



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR İHA KANADINDA KARBONFİBER
TAKVİYELİ DESTEK KİRİŞİNİN KESİT
PROFİLİ VE SERİM AÇILARININ YAPISAL
DAYANIMINA ETKİSİNİN SONLU
ELEMANTLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Ali Mert GÖÇEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali Mert GÖÇEN tarafından hazırlanan “Bir İHA Kanadında Karbonfiber Takviyeli Destek Kirişinin Kesit Profili ve Serim Açılarının Yapısal Dayanımına Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Konya Teknik Üniversitesi

Danışman

Doç. Dr. Abdullah ASLAN
Konya Teknik Üniversitesi

Üye

Doç. Dr. Mürsel EKREM
Necmettin Erbakan Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ali Mert GÖÇEN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

BİR İHA KANADINDA KARBONFİBER TAKVİYELİ DESTEK KİRİŞİNİN KESİT PROFİLİ VE SERİM AÇILARININ YAPISAL DAYANIMINA ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Ali Mert GÖÇEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdullah ASLAN

2025, 104 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Doç. Dr. Mürsel EKREM

Yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yorulma dayanımı gibi avantajları dolayısıyla karbonfiber takviyeli kompozitler havacılık ve uzay sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle hafif hava platformlarının kanat ve gövde yapılarında da karbonfiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı günden güne artmaktadır. Bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu tez çalışmasında, hava araçlarının kritik bileşenlerinden biri olan kanat yapılarında kullanılan karbonfiber takviyeli kompozit kirişlerin kesit profillerine ve fiber serim açılara bağlı yapısal davranışları numerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, I, C ve kutu profillere sahip kiriş yapılarının 0° , $\pm 45^\circ$ fiber kombinasyonlarında, aerodinamik yüklemeler altında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Belirlenen hava aracı konfigürasyonu için bir kanat tasarımı yapılmış, bu kanat tasarımı üzerinde gerçekleştirilen HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri sonucunda elde edilen basınç yükleri, tek yönlü Akışkan-Yapı etkileşimi yöntemi ile yapısal modele aktarılarak kanat yapılarının statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre kirişlerin yapısal davranışları kesit profiline ve serim açısına bağlı olarak değerlendirilmiştir.

Bulunan sonuçlarda $\pm 45^\circ$ fiber kullanımında IRF (Ters Emniyet Katsayısı) değerlerinde ani düşüşler görülse de 0° fiberlerde IRF değerlerinin arttığı ve dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar $\pm 45^\circ$ fiberlerin tüm katmanlara oranı arttıkça artmaktadır. Sadece 0° fiberlerin kullanıldığı oryantasyonlarda ise oldukça düzenli bir IRF dağılımı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca $\pm 45^\circ$ fiber kullanımının taşıma ve sürüklenme yönlerinde deformasyonları da arttırdığı görülmüştür.

Profil kesitlerinin karşılaştırmasında ise kutu profil dayanımsal olarak öne çıkarken C profil ağırlık bakımından daha avantajlıdır. I profil ise ağırlık bakımından C profile yakın olsa da hem dayanım hem de üretim zorluğu açısından diğer profillerin gerisinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fiber Oryantasyonu, Kanat Kirişi, Karbonfiber, Kesit Profili, Kompozit, Serim Açısı

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL STRENGTH OF A CARBON FIBER REINFORCED SPAR IN AN UAV WING BASED ON CROSS-SECTION PROFILE AND PLY ORIENTATIONS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Ali Mert GÖÇEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah ASLAN

2025, 104 Pages

**Jury
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

Due to their high strength, low density, and fatigue resistance, carbon fiber reinforced composites are widely used in the aerospace industry. The use of these materials is increasing day by day, particularly in the wing and fuselage structures of lightweight aerial platforms. Numerous studies can be found in the literature on this topic. In this thesis, the structural behavior of carbon fiber reinforced composite beams used in wing structures which is one of the most critical components of air vehicles has been numerically investigated with respect to cross-sectional profiles and fiber lay-up angles. Within this scope, finite element models were developed for beam structures with I, C, and box cross-sections, using fiber orientations of 0° and $\pm 45^\circ$, under aerodynamic loading conditions.

A wing design was created for a selected aircraft configuration, and the pressure loads obtained from CFD (Computational Fluid Dynamics) analyses conducted on this wing were transferred to the structural model using a one-way Fluid-Structure Interaction approach. Based on these loads, static structural analyses were performed. The results were then evaluated in relation to the cross-sectional profiles and lay-up angles of the beams.

It was observed that the use of $\pm 45^\circ$ fiber layers led to sudden drops in IRF (Inverse Reserve Factor) values, whereas 0° fibers resulted in increased IRF values with noticeable fluctuations. These fluctuations became more pronounced as the ratio of $\pm 45^\circ$ layers in the stacking sequence increased. On the other hand, lay-ups consisting completely 0° fibers showed a highly consistent IRF distribution. Moreover, the use of $\pm 45^\circ$ layers was found to increase deformations in both the lift and drag directions.

In terms of cross-section comparison, the box profile demonstrated superior strength, while the C profile proved more advantageous in terms of weight. Although the I profile was close to the C profile in terms of weight, it lagged behind both in strength and in terms of manufacturing complexity.

Keywords: Carbonfiber, Composite, Cross-Section, Fiber Orientation, Lay-up Angle, Wing Spar

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sürecinde her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah ASLAN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

HAD analizleri ve kanat aerodinamik tasarımı aşamalarında değerli bilgilerini benimle paylaşan arkadaşım Furkan ALTUNAY'a ve bu süreçte gerek küçük veya büyük fikir alışverişinde bulunan, gerekse manevi desteklerini esirgemeyen, isimlerini saymakla bitiremeyeceğim tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini her zaman arkamda hissettiğim, beni büyütüp, okutup bugünlere getiren, başta değerli annem ve babam; Ayşe Neşe GÖÇEN ve Yavuz GÖÇEN olmak üzere tüm aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ali Mert GÖÇEN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİL DİZİNİ	xi
ÇİZELGE DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	2
2.1. Fiber Tipleri	2
2.1.1. Cam fiber	2
2.1.2. Karbonfiber	3
2.1.3. Kevlar (Aramid).....	4
2.2. Matrisler.....	4
2.2.1. Polimer matrisler.....	5
2.2.2. Metal matrisler	6
2.2.3. Seramik matrisler	6
3. KOMPOZİT HASAR MEKANİZMALARI.....	8
3.1. Temel Hasar Modları	9
3.1.1. Fiber hasarı	9
3.1.2. Matris hasarı	10
3.1.3. Fiber-matris arayüzey hasarı.....	11
3.1.4. Delaminasyon hasarı.....	12
3.2. Kompozit Hasar Kriterleri	12
3.2.1. Maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme kriteri	14
3.2.2. Tsai – Hill kriteri.....	14
3.2.3. Tsai – Wu kriