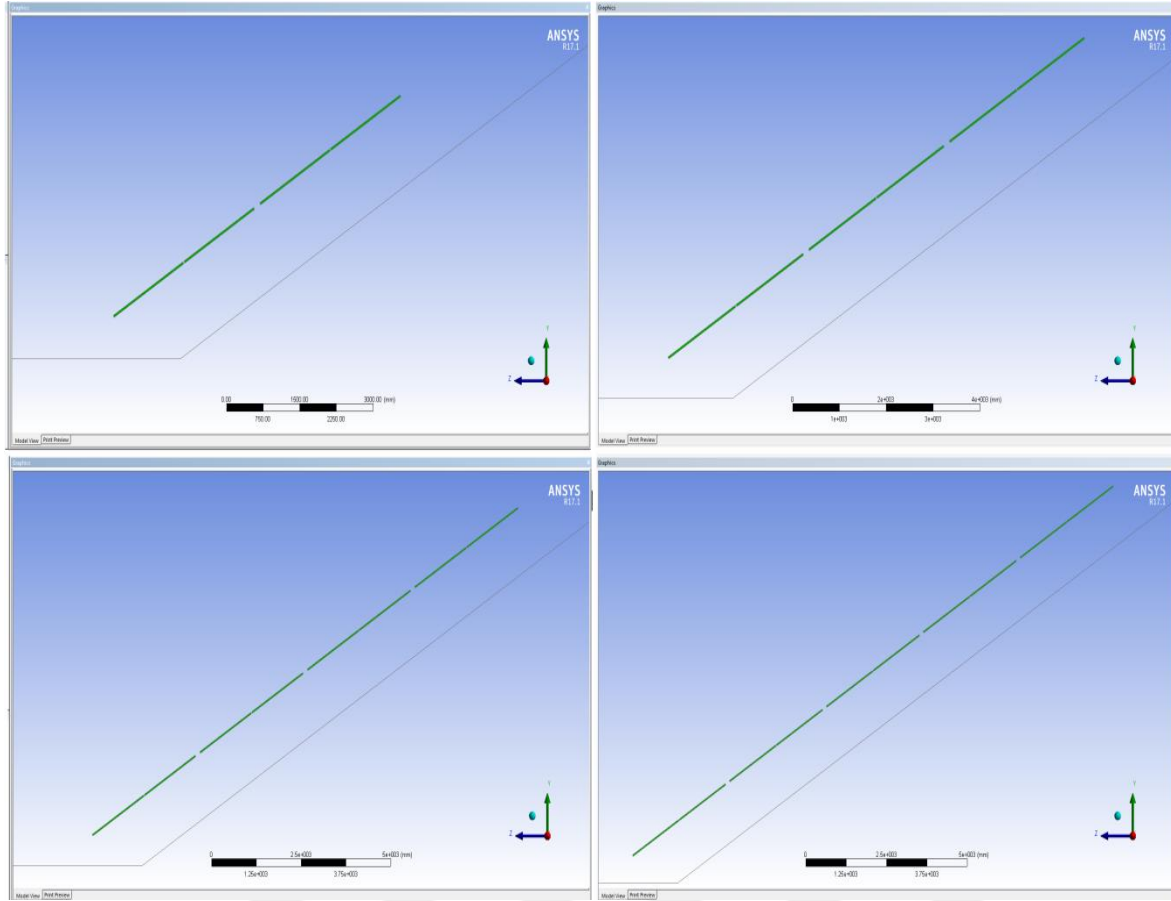
- Tek sıra (ana model).
- Arka arkaya iki sıra.
- Arka arkaya üç sıra.
- Arka arkaya dört sıra.
- Arka arkaya beş sıra.



Şekil 5.13 20° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller

3. 30° eğimli arazi (Bkz. Şekil 5.14).

- Tek sıra (ana model).
- Arka arkaya iki sıra.
- Arka arkaya üç sıra.
- Arka arkaya dört sıra.
- Arka arkaya beş sıra.



Şekil 5.14 30° ile eğimli arazi uygulamalı ardışık paneller

5.2 Sonlu Elemanlara Bölme İşlemi

Akış gerçekleşecek bölgenin sonlu elemanlara ayrılması olayıdır. Bu elemanlar tek tek çözülerek ve aralarındaki korelasyon kullanılarak problemin tamamı çözülmektedir. Sonlu elemanlar metodu aslında problemin kesin çözümünün değil, çözüme olabildiğince yaklaşan sonuçların incelemesidir. Mesh için seçilen elemanlar modele ne kadar uygun ve küçük seçilebilirse çözüme o kadar yaklaşılr. Ancak meshin sıklığı bilgisayar performansını doğrudan etkilemektedir ve kullanıcıyı kısıtlamaktadır [15].

Güneş panellerinin küçük kalınlıklarından dolayı kenar boyutlandırma teknikleri kullanılmıştır. Prizma şeklindeki rüzgâr tüneli modelinin kenarları, her kenar başına bölünmeler sayısı 200'e bölünmüştür. Güneş panellerinin kenarları elemanın büyüklüğüne göre 50 mm'ye bölünmüştür. Çünkü asıl önemli olan bu güneş panellerinin üzerinde oluşacak basınçtır. Tüm model parçaları katı elemanlar olarak modellenmiştir.

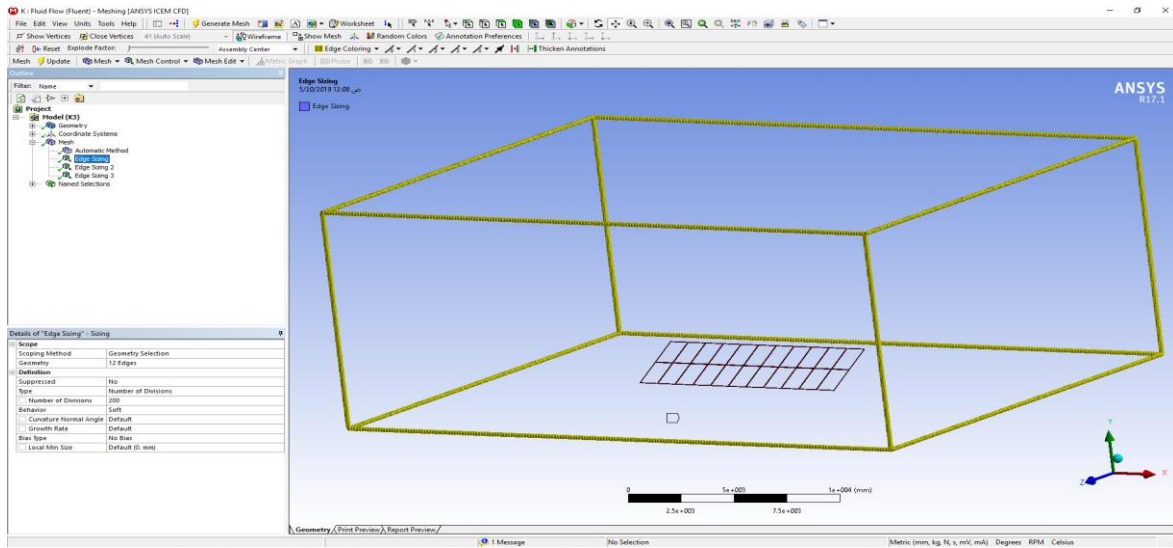
Ansys Workbench ana ekranında Mesh > Edit adımları takip edilir. Rüzgâr tünelinin kenarları için açılan CFD-mesh ekranında Mesh > Insert > Sizing adımları takip edilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;

Geometry: Prizma kenarları,

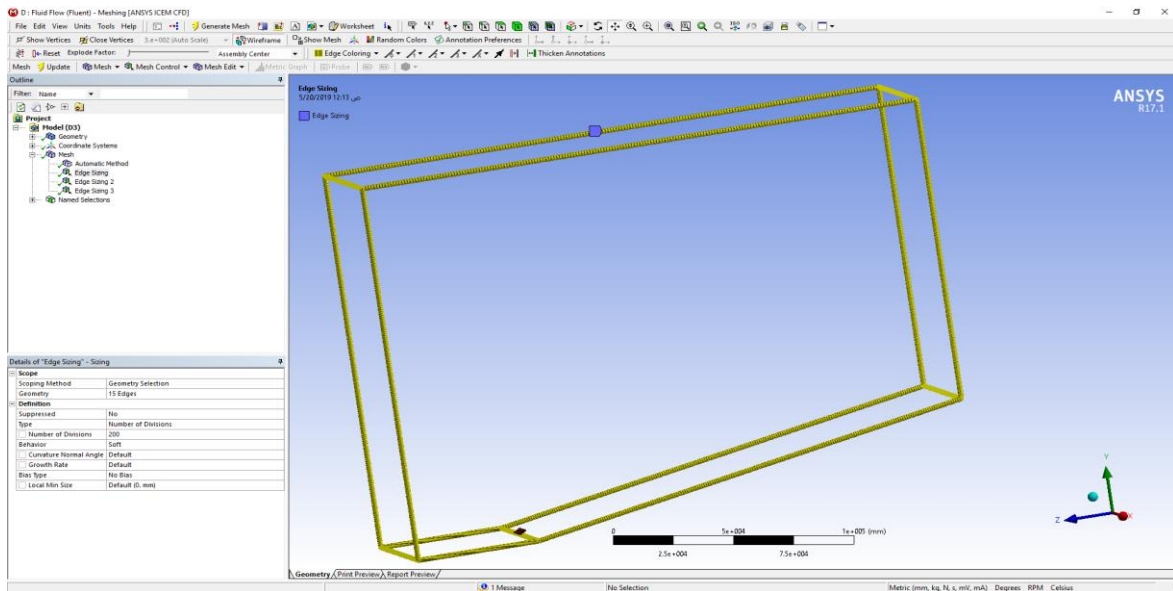
Type: Number of Divisions,

Number of Divisions: 200,

rüzgâr tüneli modelini meshlenir (Bkz. Şekil 5.15 ve 5.16).

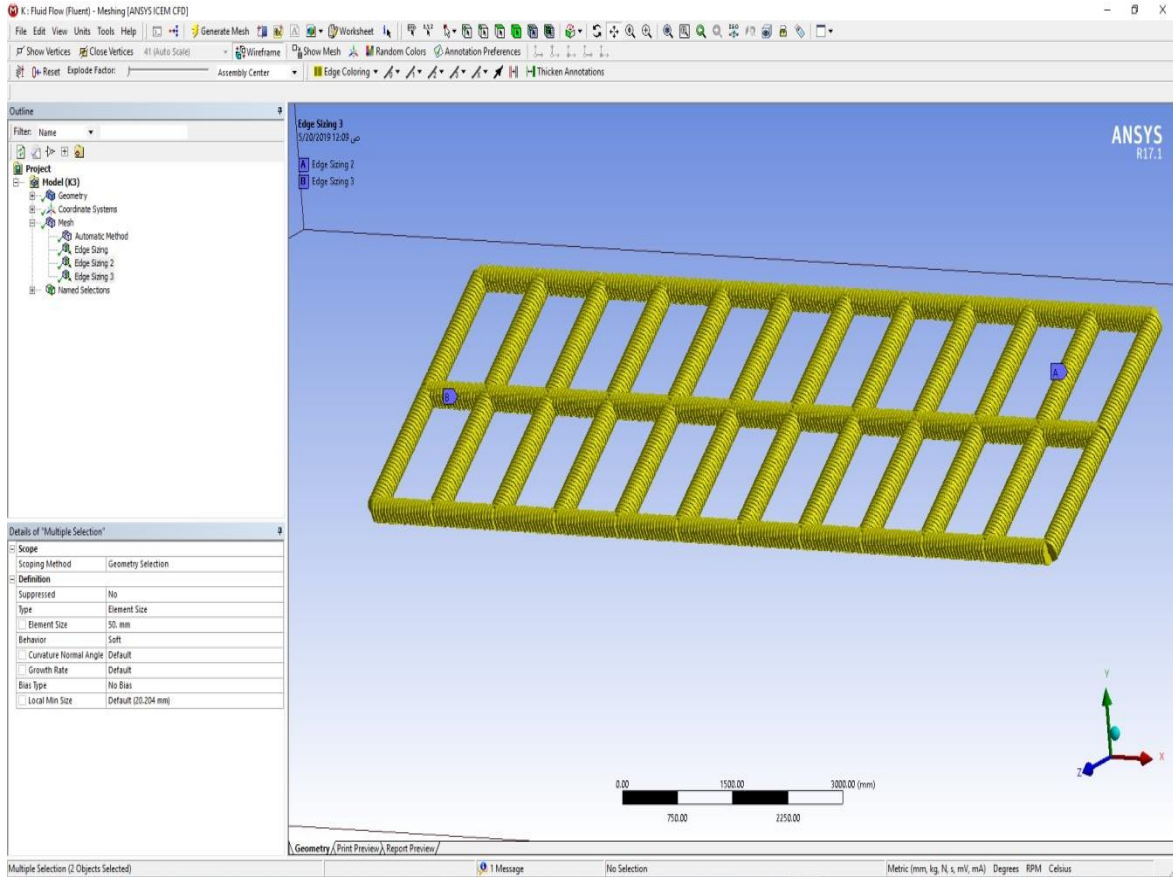


Şekil 5.15 Düz olan rüzgâr tüneli kenarlarının mesh detayları



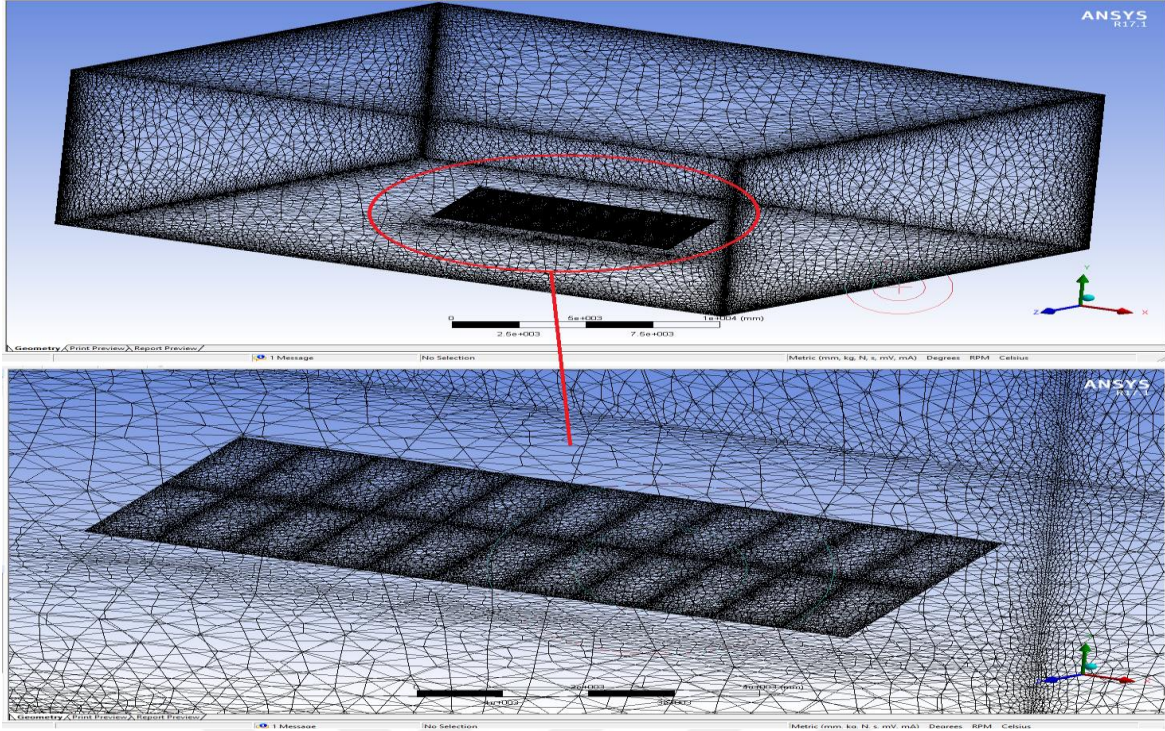
Şekil 5.16 Düz olmayan rüzgâr tüneli kenarlarının mesh detayları

Panellerin kenarları için açılan CFD-mesh ekranında Mesh > Insert > Sizing adımları takip edilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;
Geometry: Panellerin kenarları,
Type: Element Size,
Element Size: 50 mm,
panellerin modelini meshlenir (Bkz. Şekil 5.17).

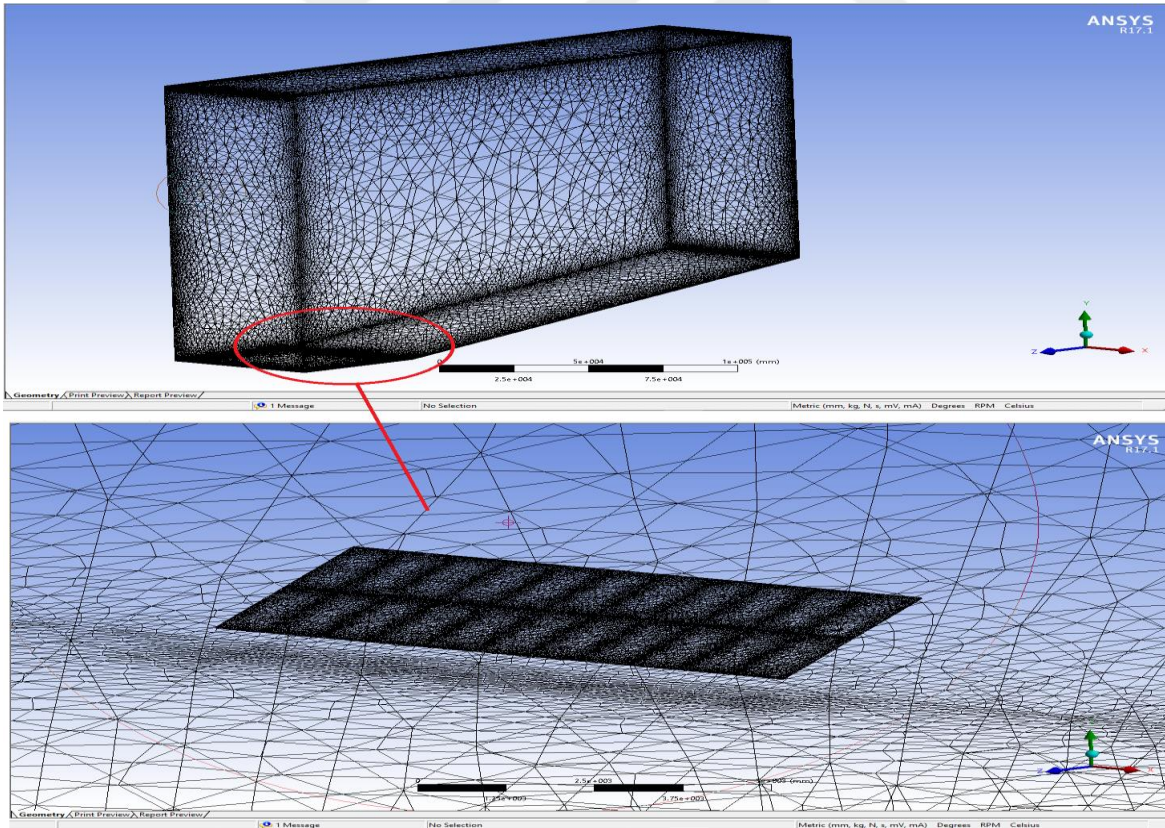


Şekil 5.17 Güneş panelleri kenarlarının mesh detayları

Bilgisayar grafiklerinde birçok nesne resmedilmeden önce mesh yapısına dönüştürülür. Fakat ana kullanım alanı sonlu elemanlar yöntemi içinde kullanılmasıdır. Yüzeysel tanım aralıkları üçgen, dörtgen vb. şekillere bölünebilirken, hacimsel tanım aralıkları tetrahedral (dört yüzlü), hexahedral (altı yüzlü) gibi şekillere bölünebilir. Elemanların şekli ve dağılımı otomatik mesh üretme algoritmaları tarafından belirlenir [20]. Modellerin mesh halleri Şekil 5.18 ve 5.19'de bulunur.



Şekil 5.18 Düz arazi uygulamalı modelin meshlenmiş hali



Şekil 5.19 Düz olmayan arazi uygulamalı modelin meshlenmiş hali

Daha sonra modelin sınır şartlarının belirleneceği kısımlar; Rüzgâr tünelinin hava giriş kısmı IN, çıkış kısmı OUT, yan duvarlar için ARROUNDING ve paneller kısmı için CELLS olarak adlandırılır.

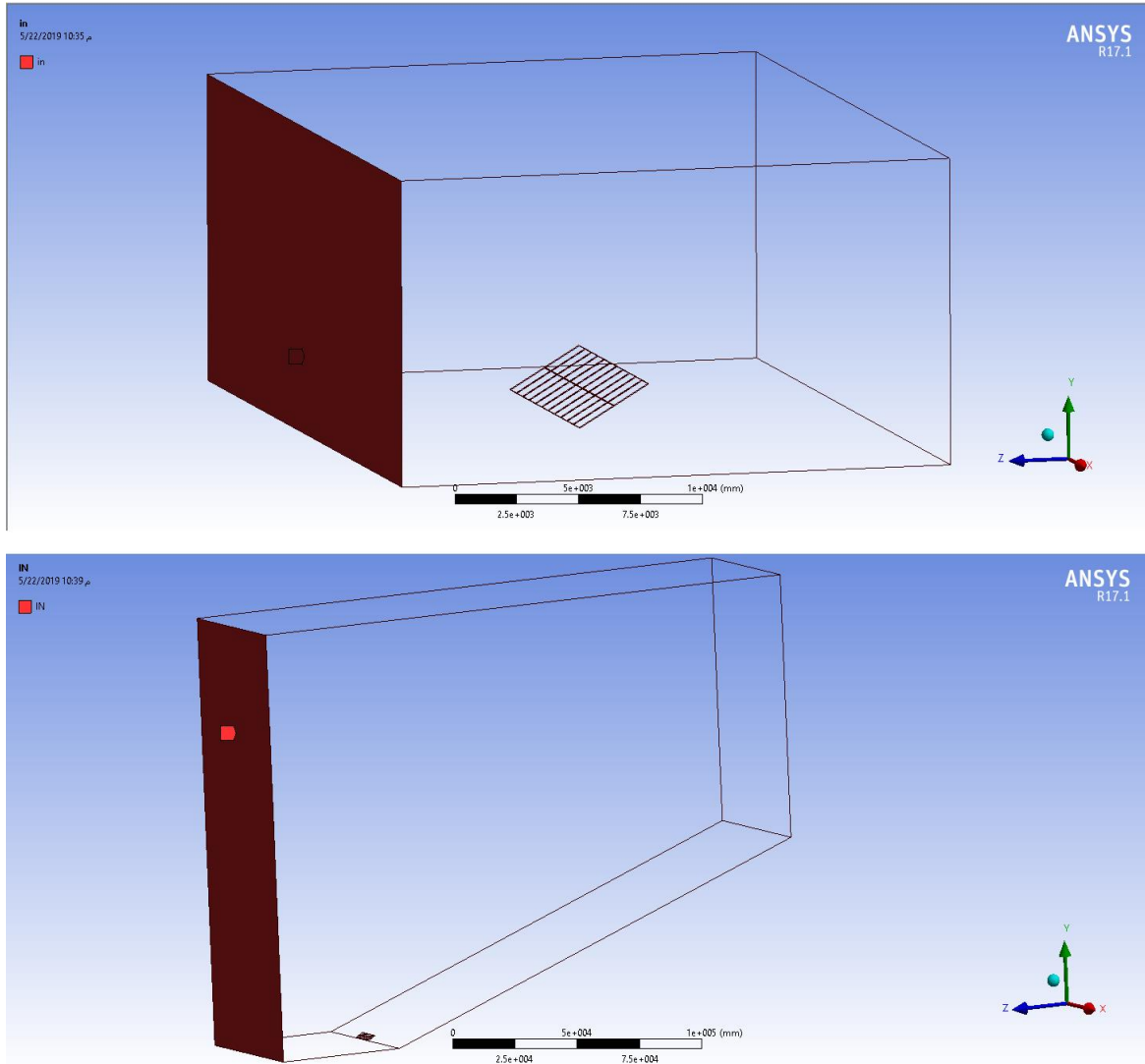
Giriş seçilir > Create Named Selection > IN (Bkz. Şekil 5.20),

Çıkış seçilir > Create Named Selection > OUT (Bkz. Şekil 5.21),

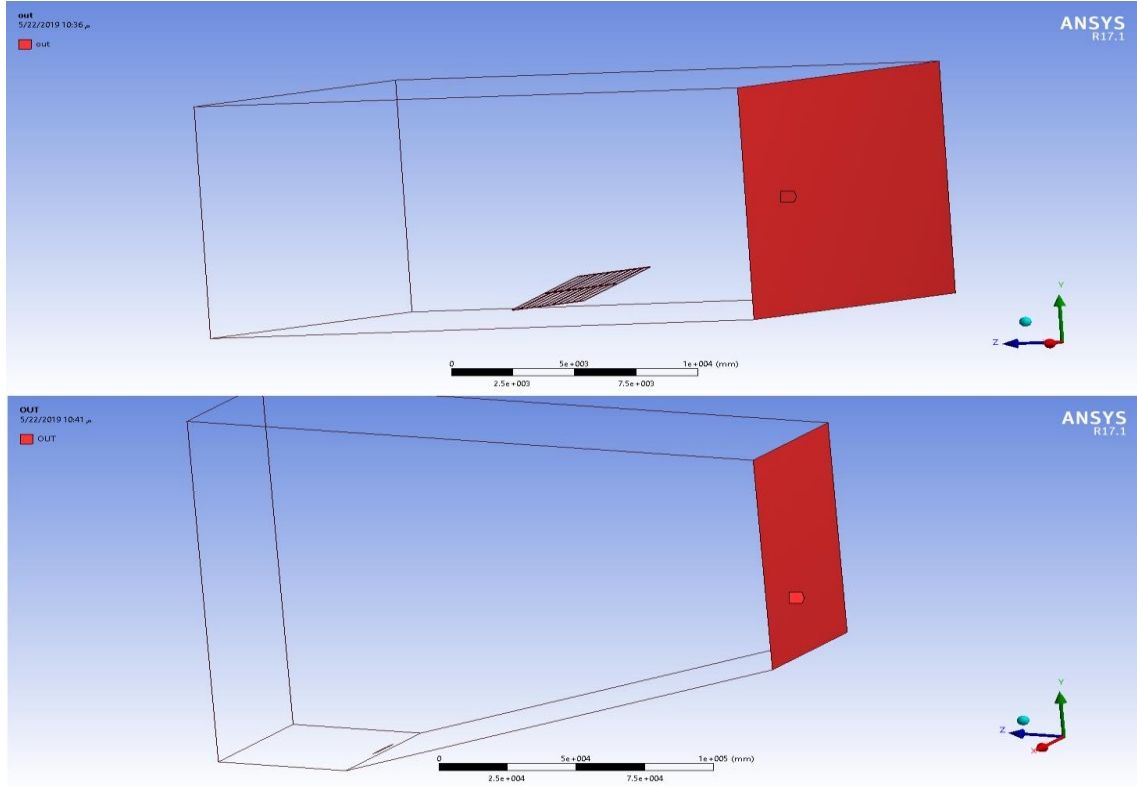
Yan duvarlar seçilir > Create Named Selection > ARROUNDING (Bkz. Şekil 5.22),

Paneller seçilir > Create Named Selection > CELLS (Bkz. Şekil 5.23),

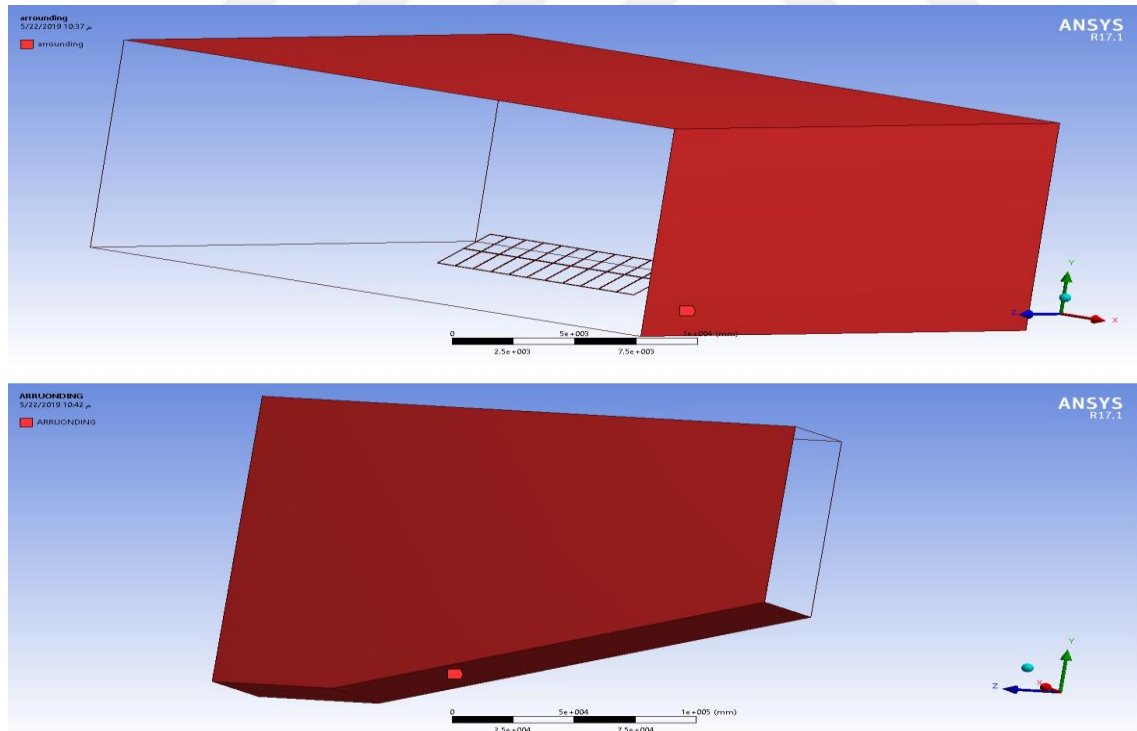
“Update” tuşuna basılır.



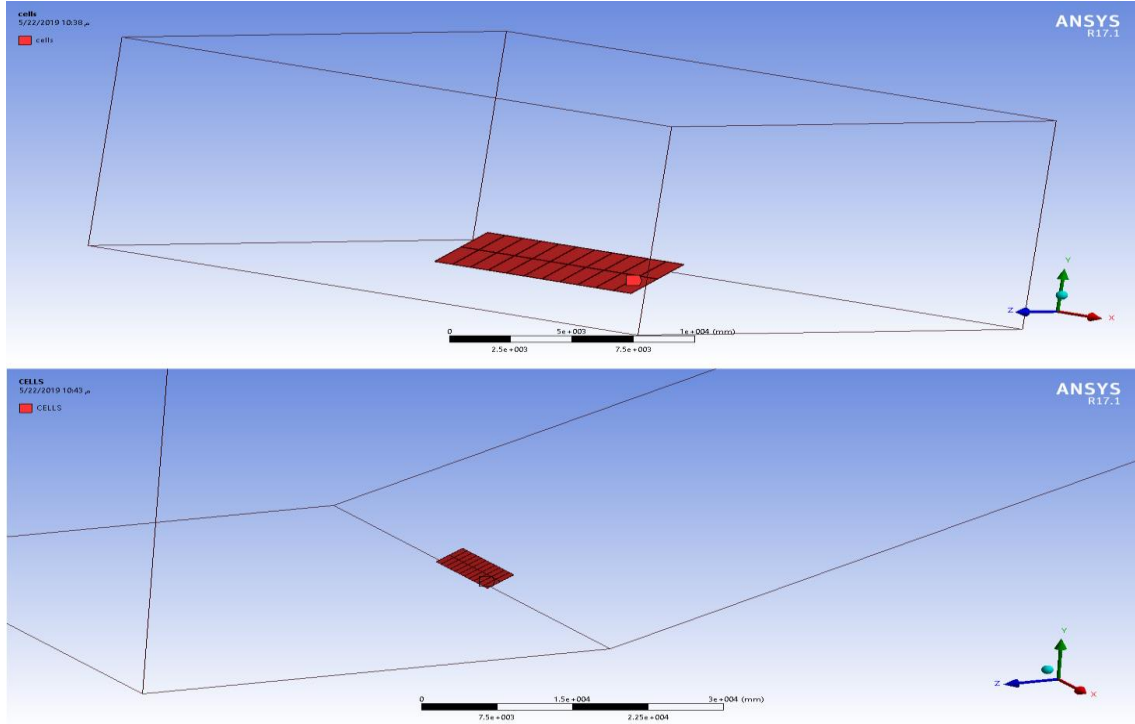
Şekil 5.20 Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli girişi



Şekil 5.21 Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli çıkışı



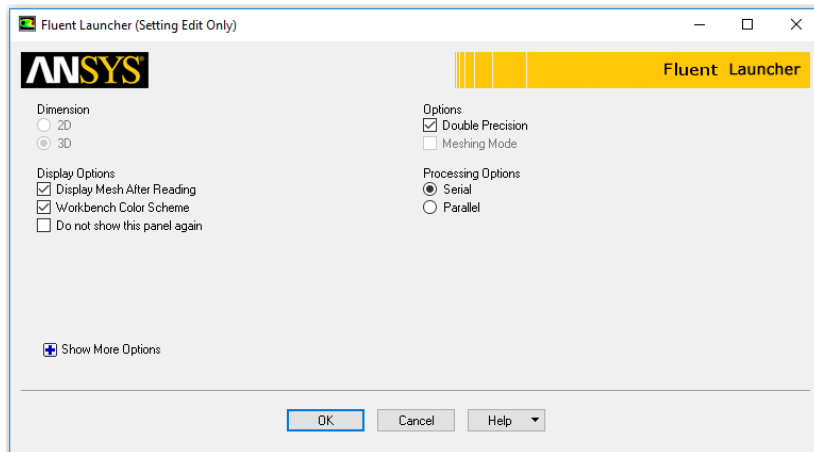
Şekil 5.22 Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli yan duvarları



Şekil 5.23 Düz ve düz olmayan rüzgâr tüneli güneş panelleri

5.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

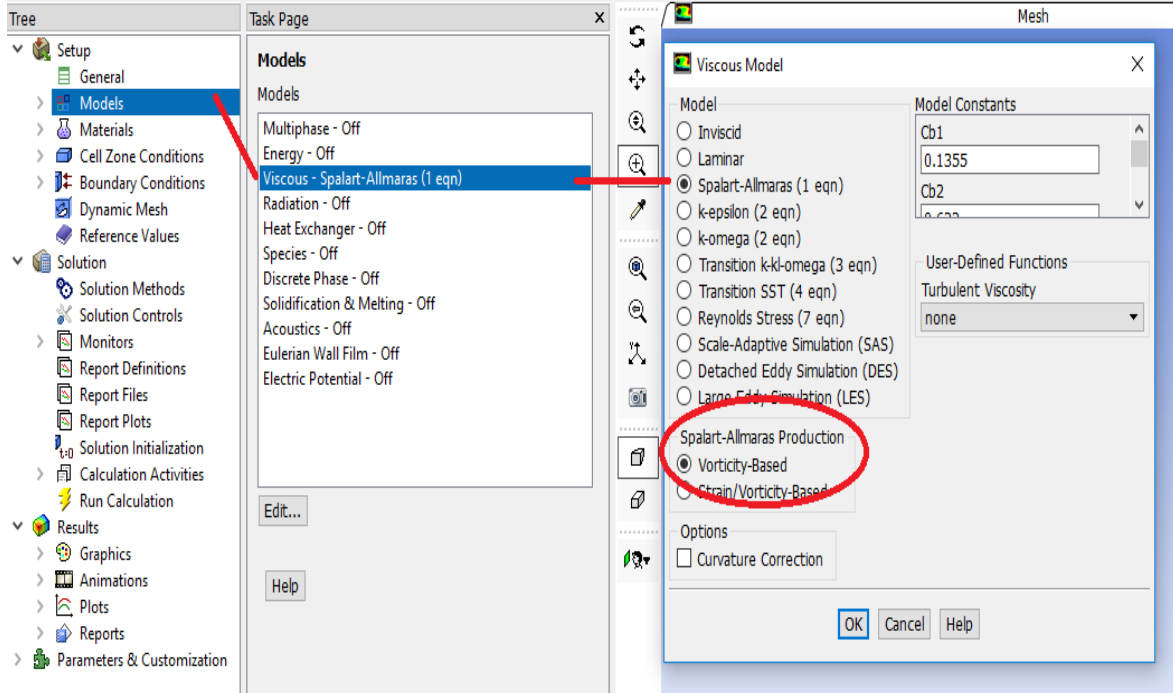
Ansyes Workbench ana ekranında Setup > Edit adımları takip edilir ve açılan pencerede “Double Precision” seçeneği işaretlenir (Bkz. Şekil 5.24). Çift hassasiyetli çözücüde her kayan nokta sayısında tek hassasiyetli çözücüde 32-bit kullanımının aksine 64-bit kullanarak ekstra hassasiyet sağlamaktadır. Fakat bellek kullanımını arttırmaktadır [15].



Şekil 5.24 Çözümleme yönteminin seçilmesi

5.3.1 Türbülans modelinin belirlenmesi

Models > Viscous-Laminar > Edit > Spalart–Allmaras (1 eqn) adımları takip edilir. Açılan pencerede “Spalart–Allmaras Production” kısmındaki “Vorticity-Based” seçeneği işaretlenerek “OK” tuşuna basılır (Bkz. Şekil 5.25).



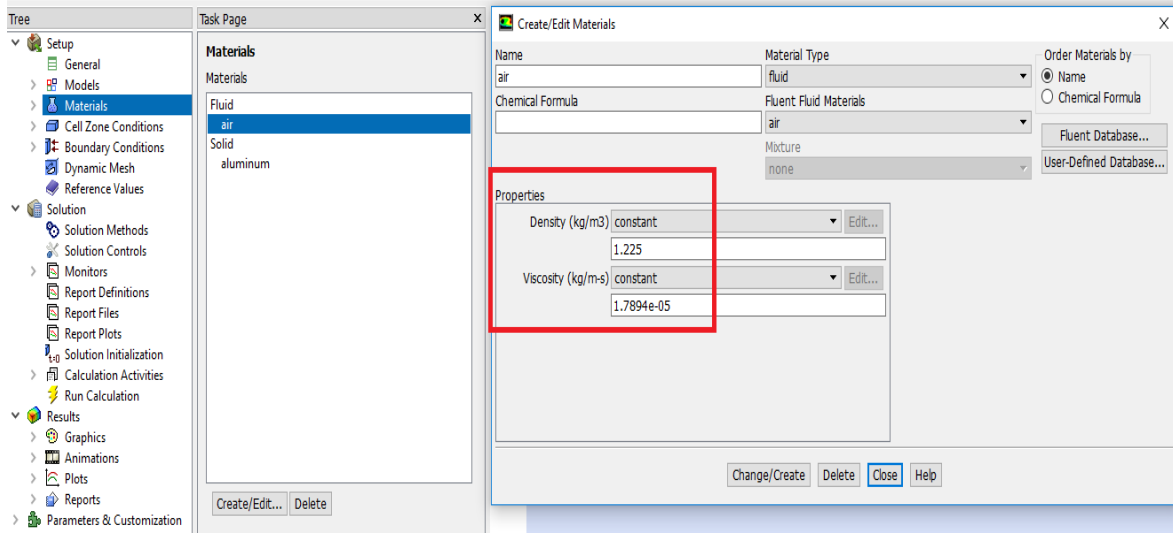
Şekil 5.25 Türbülans modelinin seçilmesi

5.3.2 Akışkan ve özelliklerinin belirlenmesi

Akışkan olarak 15°C’de hava kullanılmıştır. Material > Fluid > air adımları takip ederek havanın bu sıcaklıktaki özellikleri aşağıdaki gibi Fluent modülü içinde bu değerler tanımlanmıştır (Bkz. Şekil 5.26).

Yoğunluk = 1.225 kg/m³

Vizkozite = 1.7894×10⁻⁵ kg. m⁻¹. s⁻¹ dir.



Şekil 5.26 Akışkanın tanımlanması

5.3.3 Sınır koşullarının girilmesi

Rüzgâr tüneli, akıcının (rüzgâr) akacağı bölgeyi sağlayacaktır. Akıcı akışı ve güneş panelleri arasındaki sınırların yanı sıra tünel sınırları HAD analiz aracına dikkatlice verilmelidir.

Rüzgâr tüneli girişinde sadece hız, çıkışında sadece basınç değerleri programa girilmiştir. Hareket denklemlerinde hız ve basınç bağlı olduğundan, hız girişinde basınç belirtilemez. Çünkü bu durum aşırı matematiksel tanımlamaya yol açar. Üstelik bir hız girişindeki basınç, akış alanının geri kalanına uymak için kendisini ayarlar. Benzer şekilde, bir basınç girişinde veya çıkışında hız belirtilmez, çünkü bu da matematiksel olarak aşırı tanımlamaya yol açar. Basıncın belirtildiği bir sınır şartında hız, akış alanının geri kalanına uymak için kendisini ayarlar [7][15].

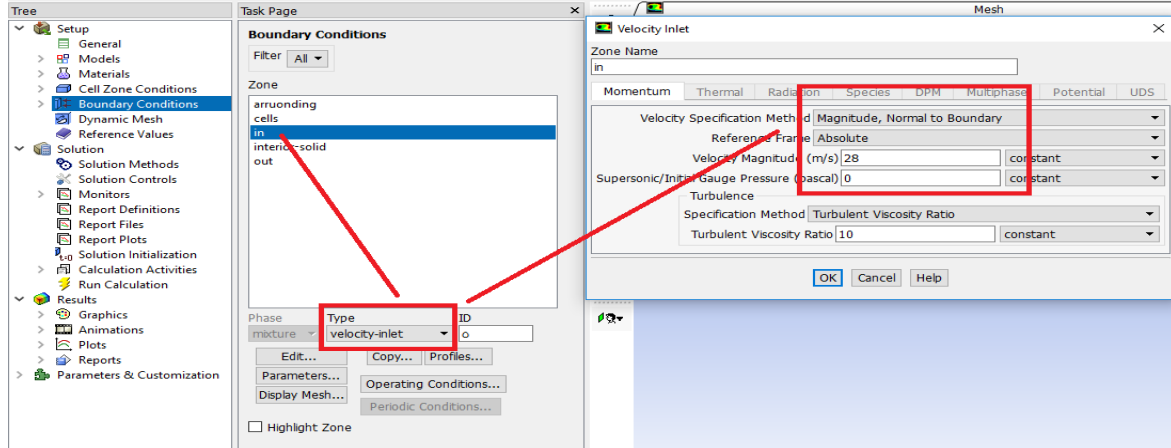
Bir basınç çıkışında (pressure outlet), akışkan hesaplama bölgesinden dışarı akmaktadır. Statik basıncı çıkış yüzü boyunca belirtilmiştir. Genelde bu basınç atmosferik basınçtır (sıfır etkin basıncı).

Giriş = Akışkanın girdiği yüzeydir.

Cisim (model) etrafındaki akış, tamamıyla görecelidir ve cismin, durgun akışkan içerisinde hareketli olması ile sonsuzda üniforma hıza sahip bir akışkan içerisinde sabit durması arasında bir fark yoktur. Bu yüzden rüzgâr tüneline giriş hızı akışkana verilmiştir.

Güneş paneli sisteminin yüksekliği 0-8 m arasında olduğu için TS498'e göre rüzgâr hızı 28 m/s olmalıdır.

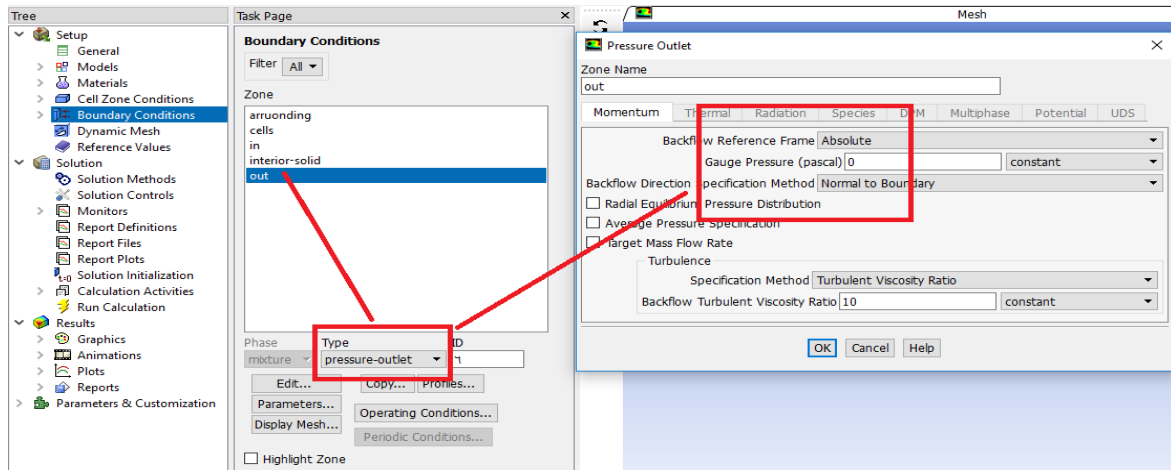
Boundary Conditions > inlet > Edit adımları takip edilir. Giriş kısmının adlandırılması “in” olarak yapıldığı için Type kısmındaki “velocity inlet” tanımlanmalıdır. Açılan pencerede Velocity Specification Method “Magnitude, Normal to Boundary” (Büyüklik, Sınıra Normal) olarak seçilir. Hız 28 m/s değeri girilir (Bkz. Şekil 5.27).



Şekil 5.27 Giriş koşulunun girilmesi

Çıkış = Akışkanın çıktığı yüzeydir.

Boundary Conditions > outlet > Edit adımları takip ederek açılan pencerede Gauge Pressure (pascal) kısmına 0 değeri girilir. Çıkış kısmının adlandırılması “out” olarak yapıldığı için Type kısmındaki “pressure-outlet” olarak tanımlanmalıdır (Bkz. Şekil 5.28).

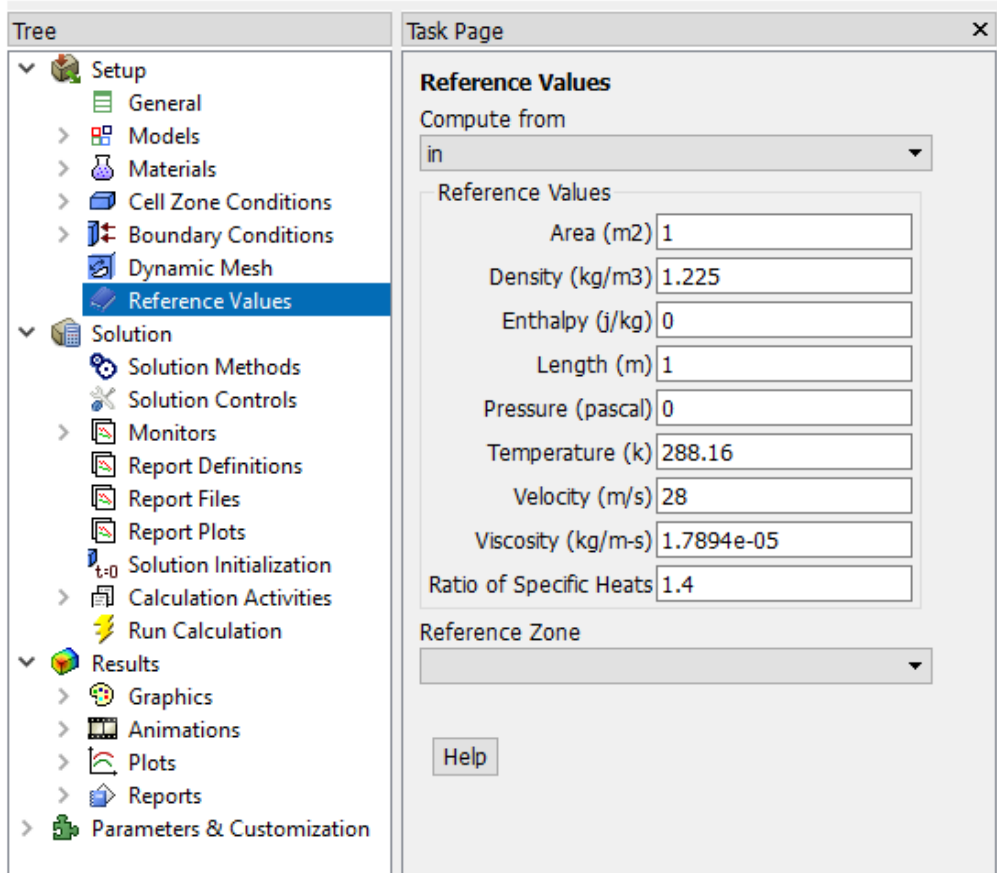


Şekil 5.28 Çıkış koşulunun girilmesi

Wall = Akışkanın akışına karşı katı sızdırmaz elemanlardır. Akışkanın geçemeyeceği sınır olarak da isimlendirilebilir. “ARROUNDING” ve “CELLS” olarak

isimlendirilen kısımlar Type kısmında otomatik olarak wall olarak tanımlanmıştır. Akışkanın duvar yüzeyinde hızı ve kayma gerilmeleri sıfırdır.

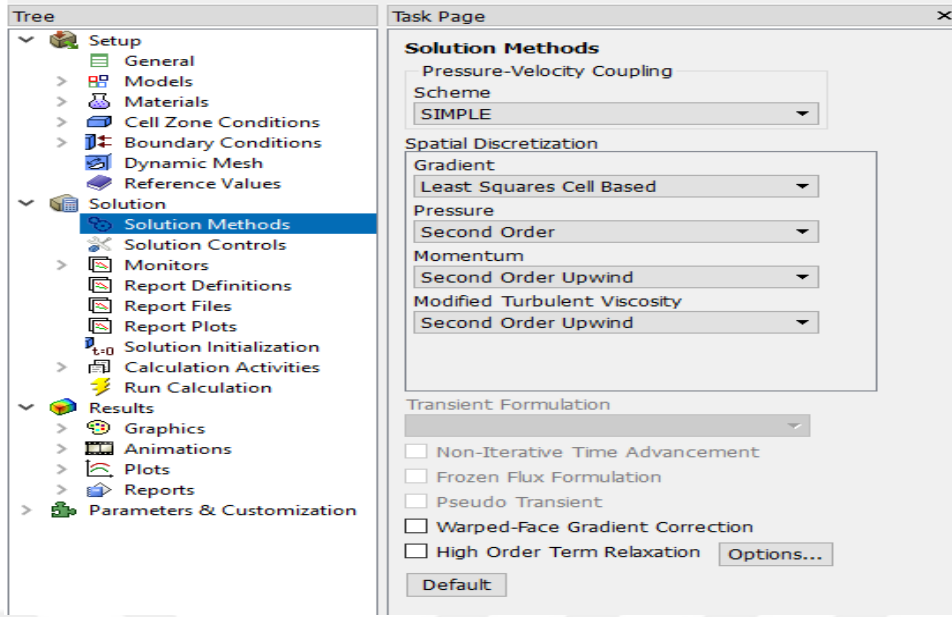
Reference Values > Compute from (in) adımları takip ederek, daha önce yapılan işlemler doğrultusunda program tarafından tanımlanmış değerler görünür (Bkz. Şekil 5.29).



Şekil 5.29 Giriş kısmı için tanımlanmış değerler

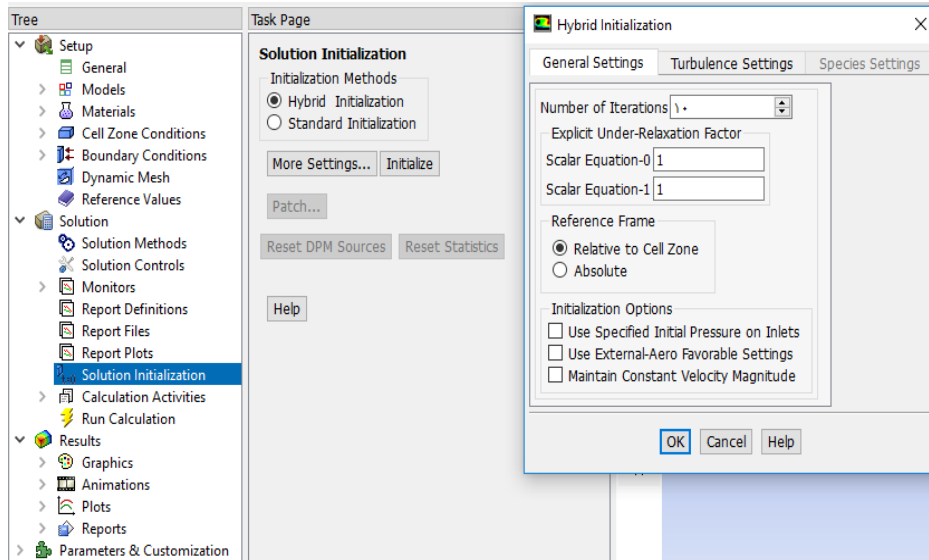
5.4 Analiz Yöntemi

Şekil 5.30 çözümlemede kullanılan yöntemi göstermektedir. Aslında bu değerler program tarafından otomatik tanımlanır. Modifiye türbülanslı viskozite "First order upwind" olarak tanımlanmışsa o zaman ilkel çözümlemede kullanılabilir. Bunun için final çözümün doğruluğunu arttırmak için ikinci mertebeden ayrıklaştırma türü kullanılmıştır.



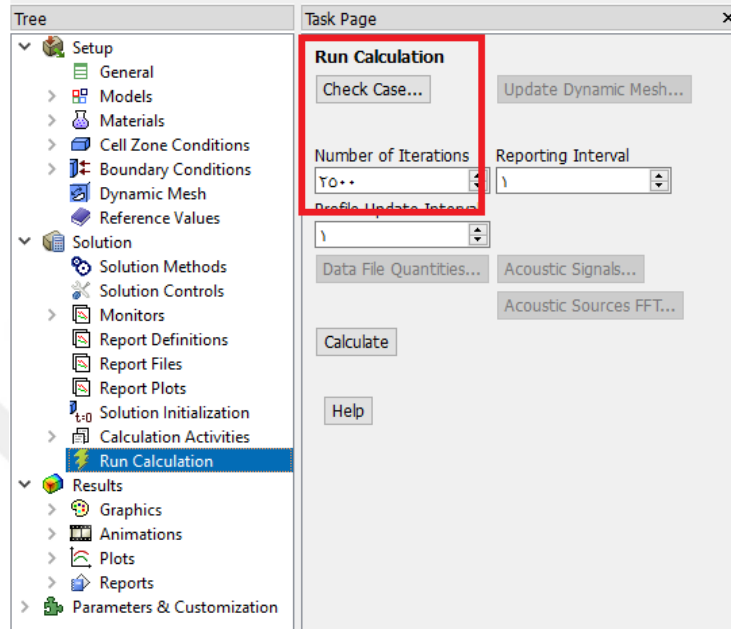
Şekil 5.30 Çözümlemede kullanılan yöntemi

Solution Initialization > Hybrid Initialization adımları takip edilerek “Initialize” tuşuna basılarak hesaplama için son adım tanımlanır (Bkz. Şekil 5.31). Hibrit başlatma düzenler ve sınır enterpolasyon yöntemleri koleksiyonudur. Hız ve basınç alanlarını belirlemek için Laplace denklemi çözülür. Sıcaklık, türbülans, tür fraksiyonları, hacim fraksiyonları vb. gibi diğer tüm değişkenler, alan ortalama değerlerine veya belirli bir enterpolasyon düzenine dayanarak otomatik olarak yamalanacaktır.



Şekil 5.31 Çözüm başlangıç durumuna getirmesi

Çözümleme için iterasyon sayısı 2500 olarak belirlenmiştir. “Initialize” tuşuna basılarak, girilmiş verilerde herhangi bir tutarsızlık veya hata varsa program ipuçları sunmaktadır. Run Calculation > Number of Iterations (2500) adımları takip ederek “Calculate” tuşuna basılmıştır (Bkz. Şekil 5.32).



Şekil 5.32 İterasyon sayısı girilmesi ve heaplama çalıştırılması

6 DOĞRUSAL STATİK ANALİZİ İŞLEM ADIMLARI

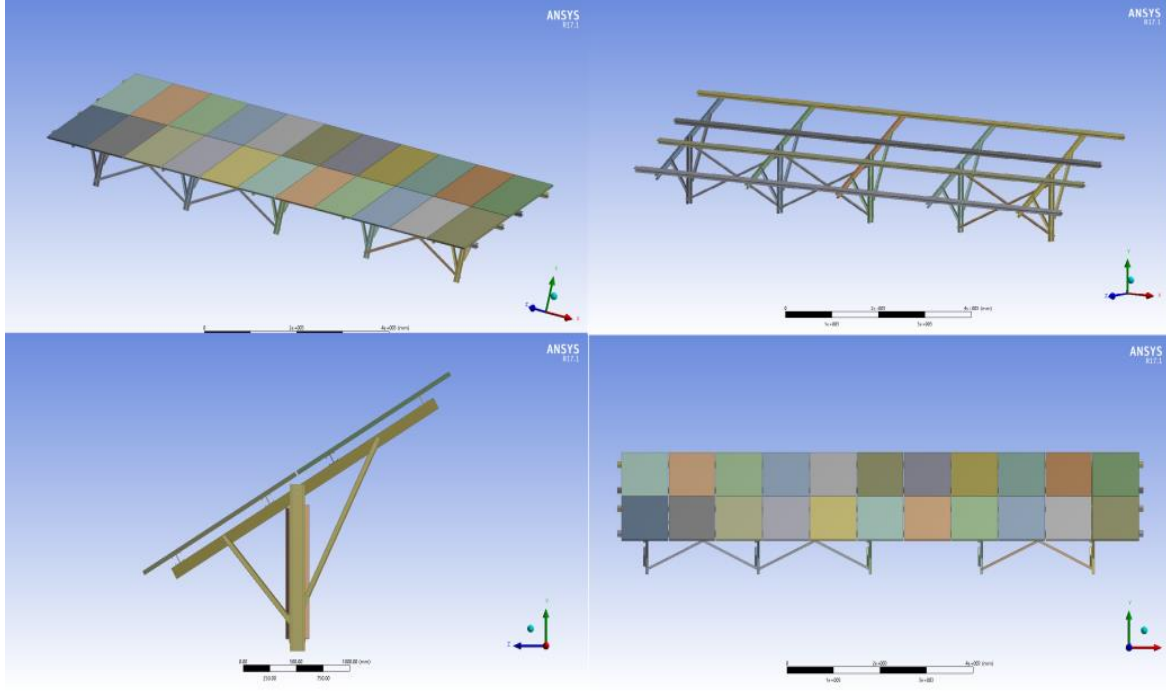
Doğrusal statik analizi adımlarına başlamadan önce, doğrusal olmayan bir analizin yapıldığı not edilmelidir. Taşıyıcı sistemindeki tüm elemanların elastik bölgesinde kalması nedeniyle doğrusal statik analizinin yeterli olduğu bulunmuştur. Doğrusal olmayan statik analizinin raporu eklerde bulunur.

Statik analiz kısaca analiz edilecek yapıların ya da sistemlerin üzerlerine gelen durağan yüklerin ve kısıtlamaların anlık olarak analiz edilmesidir. Statik analiz zamana bağlı değildir. Yapılan statik analiz sonucuyla;

- Sistemin ya da parçanın ne kadar yüklemeye karşı koyabileceği,
- Konstrüksiyonun ne kadar güvenli olduğu (Emniyet Katsayısı Belirleme),
- Yapının ne kadar sehim yaptığı,
- Yapı üzerindeki minimum, maksimum ve eşdeğer gerilme değerlerinin hangi mertebelerde olduğu bulunabilir [16].

Güneş panelleri yüzeylerindeki basınç dağılımı HAD simülasyonu sayesinde elde ettikten sonra tüm güneş sistemi için doğrusal statik analizi yapılmıştır. Statik analizi sayesinde toplam yer değiştirme, gerilme, gerinme ve reaksiyonlar elde edilebilir. Ayrıca, bu güneş sistemi için tasarlanan taşıyıcı modelin belirli rüzgâr yüküne dayanıp dayanmayacağını da belirleyebilir.

Bu çalışmada kullanılan güneş enerji sistemi örneği, Şanlıurfa ili Siverek ilçesinde uygulanan 999 kW kapasiteli enerji üretim santralinden alınmıştır. Sistem, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi bir taşıyıcı çelik yapıya monte edilen çift dizili 22 adet panellerden oluşmaktadır. Güneş panelleri 30 eğimli ve 4 tane çift U kesitli aşık profillerine monte edilmektedir. Aşıklar da 5 tane U kesitli kiriş profillerine ile her kiriş bir U kesitli kolon profiline ve iki L kesitli diyagonal profillerine monte edilmektedir. Kolonlar L kesitli çapraz profilleri ile birbirine bağlanmaktadır. Tüm profillerin detayları Çizelge 6.1'de gösterilmiştir. Her panelin boyutları 992 mm x 1650 mm'dir ve her iki panellerin arasındaki boşluk her iki yönde de 20 mm'dir. Kolonlar 1,5 metre derinliğinde bir beton temele sahiptir, ancak modellemede kolonları tespit etmek için zemin seviyesinde bir ankastre mesnet kullanılmıştır.



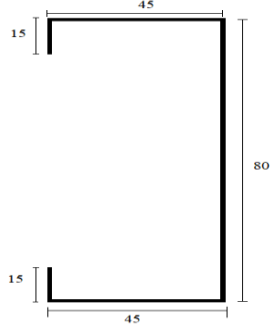
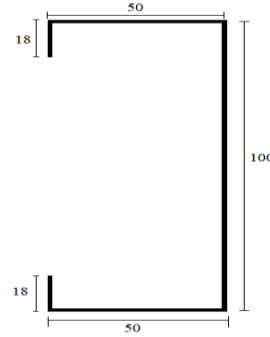
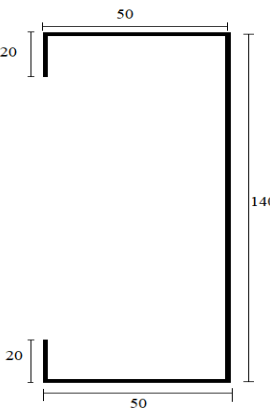
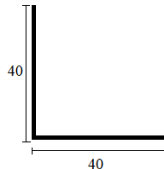
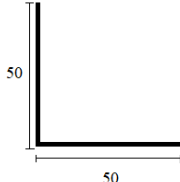
Şekil 6.1 Analizde kullanılan güneş panelleri ve taşıyıcı yapı

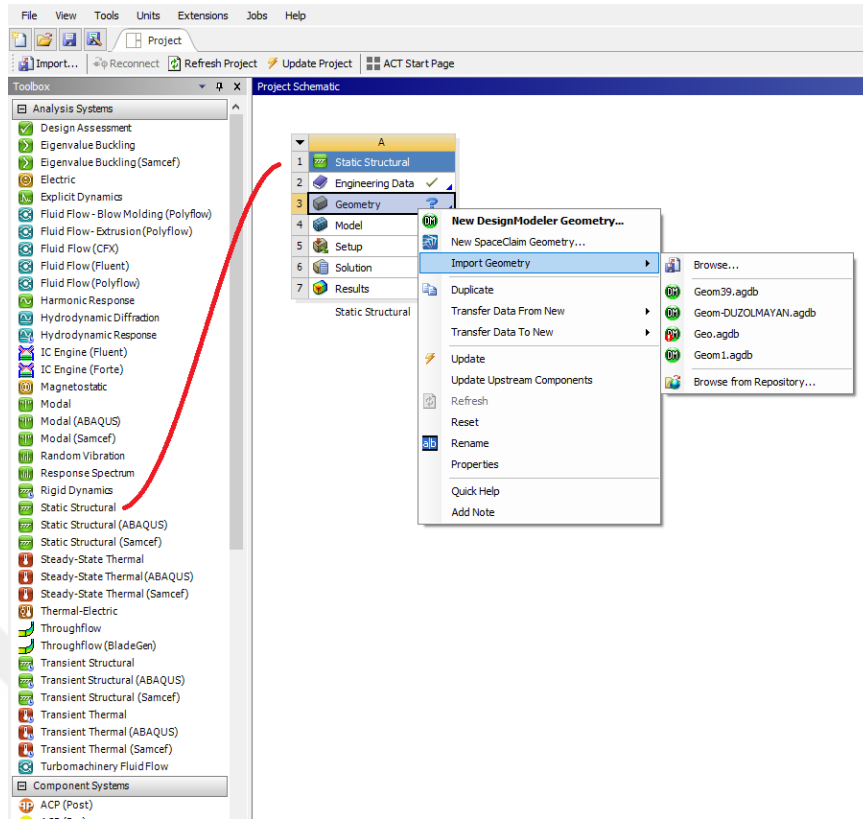
Panellerin her iki tarafında oluşan toplam basınç farkı ve daha önce test edilen yük durumlarına göre, maksimum yükleme durumunun çoğu güneş panellerinin tek durması halinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ardışıklık önemi ihmal edilerek tek duran güneş sistemi analiz edilmiştir.

Analiz ilk önce düz arazi uygulamalı güneş enerji sistemi için yapılmış ve bu kısımda analiz adımları tek tek anlatılmıştır. Daha sonra düz olmayan arazi (10, 20 ve 30 dereceyle eğik) uygulamalı güneş enerji sistemi için, tekrar analiz yapılmıştır. İşlem adımları aynı olduğu için adımlar bir kez anlatılmıştır.

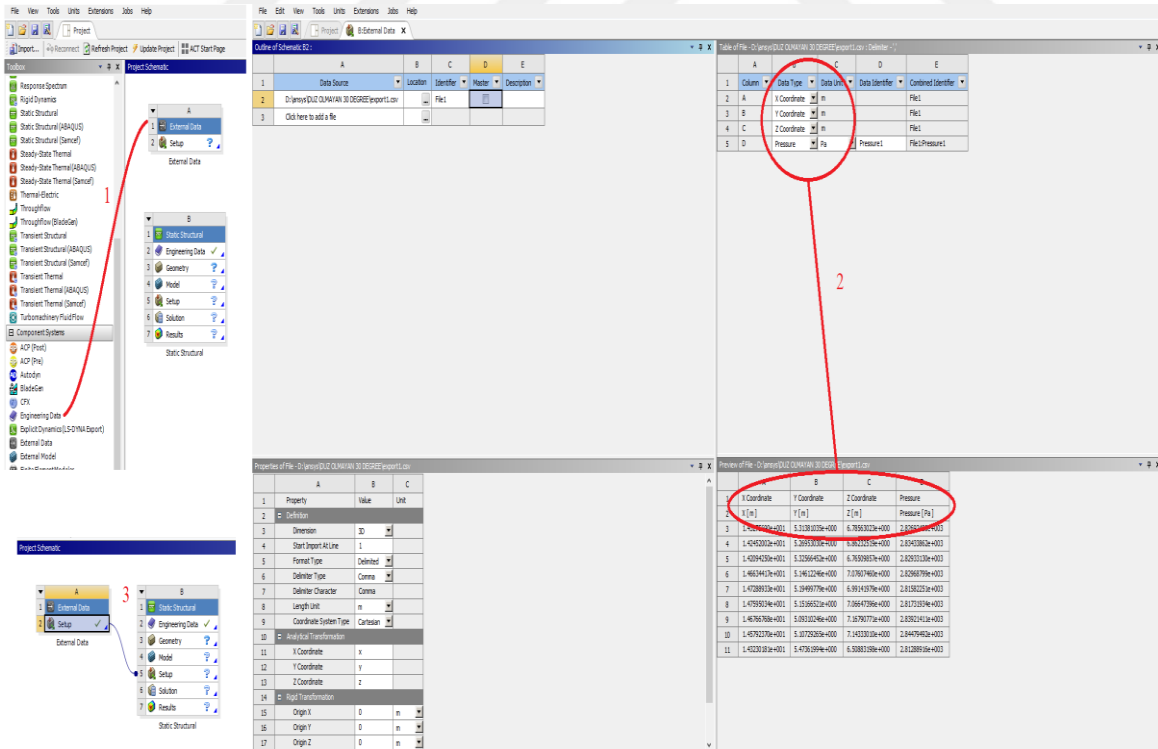
İşlem adımlarında, önce Ansys Workbench programı açılır ve Static Structural modülü seçilir. Geometry > Import Geometry > Browse adımları takip edilerek daha önce anlatıldığı gibi model yüklenir (Bkz. Şekil 6.2). Daha önce yapılan HAD analizi sonuçlarından Excel dosya olarak elde edilmiş basınç kuvvetini statik analizinde kullanabilmek için External Data modülü seçilir ve basınç Excel dosyası eklenir. Burada, eklenen dosya ile program arasındaki verilerin ve birimlerin uyumluluğuna dikkat edilmeli (Bkz. Şekil 6.3). Sonra External Data modülündeki Setup, Static Structural modülündeki Setup ile bağlanılır.

Çizelge 6.1 Profiller detayları

Profil	Kesit kalınlığı (mm) ve adedi	Boyutları (mm)	Şekli
Aşık	2.5- 2	45×80×15	
Kiriş	2.5- 1	50×100×18	
Kolon	4- 1	50×140×20	
Çapraz	4- 1	40×40	
Diyagonal	4- 1	50×50	



Şekil 6.2 Analiz modülünün seçilmesi



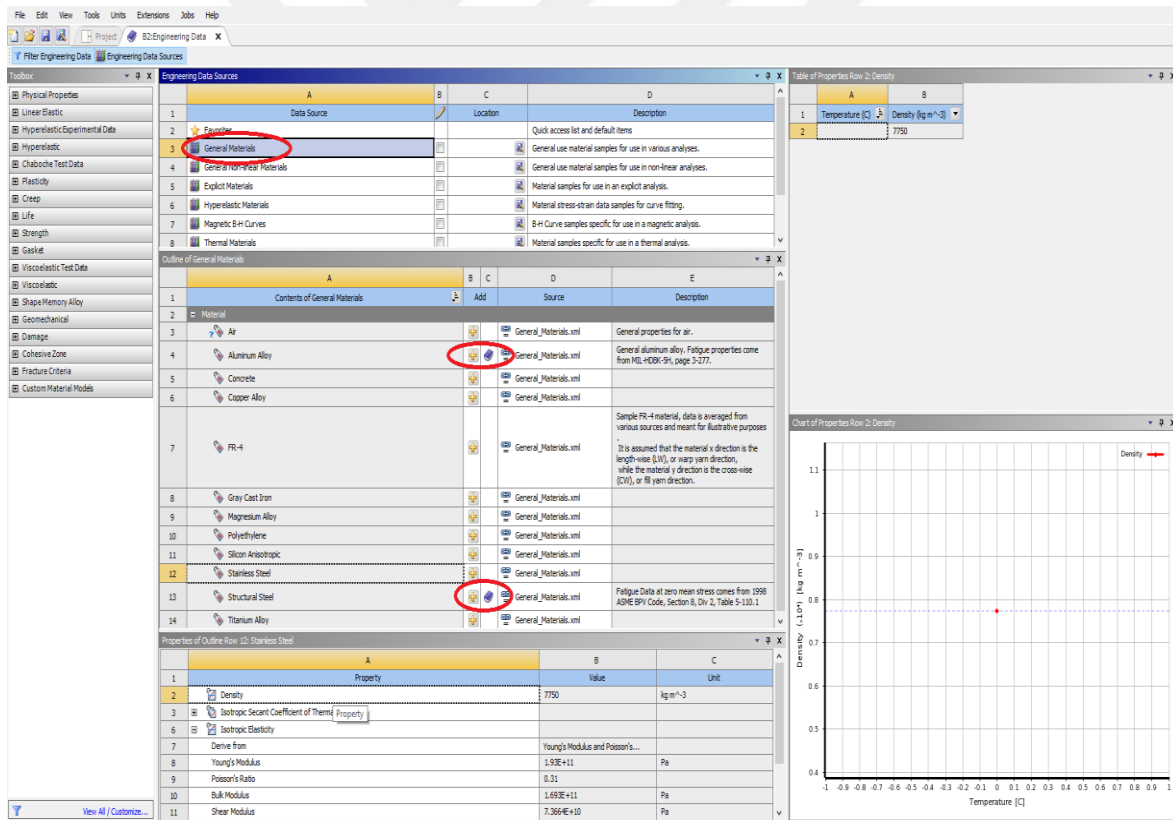
Şekil 6.3 Basınç dosyası eklenmesi ile birimlerin ve verilerin uyumluluğu

6.1 Malzemelerin Tanımı

Analizde kullanılan malzemeler, güneş panelleri için alüminyum ve taşıyıcı yapı için çeliktir. Güneş panelleri oluşturan tüm katmanların, aynı kalınlığa sahip bir alüminyum katmanına eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. Malzemeleri eklemek için Engineering Data bölümüne çift tıklayıp Engineering Data Sources > General Materials adımları takip edilerek Aluminum Alloy ve Structural Steel ikonları işaretlenir (Bkz. Şekil 6.4).

Analize eklendiği malzemelerin özelliklerini değiştirmek istenirse alt kısımdaki properties of outline row bölümünden değiştirebilir. Çizelge 6.2 kullanılan malzemelerin özelliklerini gösterilmiştir.

ANSYS, birçok farklı materyal özellik verisini destekler. Bu veri tipleri, belirli bir analiz için tüm ilgili verileri sağlamak amacıyla, tek bir malzeme adı altında fonksiyonel gruplarda toplanmıştır [17].



Şekil 6.4 Malzemelerin eklenmesi

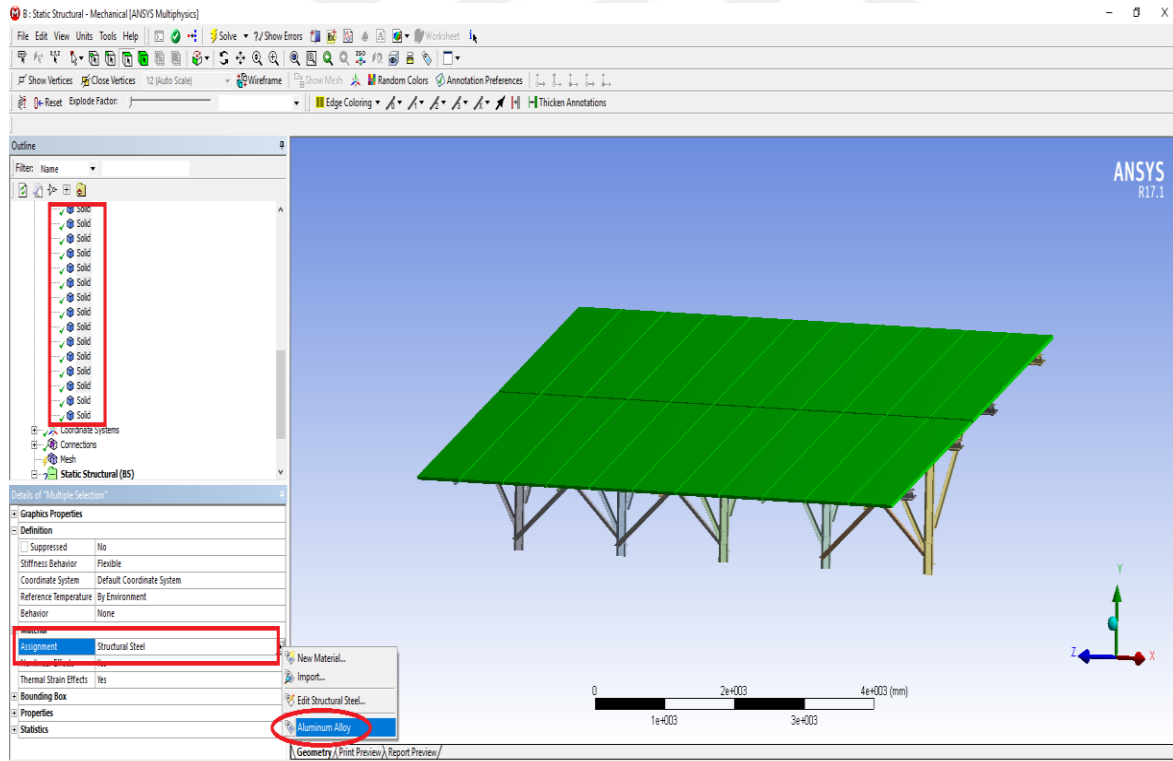
Çizelge 6.2 Malzemelerin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (Kg/m ³)	Kesme modülü (Pa)	Young Modülü (Pa)	Poisson Oranı	Akma dayanımı (Pa)	Kopma dayanımı (Pa)
Çelik	7850	7.6923E+10	2E+11	0.3	2.5E+08	4.6E+08
Alüminyum	2770	2.6692E+10	7.1E+10	0.33	2.8E+08	3.1E+08

Program tüm elemanları çelik olarak tanıır çünkü bu materyal program tarafından otomatik eklenir. Bunun için çelik elemanlarını tanımlanmaya gerek yoktur. Alüminyum elemanları tanımlanmak için Model > Geometry adımları takip edilir. Sonra Geometry listesindeki bulunan güneş panelleri seçilir ve sol alt kısımda çıkan ekranda;

Assignment: Aluminum Alloy

Seçerek alüminyum malzemesi tanımlanmıştır (Bkz. Şekil 6.5).



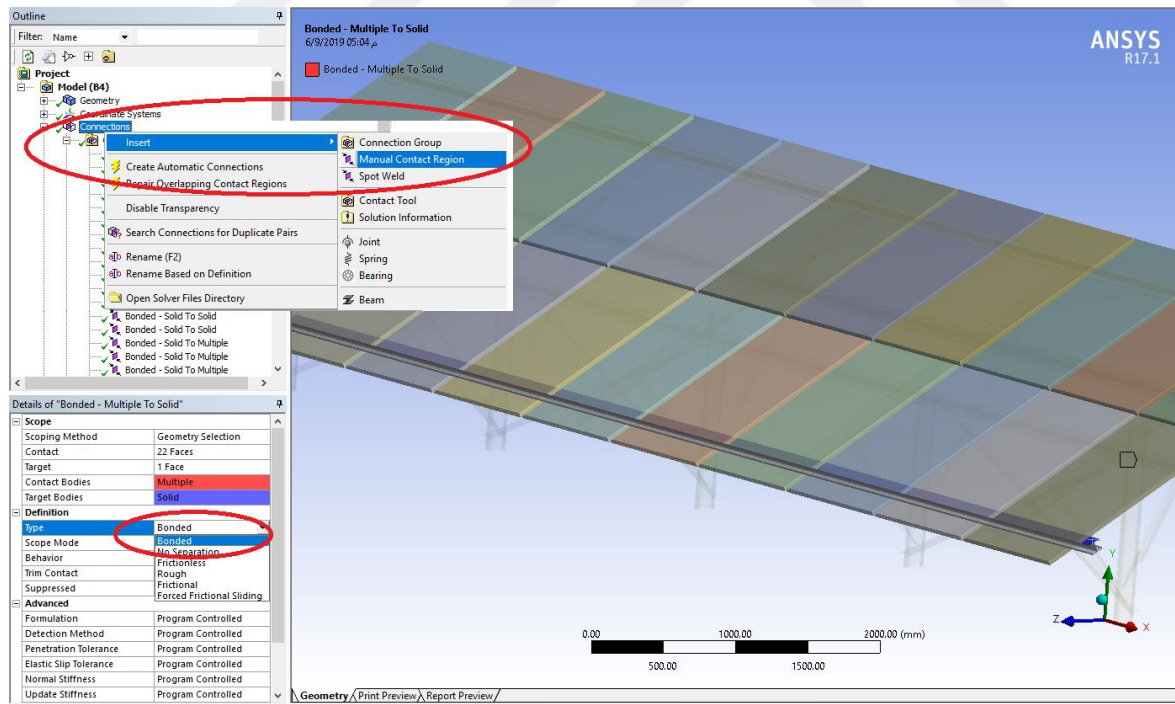
Şekil 6.5 Alüminyum elemanları tanımlanması

6.2 Bağlantılar

Statik analizde göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan biri geometrik elemanların birbirine bağlanmasıdır. Güneş panelleri, aşıklarına klamlar tarafından tespit edilmiştir. Profiller cıvatalarla birbirine bağlanmıştır. ANSYS programı sayesinde, klamlar ve cıvatalar yerine bağlantı işlemini kullanabilir. Modeldeki farklı parçaları bağlamak için tüm eşleşen yüzeyler arasında yapışık bağlantılar kullanılmıştır.

Yapışık bağlantı, bağlanan yüzeyler veya kenarlar arasında ayrıksız ve sonsuz sürtünmeli bir kontaklıdır. Bu temas türü doğrusal bir çözüme izin verir, çünkü temas uzunluğu / alanı yükün uygulanması sırasında değişmez [18]. Ansys programında, her bir temas bölgesi için temas ve hedef yüzeyleri kavramı kullanılmaktadır [19]:

- Bir temas bölgesinin bir tarafı bir temas yüzeyi olarak adlandırılır, diğer tarafı bir hedef yüzeyi olarak adlandırılır.
- Temas yüzeyleri hedef yüzeye nüfuz etmeleri sınırlandırılmıştır.
- Eğer her iki taraf temas ve hedef olmak için yapılmışsa buna simetrik temas denir. Varsayılan olarak, katı montajlar için simetrik temas kullanılır.



Şekil 6.6 Yapışkan yüzeyler bağlaması

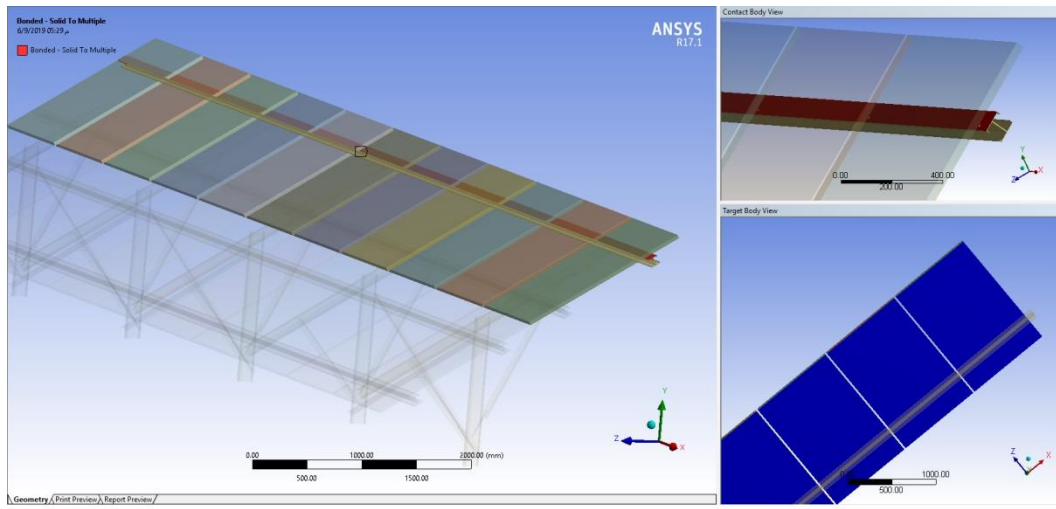
Yapışkan yüzeyler bağlamak için Model bölümüne çift tıklayıp Connections listesini sağ tıklayarak Insert > Manual Contact Region adımları takip edilir. Sol alt kısımda çıkan ekranda;

Contact: temas yüzeyi

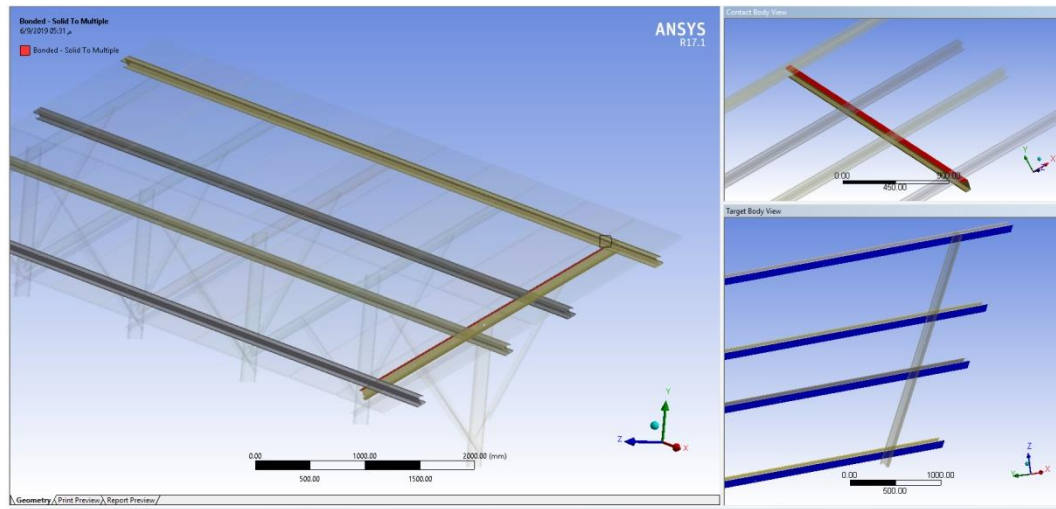
Target: hedef yüzeyi

Type: Bonded

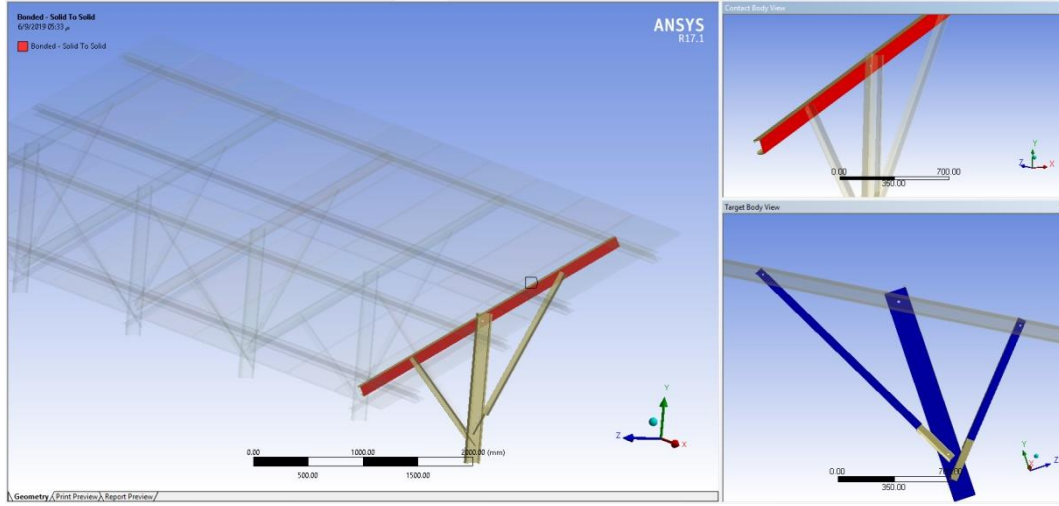
Seçerek temas bölgesinin her iki tarafı bağlanılmıştır (Bkz. Şekil 6.6). Böylece her yapışkan yüzeyler için aynı adımları tekrarlayarak bütün yapışkan yüzeyler bağlanmıştır. Elemanlar arasındaki bazı bağlantı biçimleri Şekiller 6.7, 6.8, 6.9 ve 6.10'da gösterilmiştir.



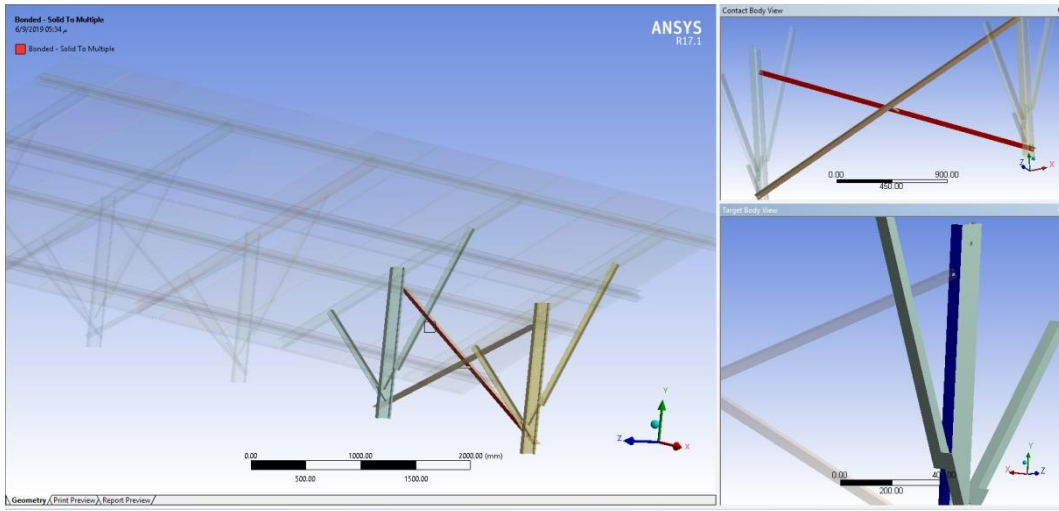
Şekil 6.7 Güneş panellerin aşıklar ile bağlanması



Şekil 6.8 Aşıkların girişler ile bağlanması



Şekil 6.9 Girişlerin kolonlar ile bağlanması



Şekil 6.10 Kolonların çarpaz profiller ile bağlanması

6.3 Sonlu Elemanlar Bölme İşlemi

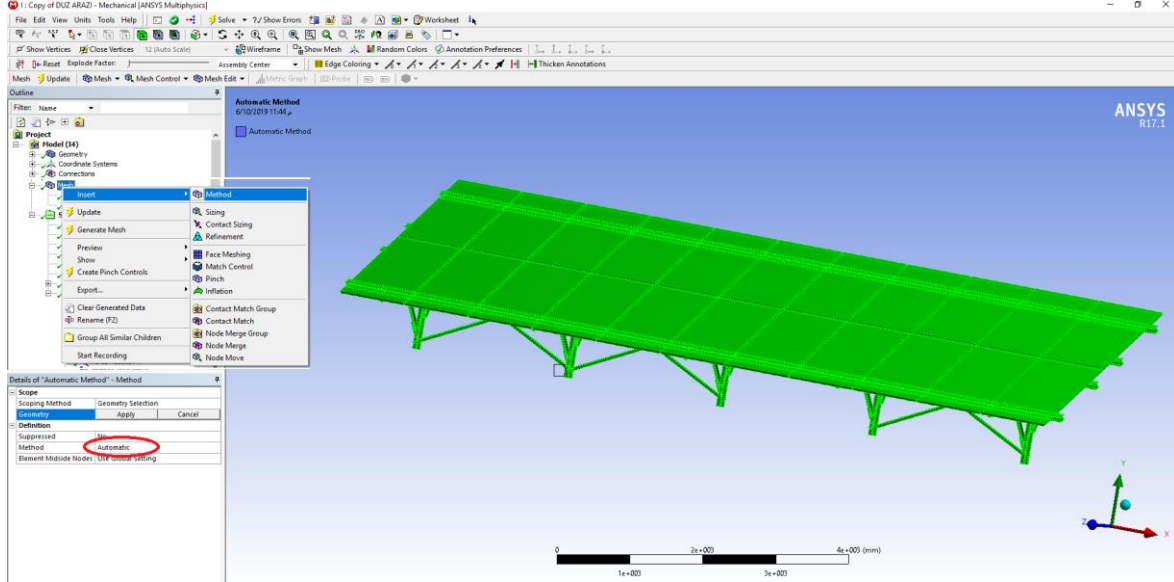
Mesh üretme fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır [20]. Mesh üretmek için Model bölümüne çift tıklayıp Mesh listesini sağ tıklayarak Insert > Method adımları takip edilir. Sol alt kısımda çıkan ekranda;

Geometry: Tüm modelin elemanları

Method: Automatic

seçerek Tetrahedron ve Sweep yöntemi kombinasyonu kullanılmıştır (Bkz. Şekil 6.11).

Otomatik Yöntem, taranabilir hacimleri otomatik olarak tanımlar ve tarama ağı oluşturur. Taranamayan tüm hacimler, Tetrahedron Patch Conformal yöntemi kullanılarak meshlenir [21].



Şekil 6.11 Meh yöntemi seçilmesi

Sonlu elemanlara bölmedeki kullanılan yöntemi seçtikten sonra modelin tüm elemanlarını seçerek Mesh listesini sağ tıklayıp Insert > Sizing adımları takip edilir. Sol alt kısımda çıkan ekranda (Bkz. Şekil 6.12);

Geometry: Tüm modelin elemanları

Type: Element Size

Element Size: 30 mm

Behavior: Soft

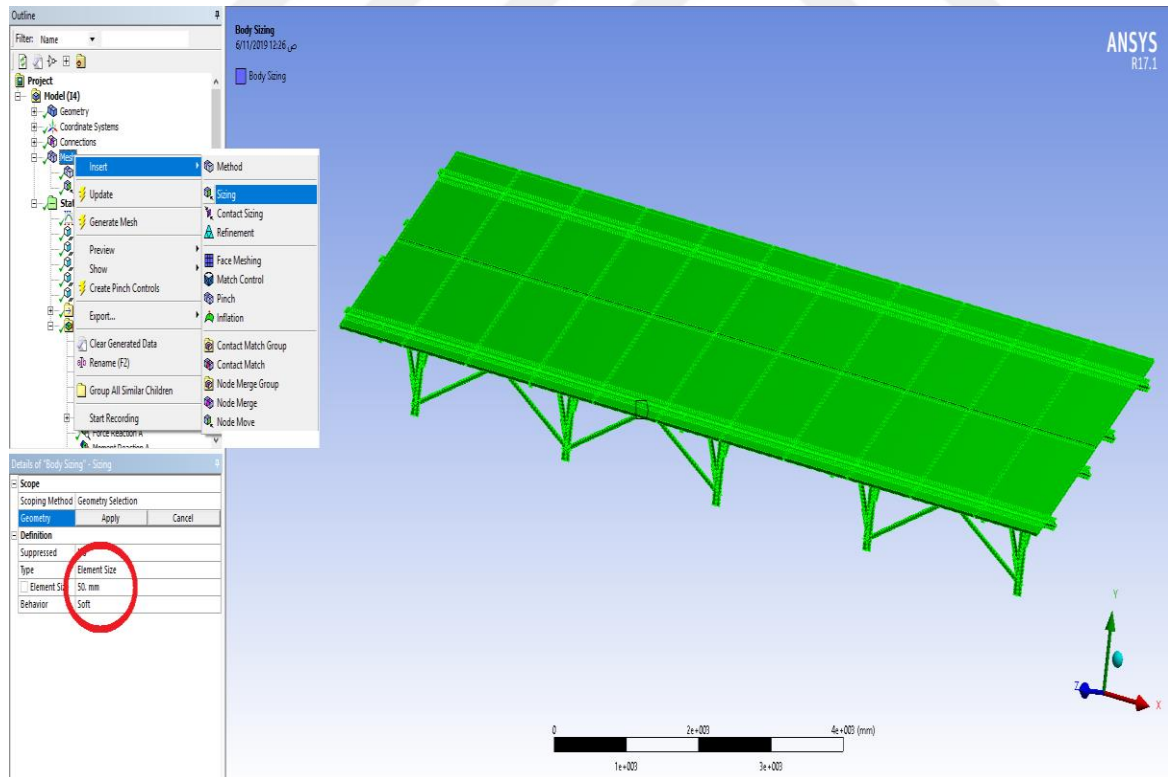
seçilir ve "Update" tuşuna basılır. Böylece model 30 mm boyutunda sonlu elemanlara ayrılmıştır (Bkz. Şekil 6.13).

Fakat burada önemli olan, güneş panellerine uygulanacak basınç yükünün harici bir dosyadan alınmasıdır. Bu dosya HAD simülasyonu sonuçlarından çıkarılmıştır. Dosyadaki rüzgâr yükünden gelen basınç, güneş panelleri koordinatlarına göre panellerin yüzeylerine dağıtılmıştır. Bu nedenle, basınç yükünün uygulandığı güneş panellerinin sonlu elemanlar yapısının daha sık olması çok önemlidir. Aksi takdirde, dosyadaki basınç ile yükleme sırasında uygulanan basınç aynı olmayabilir. HAD simülasyonundan çıkarılan maksimum ve minimum basınca ulaşmak mümkün olmayabilir. Böyle bir hataya düşmekten kaçmak için Ansys programında sonlu elemanlara bölünme işlemi, birkaç defa yapılmıştır. Yük

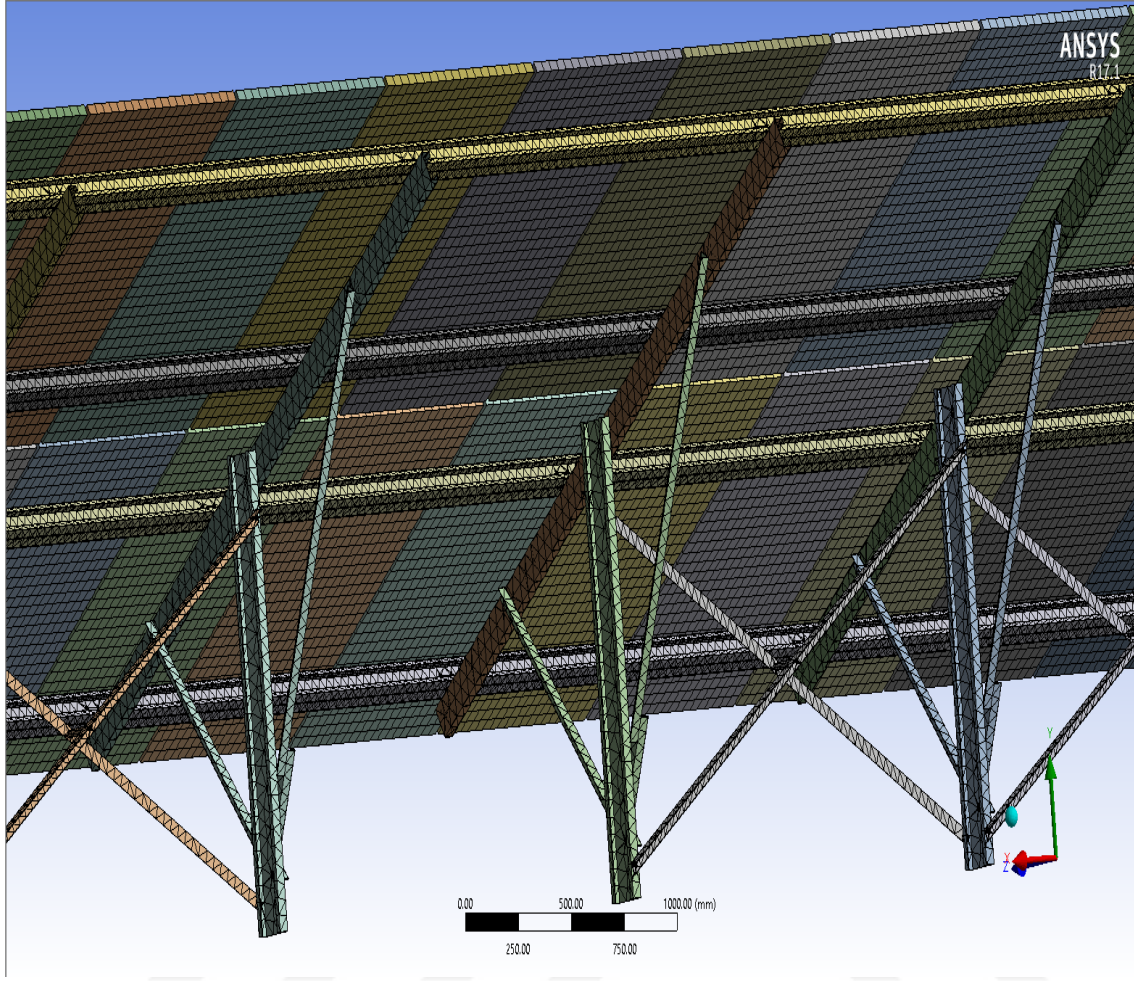
değişiminin oranlarının son halı ve analizde kullanılan sonlu elemanların büyüklüğü Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Basınç yükü uyguladığında değişik oranı

	HAD basıncı	Uygulanan basınç	Değişik oranı (%)	Sonlu Elemanların büyüklüğü (mm)	Arazi eğim açısı (°)
Minimum	839.79	838.41	0.17	30	0
Maksimum	564.66	561.89	0.49		
Minimum	247.21	210.77	8.31	20.5	10
Maksimum	818.68	813.39	0.65		
Minimum	559.97	576.71	2.99	30	20
Maksimum	1455.35	1450.92	0.30		
Minimum	2449.15	2456.36	0.29	30	30
Maksimum	2939.64	2934.77	0.17		



Şekil 6.12 Sonlu elemanların boyutlandırılması



Şekil 6.13 Modelin meshlenmiş hali

6.4 Sınır Şartları

Kolonlar 1,5 metre derinliğinde bir beton temele sahiptir. Modeli tespit etmek için yatay düzlemindeki kolonların alt yüzeyleri ankastre mesnet olarak kullanılmıştır. Simülasyon alanının sınırındaki sınır şartları FEM'in (Sonlu Elemanlar Metodunun) uygulanmasında önemlidir [22].

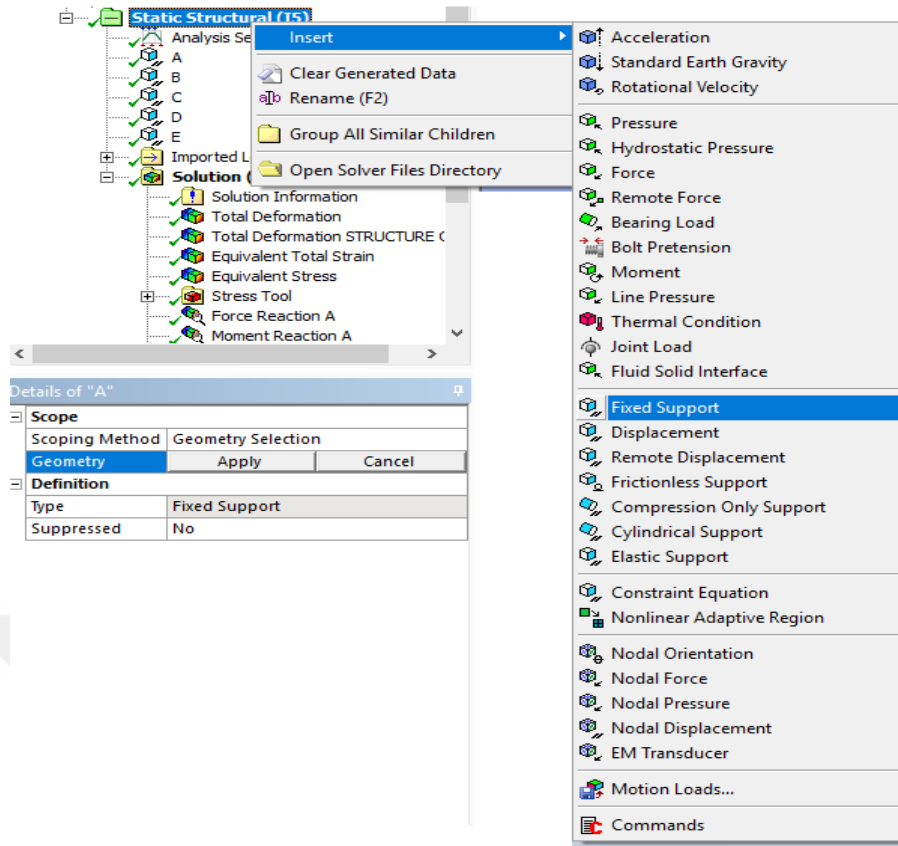
Sınır şartları tanımlamak için Static Structural listesini sağ tıklayarak Insert > Fixed Support adımları takip edilir (Bkz. Şekil 6.14). Sol alt kısımda çıkan ekranda;

Scoping Method: Geometry Selection

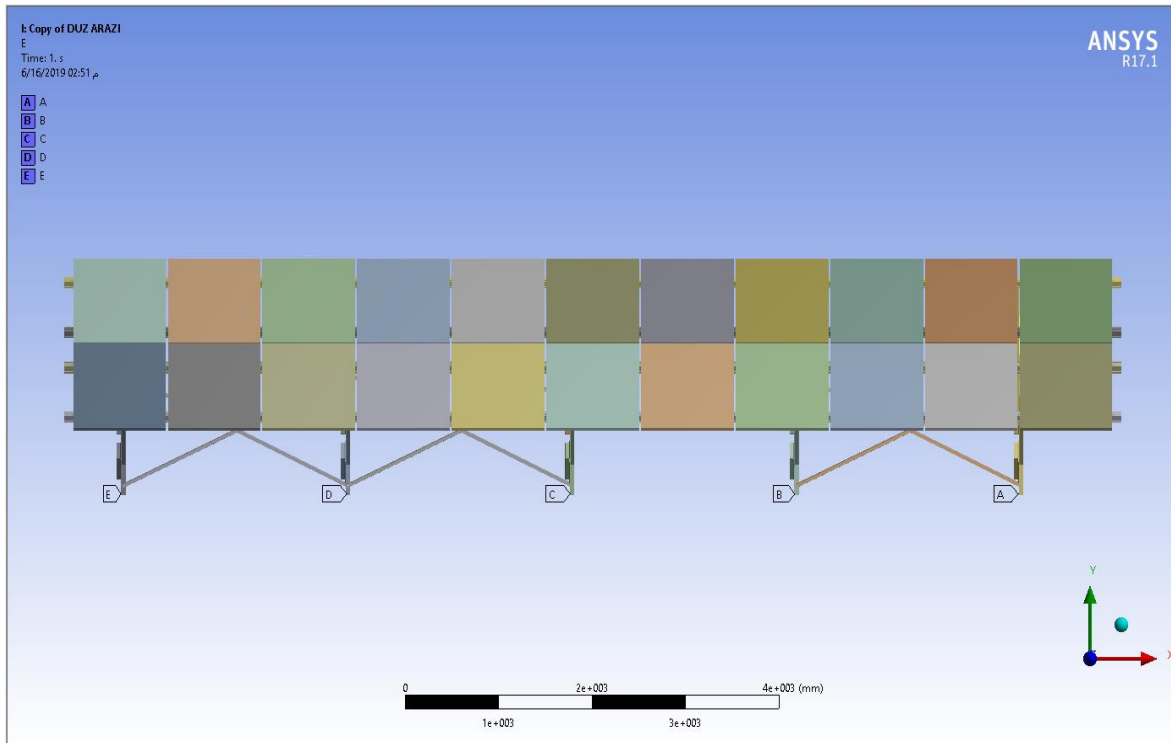
Geometry: Kolonun alt yüzeyi

Suppressed: No

seçilir ve "Apply" tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.15).



Şekil 6.14 Sınır şartlarının tanımlama işlemi



Şekil 6.15 Modeldeki mesnetlerin hali

6.5 Yük Şartları

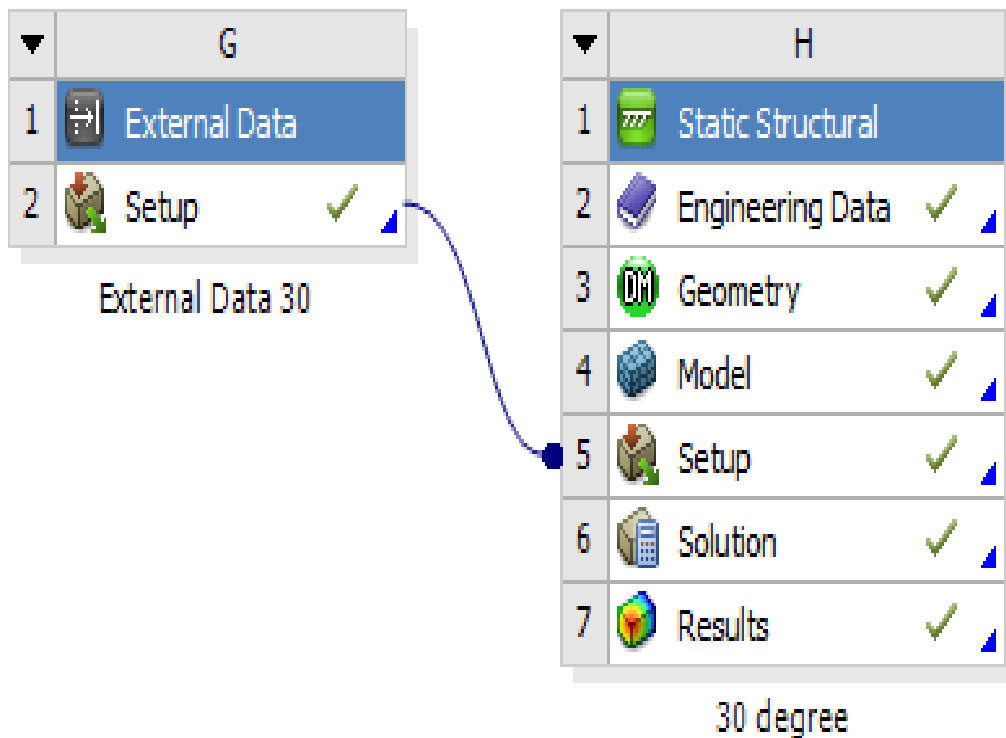
Önceden eklenmiş basınç dosyasını okumak için External Data modüllüdeki Setup'u tıklayıp sürükleyip Static Structural modülündeki Setup'a bırakılır (Bkz. Şekil 6.16). Bu durumda, uygulanacak basınç yükü tanımlanmış olur (Bkz. Şekil 6.17), ancak yükün uygulanacağı yüzeyler seçilmelidir. Burada basınç dosyası noktasal koordinatlara dayanarak çıkarıldığından, eklenen dosyadaki ve basıncının uygulanacağı yüzeylerdeki noktaların koordinatları eşleşik olmalıdır.

Basıncının uygulanacağı yüzeyler tanımlamak için Static Structural listesindeki Imported Load'ı sağ tıklayarak Insert > Pressure adımları takip edilir (Bkz. Şekil 6.18). Sol alt kısımda çıkan ekranda;

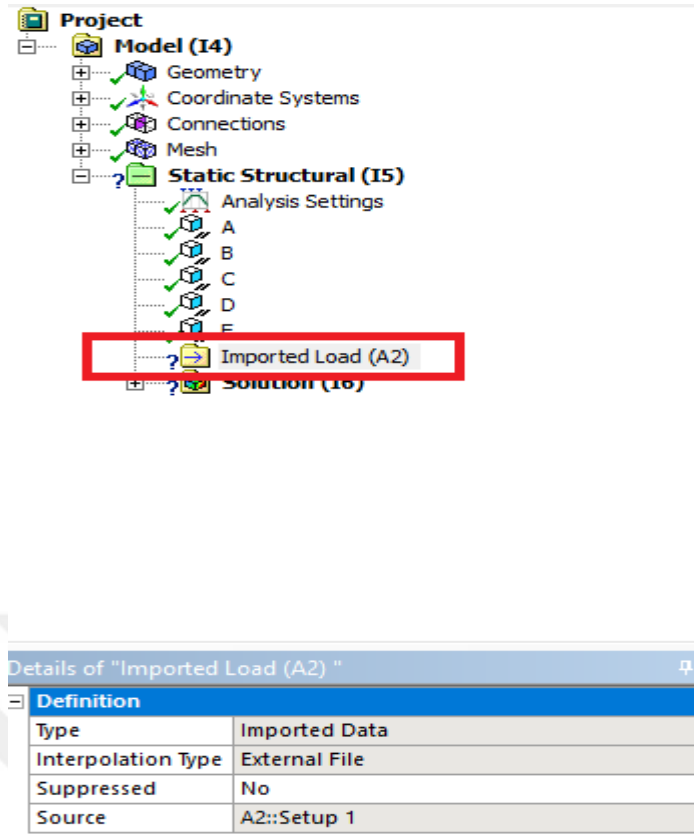
Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: Panellerin Tüm Yüzeyleri

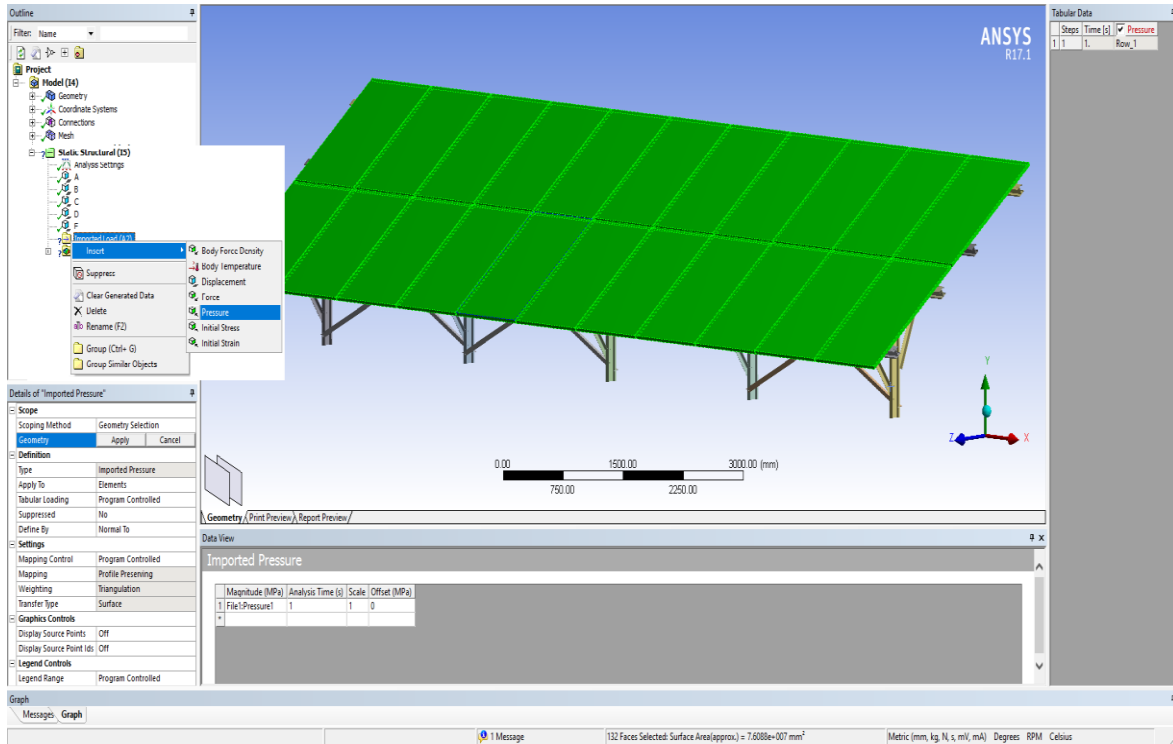
seçilir ve "Apply" tuşuna basılır. Sonra Imported Load listesindeki Imported Pressure'ı sağ tıklayarak Imported Load tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.19). Şekiller 6.20 ve 6.21 yükleme işlemi tamamlamaktan sonra panellerin yüzeylerindeki basınç dağılımı gösterilmiştir.



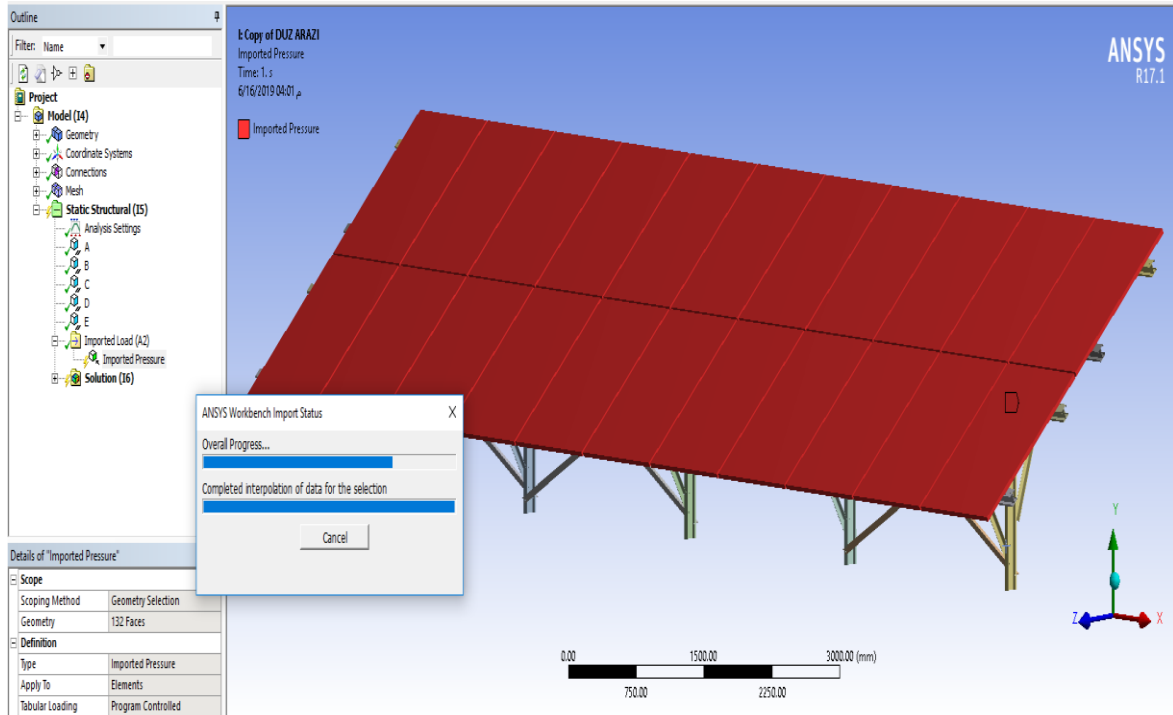
Şekil 6.16 Basınç yükünün harici dosyadan içeri aktarılması



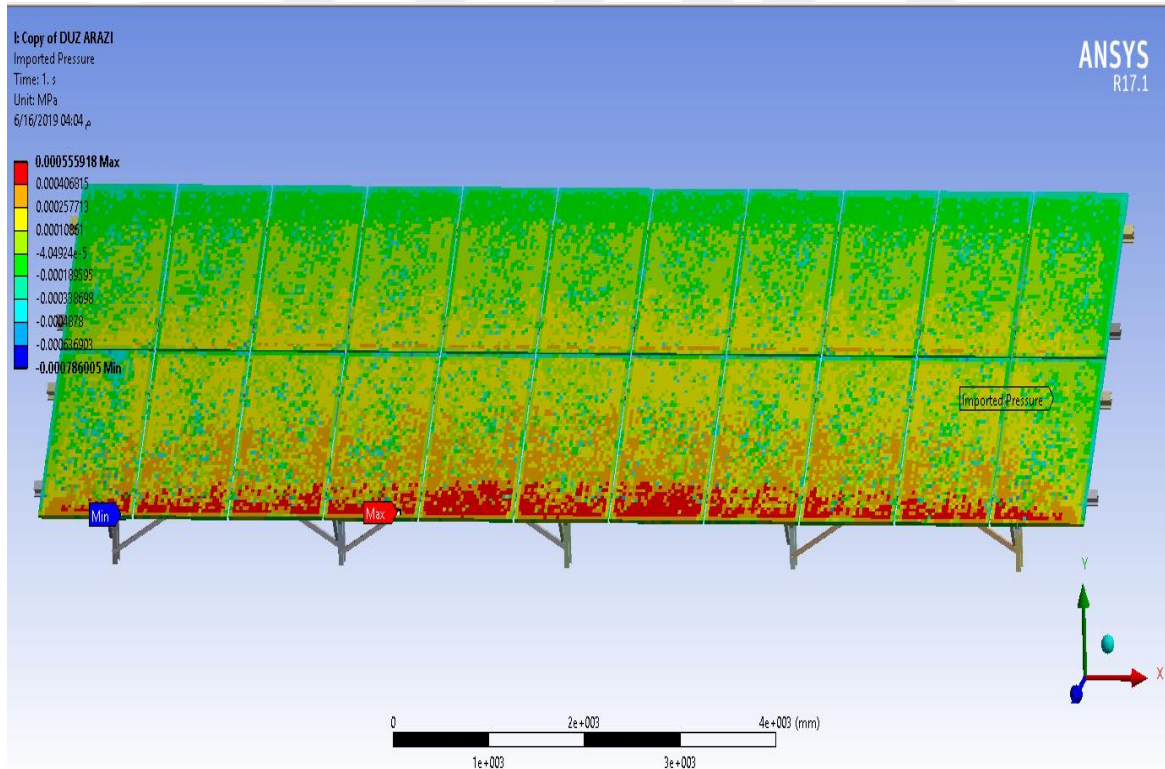
Şekil 6.17 Tanımlanmış basınç yükünün hali



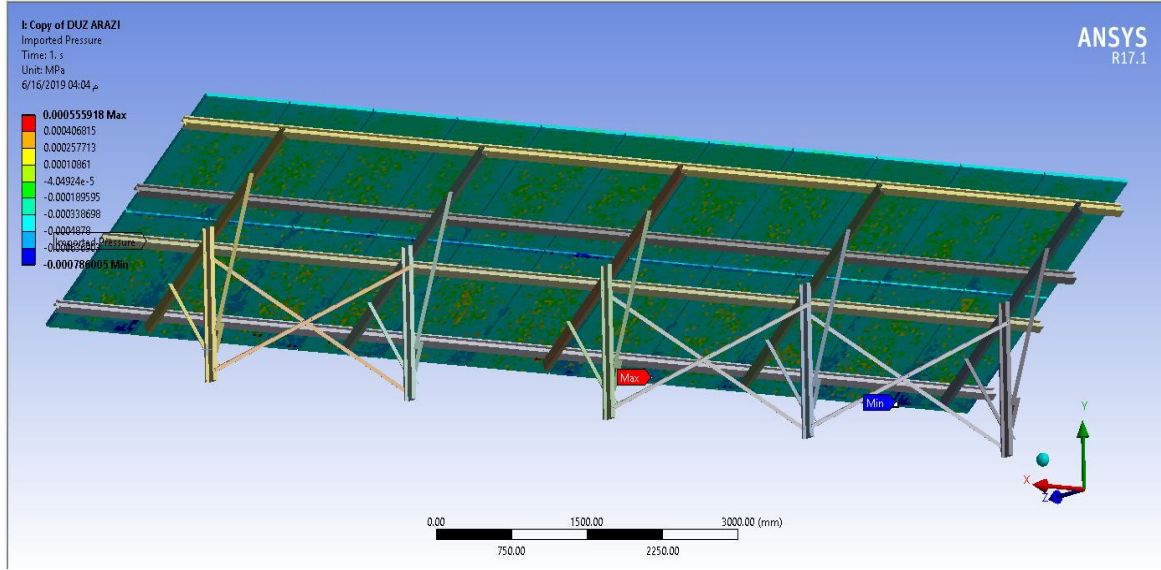
Şekil 6.18 Basıncının uygulandığı yüzeyler tanımlaması



Şekil 6.19 Yük şartlarının tanımlama işlemi



Şekil 6.20 Panellerin ön yüzeylerindeki basınç dağılımı



Şekil 6.21 Panellerin arka yüzeylerindeki basınç dağılımı

6.6 Analiz Çıktılarının Belirlenmesi

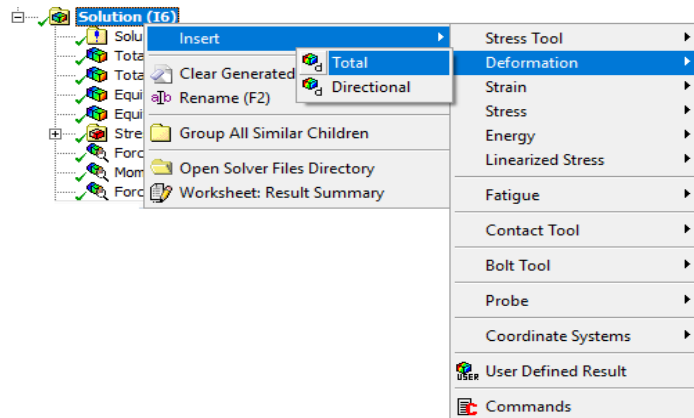
ANSYS programındaki çözüm çıktıları sayesinde, sonuçların her bir eleman için ayrı ayrı elde edilmesi mümkündür. Elde edilebilecek en önemli sonuçlardan biri toplam yer değiştirmedir. Ayrıca modelin yer değiştirme öncesi ve sonrası karşılaştırılabilir.

Çözüm çıktılarına toplam yer değiştirme sonucunu eklemek için, Static Structural listesindeki Solution'ı sağ tıklayarak Insert > Deformation > Total adımları takip edilir (Bkz. Şekil 6.22). Sol alt kısımda çıkan ekranda;

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: İstenen Eleman

seçilir ve "Apply" tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.23).



Şekil 6.22 Toplam yer değiştirme sonucunun ekleme işlemi

Details of "Total Deformation 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply Cancel
Definition	
Type	Total Deformation
By	Time
☐ Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Results	
☐ Minimum	
☐ Maximum	
Minimum Occurs On	
Maximum Occurs On	
Information	

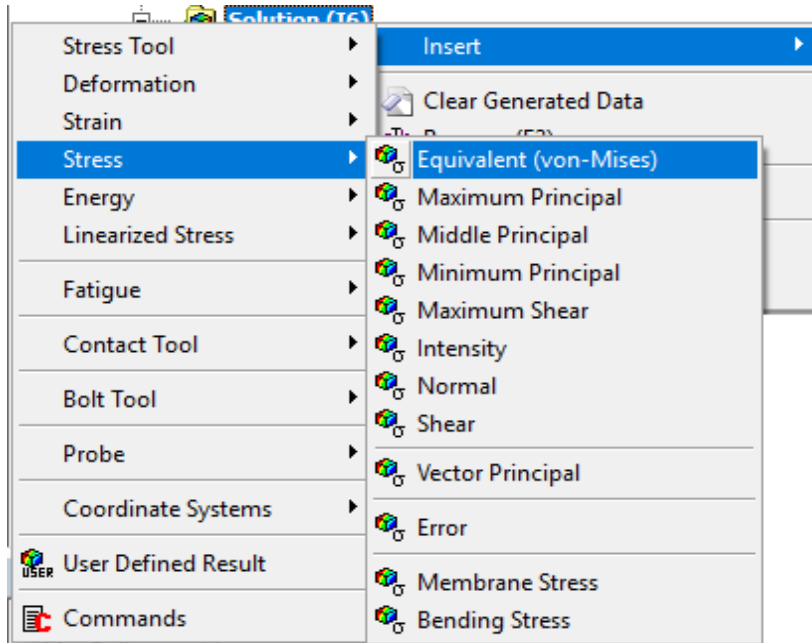
Şekil 6.23 Toplam yer değiştirme sonucunu görmek için elemanın belirlenmesi

Ayrıca, modelin tüm elemanlarının hala elastik bölgede olmasını sağlamak için gerilme sonuçları eklenebilir. Çözüm çıktılarına gerilme sonucunu eklemek için, Static Structural listesindeki Solution'ı sağ tıklayarak Insert > Stress > Equivalent (von-Mises) adımları takip edilir (Bkz. Şekil 6.24). Sol alt kısımda çıkan ekranda;

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: İstenen Eleman

seçilir ve "Apply" tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.25).

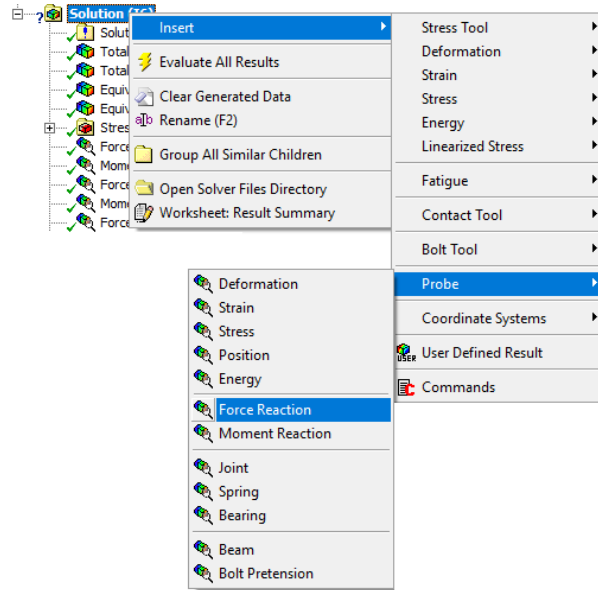


Şekil 6.24 Gerilme sonucunun ekleme işlemi

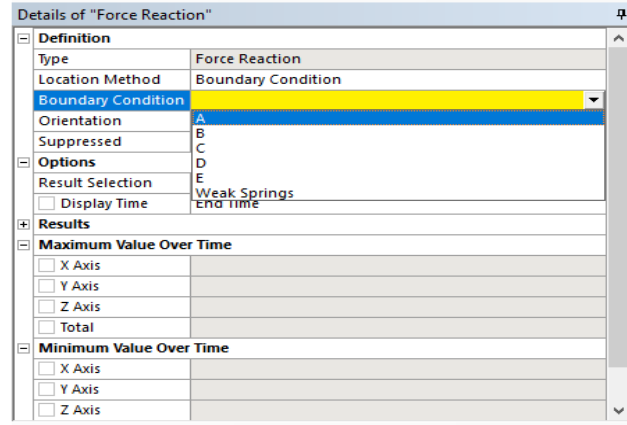
Details of "Equivalent Stress 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply Cancel
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
☐ Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
☐ Minimum	
☐ Maximum	
Minimum Occurs On	
Maximum Occurs On	
Information	

Şekil 6.25 Eşdeğer gerilme sonucunu görmek için elemanın belirlenmesi

Mesnetlerdeki reaksiyon sonuçları da moment ya da kuvvet olarak elde edilebilir. Reaksiyon sonuçlarını eklemek için, Static Structural listesindeki Solution'ı sağ tıklayarak Insert > Probe > Force Reaction / Moment Reaction adımları takip edilir (Bkz. Şekil 6.26). Sol alt kısımda çıkan ekranda;
 Type: Force Reaction / Moment Reaction
 Location Method: Boundary Condition
 Orientation: İstenen Mesnet
 seçilir ve "Apply" tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.27).



Şekil 6.26 Reaksiyon sonuçlarının ekleme işlemi



Şekil 6.27 Reaksiyon sonucunu görmek için mesnet belirlemesi

Elde edilebilecek önemli sonuçlardan biri de güvenlik faktörüdür. Güvenlik faktörünün sonucu eklemek için, Static Structural listesindeki Solution'ı sağ tıklayarak Insert > Stress Tool > Max Equivalent Stress adımları takip edilir ve yeni liste eklenir (Bkz. Şekil 6.28). Yeni eklenen listeyi tıklayarak sol alt kısımda çıkan ekranda;

Theory: Max Equivalent Stress

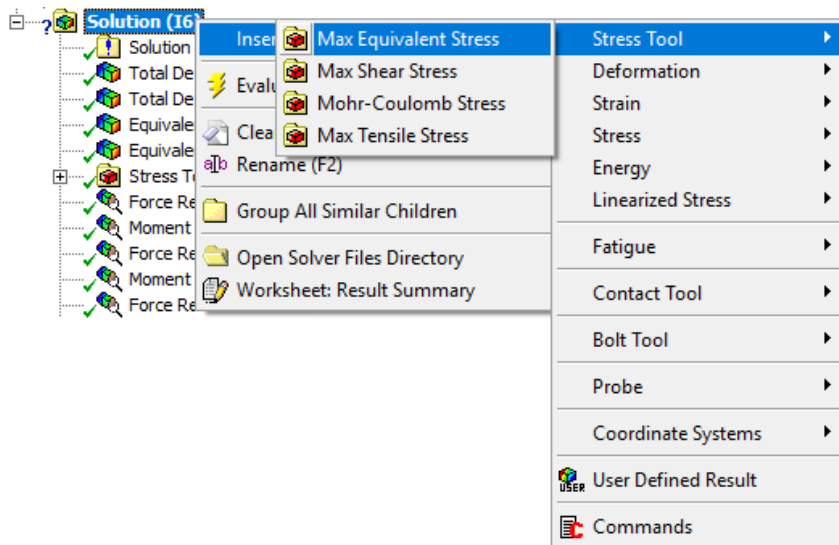
Stress limit Type: Tensile Yeild Per Material

seçilir (Bkz. Şekil 6.29). Sonra Yeni eklenen listedeki Safety Factor'u tıklayarak sol alt kısımda çıkan ekranda;

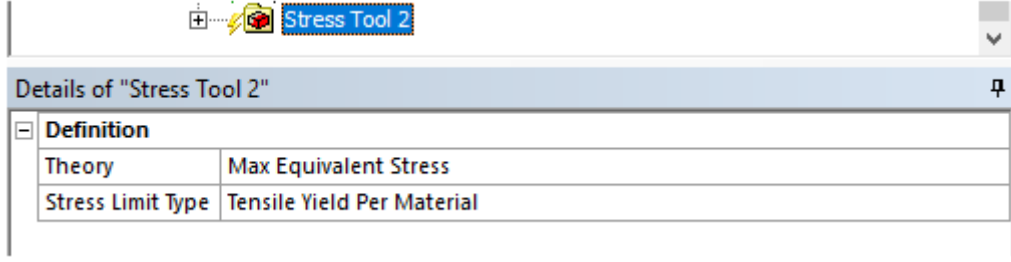
Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: İstenen Eleman

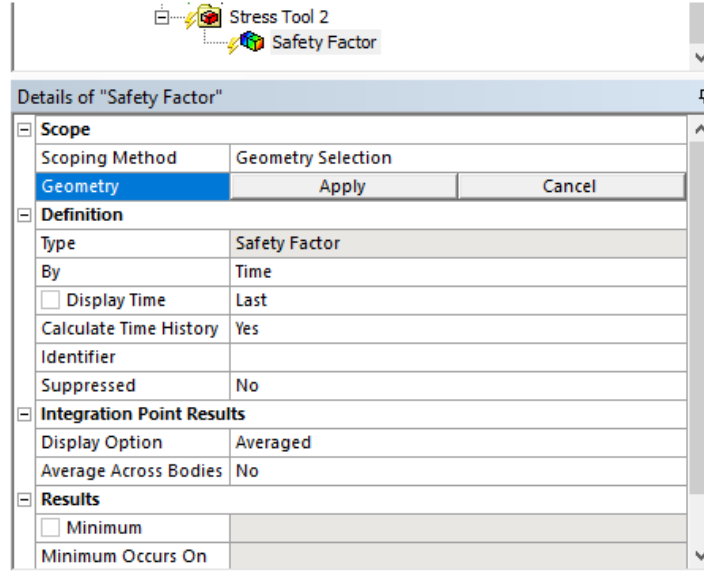
seçilir ve "Apply" tuşuna basılır (Bkz. Şekil 6.30).



Şekil 6.28 güvenlik faktörünün ekleme işlemi

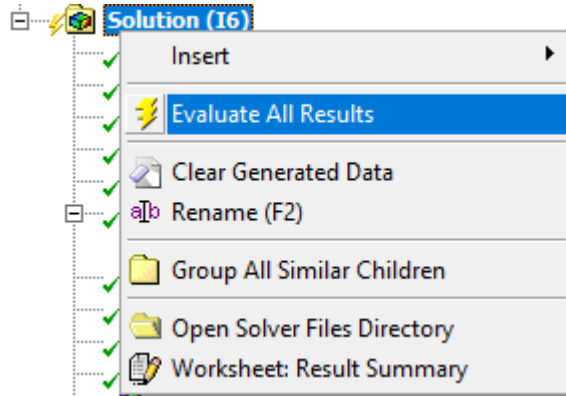


Şekil 6.29 Güvenlik faktörünü bulmak için kullanılan çözüm yönteminin seçilmesi



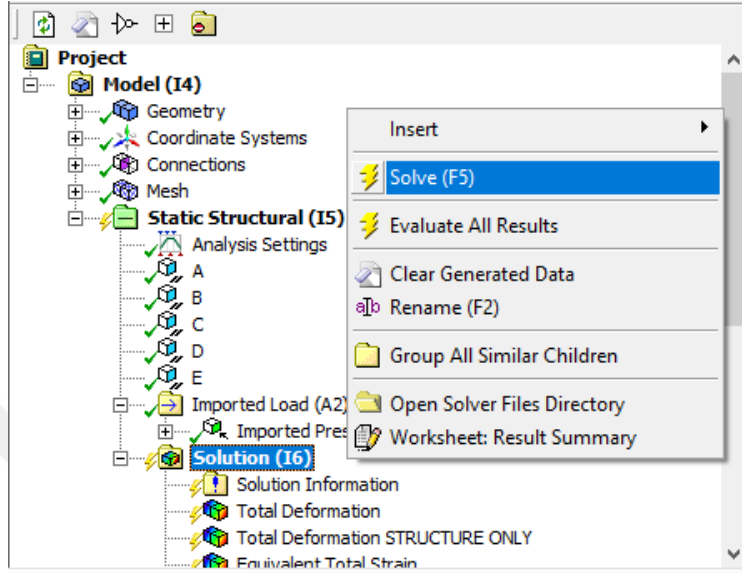
Şekil 6.30 Güvenlik faktörünü görmek için elemanın belirlenmesi

Böylece kontrol edilecek çözümün tüm çıktıları eklenmiştir. Ancak, çözüm yaptıktan sonra bile herhangi bir sonuç eklenmesi ya da değiştirilmesi mümkündür. Eklenen ya da değiştirilen sonuçları, sağ tıklayarak "Evaluate All Results" in komutu ile çözümü tekrarlamaya gerek kalmadan değerlendirilebilir (Bkz. Şekil 6.31).



Şekil 6.31 Eklenen ya da değiştirilen sonuçlarının değerlendirilmesi

Nihayet programa çözmek için bir komut verilir. Proje köşesinde herhangi bir noktada sağ tıklayarak Solve (F5)'i basılır (Bkz. Şekil 6.32). Program çözmeyi bitirene kadar beklenir. Çözüm hızının girilmiş verilerinin yoğunluğuna bağlı olduğu vurgulanmalıdır. Çözüm ağı ne kadar küçük olursa, çözme o kadar karmaşık olur ve o kadar uzun sürer.



Şekil 6.32 Analizin başlatılması

7 SONUÇLAR VE KARŞILAŞTIRMA

Bu çalışmada, Şanlıurfa Siverek ilinde bulunan elektrik üretim projesinin bir örneği alınmıştır. Arazi eğilimlerin güneş sistemi üzerindeki etkisini incelemek için, aşağıdakilere göre dört model hazırlanmıştır.

1. Düz arazi uygulamalı model
2. 10° eğimli arazi uygulamalı model
3. 20° eğimli arazi uygulamalı model
4. 30° eğimli arazi uygulamalı model

Modeller iki aşamada analiz edilmiştir.

- Birinci Aşama:

Bu aşamada 28 km/s rüzgâr hızının etkisi altında güneş panellerinin HAD simülasyonu yapılmıştır. Ardışıklığın paneller üzerindeki etkisini göz önünde bulundurmak için, beşe kadar arka arkaya panellerin sıraları yerleştirilmiş. Bu durumda, bu aşamadaki model sayısı 20 olmuştur. Her model aşağıdaki gibi beş modele ayrılmıştır.

1. Tek sıra.
2. Arka arkaya iki sıra.
3. Arka arkaya üç sıra.
4. Arka arkaya dört sıra.
5. Arka arkaya beş sıra.

Bu aşamada, güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımı, yük uygulaması sırasında ikinci aşamada daha sonra kullanmak için bir Excel dosyası olarak ihraç edilmiştir.

- İkinci aşama

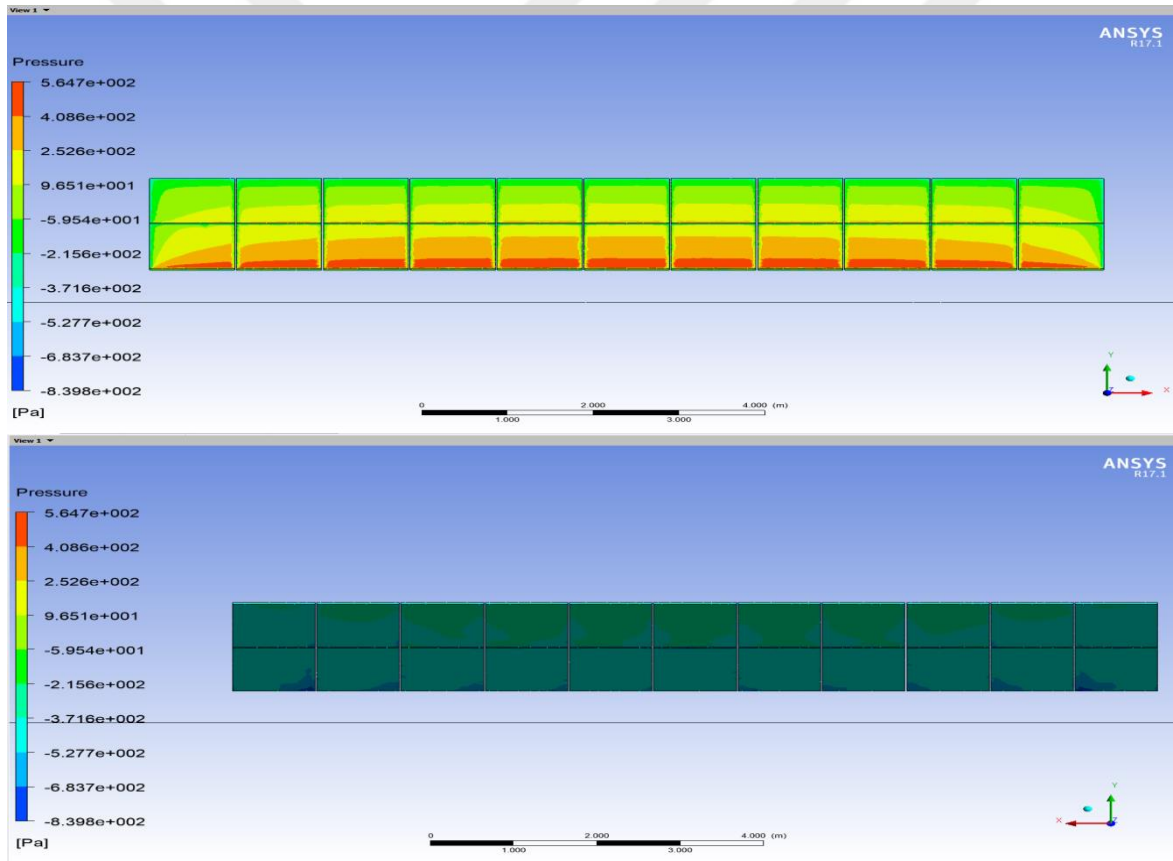
Bu aşamada tüm modelin doğrusal olmayan bir statik analizi yapılmıştır. Simülasyon yapıldıktan sonra çoğu modelde en yüksek basınç farkına maruz kalan ilk güneş panelleri sırası gözlenmiş ve maksimum basınç her zaman ilk panel sıralarında toplanmıştır. Bunun için bu aşamada sadece tek duran modeller alınmıştır. Sonuç olarak, bu aşamadaki model sayısı aşağıdaki gibi sadece 5'tir.

1. Düz arazi uygulamalı tek sıra
2. 10° eğimli arazi uygulamalı tek sıra

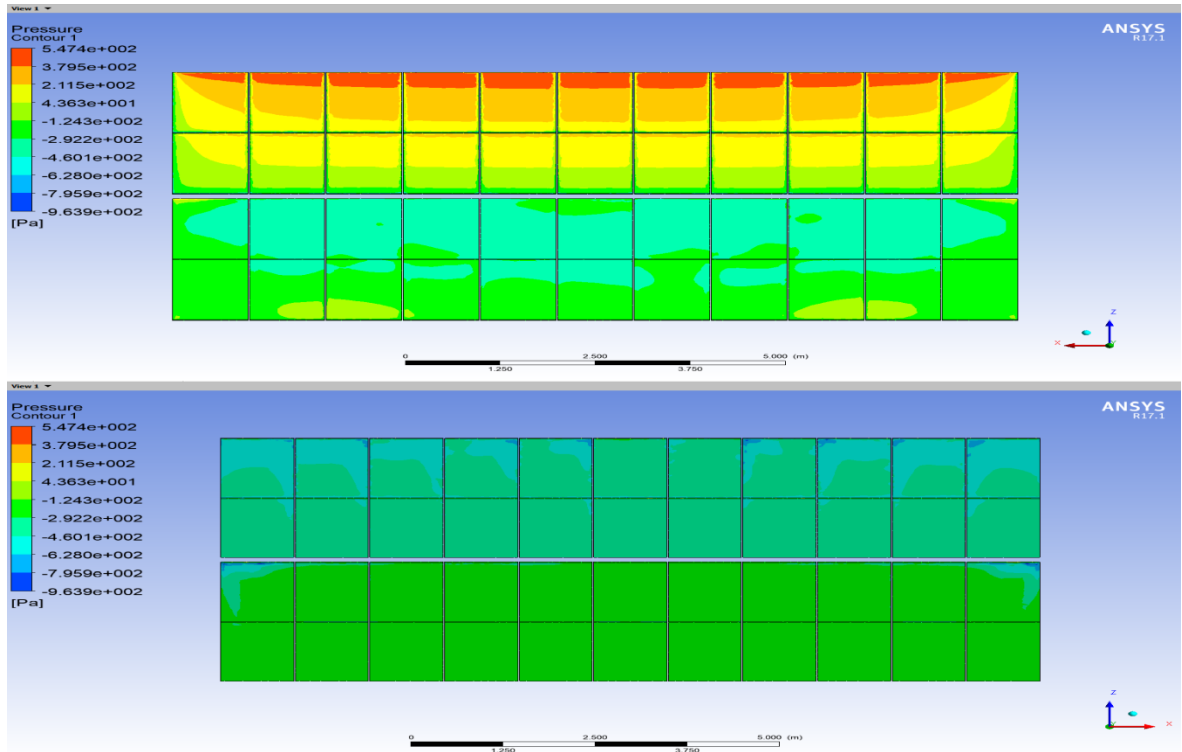
3. 20° eğimli arazi uygulamalı tek sıra
4. 30° eğimli arazi uygulamalı tek sıra

7.1 HAD Simülasyonu Sonuçları

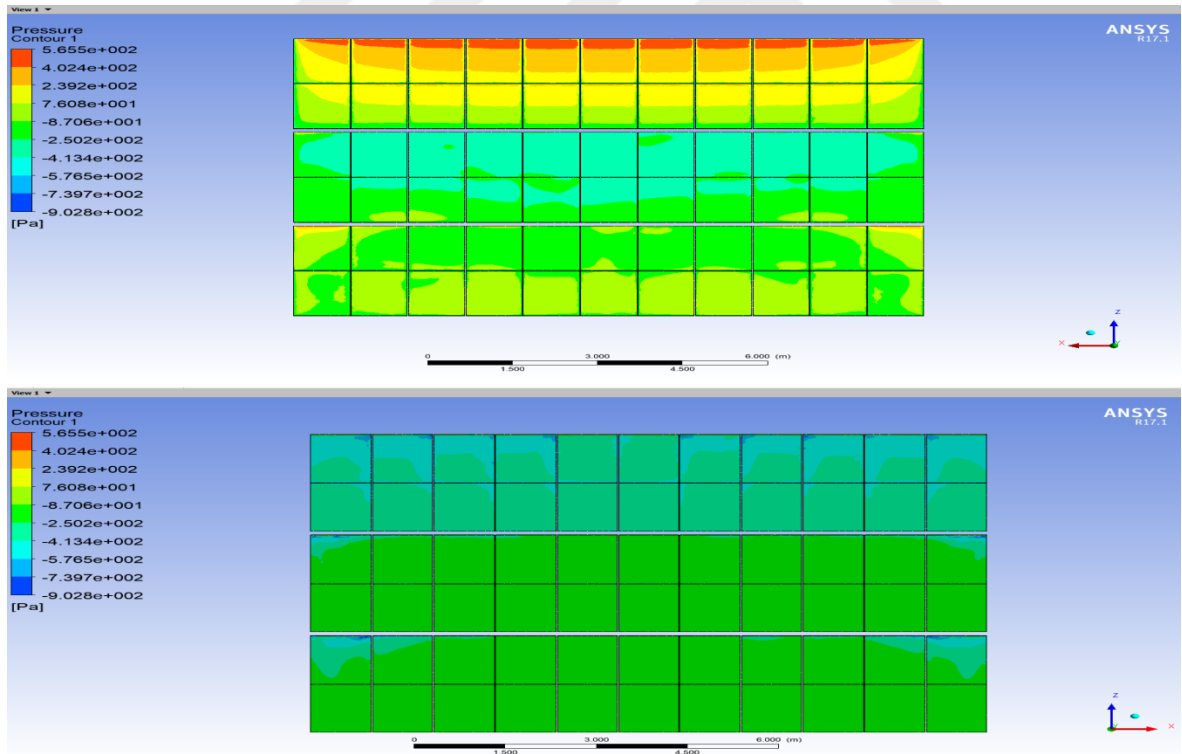
Bu bölümde, HAD simülasyonu sonuçları sadece düz arazi uygulamalı model için gösterilmiştir. Eğimli arazi uygulamalı modellerin HAD sonuçları ekler A, B ve C'de bulunmuştur. Simülasyon yapıldıktan sonra güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımı elde edilmiş. Basınç dağılımı 7.1'den 7.5'ye kadar kontur Şekillerinde gösterilmiştir. Ancak her şekilde iki görüntü vardır; üst görüntü panellerin ön yüzeyleri üzerindeki basınç dağılımı için ve alt görüntü ise panellerin arka yüzeyleri üzerindeki basınç dağılımı içindir.



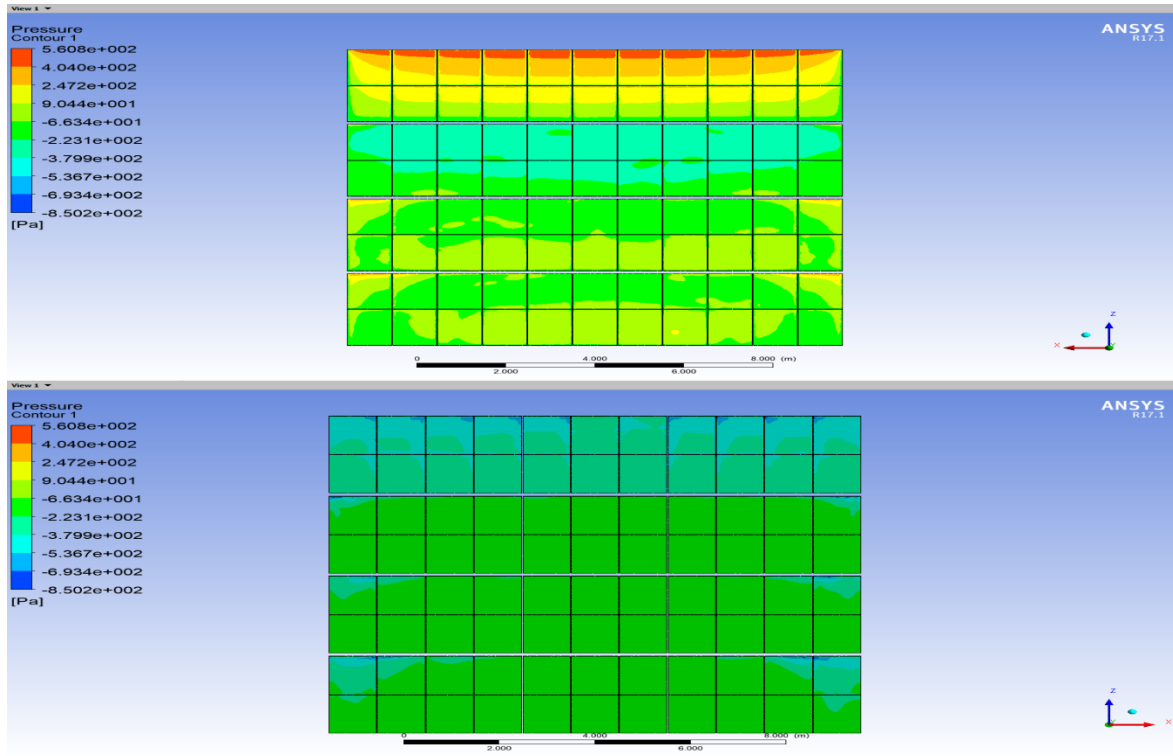
Şekil 7.1 Düz arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



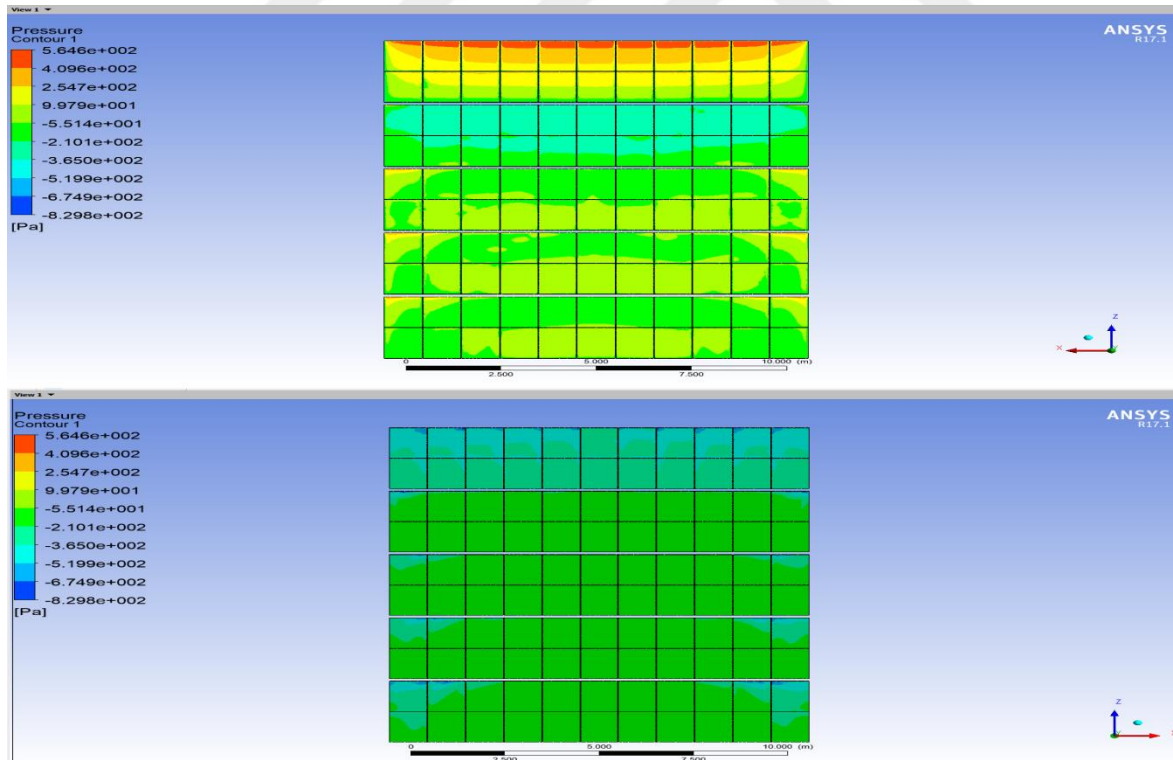
Şekil 7.2 Düz arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



Şekil 7.3 Düz arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

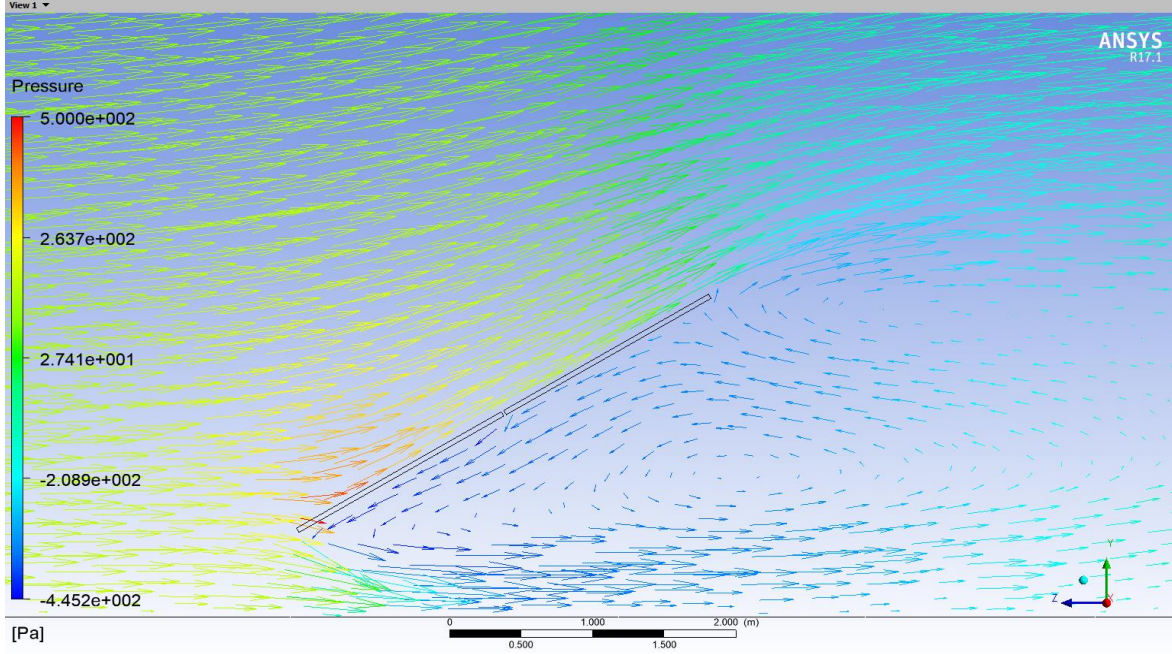


Şekil 7.4 Düz arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

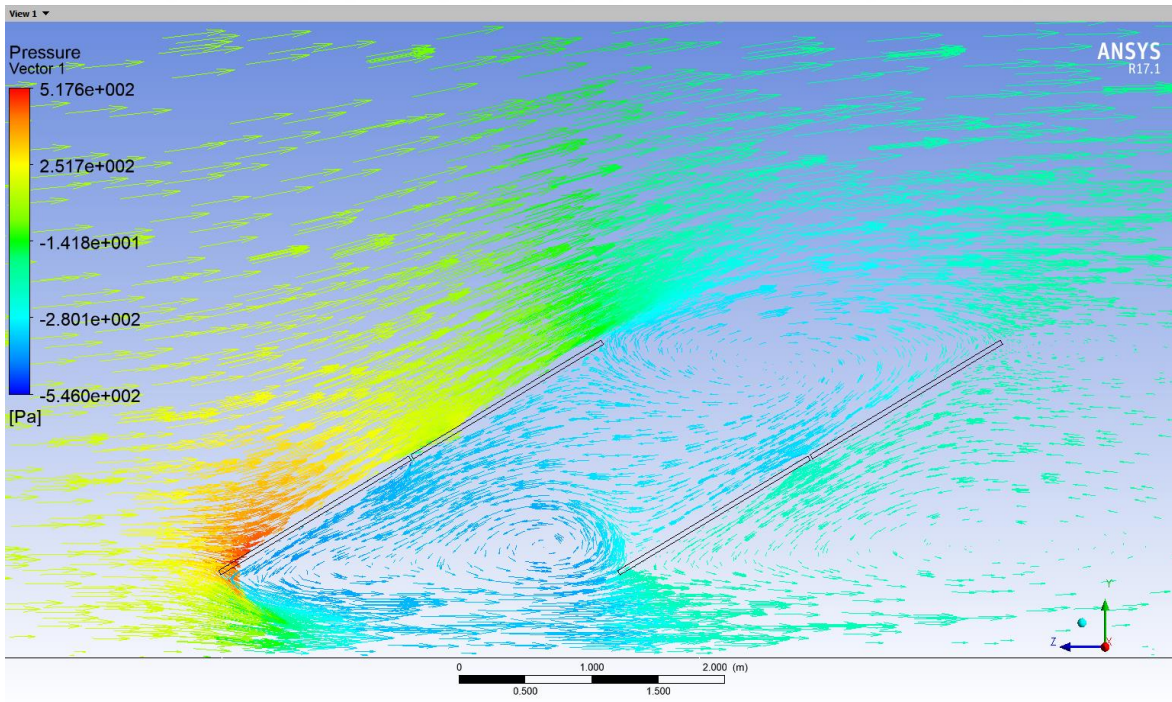


Şekil 7.5 Düz arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

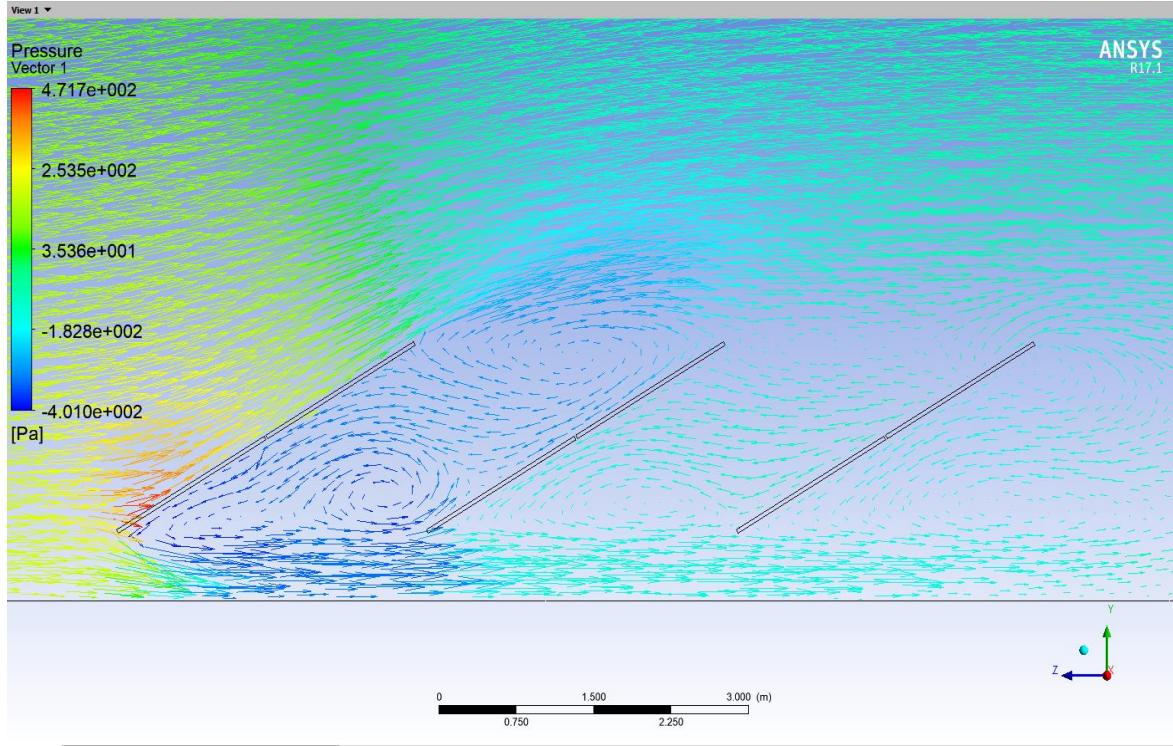
Rüzgârın güneş panelleri etrafında nasıl estiğini iyi anlamak için, akış çizgisi dikkate alınmıştır. Akış çizgisi, güneş panelleri sırasının ortasında vektör olarak düz arazi uygulamalı model için 7.6'den 7.10'ye kadar Şekillerde gösterilmiştir. Eğimli arazi uygulamalı modellerin akış çizgileri ekler A, B ve C'de bulunmuştur.



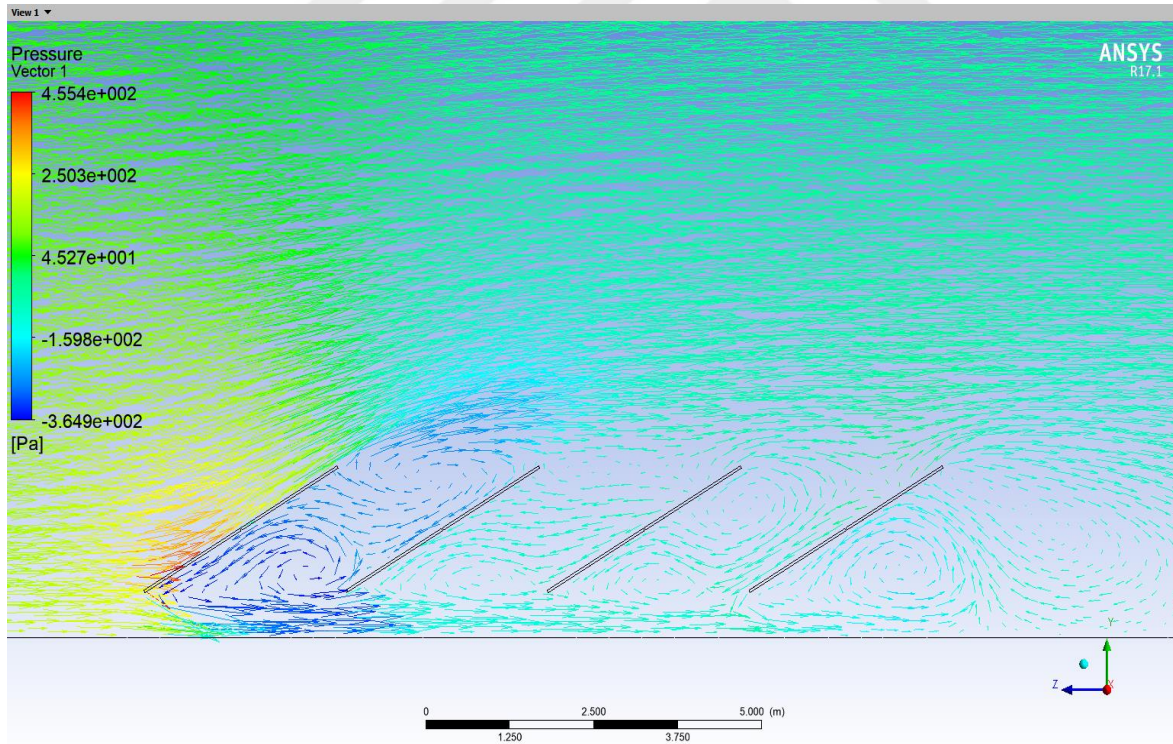
Şekil 7.6 Düz arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi



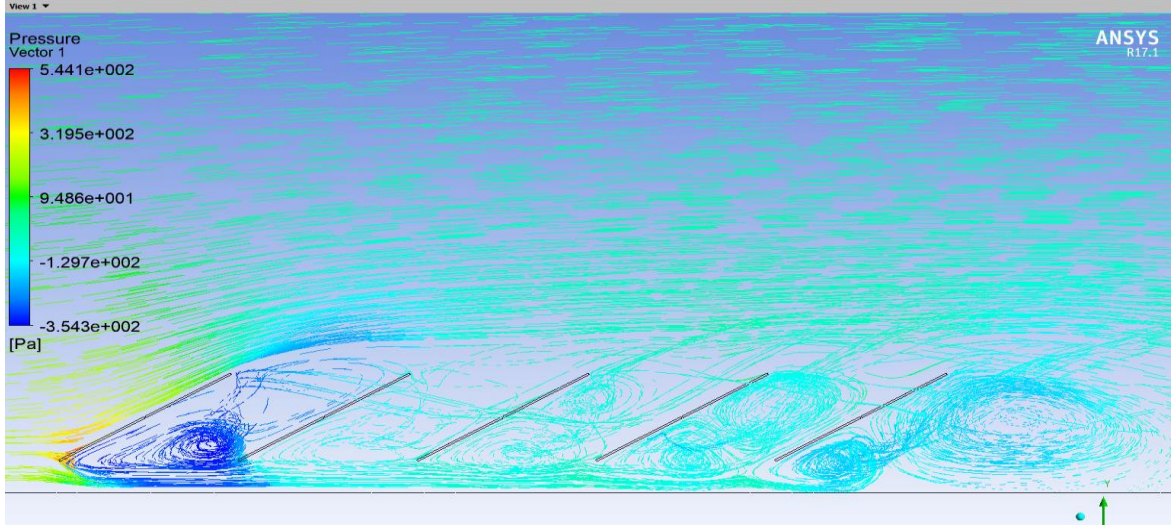
Şekil 7.7 Düz arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi



Şekil 7.8 Düz arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi



Şekil 7.9 Düz arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi



Şekil 7.10 Düz arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgisi

Basınç kontur şekilleri ve akış çizgileri incelendikten sonra, aşağıdaki sonuçlara varılmış.

1. Panel sıralarının sayısını arttırırken ilk panel sırasının basınç dağılımından en büyük paya sahip olduğu görülmüştür. Azami basınç değerleri, ilk sıranın sonraki sıralara göre daha geniş alanlarına dağıtılmıştır. Başka bir deyişle, ilk sıra rüzgârın diğer sıralara doğru ilerlemesini engelleyerek rol oynamaktadır. İncelenen dört modelde oluşan rüzgâr basıncının maksimum ve minimum değerleri Çizelgeler 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Düz arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)

Sıra No	Ekstrem Değerler	Sıra Adedi				
		1	2	3	4	5
1	Max	564.66	547.38	565.53	560.77	564.57
	Min	-839.79	-858.23	-820.73	-811.27	-793.96
2	Max		164.35	165.94	182.92	203.52
	Min		-963.85	-882.16	-829.80	-797.77
3	Max			372.14	386.45	382.13
	Min			-902.80	-793.21	-700.88
4	Max				378.08	383.60
	Min				-850.23	-722.69
5	Max					392.11
	Min					-829.78

Çizelge 7.2 10° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)

Sıra No	Ekstrem Değerler	Sıra Adedi				
		1	2	3	4	5
1	Max	818.68	812.68	808.61	809.93	805.41
	Min	-247.21	-337.05	-235.99	-123.22	-200.76
2	Max		502.39	466.36	474.89	471.69
	Min		-186.74	-117.75	-130.41	-131.33
3	Max			549.14	541.81	531.95
	Min			-520.42	-426.24	-400.86
4	Max				558.88	563.56
	Min				-572.61	-562.61
5	Max					563.98
	Min					-557.68

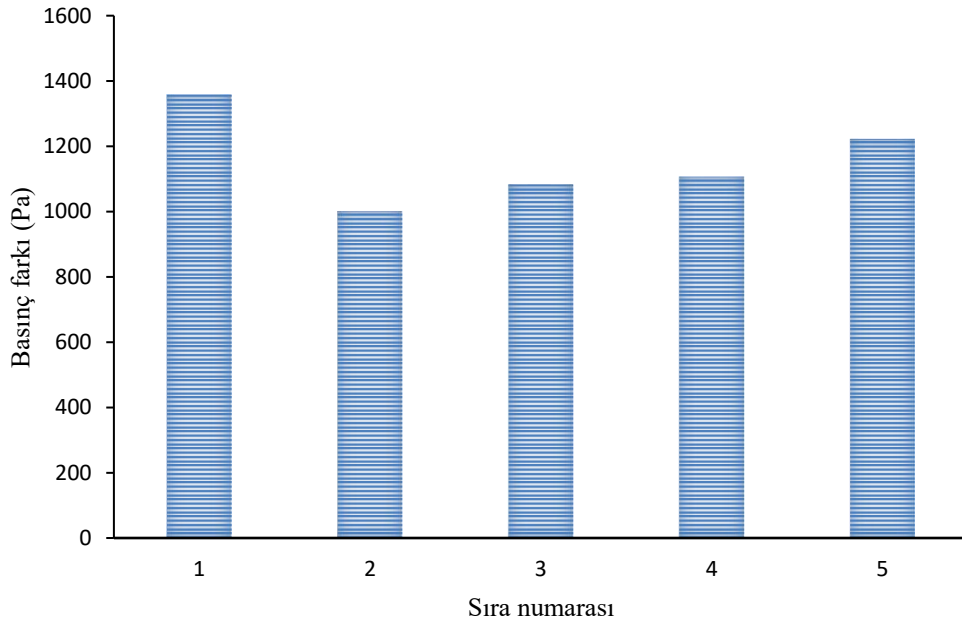
Çizelge 7.3 20° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)

Sıra No	Ekstrem Değerler	Sıra Adedi				
		1	2	3	4	5
1	Max	1455.35	1459.86	1450.76	1452.15	1454.67
	Min	559.97	608.06	584.14	703.95	664.22
2	Max		1280	1288.73	1268.06	1280.90
	Min		630.99	655.83	633.40	606.29
3	Max			1169.16	1170.18	1172.21
	Min			578.61	484.49	491.12
4	Max				1160.77	1174.08
	Min				511.91	631.12
5	Max					1148.72
	Min					627.72

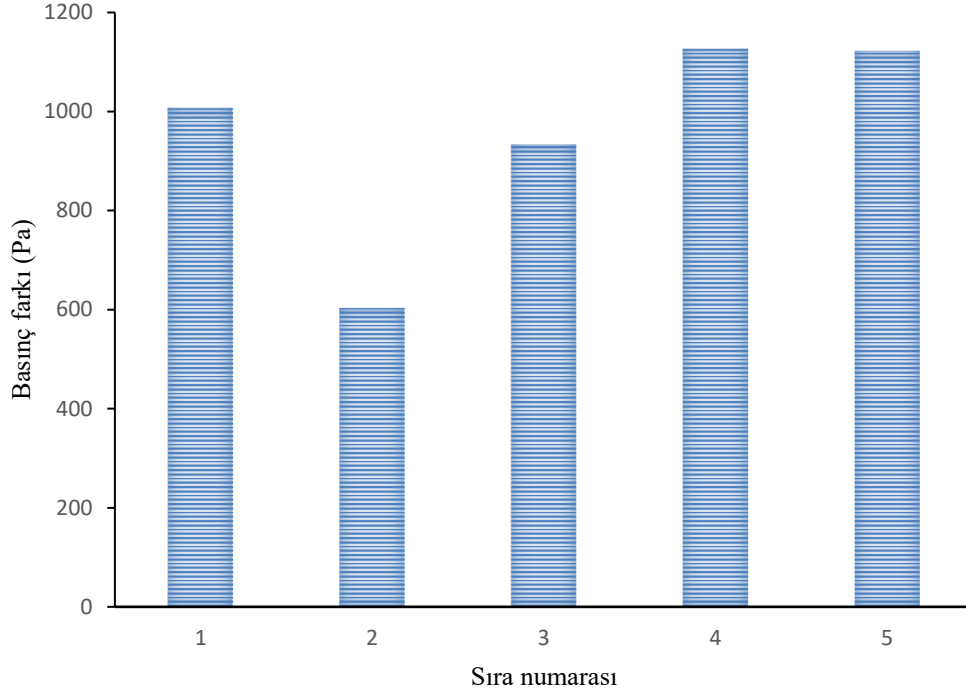
Çizelge 7.4 30° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç değerleri (Pa)

Sıra No	Ekstrem Değerler	Sıra Adedi				
		1	2	3	4	5
1	Max	2939.64	2941.96	2943.50	2942.15	2939.12
	Min	2449.15	2466.27	2462.88	2498.55	2448.05
2	Max		2820.16	2815.16	2824.25	2814.65
	Min		2452.84	2459.42	2476.67	2483.02
3	Max			2746.19	2752.06	2748.56
	Min			2429.67	2442.02	2414.08
4	Max				2694.50	2694.29
	Min				2426.01	2441.18
5	Max					2652.34
	Min					2434.70

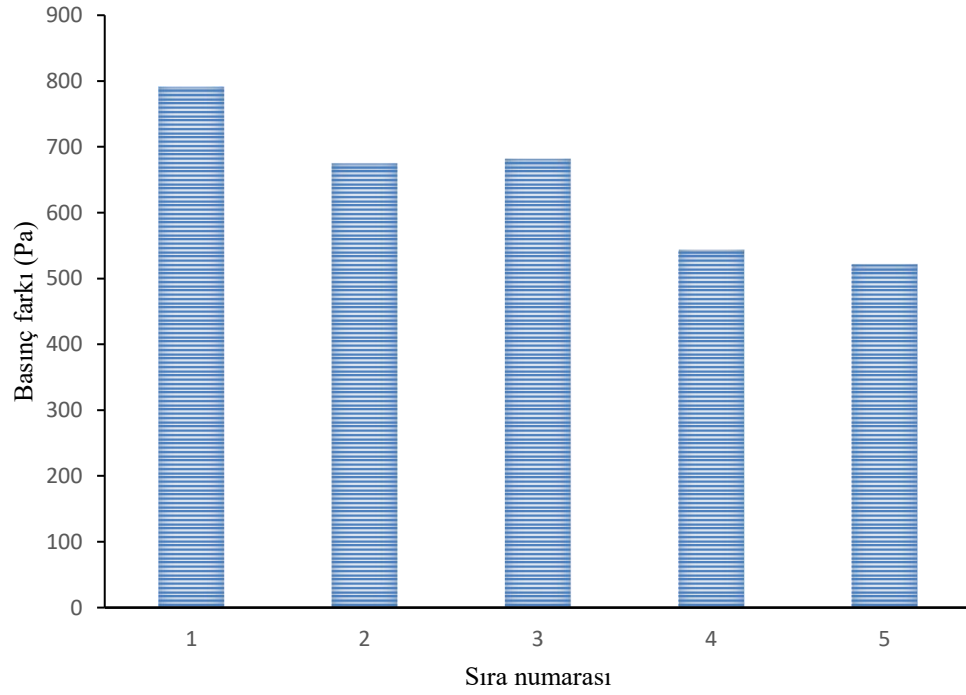
Maksimum ve minimum değerler arasındaki basınç farkı göz önüne alındığında ve 5 sıra arka arkaya yerleştirilmesi durumunda, ilk sıradaki basınç farkının, çoğu durumda, Şekil 7.11, 7.12, 7.13 ve 7.143'te gösterildiği gibi en büyük olduğu görülmüştür.



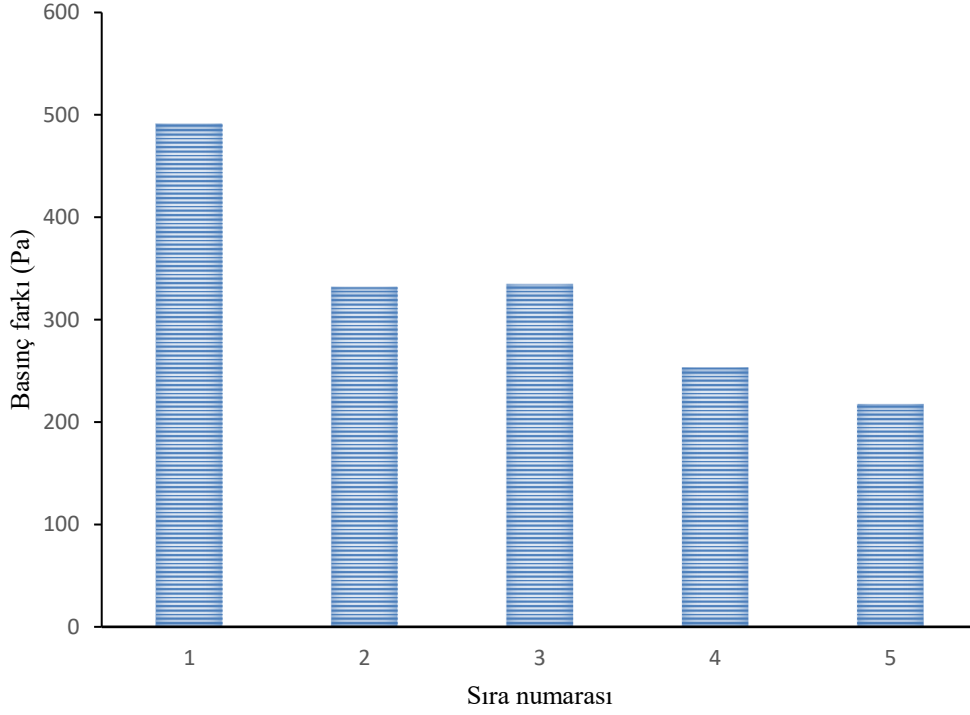
Şekil 7.11 Düz arazi; maksimum ve minimum basınç farkları



Şekil 7.12 10° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları

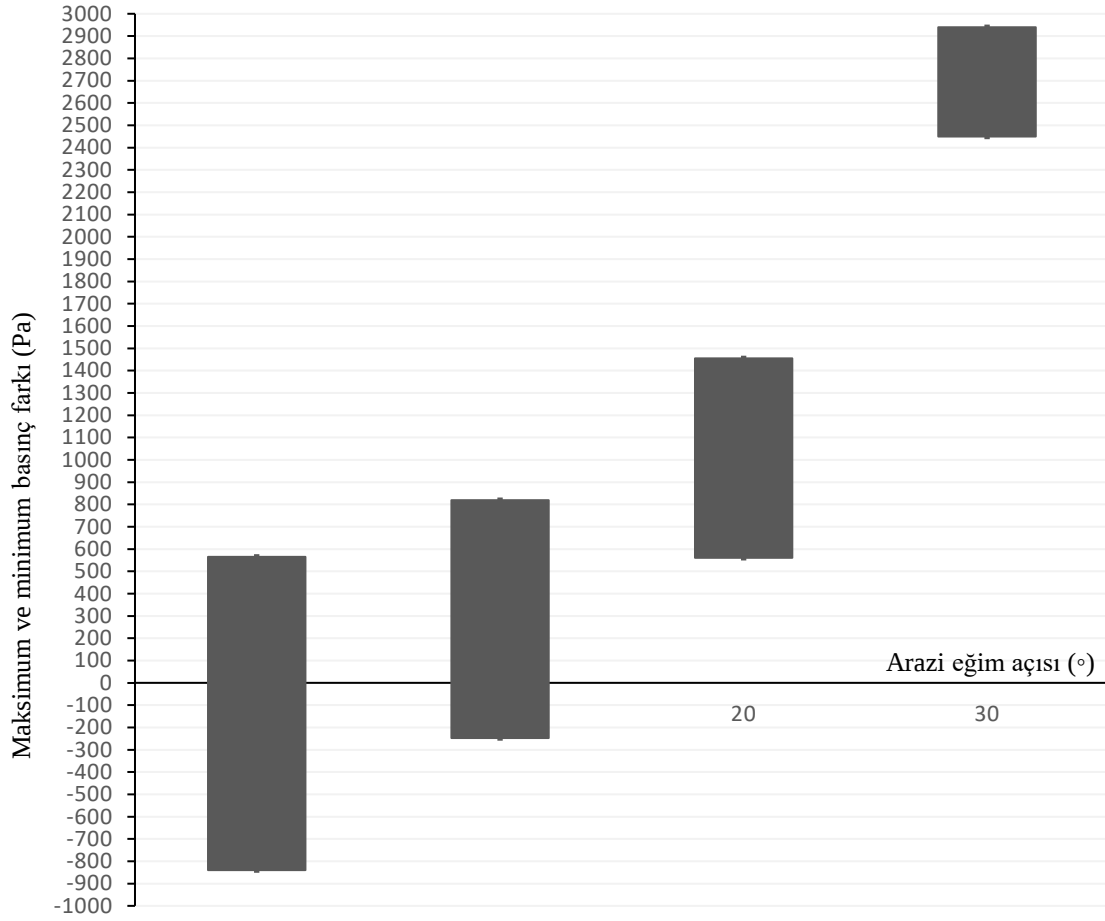


Şekil 7.13 20° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları



Şekil 7.14 30° eğimli arazi; maksimum ve minimum basınç farkları

2. Düz ve 10° eğimli arazi uygulamalarında, panellerin arka yüzlerindeki bazı bölgelerde negatif basınç gözlenmiştir. Bu durumda paneller ön yüzlerinin basınç kuvvetine, arka yüzlerinin emme ve basınç kuvvetlerine maruz kaldığı anlamına gelir. Böylece paneller üzerindeki basınç farklılıkları artar. Başka bir deyişle, taşıyıcı yapıya daha tehlikeli bir yükleme durumu oluşacaktır.
3. 20° ve 30° eğimli arazi uygulamalarında, panellerin yüzlerinde hiç negatif basınç gözlenmemiştir. Sadece pozitif basınç gözlenmiştir. Bu durumda panel yüzlerinin sadece basınç kuvvetlerine maruz kaldığı anlamına gelir. Bu nedenle, arka yüzdeki basınç, ön yüzdeki basınca direnç göstermede rol oynayacaktır. Böylece paneller üzerindeki basınç farklılıkları azalacak, başka bir deyişle, taşıyıcı yapıya daha hafif bir yükleme durumu oluşacaktır.
4. Dört modeldeki tek başına duran panellerde oluşan basınç farkları incelenerek Şekil 7.15 ve 7.16'da gösterildiği gibi arazi eğim açısının artmasıyla daha düşük basınç farkı gözlenmiştir. Yani, arazinin eğik yüzeyi de rüzgâr direncinde bir rol oynar. Böylece arazinin eğim açısını arttırmak, taşıyıcı yapı üzerindeki rüzgâr yükünü azaltır.



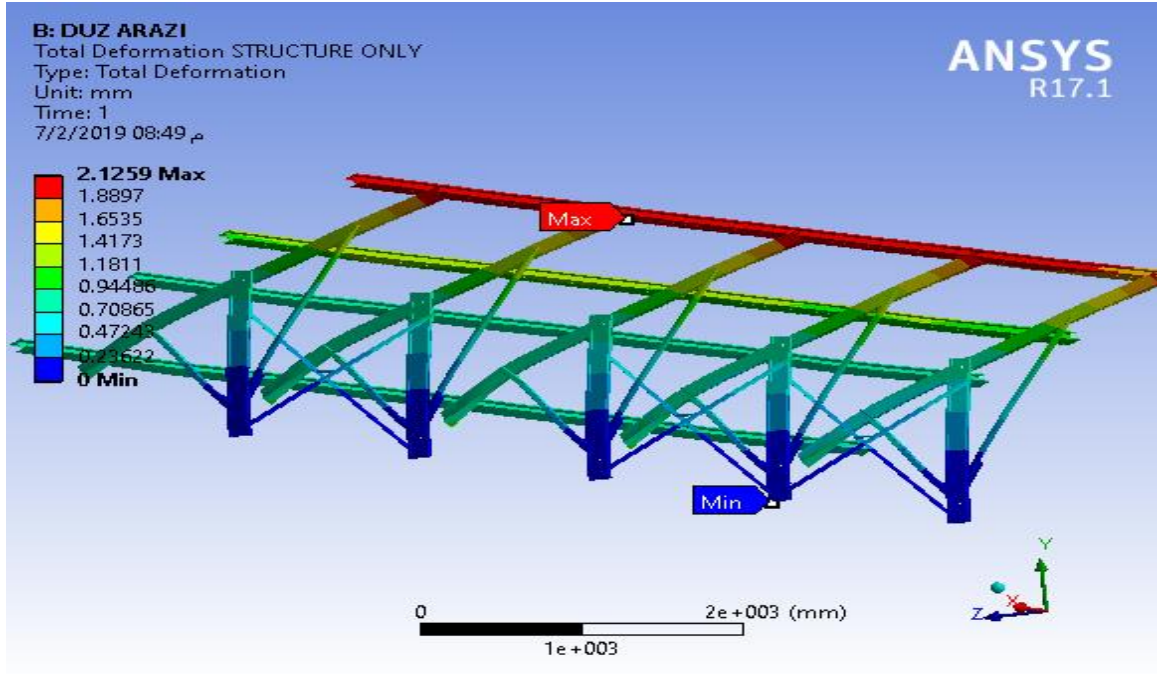
Şekil 7.15 Tek başına duran panellerde oluşan basınç farkları



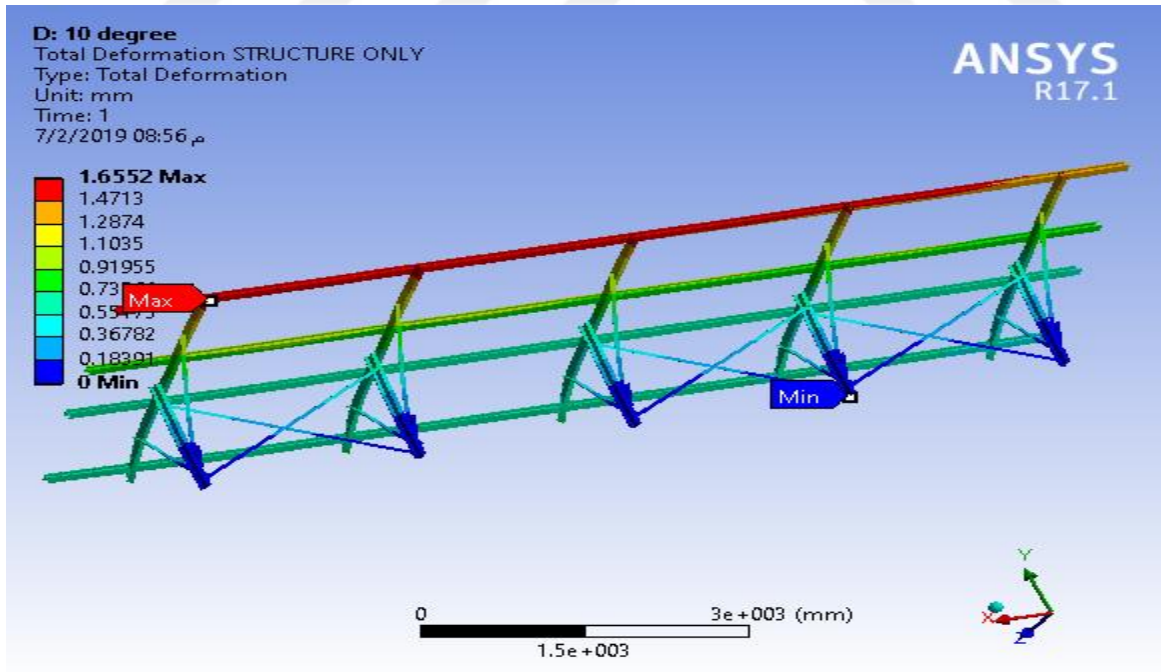
Şekil 7.16 Arazinin eğim açısına göre basınç farkından, tek başına duran panellerin payı

7.2 Statik Analizi Sonuçları

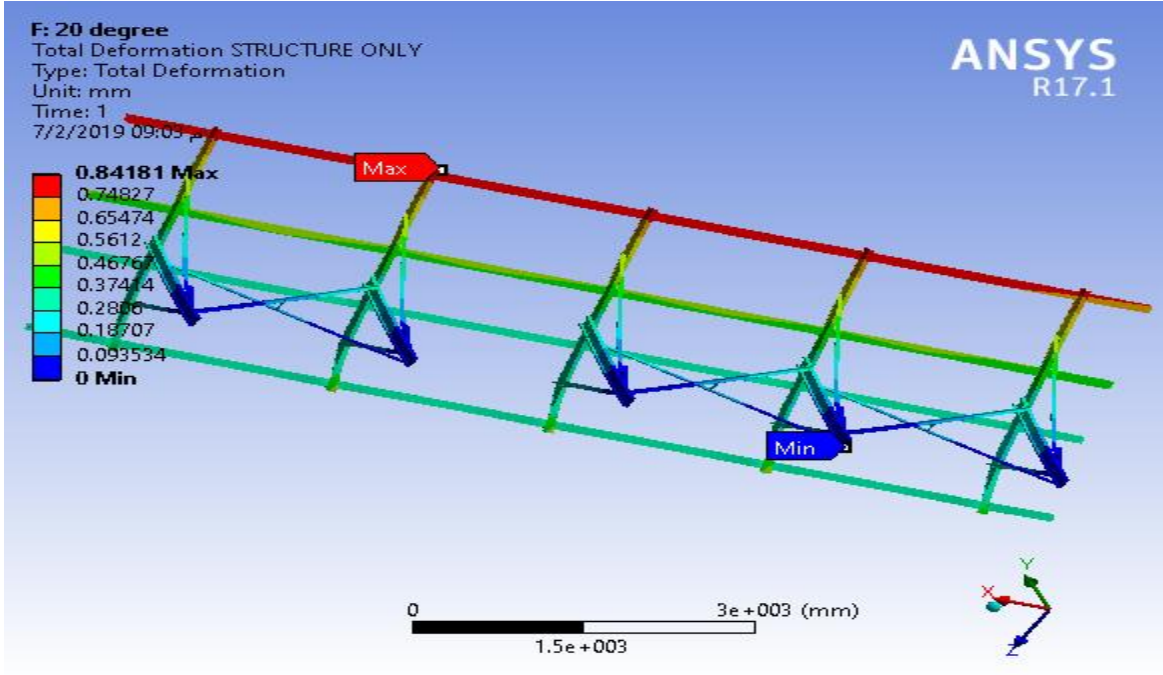
Analiz bittikten sonra, taşıyıcı yapıdaki ortaya çıkan toplam yer değiştirme sonuçları elde edilmiş. Toplam yer değiştirme 7.17'den 7.20'ye kadar Şekillerde gösterilmiştir.



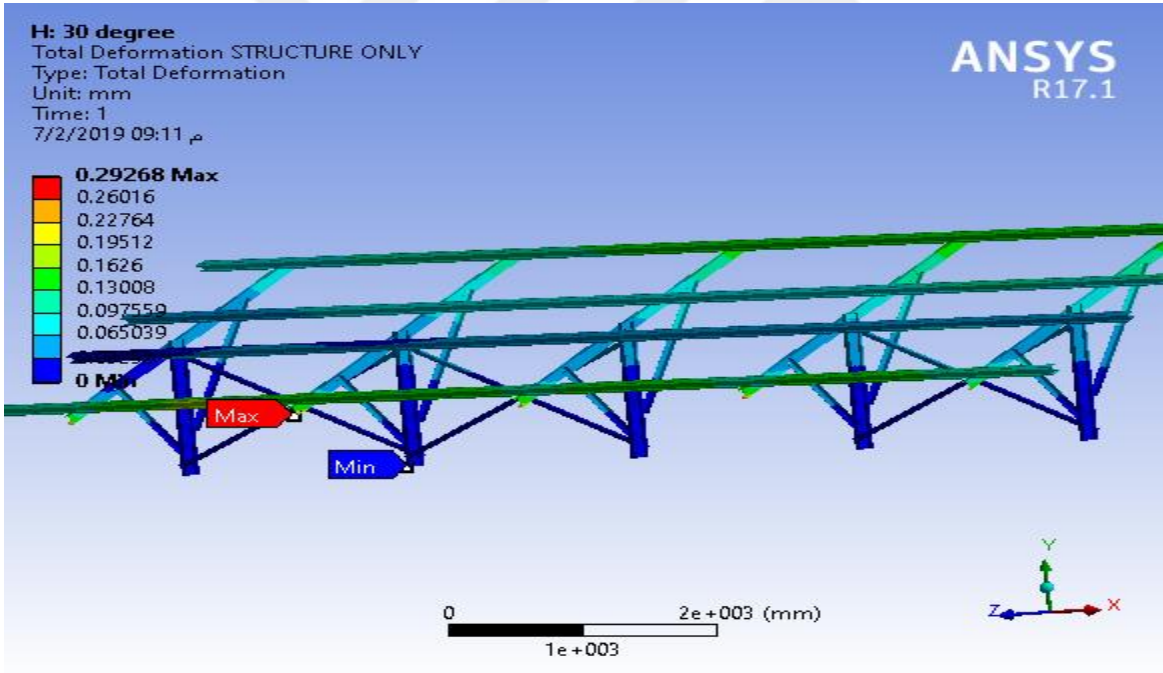
Şekil 7.17 Düz arazi; toplam yer değiştirme



Şekil 7.18 10° eğimli arazi; toplam yer değiştirme

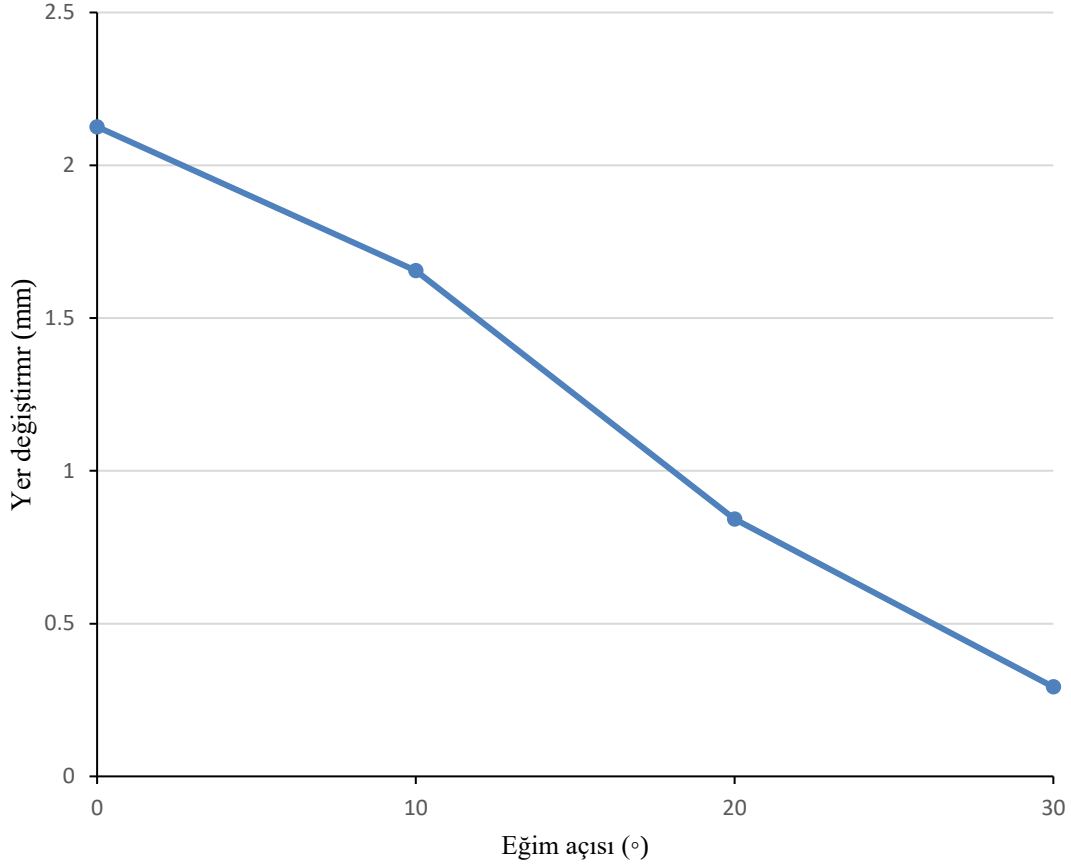


Şekil 7.19 20° eğimli arazi; toplam yer değiştirme



Şekil 7.20 30° eğimli arazi; toplam yer değiştirme

Çizelge 6.10'da gösterilen modellerin toplam yer değiştirme değerleri incelenerek, arazinin eğim açısı arttıkça yer değiştirme değerlerinin nasıl azaldığı açıkça gözlenmiştir. Arazinin eğim açısı arttıkça yer değiştirmedeki değişimi Şekil 7.21 gösterilmiştir.

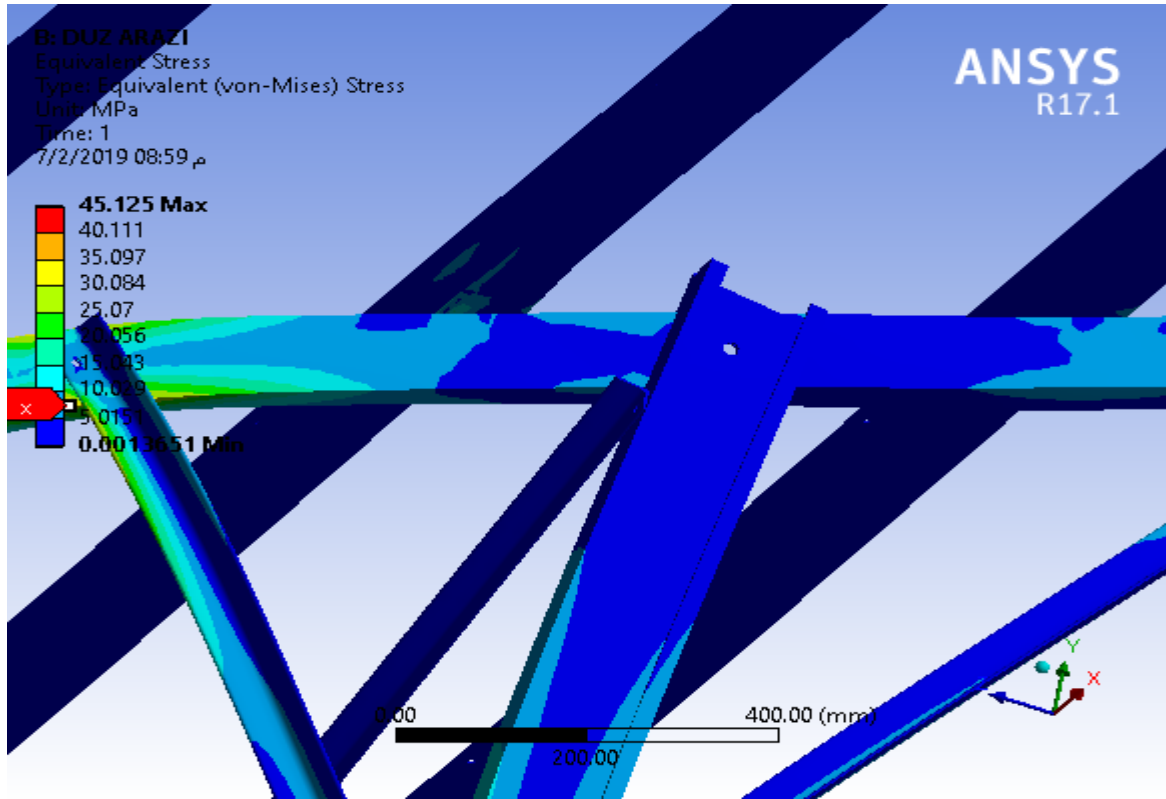


şekil 7.21 Yer değiştirmedeki değişimi

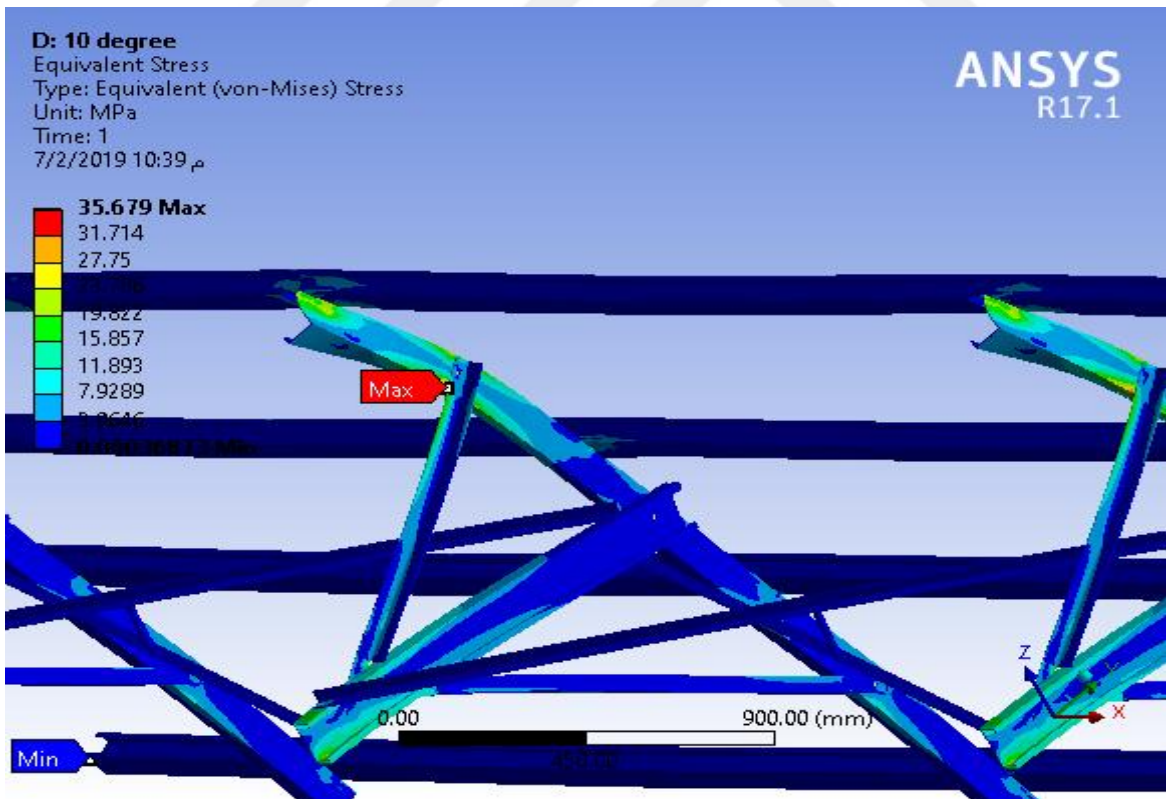
Çizelge 7.5 Statik analizi sonuçları

Arazi eğim açısı	Toplam yer değiştirme (mm)	Eşdeğer gerilme (MPa)		Güvenlik katsayısı	
		Maksimum	Minimum	Minimum	Maksimum
0	2.13	45.13	0.0017	5.54	15.00
10	1.66	35.68	0.0004	7.01	15.00
20	0.84	24.43	0.0006	10.23	15.00
30	0.29	11.30	0.0001	15.00	15.00

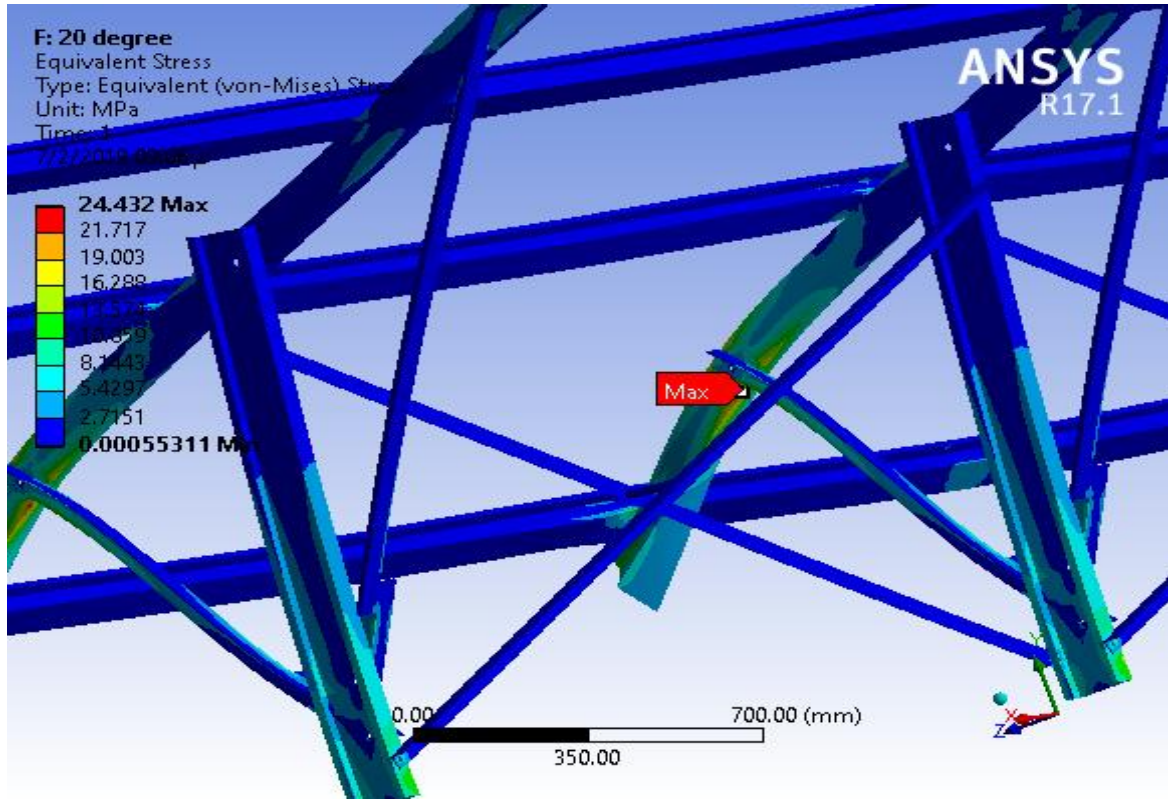
Taşıyıcı yapının tüm elemanları elastik bölgesinde kalmasını kontrol etmek için eşdeğer gerilme sonuçları dikkate alınmıştır. Eşdeğer gerilme sonuçları 7.22'den 7.25'e kadar şekillerde ve izelge 7.5'te gösterilmiştir.



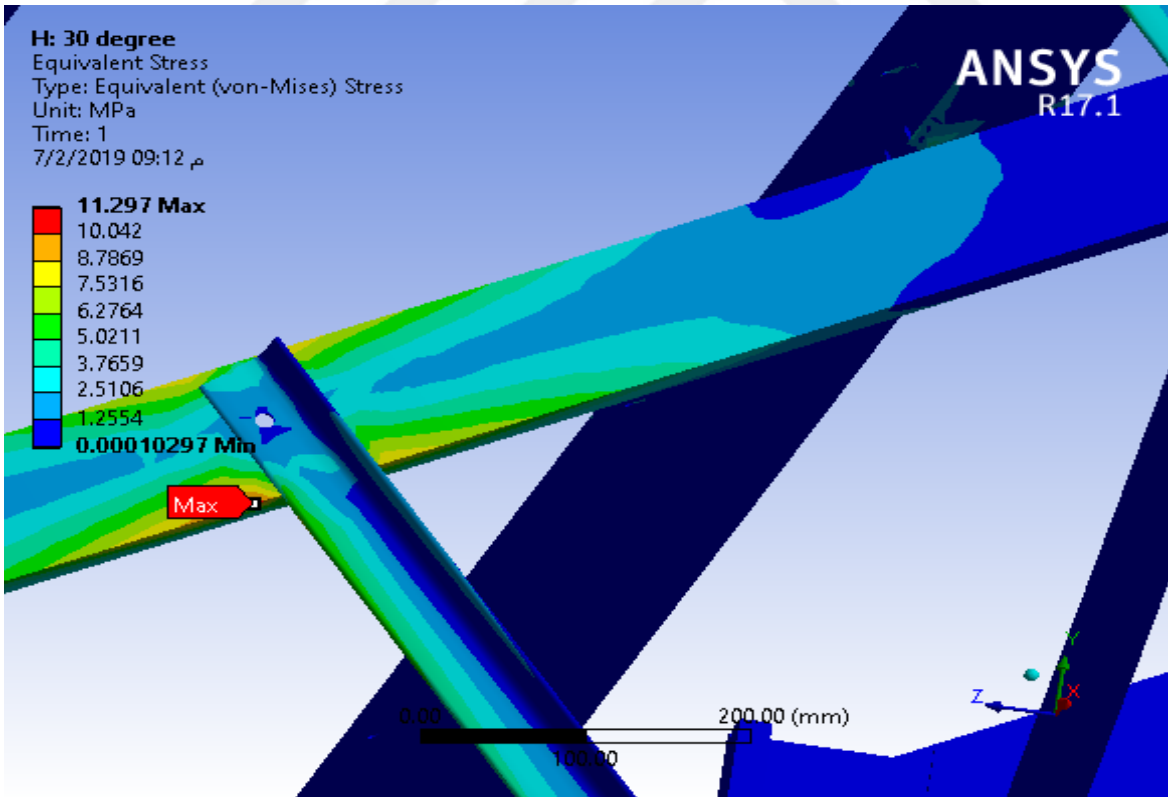
Şekil 7.22 Düz arazi; eşdeğer gerilme



Şekil 7.23 10° eğimli arazi; eşdeğer gerilme

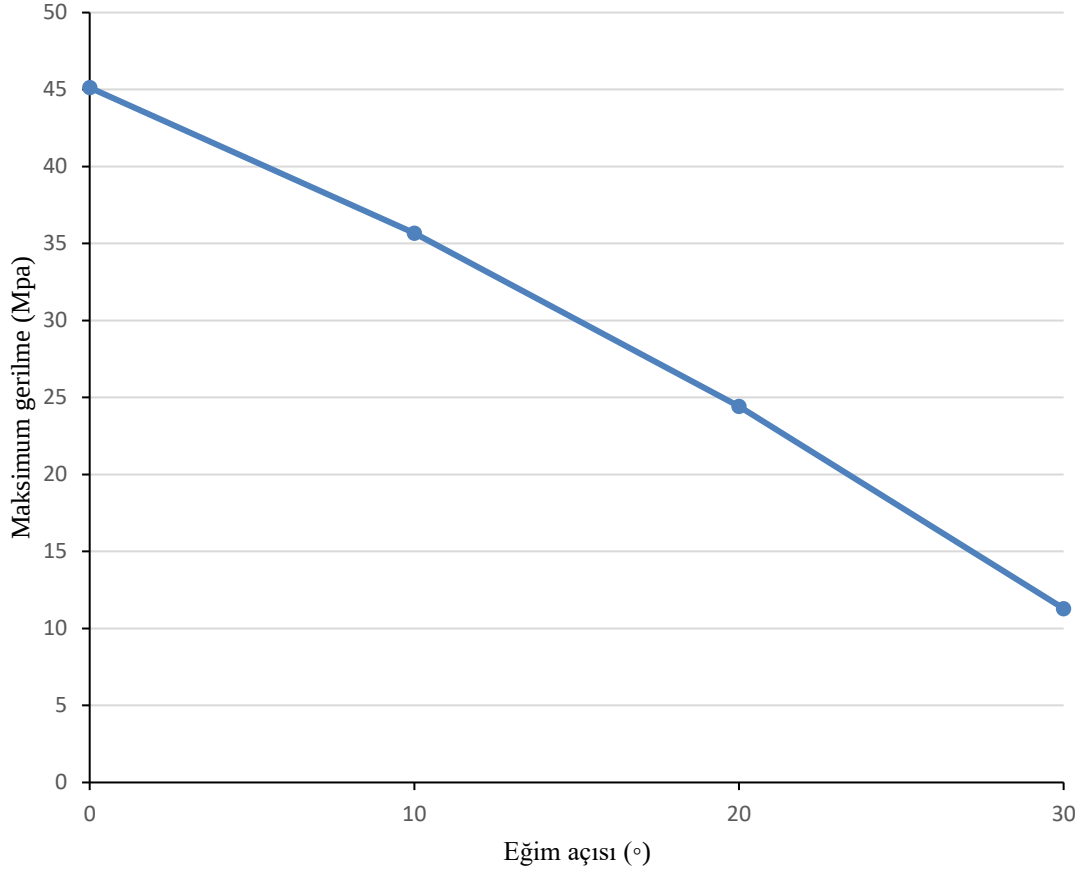


Şekil 7.24 20° eğimli arazi; eşdeğer gerilme



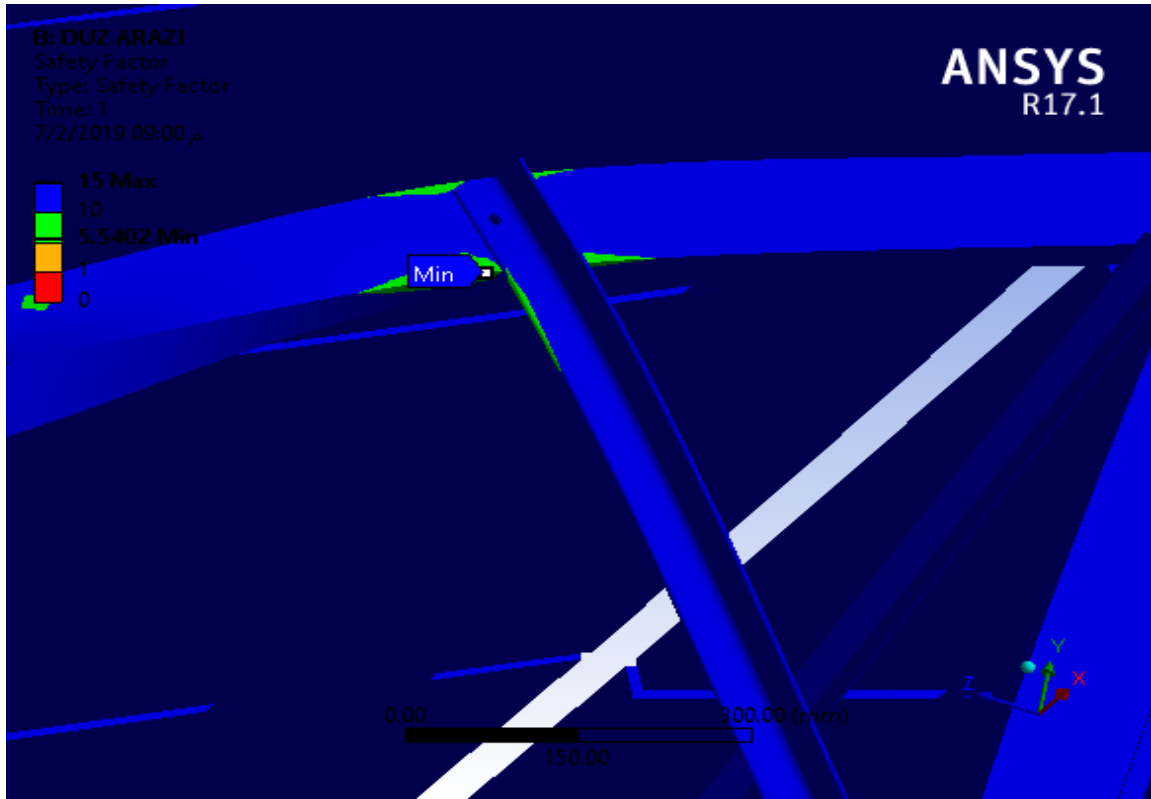
Şekil 7.25 30° eğimli arazi; eşdeğer gerilme

Çizelge 7.5'te gösterilen modellerin maksimum eşdeğer gerilme değerlerini inceleyerek, arazinin eğim açısı arttıkça eşdeğer gerilme değerlerinin nasıl azaldığı açıkça gözlenmiştir. Arazinin eğim açısı arttıkça maksimum eşdeğer gerilmedeki değişimi Şekil 7.26 gösterilmiştir.

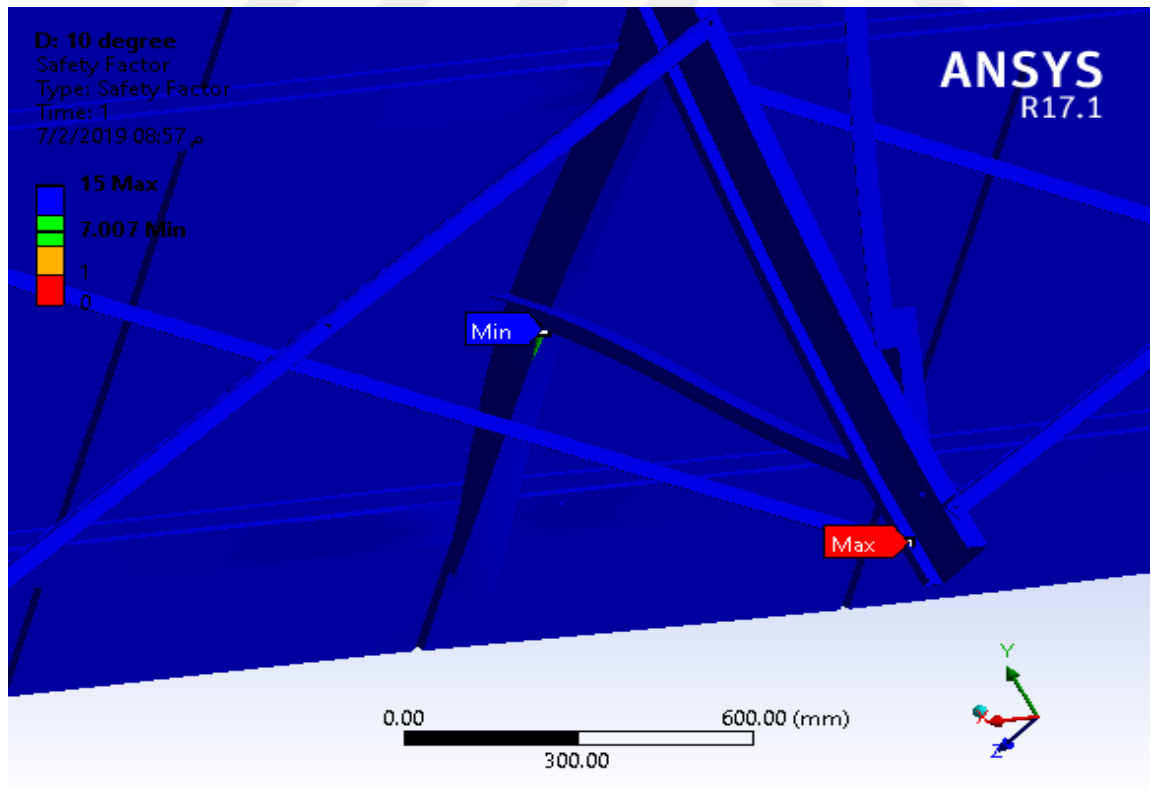


Şekil 7.26 Maksimum eşdeğer gerilmedeki değişimi

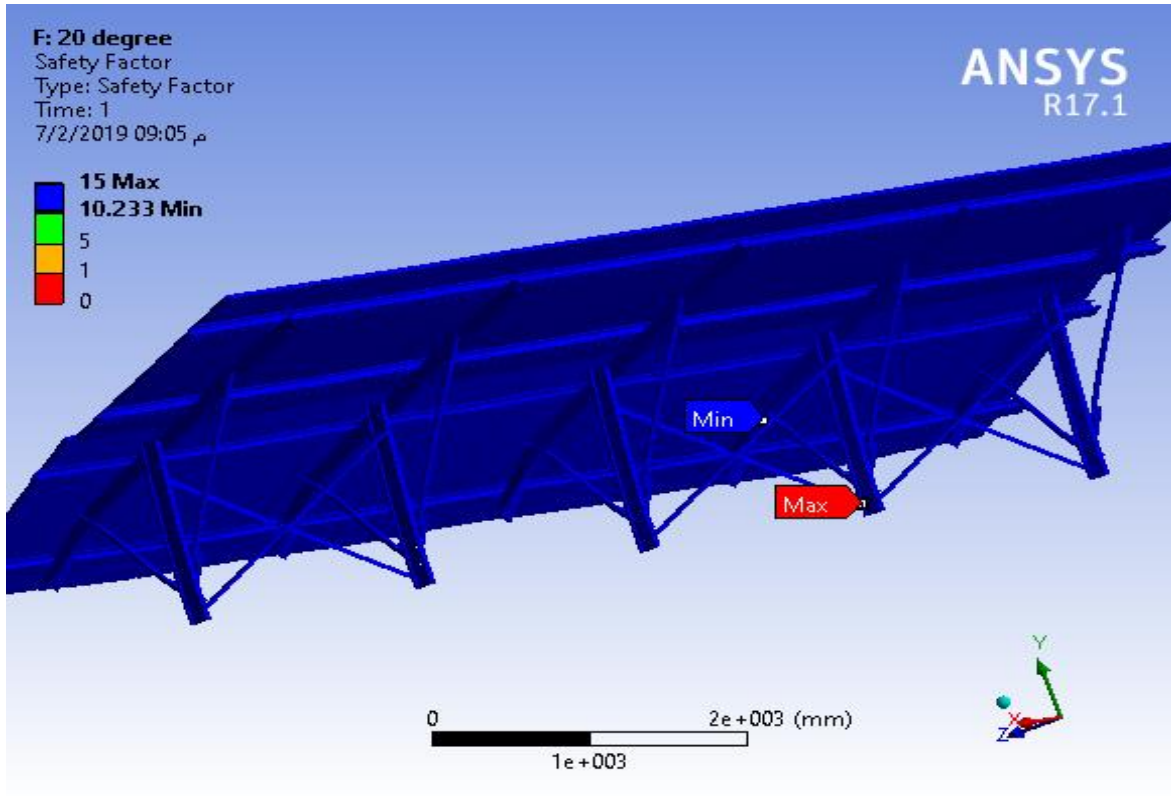
Modellerin taşıyıcı yapılarının dayanıklılığını ve uygulanan rüzgâr kuvvetine karşı direncini kontrol etmek için güvenlik katsayısı göz önünde bulundurulmuştur. Güvenlik katsayısı 7.27'den 7.30'a kadar Şekillerde ve Çizelge 7.5'te gösterilmiştir.



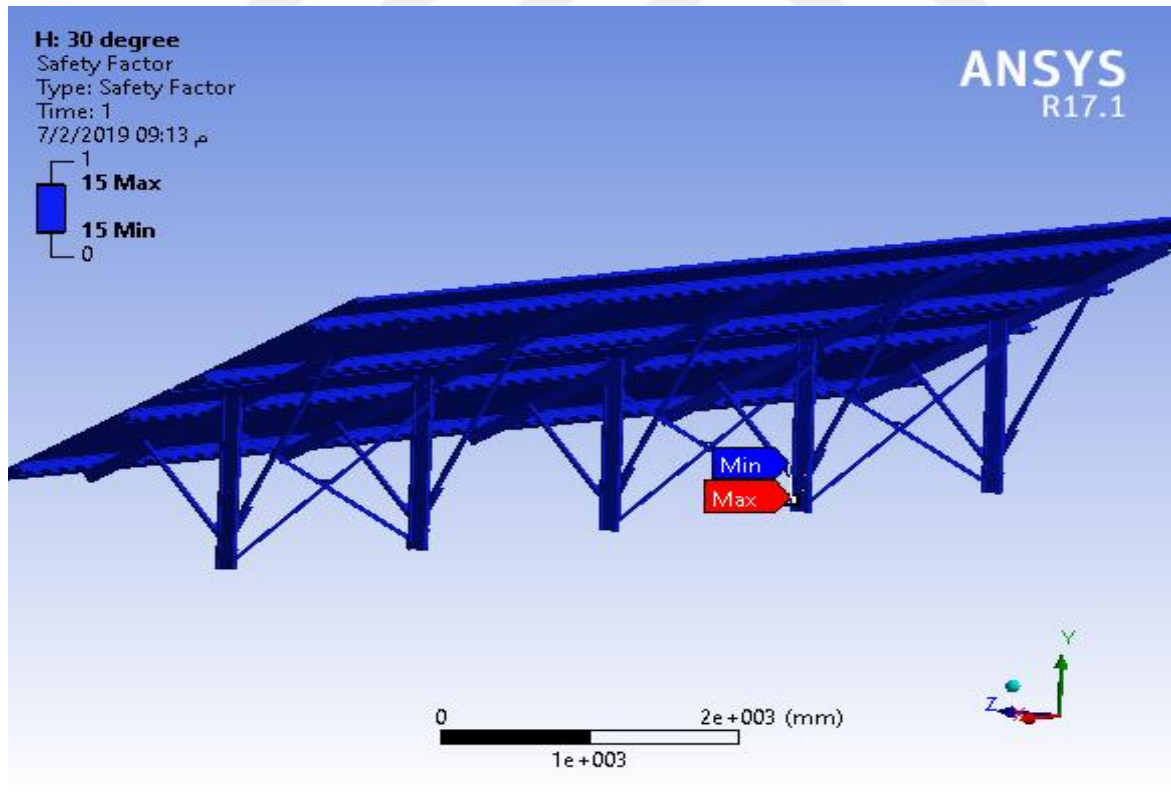
Şekil 7.27 Düz arazi; güvenlik katsayısı



Şekil 7.28 10° eğimli arazi; güvenlik katsayısı

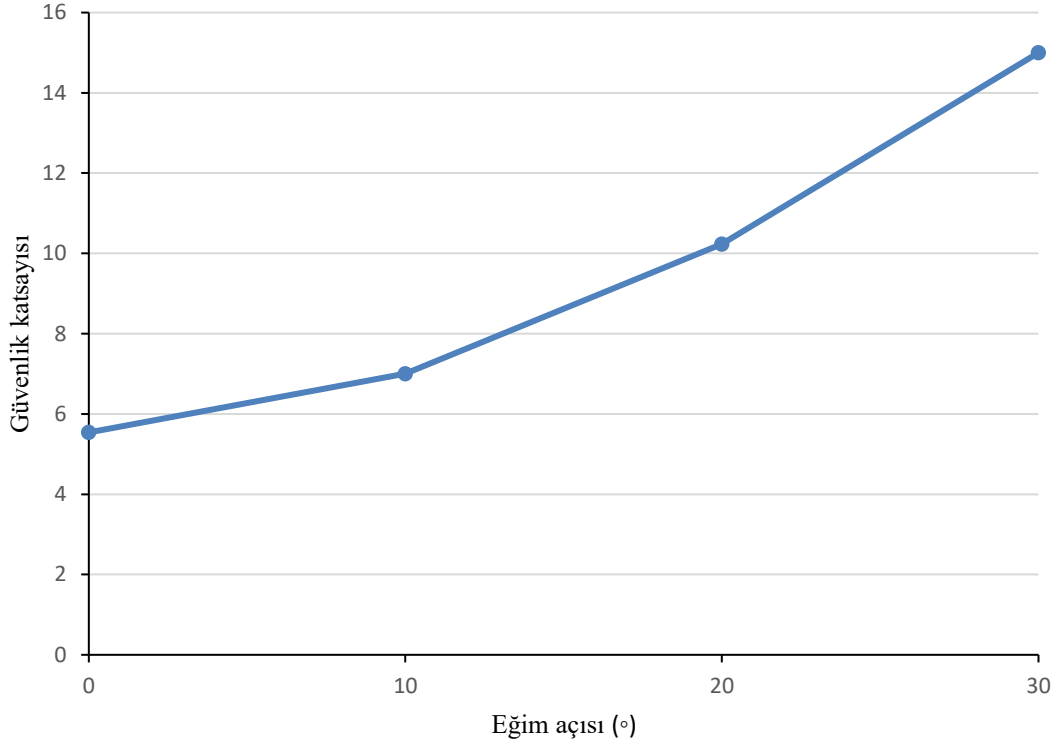


Şekil 7.29 20° eğimli arazi; güvenlik katsayısı



Şekil 7.30 30° eğimli arazi; güvenlik katsayısı

Çizelge 7.10'da gösterilen modellerin maksimum güvenlik katsayısı değerlerini inceleyerek, arazinin eğim açısı arttıkça güvenlik katsayısı değerlerinin nasıl arttığı açıkça gözlenmiştir. Arazinin eğim açısı arttıkça minimum güvenlik katsayısındaki değişimi Şekil 7.31 gösterilmiştir.



Şekil 7.31 Minimum güvenlik katsayısındaki değişimi

Rüzgârın tüm güneş sistemini taşıyan beton temeli üzerindeki etkisini incelemek için modellerin yüklenmesinden kaynaklanan reaksiyon kuvvetleri ve momentleri elde edilmiştir. Reaksiyon değerleri Çizelge 7.6 ve 7.7'de gösterilmiştir.

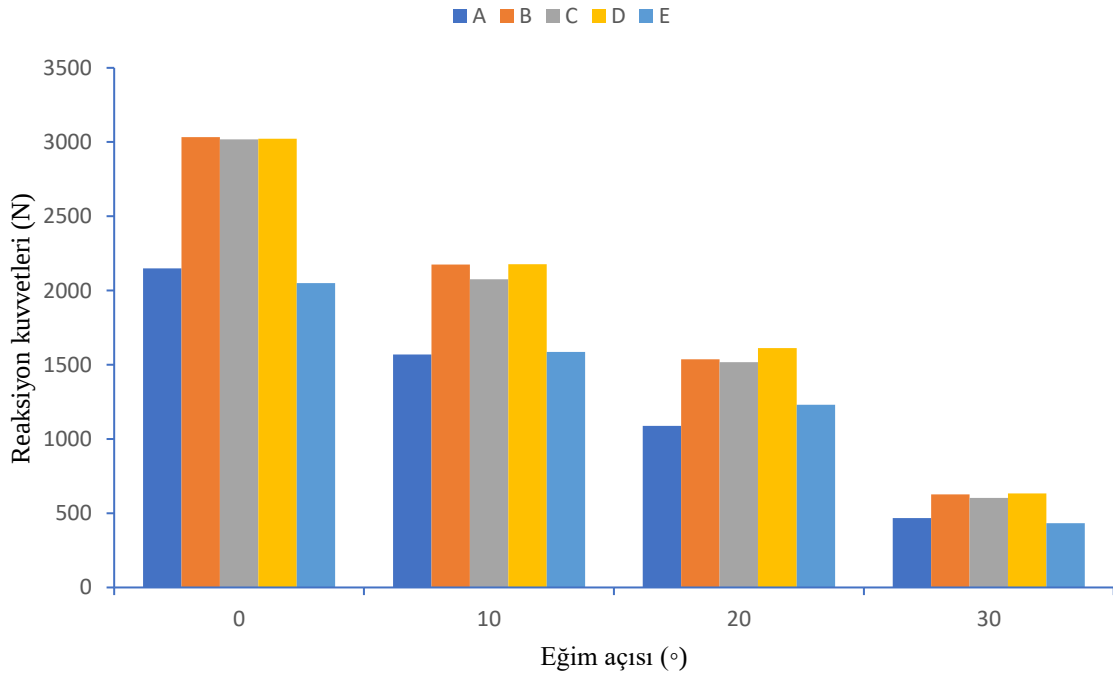
Çizelge 7.6 Reaksiyon kuvvetleri (N)

Arazi Eğim Açısı	Mesnet Adı				
	A	B	C	D	E
0	2150.30	3032.50	3019.20	3022.8	2050.30
10	1568.30	2174.30	2075.60	2176.3	1585.90
20	1087.40	1537.30	1517.40	1611.5	1231.70
30	466.35	627.23	603.23	632.9	433.61

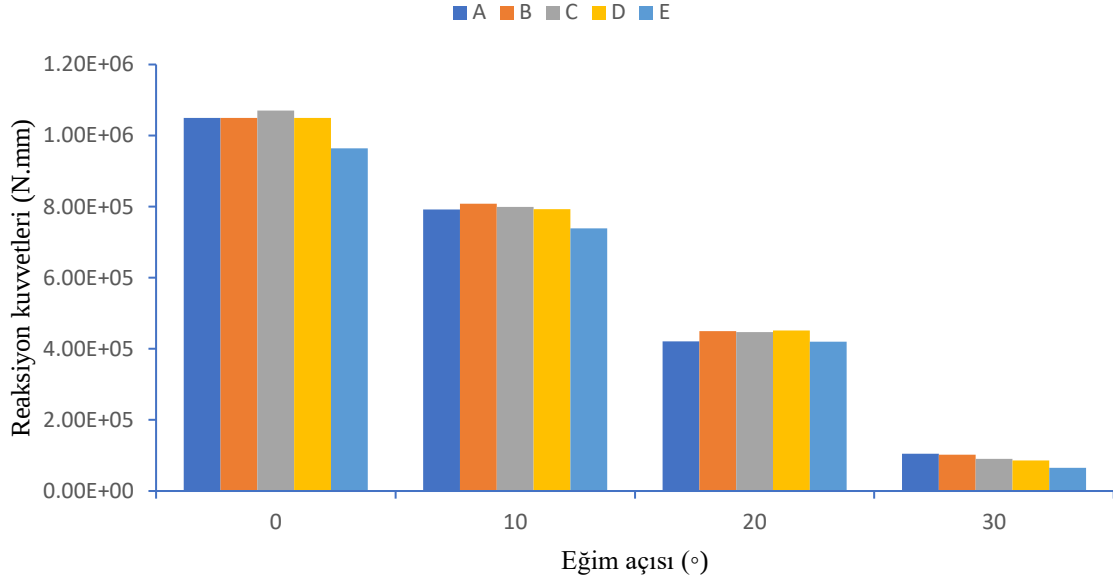
Çizelge 7.7 Reaksiyon momentleri (N.mm)

Arazi Eğim Açısı	Mesnet Adı				
	A	B	C	D	E
0	1.05E+06	1.05E+06	1.07E+06	1.05E+06	9.64E+05
10	7.92E+05	8.08E+05	7.99E+05	7.93E+05	7.39E+05
20	4.21E+05	4.50E+05	4.47E+05	4.52E+05	4.20E+05
30	1.05E+05	1.02E+05	9.05E+04	8.55E+04	6.51E+04

Çizelge 7.6 ve 7.7'de gösterilen modellerin reaksiyon değerlerini inceleyerek, arazinin eğim açısı arttıkça reaksiyon kuvvetleri ve momentlerinin nasıl azaldığı açıkça gözlenmiştir. Arazinin eğim açısı arttıkça reaksiyon kuvvetleri ve momentlerindeki değişimi Şekil 7.32 ve 7.33'te gösterilmiştir.



Şekil 7.32 Mesnetlere göre reaksiyon kuvvetlerindeki değişimi



Şekil 7.33 Mesnetlere göre reaksiyon momentlerindeki değişimi

HAD simülasyonu ve statik analizi sonuçlarını araştırıp kontrol ettikten sonra, aşağıdaki noktalar özetlenebilir

1. Düz arazi durumunda, panel sıraları sayısı arttıkça ilk ve son sıralardaki basınç farkının, orta sıralardan daha büyük olduğunu fark edilmiştir.
2. Düz olmayan arazi durumunda, arazinin eğim açısı arttıkça basınç farkı ilk sıralarda mümkün olduğu kadar büyüktü ve ertesı sıralarda kademeli olarak düşmüştür.
3. Çoğu durumlarda, basınç dağılımının en büyük payı ilk sıralardadır. Bu nedenle ilk sıranın, rüzgârın ilerlemesini önlemede ve ertesı sıralara yükünü azaltmasında rol oynadığını söylemek mümkündür.
4. Rüzgâr Yüğü, arazinin eğim açısı arttıkça belirgin bir şekilde azalmıştır. Taşıyıcı yapı üzerindeki rüzgâr yükünden kaynaklanan toplam yer değiştirme ve eşdeğer basınç değerlerinin azaltıldığı fark edilmiştir. Başka bir deyişle, taşıyıcı profillerin kesitleri küçültebilir.
5. Arazinin eğim açısı panellerin eğim açısına yaklaştığında, daha düzenli ve istikrarlı girdaplar ile akış kararlılığı gözlenmiştir.

7.3 Karşılaştırma

Bu bölümde, bazı standartlardaki basınç dağılımını hesaplamak için kullanılan basınç katsayısı karşılaştırılmıştır. Her standart yüzeydeki net basıncı hesaplamak için denklem 7-1'i kullanır.

$$w = C_p \cdot q \quad (7-1)$$

Burada;

w : Net basınç

q : Rüzgâr basıncı

C_p : Basınç katsayısı

7.3.1 Türk standardı (TS-498)

Rüzgâr basıncı, yapının yüksekliğe bağlı olarak standarttaki çizelge 5'ten alınır. Elimizdeki güneş sisteminin yüksekliği 8 metreden az olduğu için, rüzgâr basıncı $q = 0,5 \text{ kn/m}^2$ olmuştur.

Basınç katsayısı, yapı cinsine göre standarttaki çizelge 6 ile verilmiştir. Güneş panellerine en benzer olan bina cinsi "Taşıyıcı sistemler ve taşıyıcı dolu duvarlar" 'ın 2.2-b-II kısmında bulunur. Buna göre, panellerdeki net basınç katsayısı $C_p = 1,2 \sin \alpha$ olmuştur. Burada; α Güneş panellerinin eğim açısı ve elimizdeki güneş panelleri için $\alpha = 30^\circ$ 'dir. Dolayısıyla, basınç katsayısının Türk standardına göre değeri $C_p = 0.6$ 'dır.

7.3.2 Avrupa standardı (EN 1991-1-4)

Rüzgâr basıncı, hesaplamak için denklem 7-2'i kullanılır.

$$q = [1 + 7I_{v,z}] \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_{m,z}^2 \quad (7-2)$$

Burada;

ρ : Hava yoğunluğu ($1,25 \text{ kg/m}^3$).

$I_{v,z}$: Türbülans şiddeti. Denklem 7-3 ile verilir.

$$I_{v,z} = \frac{K_1}{C_{o,z} \cdot \ln \frac{z}{z_0}} \quad (7-3)$$

Burada;

z_0 : EN 1991-1-4 Tablo 4.1'de verilen pürüz uzunluğu. Güneş enerjisi projeleri için en iyi arazi kategorisi III. Buna göre $z_0 = 0.3 \text{ m}$, $z_{min} = 3 \text{ m}$ ve genelde $z_{max} = 200 \text{ m}$ alınır.

Z: yapı yüksekliği ($\approx 2,3 \text{ m}$)

$C_{o,z}$: orografi faktörü. Orografik araziye dikkate alır. Ancak sadece düz arazi üzerinde oluşan basıncın karşılaştırılacağı için bu faktör 1 olarak alınır.

K_1 : türbülans faktörüdür ve önerilen değer 1'dir.

$$\Rightarrow I_{v,z} = \frac{1}{1. \ln \frac{2.3}{0.3}} = 0.491$$

$v_{m,z}$: elemanların yüksekliğine göre ortalama rüzgâr hızı. Denklem 7-4 ile verilir.

$$v_{m,z} = C_{r,z} \cdot C_{o,z} \cdot v_b \quad (7-4)$$

$C_{r,z}$: pürüzlülük faktörü. Denklem 6 – 5 ile verilir.

$$z \leq z_{min} \text{ için, } C_{r,z} = k_r \cdot \ln \frac{z_{min}}{z_0} \quad (7-5)$$

k_r : arazi faktörü. Pürüzlülük uzunluğuna bağlı olarak z_0 kullanılarak denklem 7-6 ile hesaplanır.

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (7-6)$$

$$\Rightarrow k_r = 0.19 \left(\frac{0.3}{0.05} \right)^{0.07} = 0.215$$

$$\Rightarrow C_{r,z} = 0.215 \cdot \ln \frac{3}{0,3} = 0.437$$

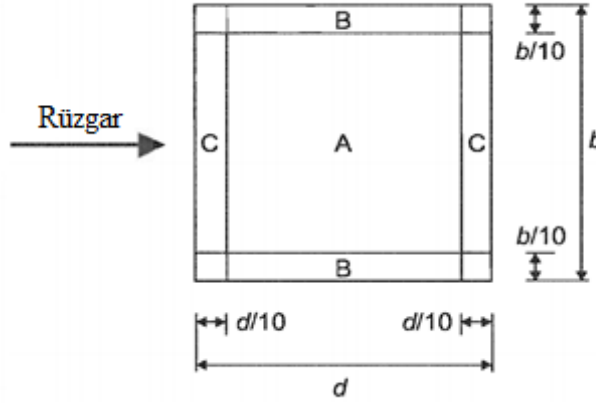
v_b : temel rüzgâr hızı. Karşılaştırma için, analiz sırasındaki kullanılan aynı hız kullanılmıştır $v_b = 28 \text{ m/s}$.

$$\Rightarrow v_{m,z} = 0.437 \cdot 1 \cdot 28 = 12.236 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow q = [1 + 7(0,491)] \cdot \frac{1,25}{2} \cdot 12.236^2 = 415.19 \text{ N/m}^2$$

$$= 0.415 \text{ KN/m}^2$$

Basınç katsayısını hesaplamak için standarttaki Tablo 7-6 kullanılmıştır. Elimizdeki güneş panelleri EN 1991-1-4 / 7.2 bölümündeki belirtilen kanopi çatılar ile karşılaştırılmıştır. Basınç katsayısının değerleri, θ çatının eğim açısına ve φ blokaj katsayısına göre verilmiştir. Ancak burada basınç katsayısı, Şekil 7.34'teki gibi yüzeye dağılmıştır. Bu nedenle, karşılaştırma amacıyla, basınç katsayılarının aritmetik ortalaması alınacaktır.



Şekil 7.34 Avrupa standardına göre yüzeydeki basınç katsayısı dağıtımı [23]

Elimizdeki güneş panelleri için $\theta = 30^\circ$, $\varphi = 0$ dır. Bu nedenle, panellerin ön yüzündeki basınç katsayısının değerleri;

A bölge için +2.2

B bölge için +3.2

C bölge için +2.4

ve arka yüzündeki basınç katsayısının değerleri;

A bölge için -3

B bölge için -3.8

C bölge için -3.6 dır. + ve - değerler, sırasıyla aşağı ve yukarı doğru hareket eden rüzgâr temsil eder. Basınç bölgelerine göre aritmetik ortalama kullanarak basınç katsayısı aşağıdaki gibi bulunur.

$$A \text{ bölge alanı} = 23.0461 \text{ m}^2$$

$$B \text{ bölge alanı} = 2.8808 \text{ m}^2$$

$$C \text{ bölge alanı} = 2.8808 \text{ m}^2$$

$$\text{Toplam alan} = 36.0096 \text{ m}^2$$

$$C_p = \frac{(C_A \cdot \text{Alan}_A) + 2 \cdot (C_B \cdot \text{Alan}_B) + 2 \cdot (C_C \cdot \text{Alan}_C) - (C'_A \cdot \text{Alan}_A) - 2 \cdot (C'_B \cdot \text{Alan}_B) - 2 \cdot (C'_C \cdot \text{Alan}_C)}{6 \cdot \text{Alan}_{\text{toplam}}}$$

$$= \frac{(2.2 \cdot 23.0461) + 2 \cdot (3.2 \cdot 2.8808) + 2 \cdot (2.4 \cdot 2.8808) - (3 \cdot 23.0461) - 2 \cdot (3.8 \cdot 2.8808) - 2 \cdot (3.6 \cdot 2.8808)}{6 \cdot 36.0096}$$

$$= -0.1333$$

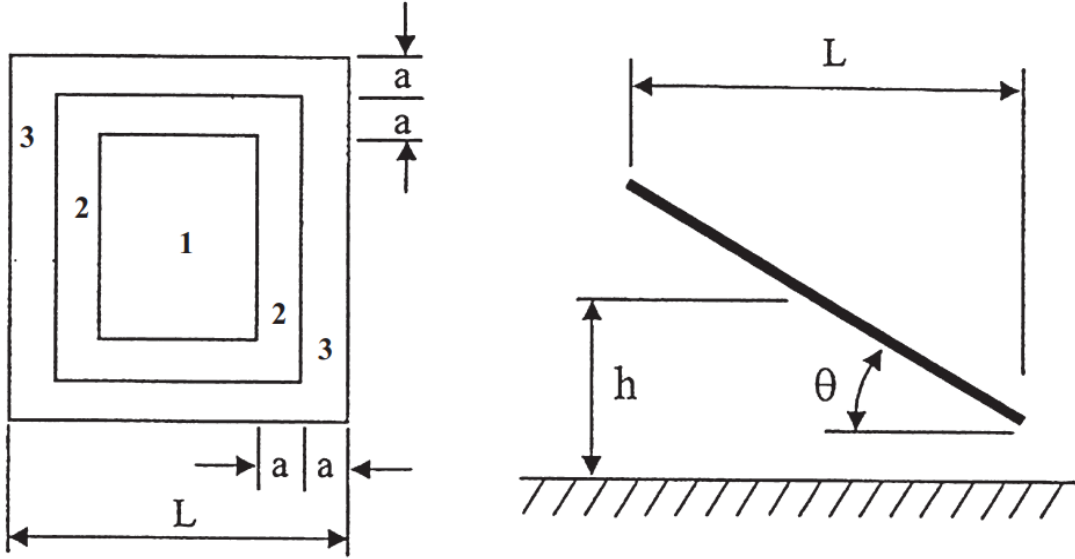
7.3.3 Amerikan standardı (ASCE7)

Amerikan standardına göre açık Binalarda Rüzgâr Yükünü Belirleme Adımları aşağıdadır:

- Adım 1: Risk kategorisini belirlemek. Standarttaki Tablo 1.5-1'e göre santrallerin projeleri sınıf III düşünülebilir. Çünkü başarısızlığı büyük bir ekonomik etkiye veya sivil hayatın bozulmasına neden olabilir.
- Adım 2: Uygulanan risk kategorisine göre temel rüzgâr hızı belirlemek. Ancak karşılaştırma için, analiz sırasındaki kullanılan aynı hız kullanılmıştır $V=28$ m/s.
- Adım 3: Rüzgâr yükü değişkenlerini belirlemek.
 - 1- Rüzgâr doğrultu faktörü (K_d). Bu faktör sadece yük kombinasyonları ile birlikte kullanıldığında uygulanır. Bu nedenle projemiz için $K_d = 1$ 'dir.
 - 2- Maruz kalma kategorisi. Standardın bölüm 26.7'sine göre elimizdeki paneller için maruz kalma kategorisi C'dir.
 - 3- Topoğrafya etki faktörü (K_{ht}). Standardın bölüm 26.8'ine göre eğer genel topoğrafide ani değişiklikler varsa topoğrafya etki katsayısı standartta belirlemiş denklem ile hesaplanır. Aksi durumlarda topoğrafik faktör 1 alınır. Standardın şekil 26.8-1'ine göre elimizdeki paneller için topoğrafya etki faktörü $K_{ht} = 1$ 'dir.
 - 4- Fırtına etki faktörü (G). Standardın bölüm 26.9'una göre 0,85 olarak alınmasına izin verilir.
- Adım 4: Rüzgâr basıncı maruz kalma katsayısını (K_h) belirlemek. Standardın çizelge 30.3-1'ine göre elimizdeki panellerin yüksekliği ve maruz kalma kategorisini için $K_h = 0.85$ 'tir.
- Adım 5: Hız basıncını (q_h) belirlemek. Bunun için denklem 7-7'i kullanılır.

$$q_h = 0.613 K_h K_{ht} K_d V^2 \quad (7-7)$$

$$\Rightarrow q_h = 0.613 \cdot 0.85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 28^2 = 408.50 \text{ N/m}^2 = 0.4085 \text{ KN/m}^2$$
- Adım 6: Net basınç katsayıları (C_N) belirlemek. Standarttaki şekil 30.8-1, tek eğimli serbest çatılar için net basınç katsayısı verir. Bu tür çatılar, güneş panellerin çok benzediği için net basınç katsayısını kullanılmıştır. Burada, yüzey Şekil 7.35'te gibi bölgelere ayrılır. Her bölümün alanına göre bu alanda etkileyecek net basınç katsayısı bulunur.



Şekil 7.35 Amerikan standardına göre yüzeydeki basınç katsayısı dağıtımını [24]

Bölgelerin etkili alanını bulmak için aşağıdaki kontrolleri yapılmıştır:

$$0.25 \leq \left(\frac{h}{L} = \frac{1.45}{2.9} = 0.5\right) \leq 1$$

$$\left. \begin{array}{l} 4\% \cdot L = 0.04 \cdot 2.9 = 0.116 \text{ m} \\ 0.9 \text{ m} \end{array} \right\} \leq a = \text{minimum} \left\{ \begin{array}{l} 10\% \cdot L = 0.29 \\ 0.4 h = 0.4 \cdot 1.45 = 0.58 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow a = 0.9 \text{ m}$$

Elimizdeki paneller $a = 0,9$ çıktığı için sadece iki bölgeye (1,2) bölünecek. Bu iki bölgenin alanı:

$$A_1 = 10.23 \text{ m}^2 > 4 a^2 = 3.24 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 21.96 \text{ m}^2 > 4 a^2 = 3.24 \text{ m}^2$$

Buna göre bölgelerin iki yüzünün net basınç katsayılarının aynı olduğu bulunmuştur. Başka bir deyişle, basınç yüzeylere tutarlı dağılacaktır. Sonunda, panellerin ön yüzündeki net basınç katsayısı +2,6 ve arka yüzündeki net basınç katsayısı -2,5 olarak bulunmuştur. Artı işareti, üst çatı yüzeyine doğru hareket eden basınçları ifade eder. Eksi işareti, üst çatı yüzeyinden uzağa hareket eden basınçları ifade eder. Bu nedenle, ortalama net basınç $C_N = 2.6 - 2.5 = 0.1$ 'dir.

Tek eğimli çatılara sahip açık binaların bileşen elemanları için net tasarım rüzgâr basıncı, aşağıdaki denklemde belirlenir.

$$p = q_h G C_N \quad (7-8)$$

Ancak diğer standartlarla karşılaştırmak için $G C_N = C_p$ olarak alınmıştır. Buna göre $C_p = 0.85 \cdot 0.1 = 0.085$ olarak bulunur.

7.3.4 HAD sonuçlarına göre

Standartlarda, önce basınç katsayısı ve rüzgâr tasarım basıncı hesaplanır daha sonra net basınç yüzeylere uygulanır. Panellere basınç uygulandıktan sonra yapı analiz edilir ve reaksiyonlar hesaplanır.

Fakat yapılan analizlerde, basınç katsayısı ters yol ile bulunmuştur. Kuvvet reaksiyonları ele aldıktan sonra, değerleri toplanarak ve panellerin toplam alanına bölerek panellere etki eden net basınç elde edilmiştir. Bu durumda, tek duran panellerinin yüklenmesinden kaynaklanan reaksiyonlar alındı. Tüm modeller için panellerdeki net basıncı Çizelge 7.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 Tüm modeller için panellerdeki net basıncı

Arazi eğim açısı derece	Reaksiyon toplamı (kN)	Paneller alanı (m ²)	Net basıncı (w) (kN/m ²)
0	13.2751	36	0.3687
10	9.5804	36	0.2661
20	6.9853	36	0.1940
30	2.7633	36	0.0767

Standartlarda kullanılan basınç katsayısının değerini doğrulamak için standardın aynı rüzgâr basıncı kullanılmıştır. Simülasyondan kaynaklanan basınç katsayısını elde etmek için yukarıdaki elde edilen net basınç değerleri, standardın elde edilen basınç değerlerine bölünmüştür. Simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları standartlara göre Çizelge 7.9, 7.10 ve 7.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.9 Türk standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları

Standardın Basınç Katsayısı (C)	Standardın Rüzgâr Basıncı (q)	Analize Göre Basınç Katsayısı	Analizin Net Basıncı (w)
0.6	0.5	0.7373	0.3687
0.6	0.5	0.5321	0.2661
0.6	0.5	0.3880	0.1940
0.6	0.5	0.1535	0.0767

Çizelge 7.10 Avrupa standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları

Standardın Basınç Katsayısı (C)	Standardın Rüzgâr Basıncı (q)	Analize Göre Basınç Katsayısı	Analizin Net Basıncı (w)
-0.1333	0.415	0.8883	0.3687
-0.1333	0.415	0.6411	0.2661
-0.1333	0.415	0.4674	0.1940
-0.1333	0.415	0.1849	0.0767

Çizelge 7.11 Amerikan standardının rüzgâr basıncına göre simülasyonlardan kaynaklanan basınç katsayıları

Standardın Basınç Katsayısı (C)	Standardın Rüzgâr Basıncı (q)	Analize Göre Basınç Katsayısı	Analizin Net Basıncı (w)
0.085	0.4085	0.9025	0.3687
0.085	0.4085	0.6513	0.2661
0.085	0.4085	0.4749	0.1940
0.085	0.4085	0.1879	0.0767

Yukarıdaki çizelgeler kontrol edilerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1- Türk standardına göre, basınç tüm yüzeye tutarlı bir şekilde dağıtılmaktadır. Bunun simülasyon sonuçlarına aykırı olduğu görülmüştür.
- 2- Avrupa standardına göre, yüzeydeki basınç dağılımı değişkendir ve yüzey bölgelerine göre dağıtılmıştır. Bu durum simülasyon sonuçlarıyla biraz uyumludur.
- 3- Amerikan standardına göre, yüzeydeki basınç dağılımı genelde değişkendir. Ancak elimizdeki verilere göre, basınç dağıtımı sabit bir şekle dönüşmüştür ve bunun simülasyon sonuçlarına aykırı olduğu görülmüştür.
- 4- Türk ve Amerikan Standardına göre basınç katsayısı pozitifdir, bu da rüzgârın panellere doğru basınç oluşturduğu anlamına gelmektedir. Bu durum, simülasyon ve deney tarafından oluşturulan yük durumu ile uyumludur.
- 5- Avrupa Standardına göre basınç katsayısı negatiftir, bu da rüzgârın kaldırma oluşturduğu anlamına gelmektedir. Bunun nedeni, panellerin arka yüzeylerindeki Standarttaki basınç katsayısının ön yüzeylerden daha büyük olmasıdır. Bu durum, simülasyon ve deney tarafından oluşturulan yük durumu ile uyumsuzdur.

- 6- İncelenen standartlar için, simülasyondan kaynaklanan basınç katsayısının standarttaki basınç katsayısından bir dereceye kadar büyük olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, standart tarafından verilen basınç katsayısı güvensiz olabilir.
- 7- Analizden kaynaklanan basınç katsayısının, arazi eğim açısının artmasıyla azaldığı da gözlenmiştir. Standartta verilen basınç katsayısı sabit kalmıştır ve arazinin eğim açısındaki değişiklikten etkilenmemiştir.
- 8- Amerikan standardı, rüzgâr tüneli testinin özel yapılar için kullanıldığını belirtir [25]. Enerjisi santrallerindeki güneş panelleri bu özel yapılar arasında düşünülebilir. Bu nedenle, bu panelleri tasarlamak için en iyi çözüm, rüzgâr tüneli testine benzeyen simülasyon yöntemlerini kullanmaktır.
- 9- Basınç katsayıları ışığında, Türk standardı, Amerikan standardı, simülasyon ve deneyden kaynaklanan basınç katsayılarının hepsinin basınç durumu verdiği görülmüştür. Ancak Avrupa standardından kaynaklanan basınç katsayısının kaldırma durumu verdiği görülmüştür.
- 10- Basınç katsayısı, arazinin eğim açısına göre değişir, bu yüzden standartlar rüzgâr hesabında bunu dikkate almalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Söylemez, F. (N.D.). Güneş Enerji Sistemleri (GES). (Erişim Tarihi: 10.05.2019)
<https://www.linkedin.com/pulse/güneş-enerji-sistemleri-ges-fatih-soylemez>.
(2017)
- [2] Charabi, Y., Rhouma, M. B. H., & Gastli, A. (2016). Siting Of PV Power Plants On Inclined Terrains. *International Journal Of Sustainable Energy*, 35(9), 834-843.
- [3] USLU, V. E. (2014). Computational Fluid Dynamic Analysis Of Wind Loads Acting On Ground Mounted Solar Panels (Doctoral Dissertation, M. Sc. Thesis, 117 Pp., Nat. Appl. Sci., Middle East Technical Univ., Turkey).
- [4] Assmus, M., & Koehl, M. (2012). Experimental Investigation Of The Mechanical Behavior Of Photovoltaic Modules At Defined Inflow Conditions. *Journal Of Photonics For Energy*, 2(1), 022002.
- [5] Raghuvendra Singh Som, Rishabh Sharma, Harshit Tripathi. (2016). Stability And Stress Analysis Of Solar Array Structure. *IJATES International Journal Of Advanced Technology In Engineering And Science*, 2348-7550.
- [6] Y. MÜH. İbrahim Koç Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Ders Notları (2014).
- [7] Karaoğlu, İ., Cn-235 Casa Uçağı Kıvrık Kanat Tasarımının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzak Teknolojileri Enstitüsü. İstanbul. 49s (2015).
- [8] Yusuf Berktaş Bir Sesaltı Rüzgâr Tüneli İçerisine Yerleştirilmiş Naca0012 Kanadının Sayısal Analizi Haziran 2012.
- [9] Fletcher, C. A. (2003). *Computational Techniques For Fluid Dynamics 2: Specific Techniques For Different Flow Categories*. New York: Springer-Verlag.
- [10] Özcan, O.A., Uçak Kanatların CFD Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 60s (2004).
- [11] FLUENT, ANSYS. Release 15.0. Theory Guide, November, 2013.
- [12] Okan, M. İki Boyutlu Bir Profil Etrafındaki Türbülanslı Akışın İncelenmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 92s (2002).
- [13] Spalart. P.R. Ve Allmaras. S.R. “A One-Equation Turbulence Model For Aerodynamic Flows.” In 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. AIAA-92-0439. Reno. NV. 6-9 Jan. 1992.

- [14] Hakan Telli Arka Gövde Eklentileri ile C-130'e Uçağı Basınç Sürüklemesinin Azaltılmasının Sayısal Olarak İncelenmesi Haziran 2014.
- [15] SÖYLEMEZ, İ., ARAÇLARDA AERODİNAMİK TASARIMIN ÖNEMİ VE ANSYS FLUENT İLE ANALİZİ. Bitirme Çalışması. Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü. 56s (2015).
- [16] Statik Analiz. (N.d.). (Erişim tarihi: 20.05.2019) <http://www.cfdanaliz.com/statik-analiz/statik-analiz/> . (2019)
- [17] Material Property Definitions. (N.d.). (Erişim tarihi: 01.06.2019) <https://www.princeton.edu/~dynaflow/femgy/manuals/preansy/node25.htm> . (1999)
- [18] Contact Definition- Contact Types in ansys. (Erişim tarihi: 15.05.2019) [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_sim/ds>Contact Definition.html#ds>Contact Types](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_sim/ds>Contact%20Definition.html#ds>Contact%20Types) . (2015).
- [19] Static Structural Analysis. (Erişim tarihi: 25.04.2019) http://mguler.etu.edu.tr/WB-Mech_120_Ch04_Static.pdf. (2009)
- [20] PİŞKİN, Ş., HESAPLAMALI BİLİM VE MÜHENDİSLİKTE ÖZEL KONULAR; MESH ÜRETİMİ. ÖDEV. İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ. 39s (2002).
- [21] Munoz, G. A. (n.d.). MESHING METHODS IN ANSYS WORKBENCH 16.0. (erişim tarihi: 27.05.2019) https://www.academia.edu/16969929/MESHING_METHODS_IN_ANSYS_WORKBENCH_16.0 . (2015).
- [22] Boundary Conditions for FEM. (Erişim tarihi: 15.05.2019) <http://home.ku.edu.tr/~akabakcioglu/teaching/math506/fem.pdf>
- [23] EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-4 ... www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf.
- [24] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Published by American Society of Civil Engineers, 2013.
- [25] Simiu, Emil, and Emil Simiu. Design of Buildings for Wind: a Guide for ASCE 7-10 Standard Users and Designers of Special Structures. Wiley, 2011.
- [26] Lift (force) facts for kids. (Erişim tarihi: 20.07.2019) [https://kids.kiddle.co/Lift_\(force\)](https://kids.kiddle.co/Lift_(force))

EKLER

EK-A 10° eğimli arazi için HAD simülasyonu sonuçları

A1. Güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları

A2. Güneş panelleri üzerindeki akış çizgileri

EK-B 20° eğimli arazi için HAD simülasyonu sonuçları

B1. Güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları

B2. Güneş panelleri üzerindeki akış çizgileri

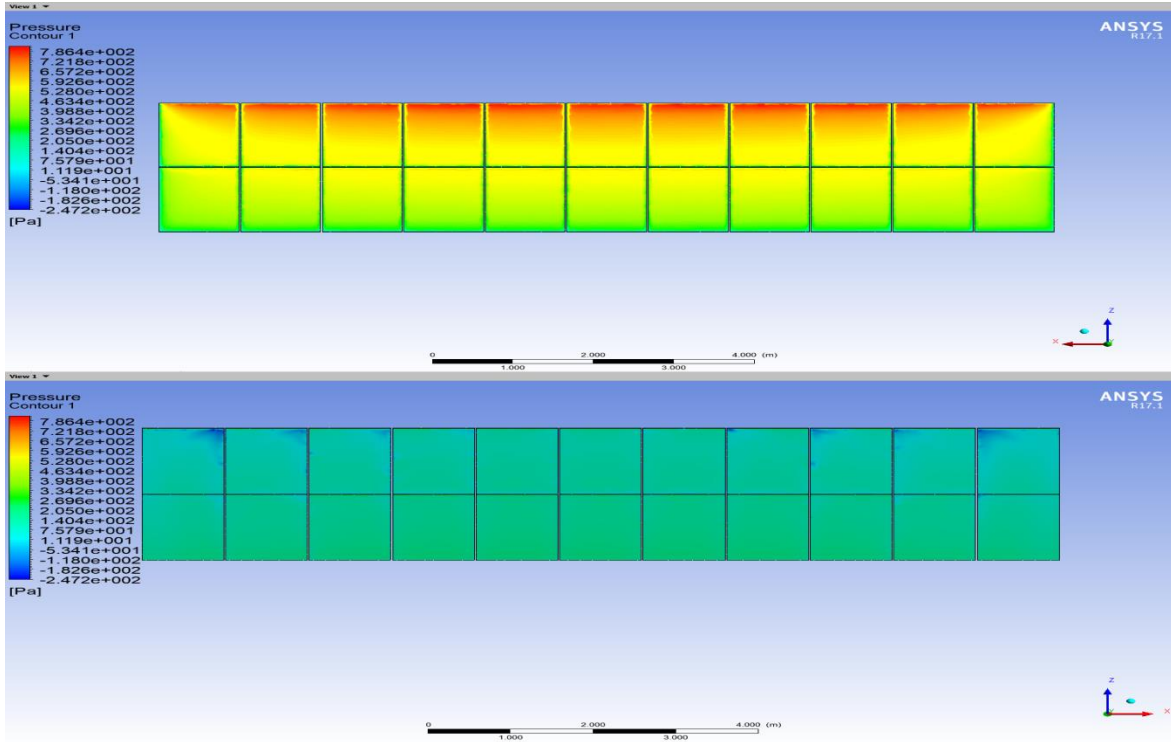
EK-C 30° eğimli arazi için HAD simülasyonu sonuçları

C1. Güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları

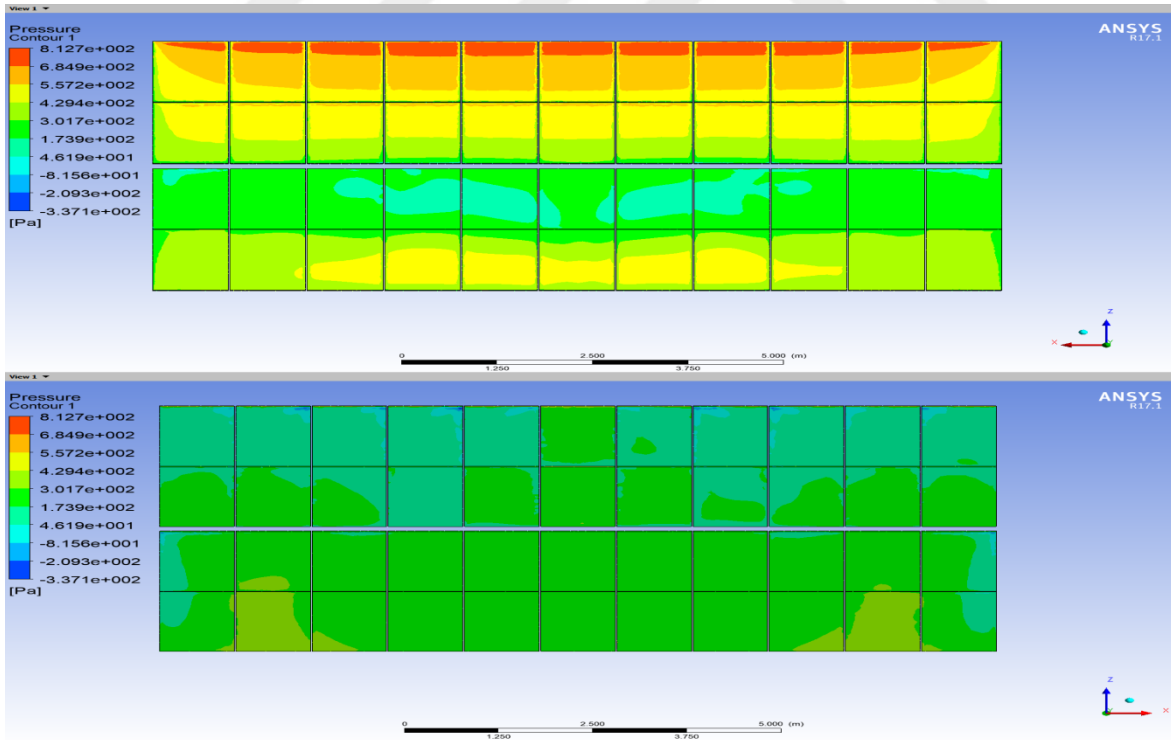
C2. Güneş panelleri üzerindeki akış çizgileri

EK-D Doğrusal olmayan statik analizi raporu

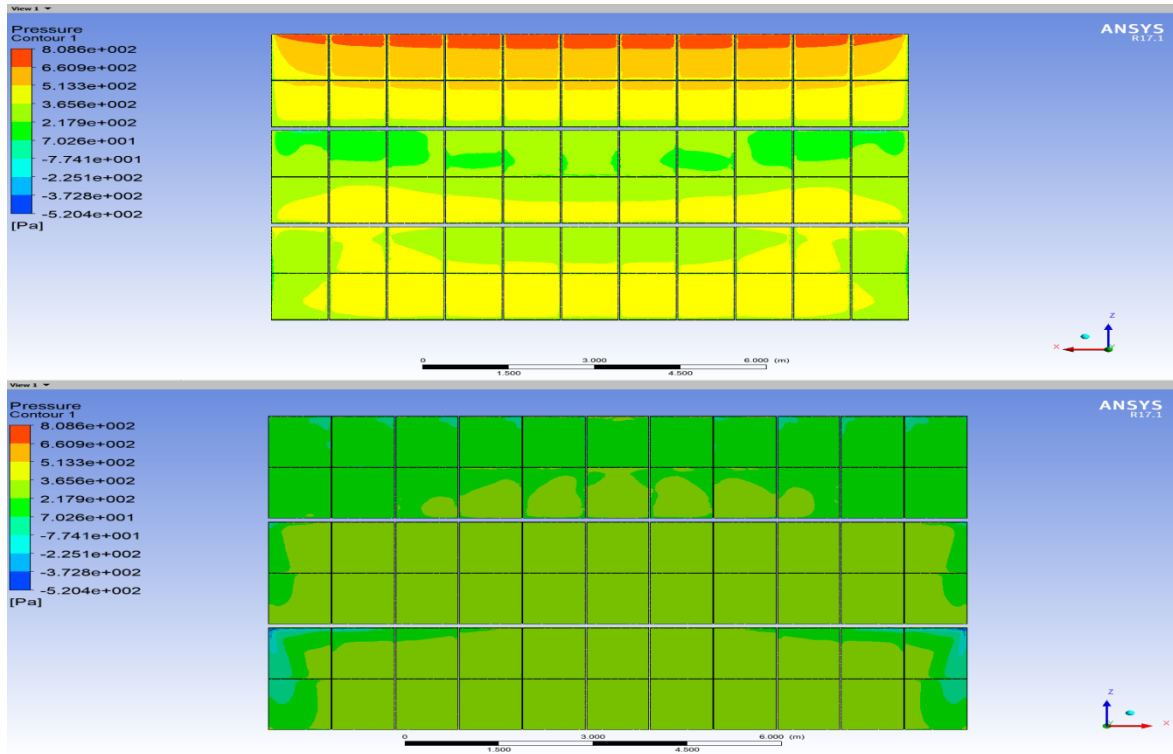
EK-A1 10° eğimli arazi için güneş panelleri üzerindeki basınç dağılımları



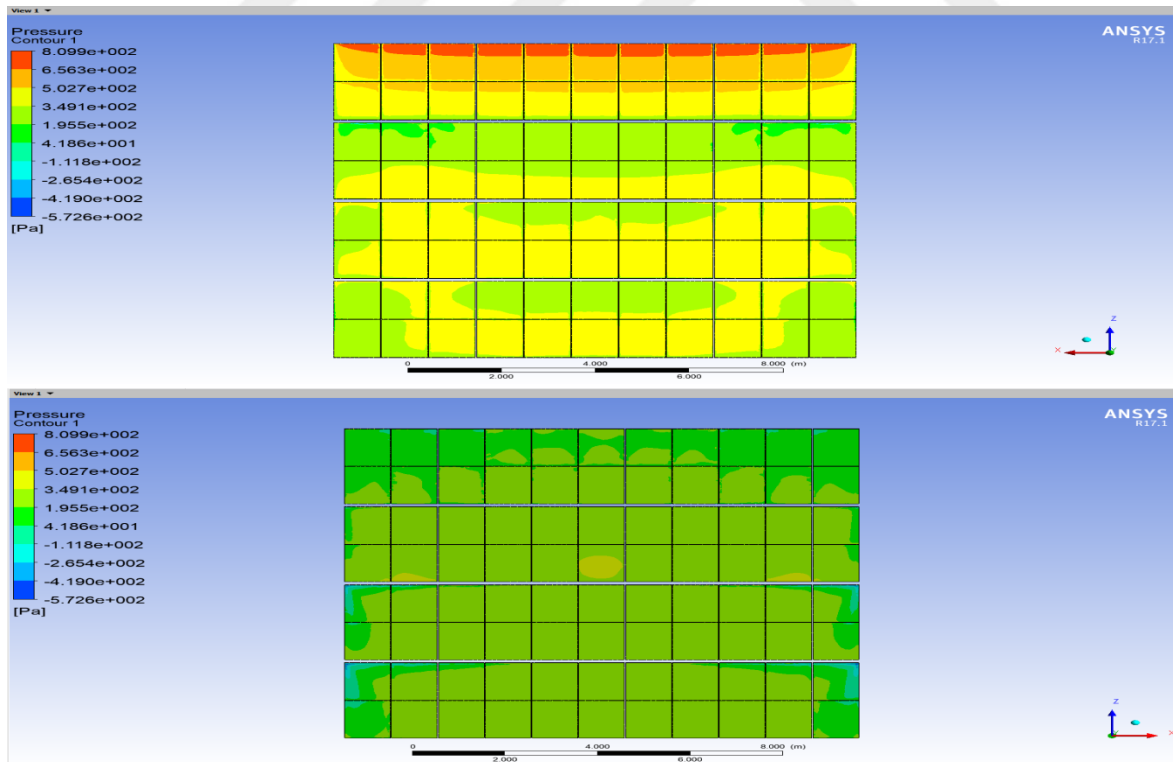
Şekil A1.1 10° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



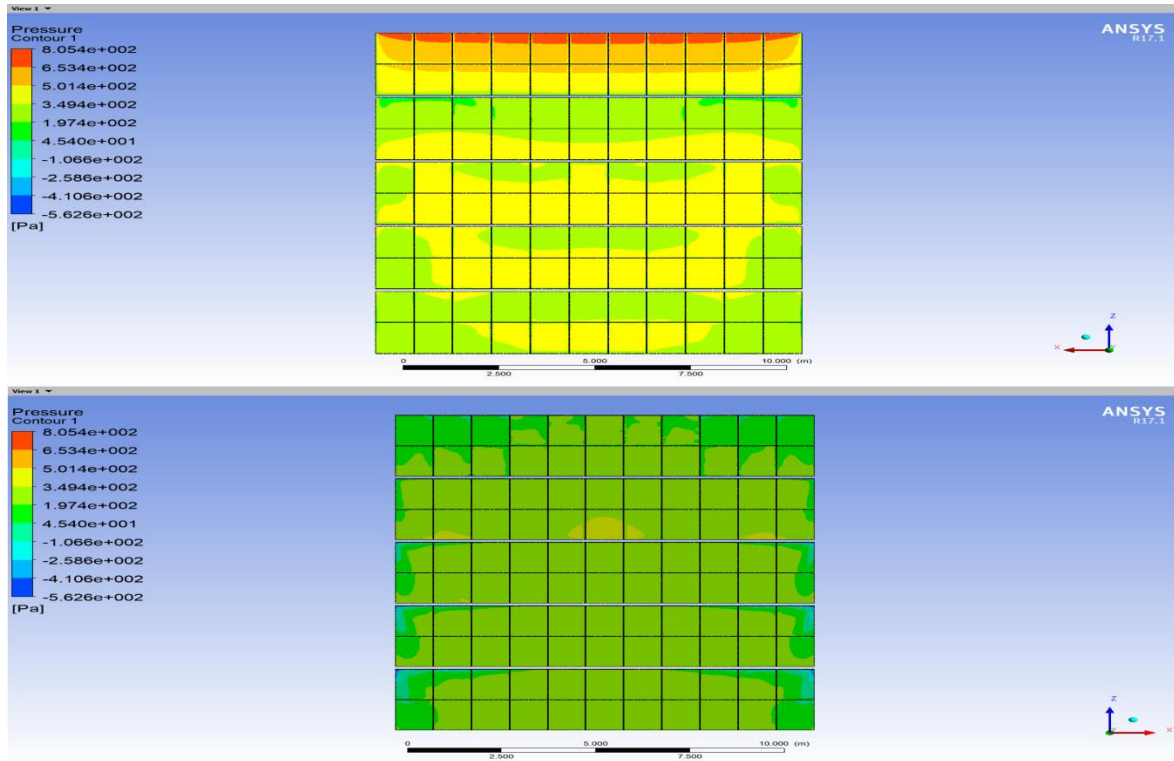
Şekil A1.2 10° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



Şekil A1.3 eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

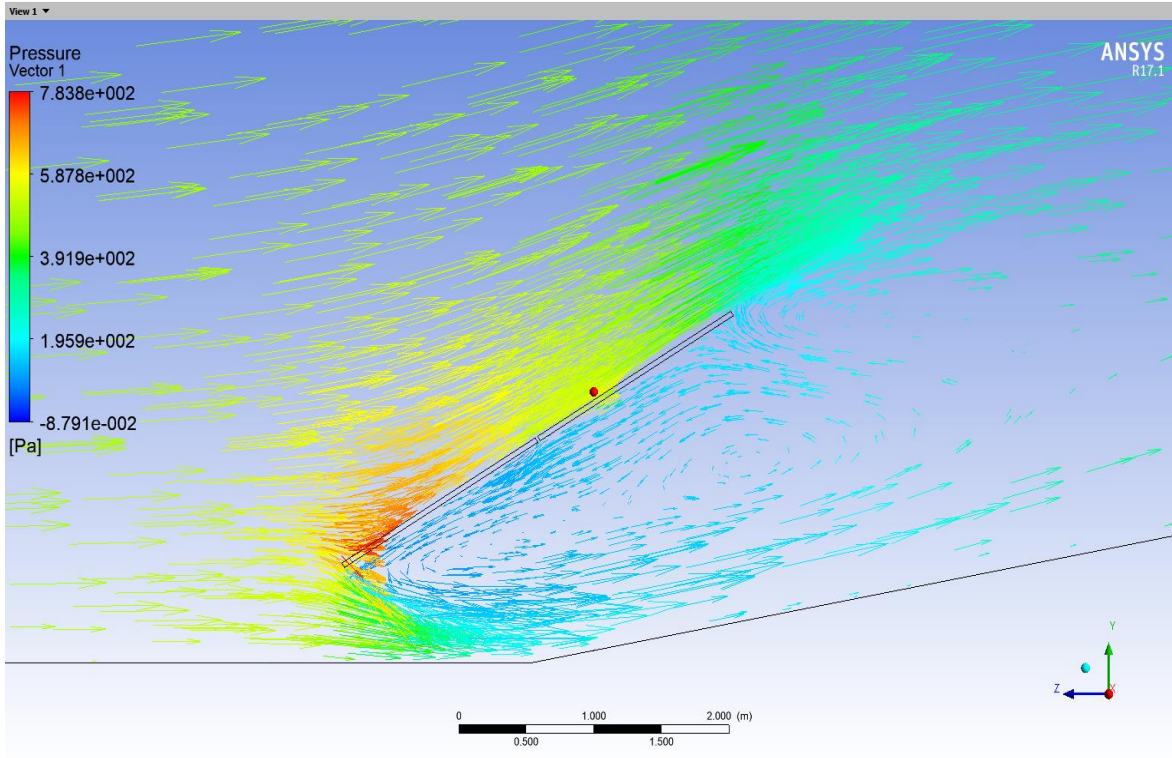


Şekil A1.4 10° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

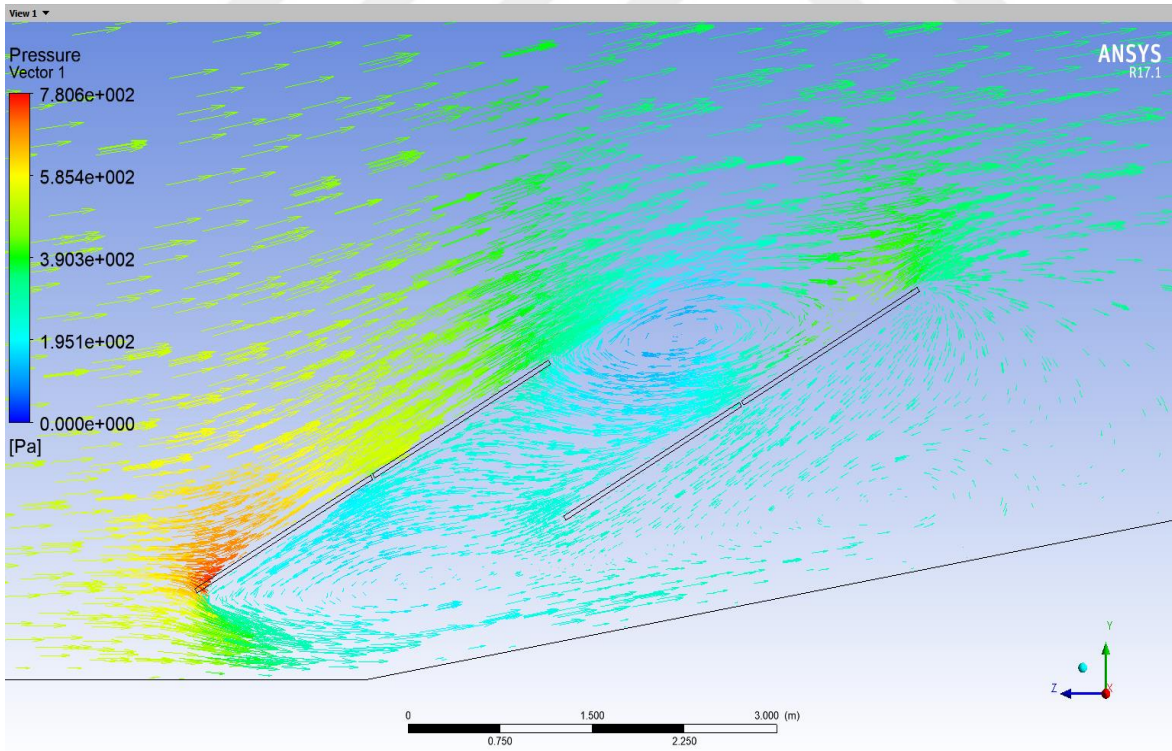


Şekil A1.5 10° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

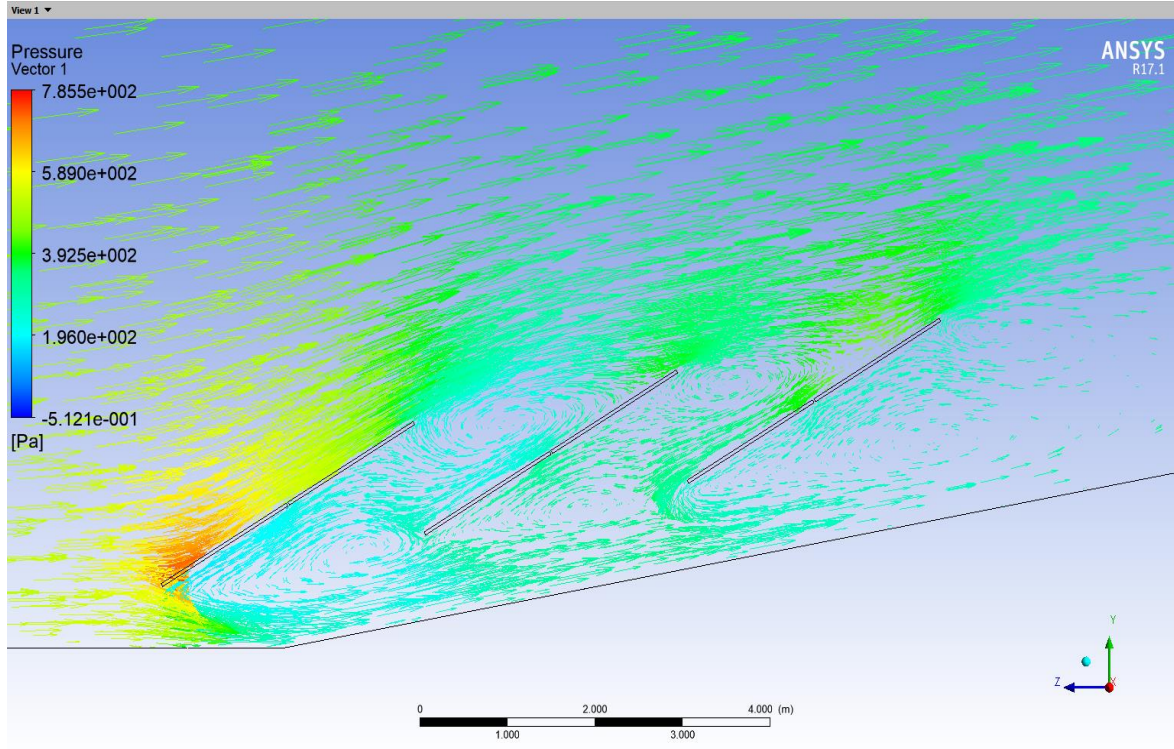
EK-A2 10° eğimli arazi için güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



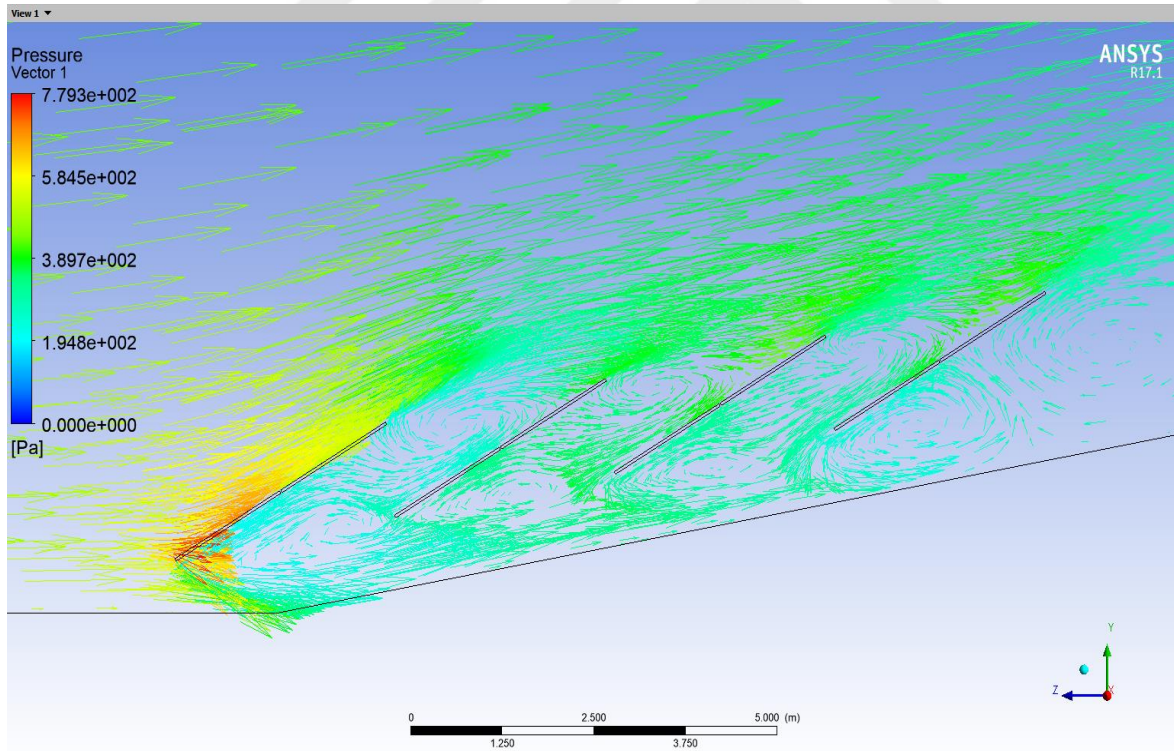
Şekil A2.1 10° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



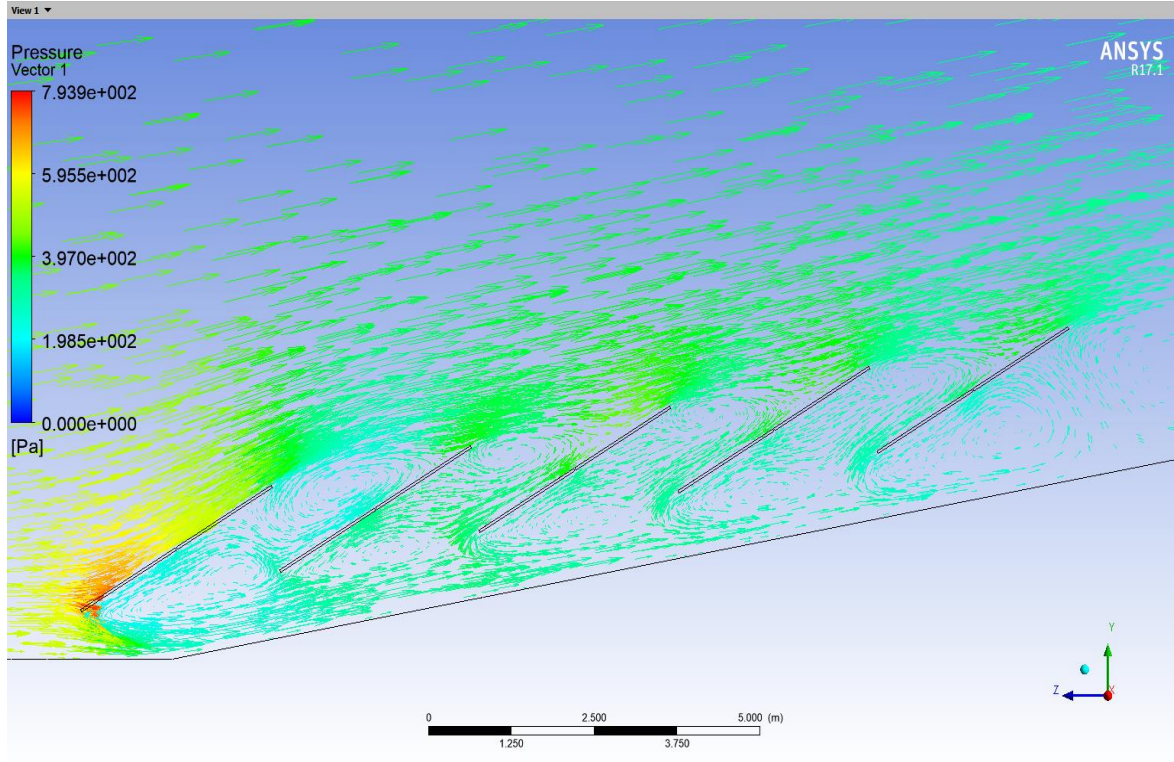
Şekil A2.2 10° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



Şekil A2.3 10° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

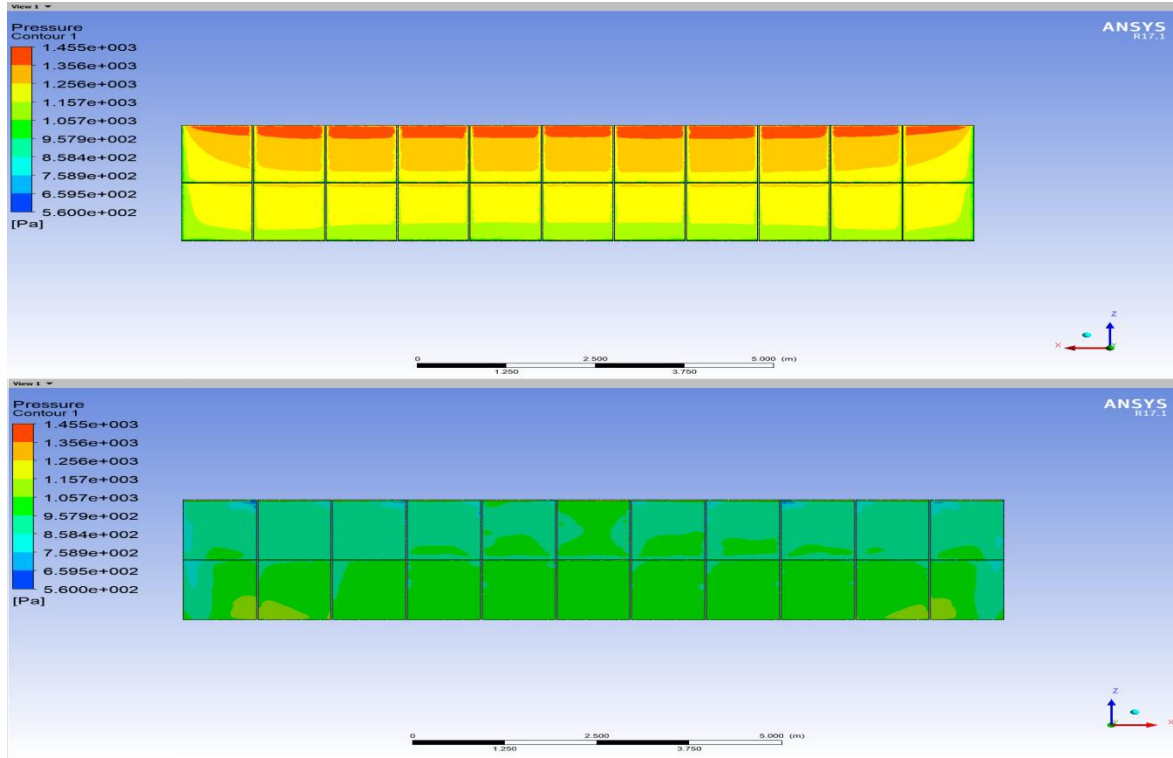


Şekil A2.4 10° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

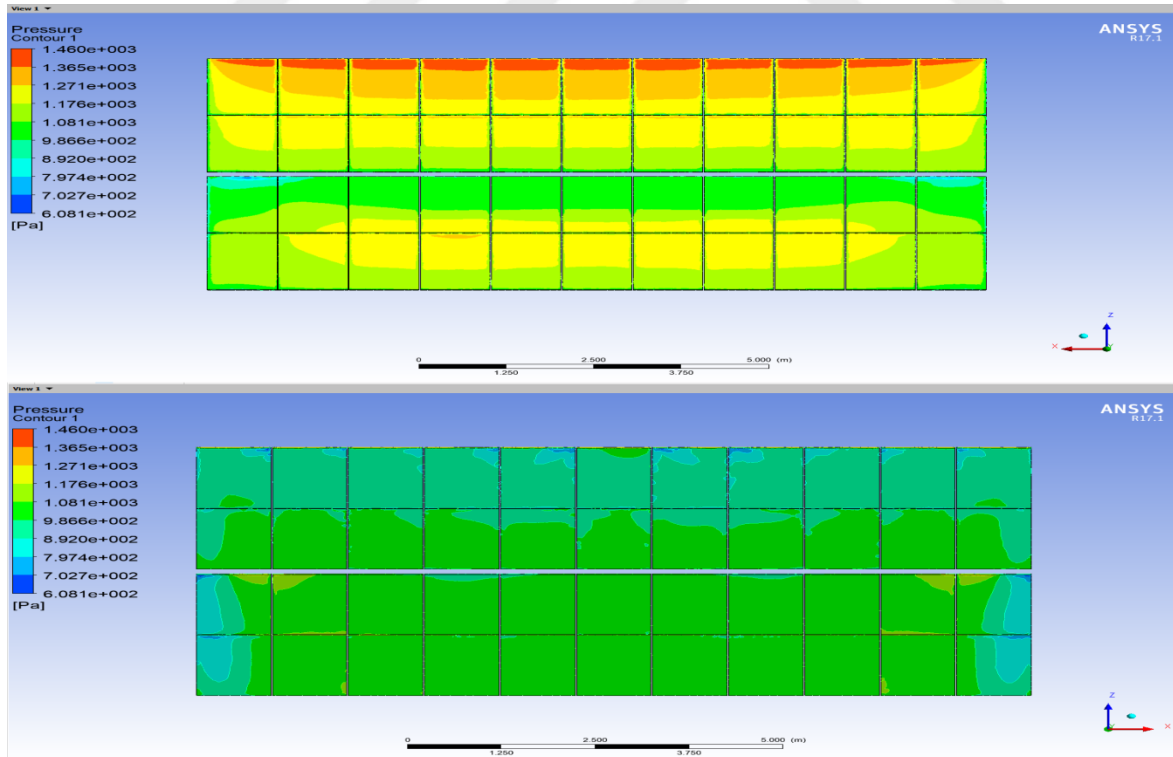


Şekil A2.5 10° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

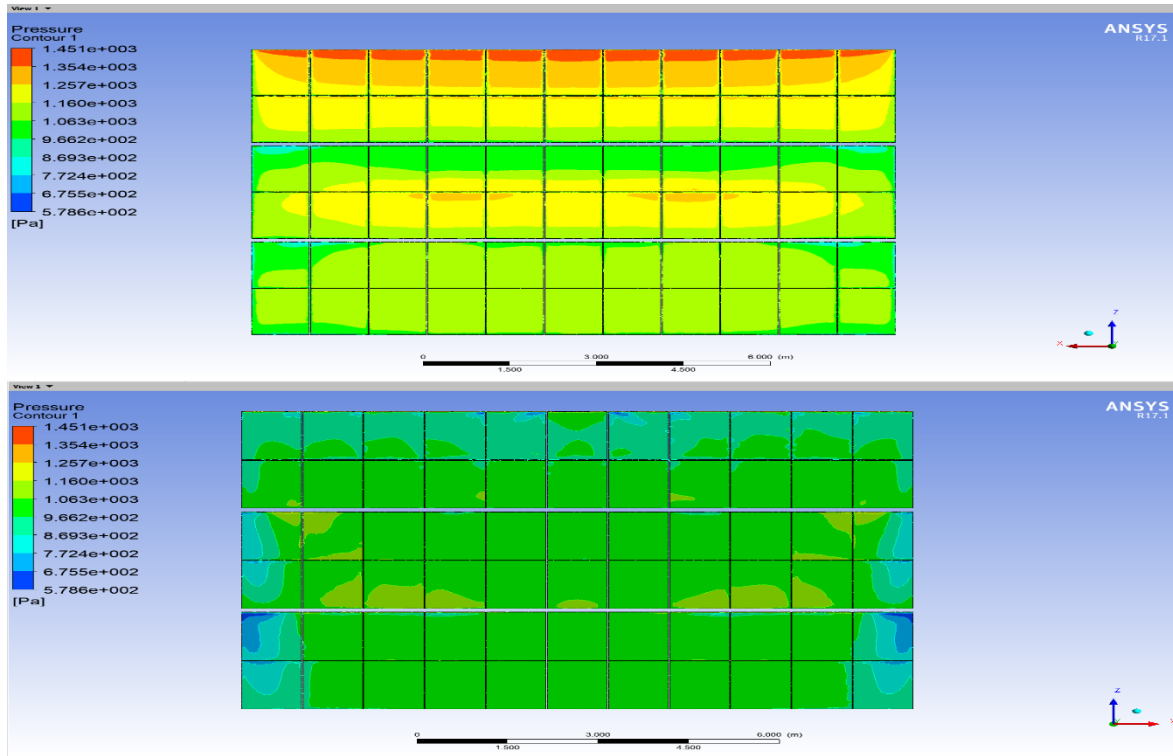
EK-B1 20° eğimli arazi için güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



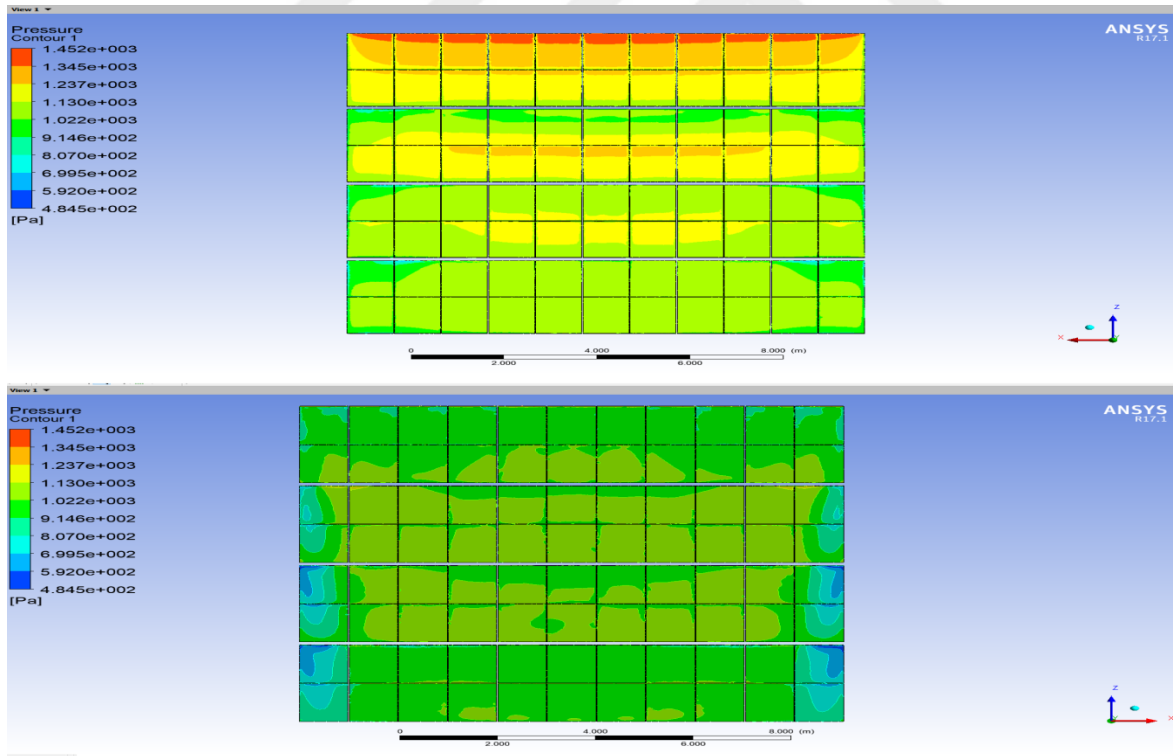
Şekil B1.1 20° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



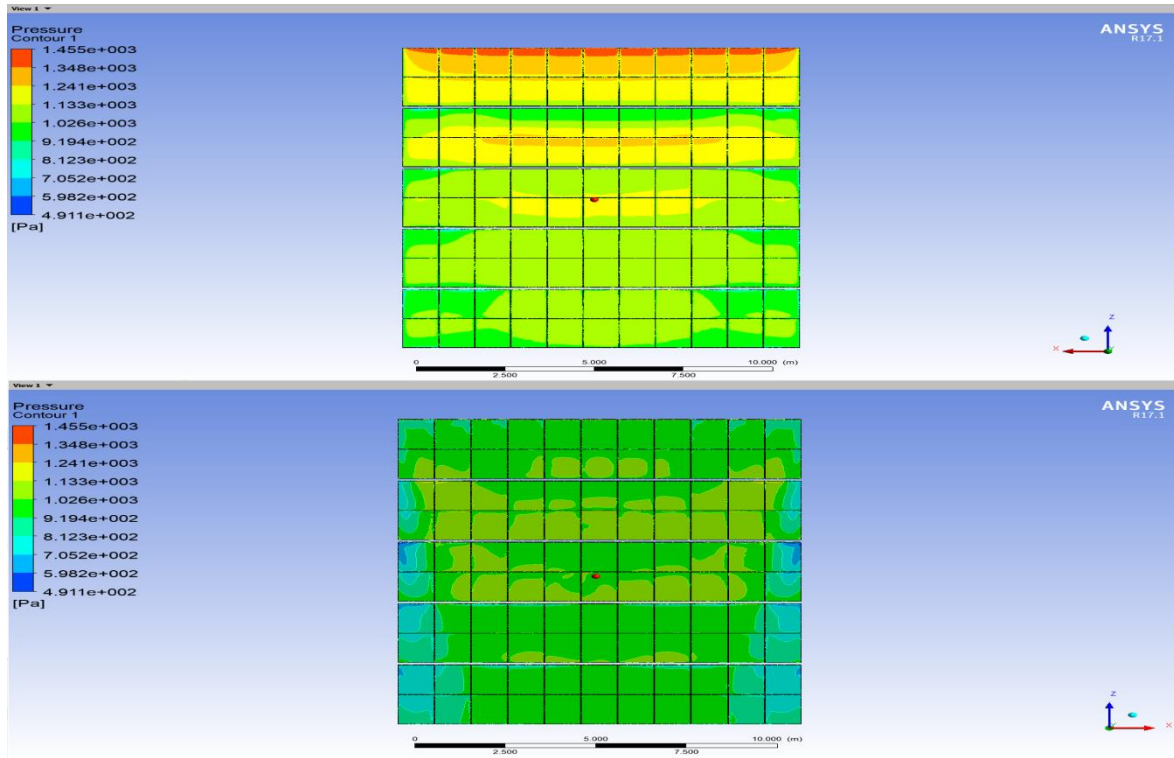
Şekil B1.2 20° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



Şekil B1.3 20° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

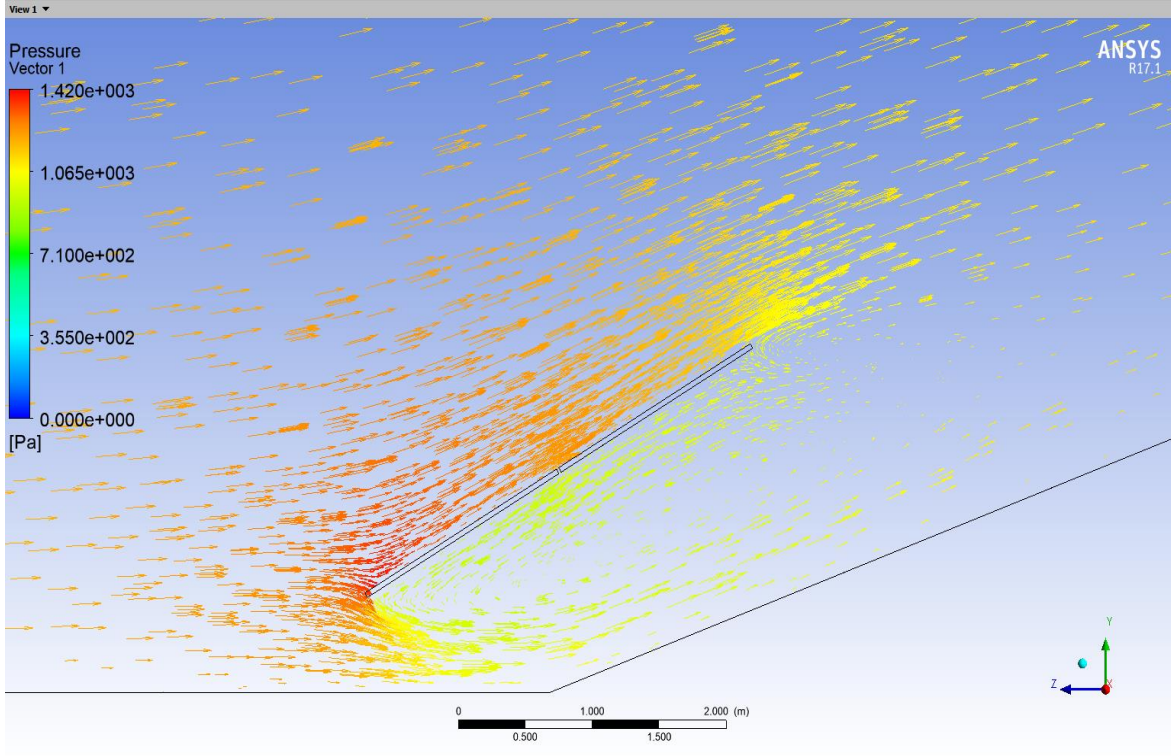


Şekil B1.4 20° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

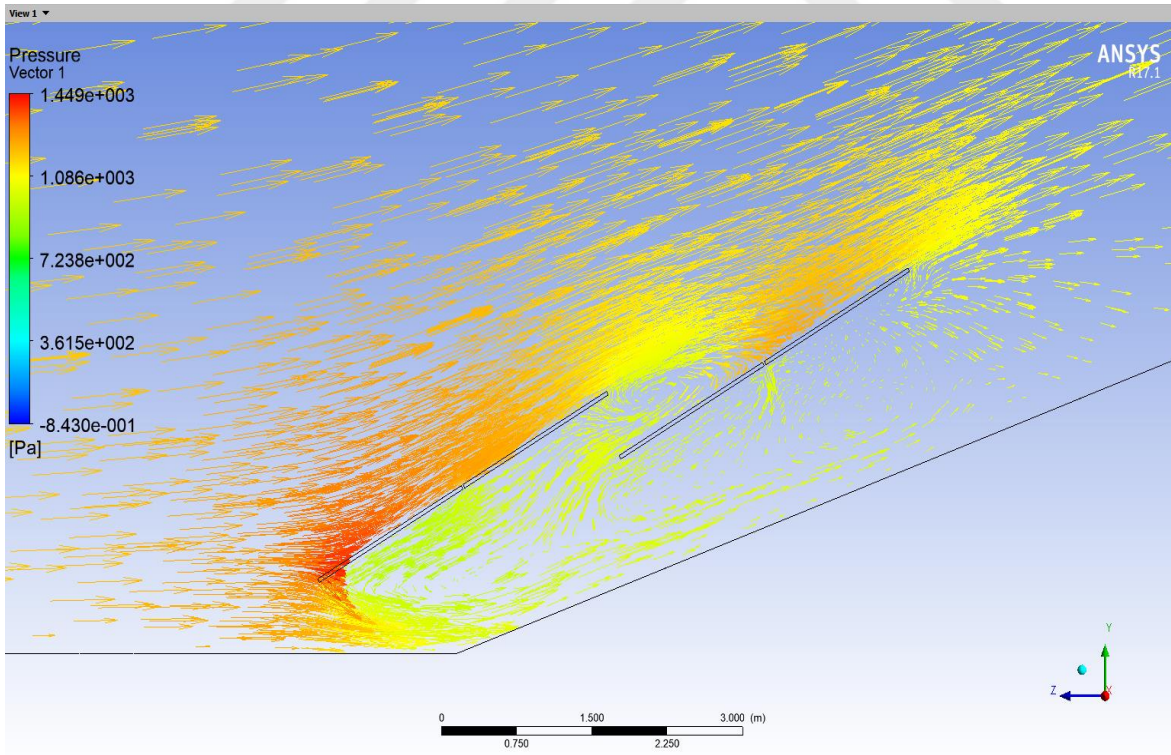


Şekil B1.5 20° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

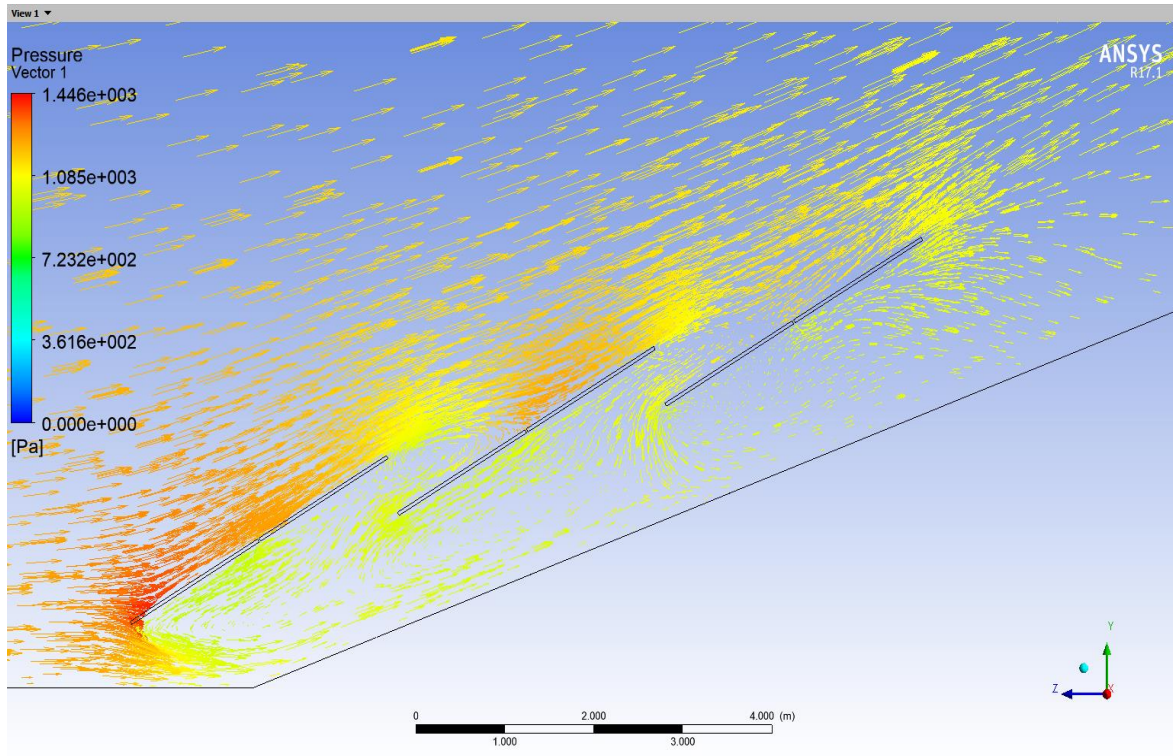
EK-B2 20° eğimli arazi için güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



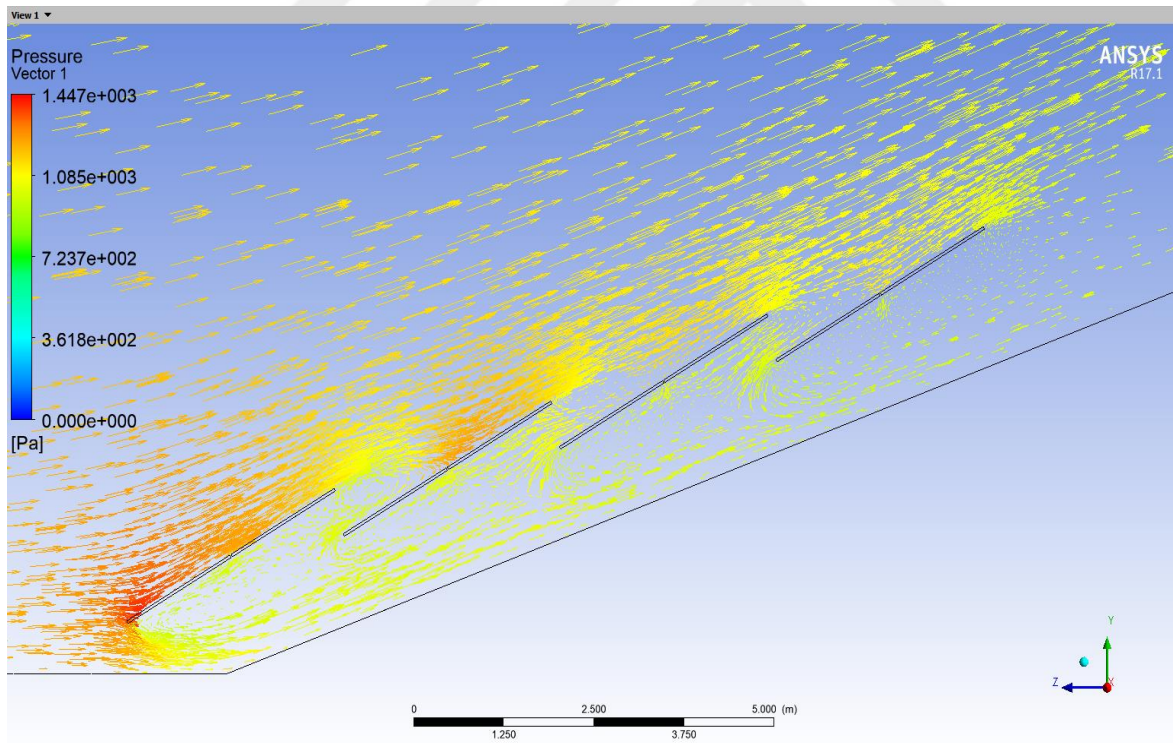
Şekil B2.1 20° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



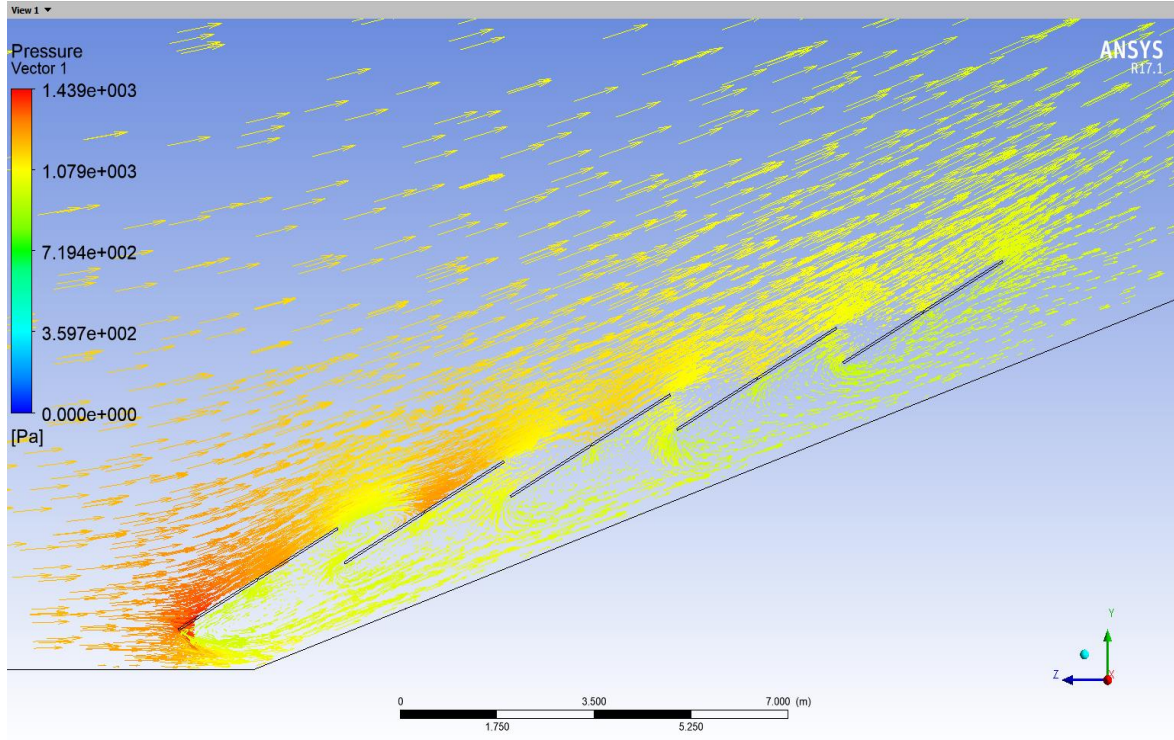
Şekil B2.2 20° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



Şekil B2.3 20° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

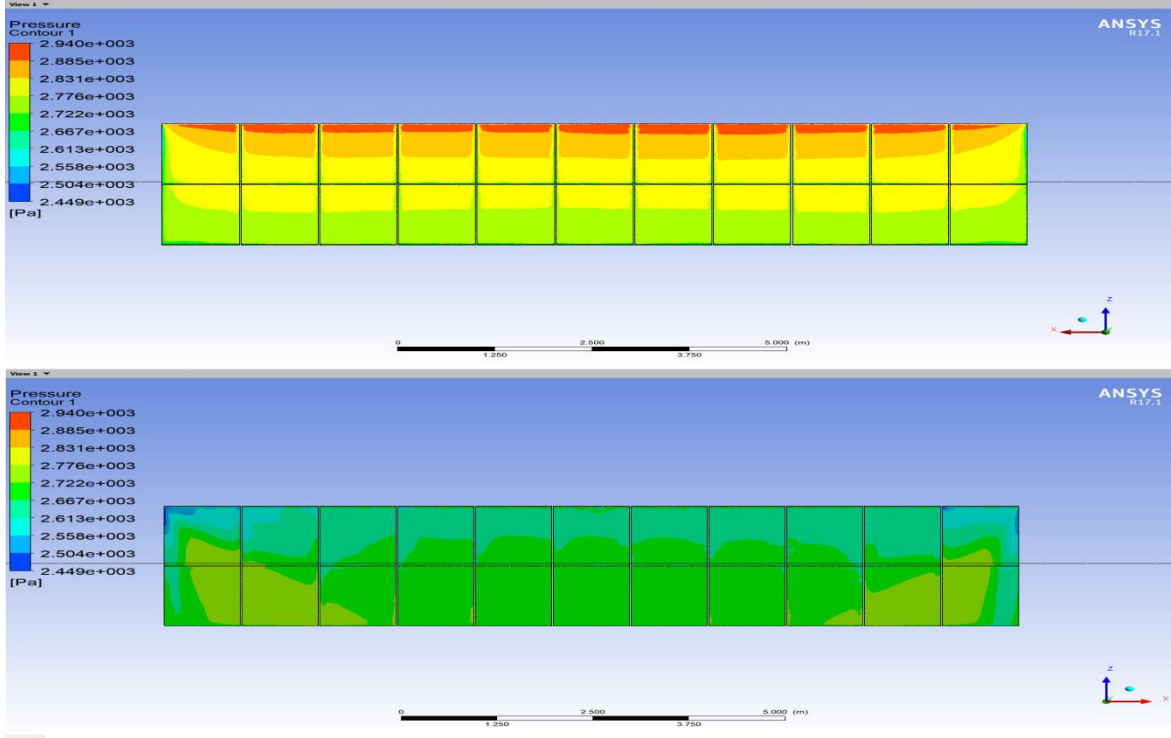


Şekil B2.4 20° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

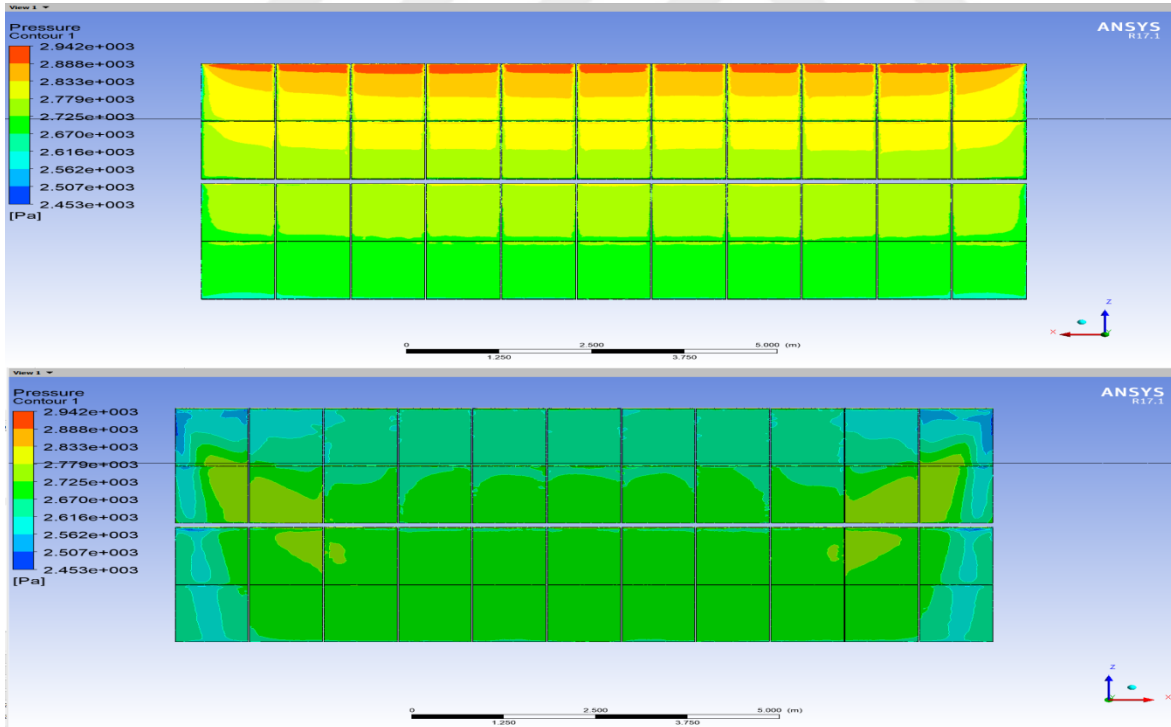


Şekil B2.5 20° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

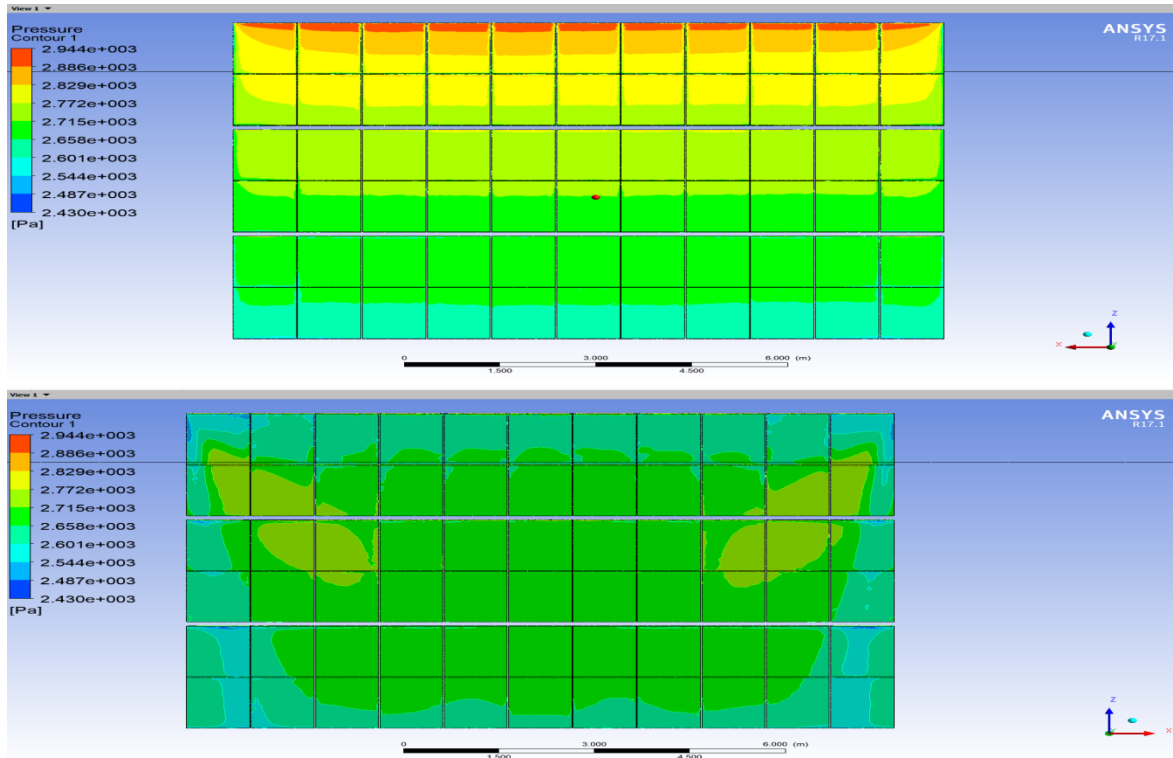
EK-C1 30° eğimli arazi için güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



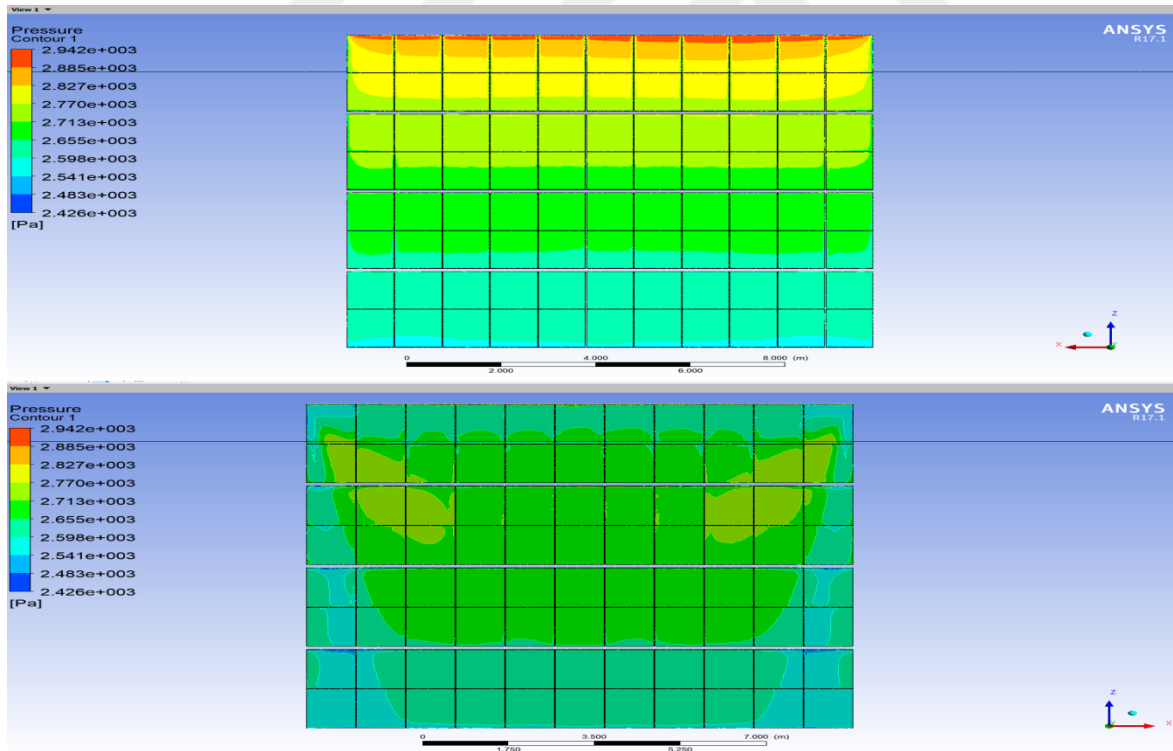
Şekil B2.6 30° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



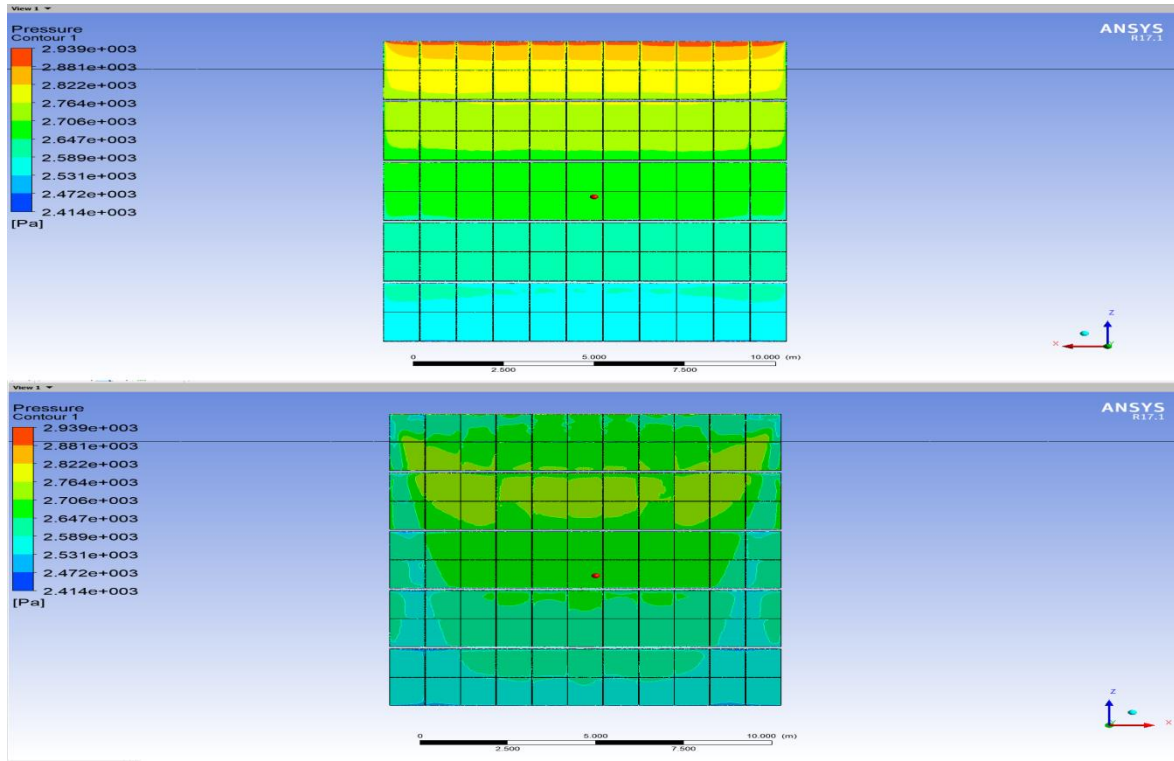
Şekil B2.7 30° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı



Şekil B2.8 30° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

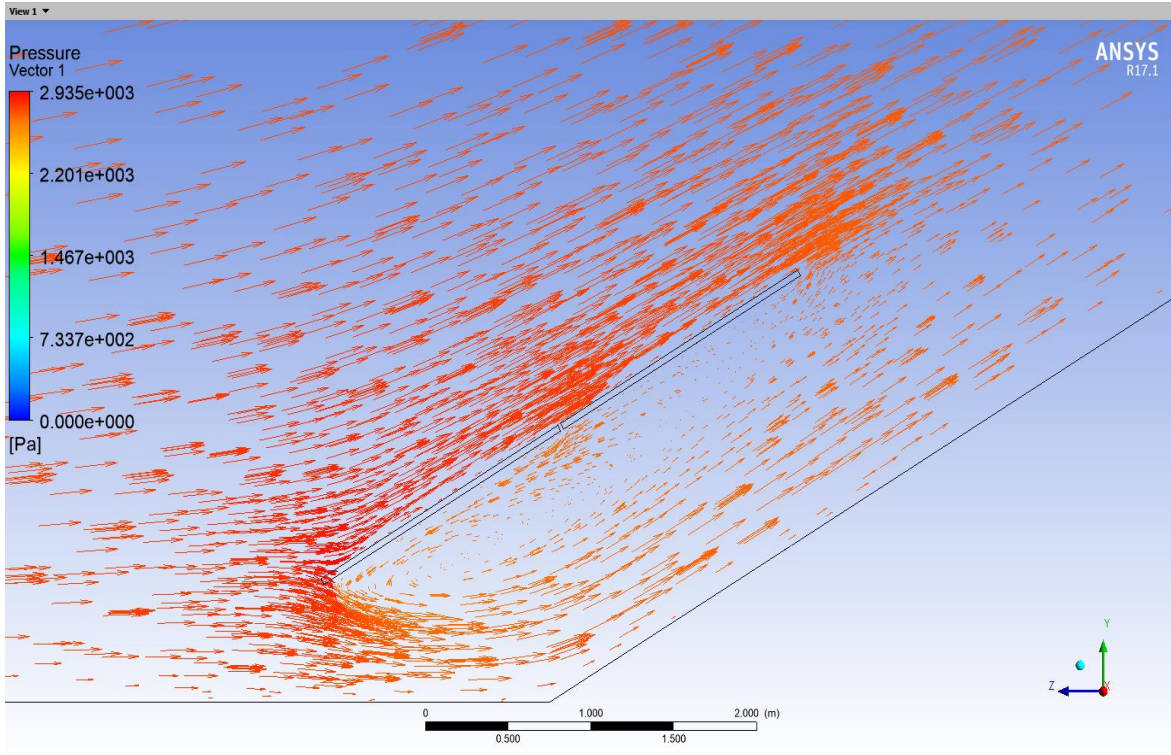


Şekil B2.9 30° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

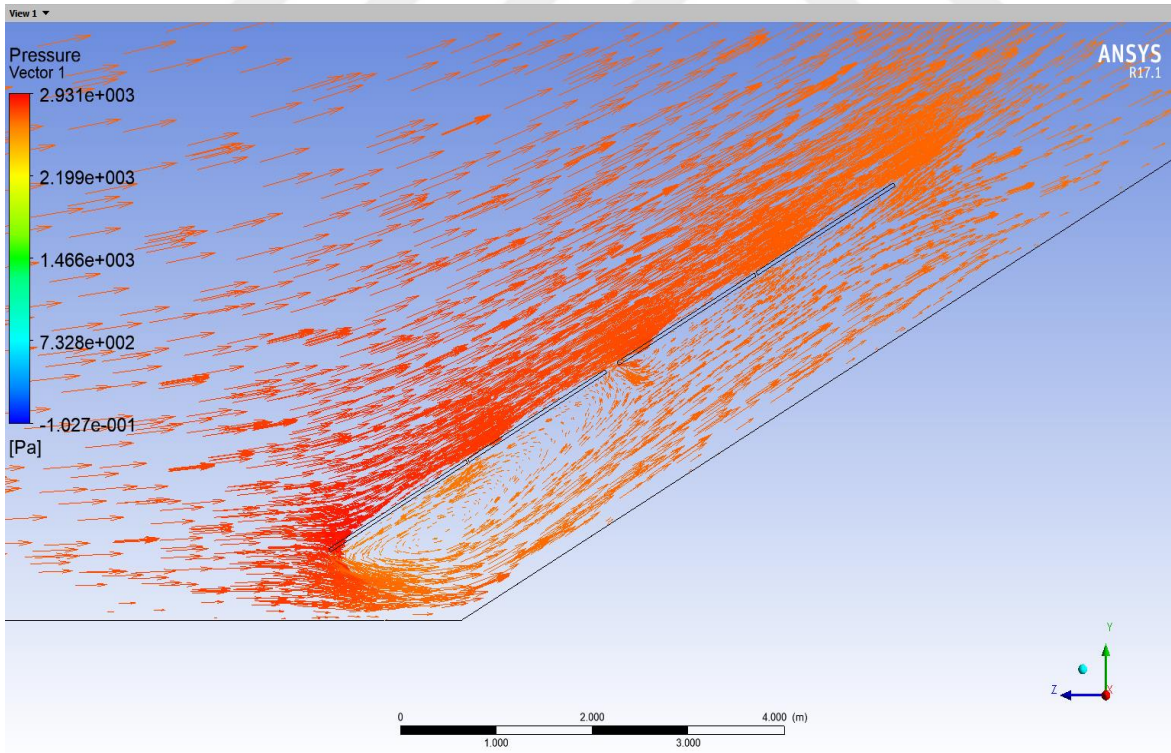


Şekil B2.10 30° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki basınç dağılımı

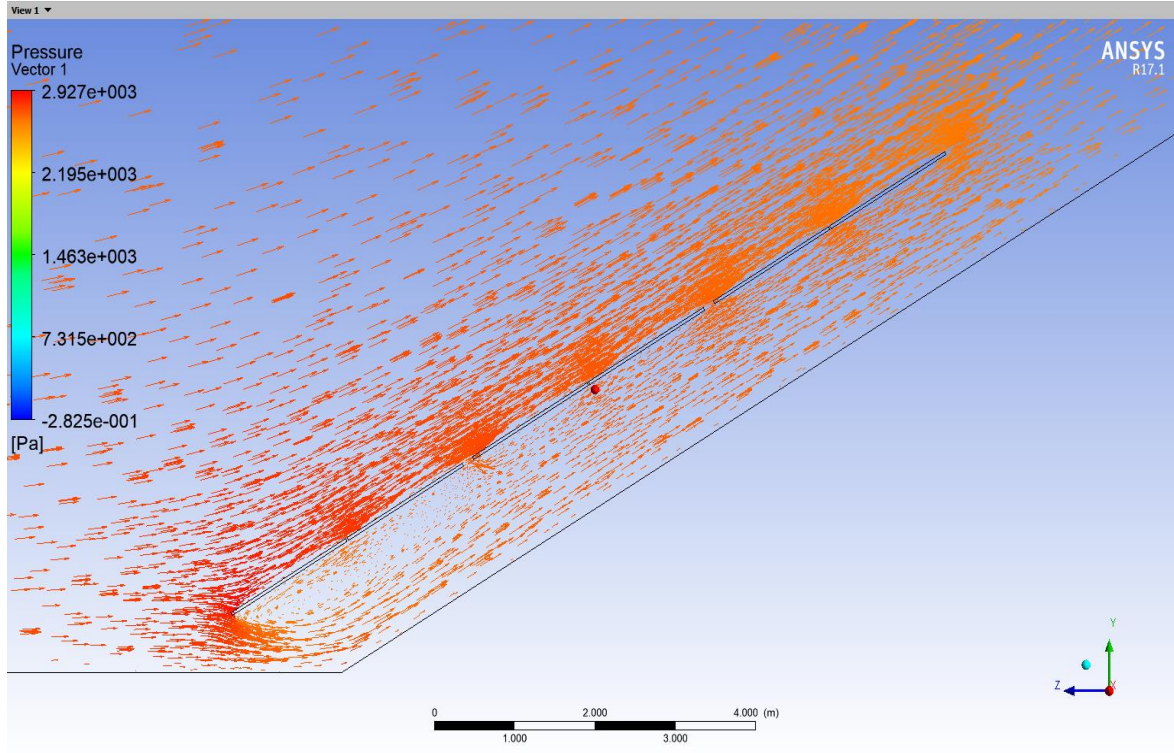
EK-C2 30° eğimli arazi için güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



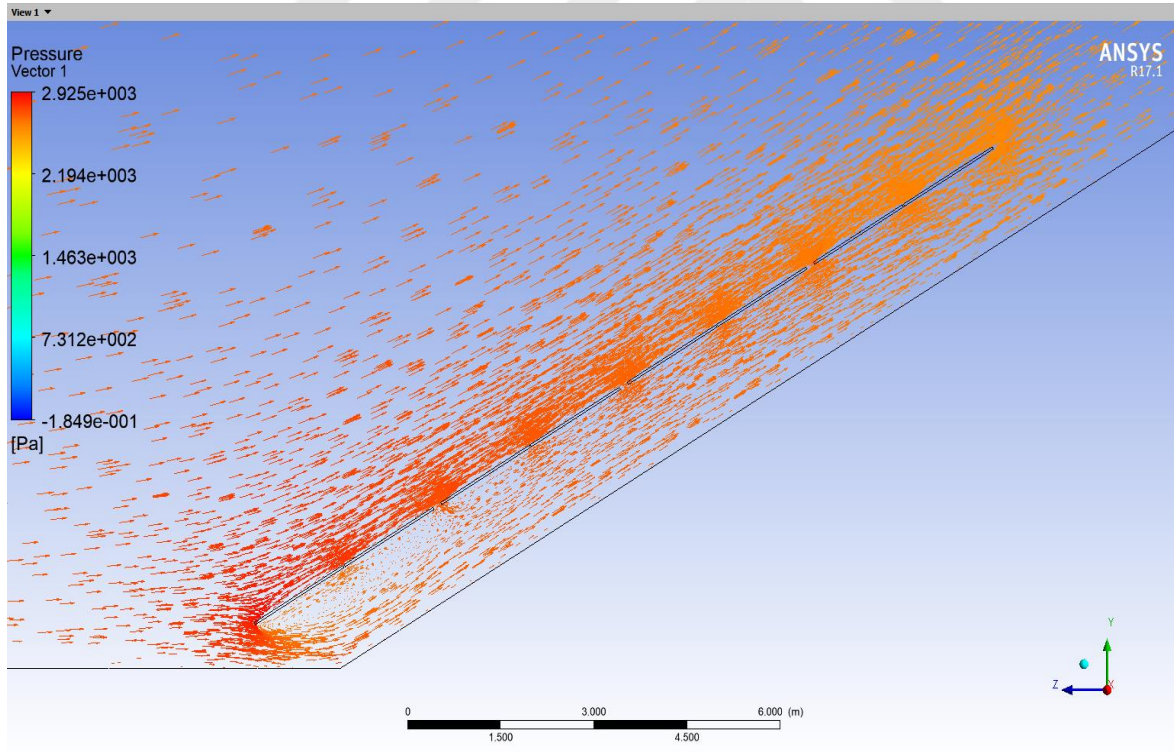
Şekil C2.1 30° eğimli arazi; tek sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



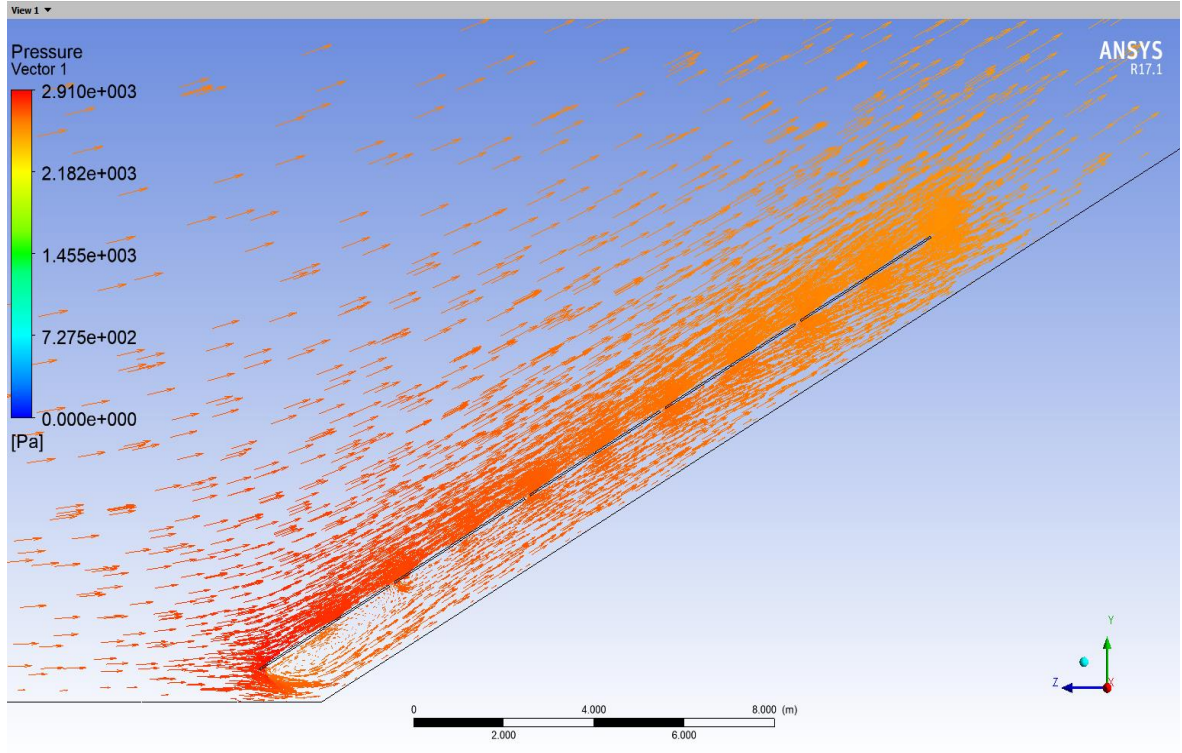
Şekil C2.2 30° eğimli arazi; iki sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



Şekil C2.3 30° eğimli arazi; üç sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



Şekil C2.4 30° eğimli arazi; dört sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri



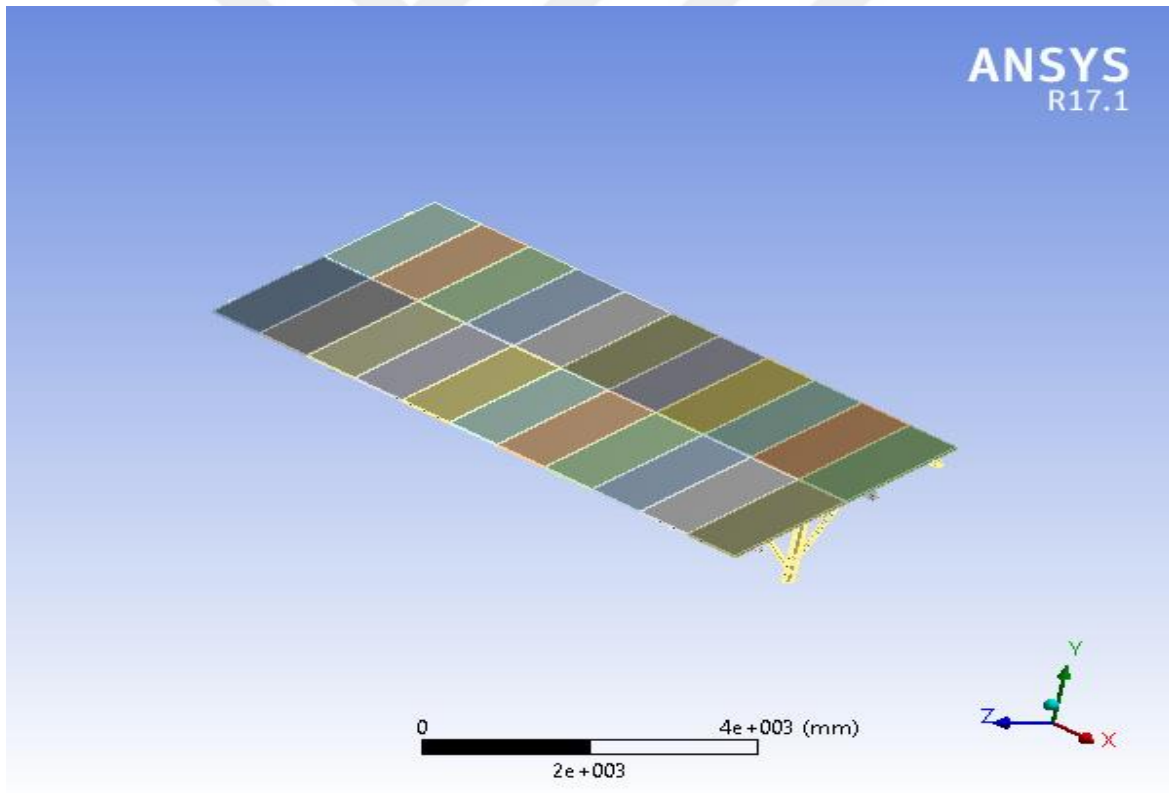
Şekil C2.5 30° eğimli arazi; beş sıralı güneş paneller üzerindeki akış çizgileri

Project



Project

First Saved	Saturday, June 1, 2019
Last Saved	Tuesday, July 2, 2019
Product Version	17.1 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

[Static Structural \(B5\)](#)

[Results](#)

[Chart](#)

[Material Data](#)

[Structural Steel NL](#)

[Aluminum Alloy NL](#)

FIGURE 4

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

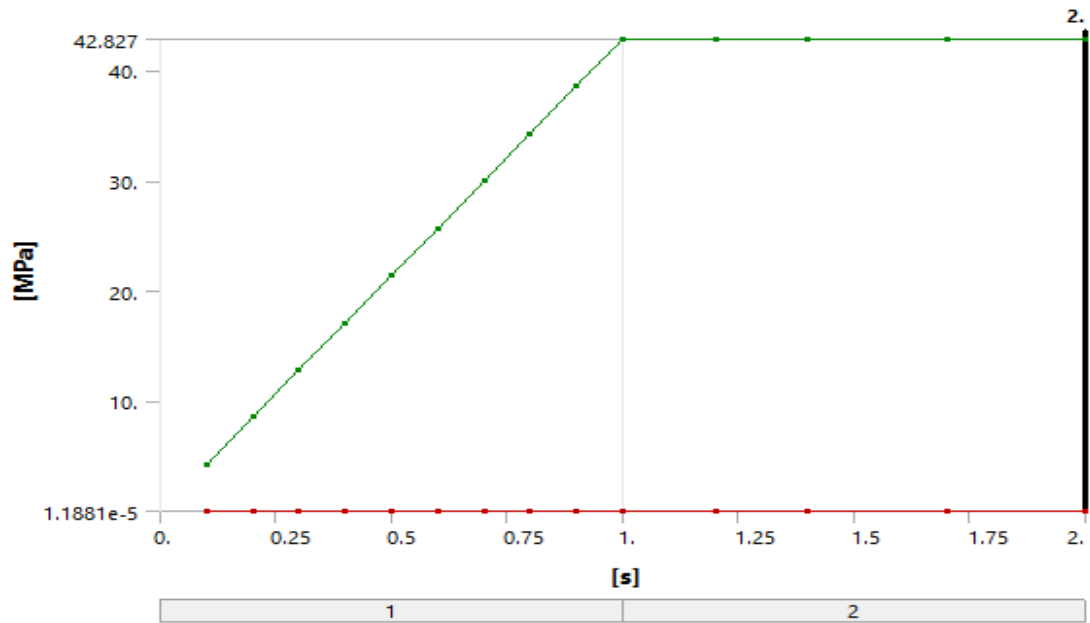


TABLE 24

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
0.1	1.1881e-005	4.2719
0.2	2.3761e-005	8.5461
0.3	3.5641e-005	12.823
0.4	4.7521e-005	17.102
0.5	5.9401e-005	21.383
0.6	7.128e-005	25.667
0.7	8.3159e-005	29.953
0.8	9.5037e-005	34.242
0.9	1.0692e-004	38.533
1.	1.1879e-004	42.827

FIGURE 5

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress > Figure

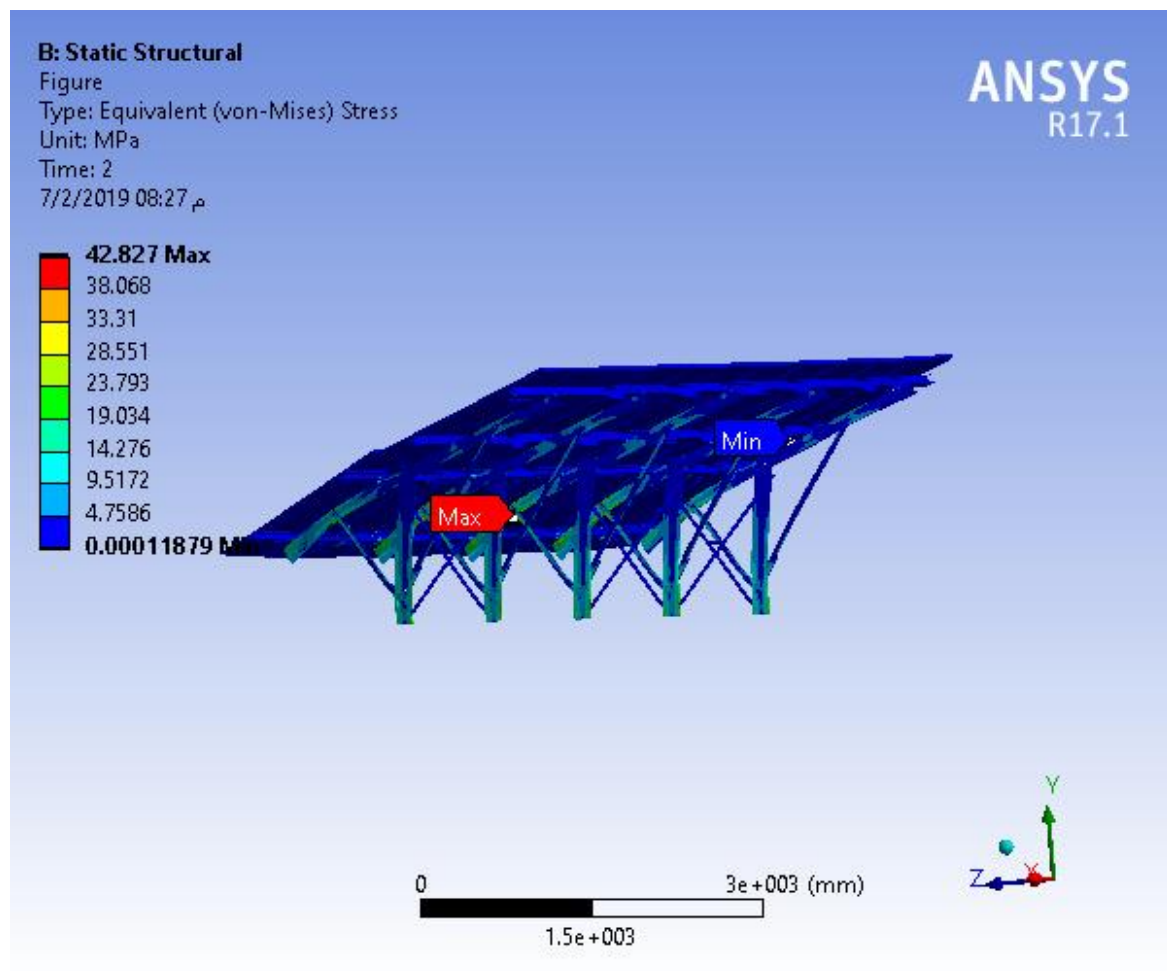


TABLE 28

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Total Strain critical profile

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
0.1	1.118e-007	2.1418e-005
0.2	2.2363e-007	4.2849e-005
0.3	3.3548e-007	6.4291e-005
0.4	4.4737e-007	8.5745e-005
0.5	5.5929e-007	1.0721e-004
0.6	6.7123e-007	1.2869e-004
0.7	7.8321e-007	1.5018e-004
0.8	8.9521e-007	1.7168e-004
0.9	1.0072e-006	1.932e-004
1.	1.1193e-006	2.1472e-004

FIGURE 13

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Total Strain critical profile > Figure

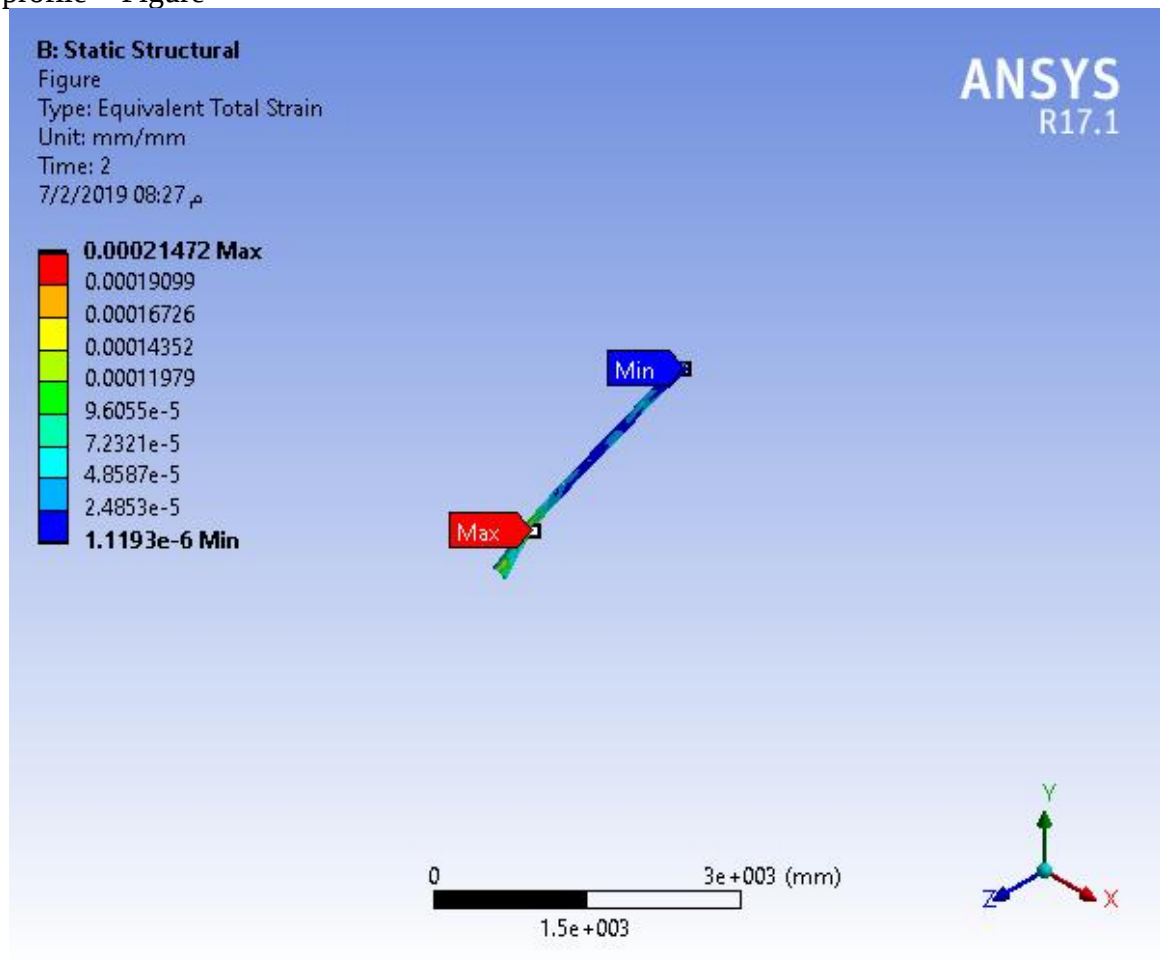


FIGURE 14

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress critical profile

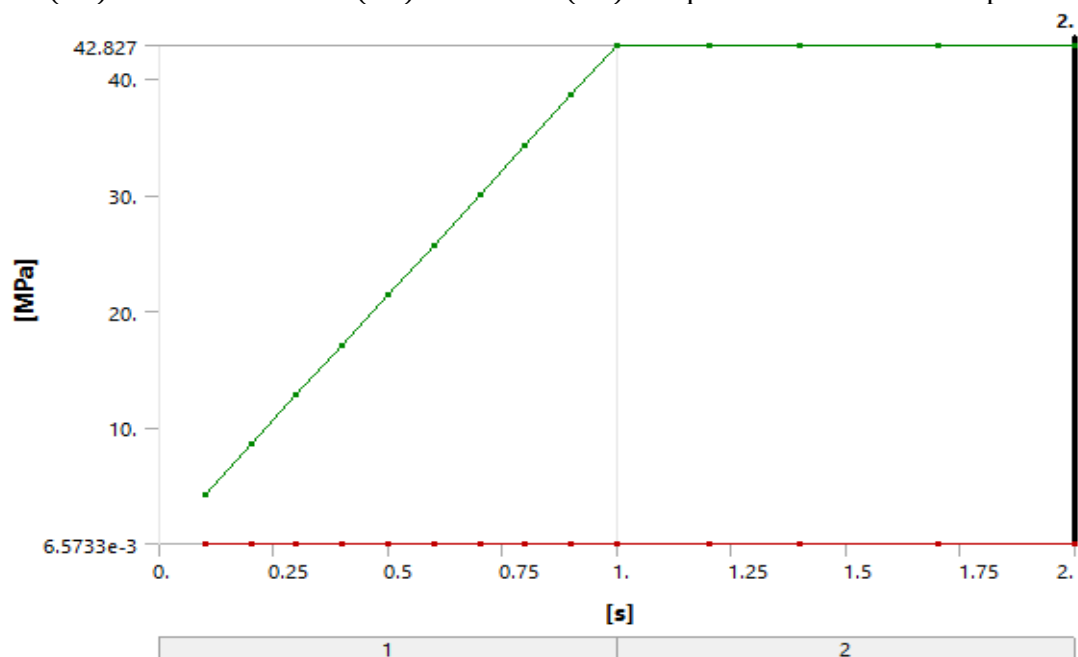


TABLE 29

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress critical profile

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
0.1	6.5733e-003	4.2719
0.2	1.3149e-002	8.5461
0.3	1.9727e-002	12.823
0.4	2.6306e-002	17.102
0.5	3.2889e-002	21.383
0.6	3.9473e-002	25.667
0.7	4.606e-002	29.953
0.8	5.2649e-002	34.242
0.9	5.924e-002	38.533
1.	6.5833e-002	42.827

FIGURE 15

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress critical profile > Figure

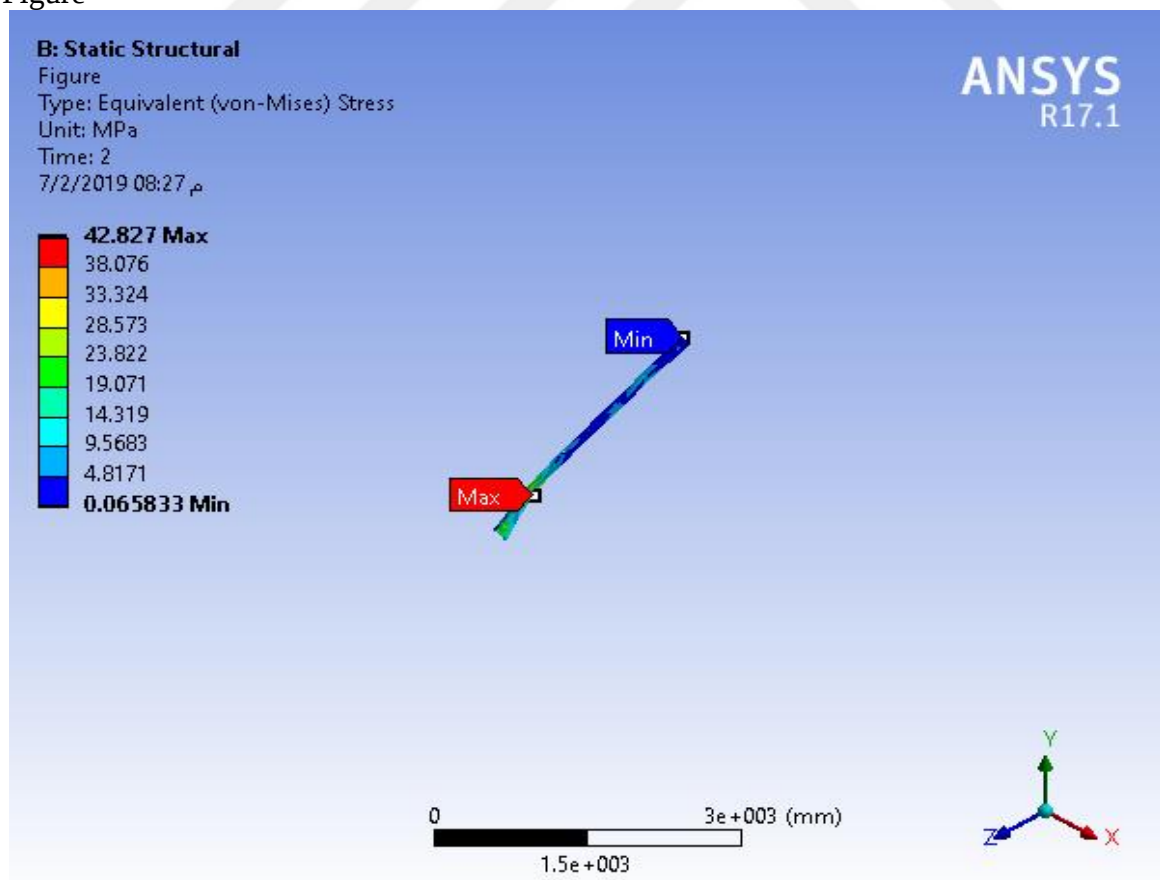


FIGURE 16

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Plastic Strain

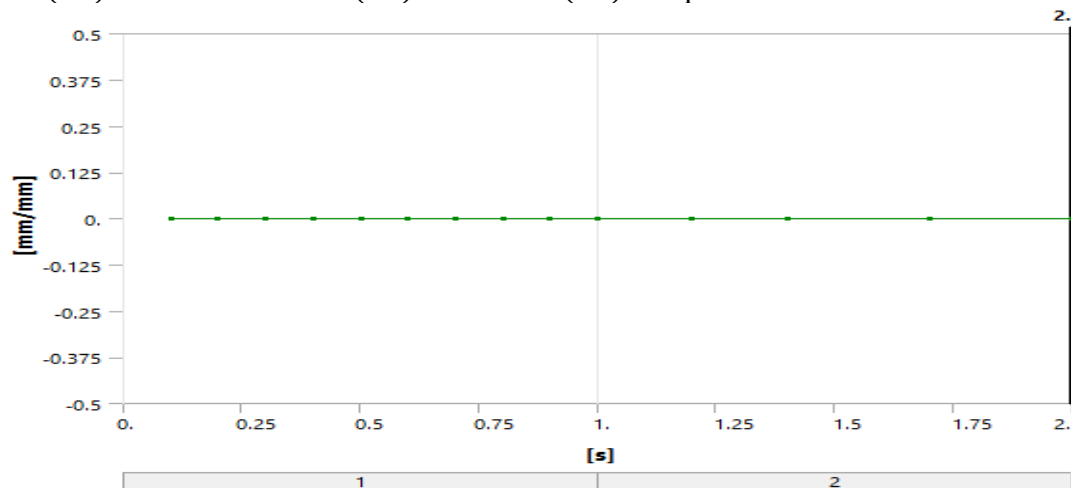


TABLE 30

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Plastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
0.1	0.	0.
0.2		
0.3		

FIGURE 17

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Plastic Strain > Figure

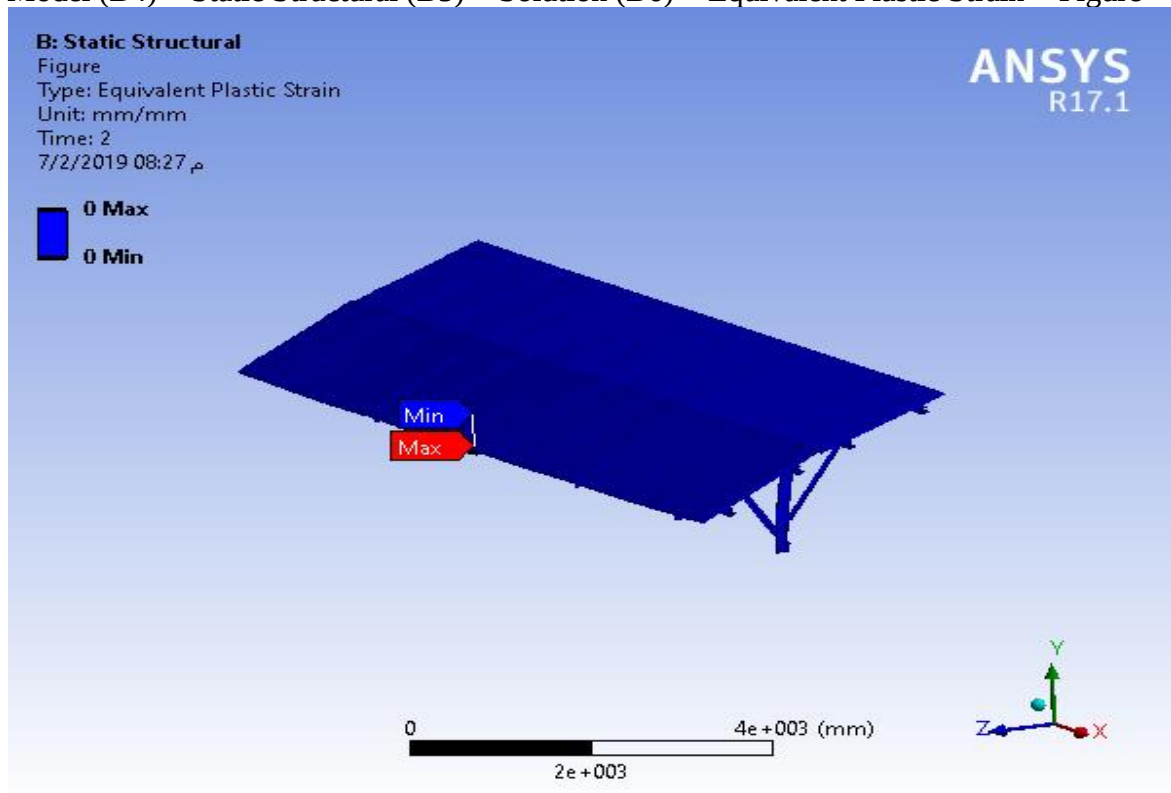


FIGURE 18

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation structure

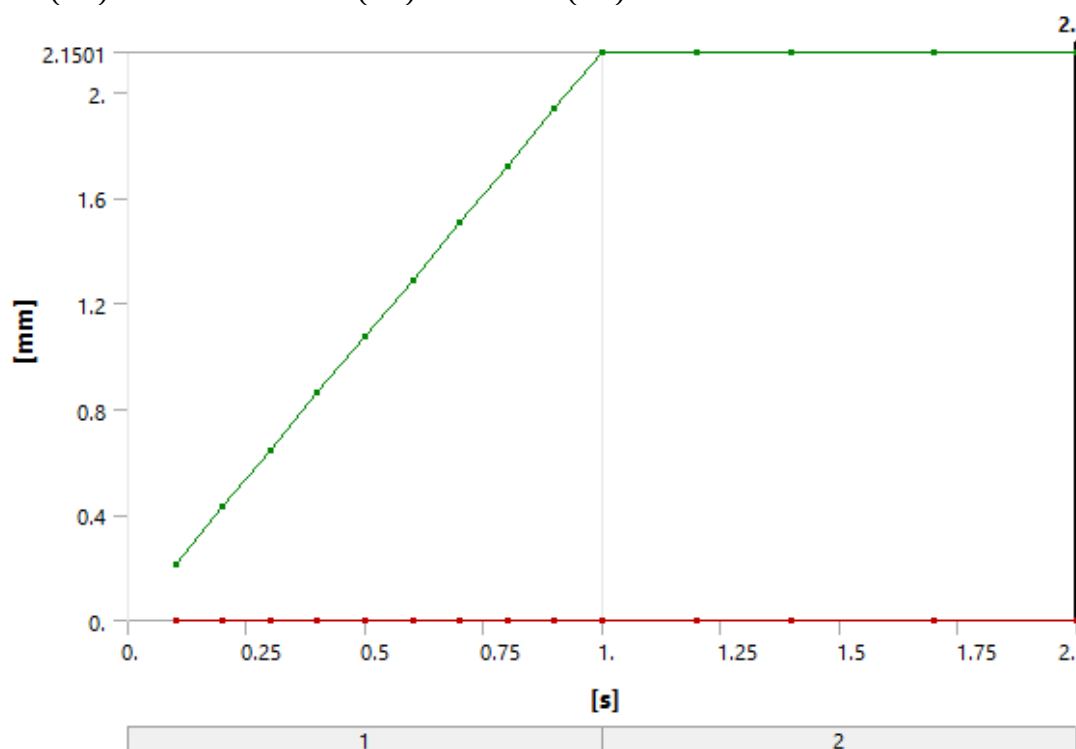


TABLE 31

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation structure

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0.1	0.	0.21478
0.2		0.4296
0.3		0.64448
0.4		0.85942
0.5		1.0744
0.6		1.2894
0.7		1.5045
0.8		1.7197
0.9		1.9349
1.		2.1501

FIGURE 19

Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation structure > Figure

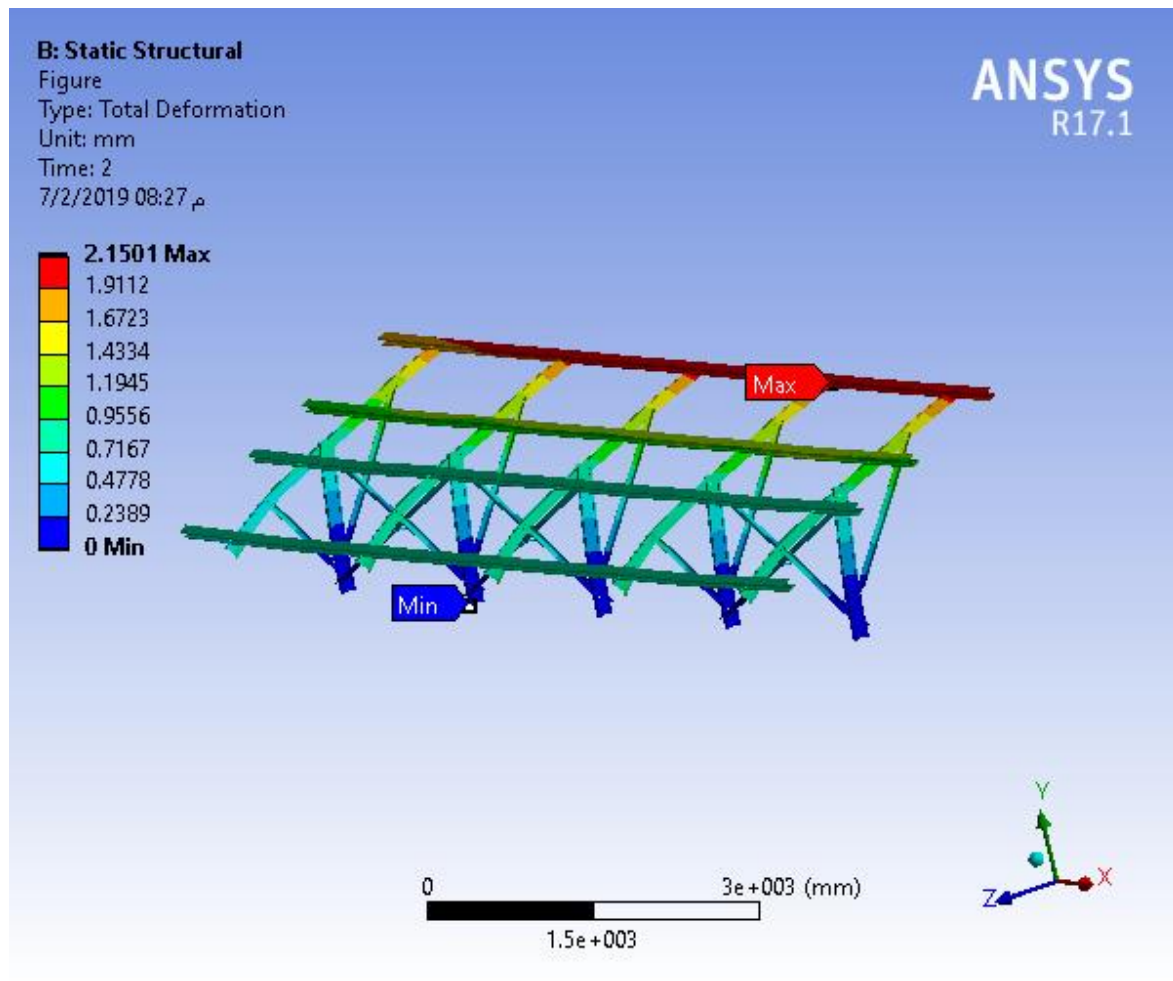


Chart
FIGURE 20
Model (B4) > Chart

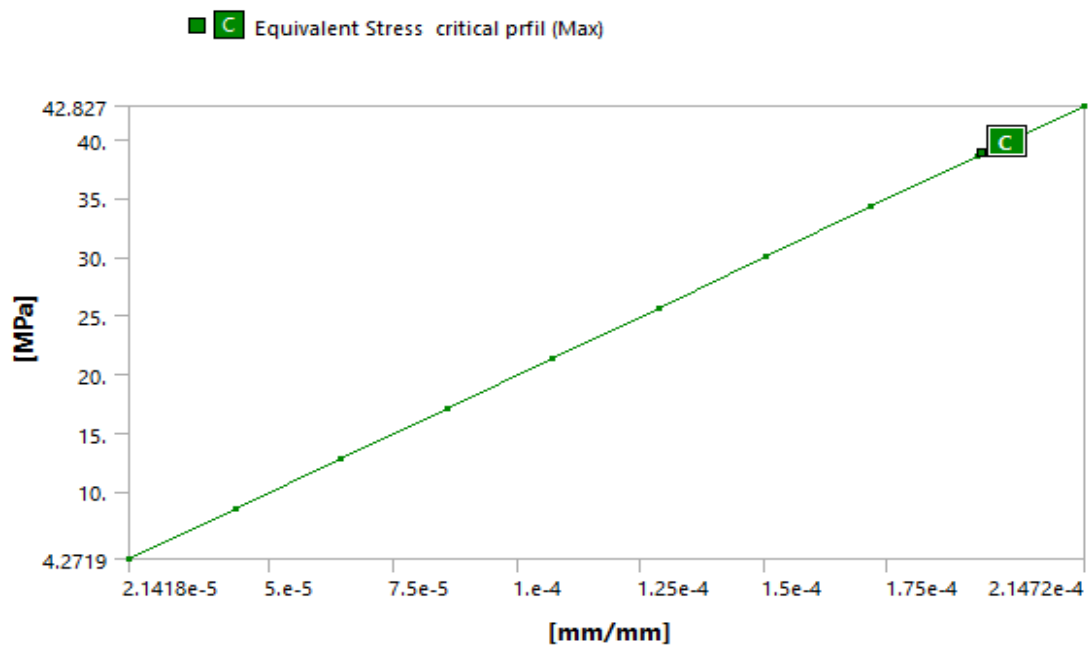


TABLE 32
Model (B4) > Chart

Steps	Time [s]	Equivalent Total Strain critical profile (Max) [mm/mm]	[C] Equivalent Stress critical profile (Max) [MPa]
1	0.1	2.1418e-005	4.2719
	0.2	4.2849e-005	8.5461
	0.3	6.4291e-005	12.823
	0.4	8.5745e-005	17.102
	0.5	1.0721e-004	21.383
	0.6	1.2869e-004	25.667
	0.7	1.5018e-004	29.953
	0.8	1.7168e-004	34.242
	0.9	1.932e-004	38.533
	1.	2.1472e-004	42.827

Material Data
Structural Steel NL

TABLE 33
Structural Steel NL > Constants

Density	7.85e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 34
Structural Steel NL > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923

TABLE 35
Structural Steel NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
250	1450	

TABLE 36
Structural Steel NL > Color

Red	Green	Blue
222	222	222

Aluminum Alloy NL

TABLE 37

Aluminum Alloy NL > Constants

Density	2.77e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	8.75e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 38

Aluminum Alloy NL > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	71000	0.33	69608	26692

TABLE 39

Aluminum Alloy NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
280	500	

TABLE 40

Aluminum Alloy NL > Color

Red	Green	Blue
235	209	184

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Khaled ADAMEH
Uyruğu : T.C. / Suriye
Doğum tarihi ve yeri : 20.03.1990, Hama- Suriye
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (536) 686 57 10
e-posta : eng-khaled14992@outlook.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	KSÜ / İnşaat Müh. Bölümü	2019
Pedagojik formasyon	Hama Üniversitesi/ Eğitim Fakültesi	2015
Lisans	Halep Üniversitesi / İnşaat Müh. Bölümü	2013
Lise	Mardes Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-	Türkiye/Kırıkhan Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi	Hasta Yönlendirme Personeli
2014-2015	Suriye/Hama Kamu Konutları Kurumu	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Türkçe

Yayınlar

1. Adameh, K., Kose, M.M., “Simulation Of Solar Panel Placed In Open Areas Under Wind Load”, International Symposium on Advanced Engineering Technologies, 2019.

Hobiler

Mühendislik bilimleri, Yüzme, Kitap okuma.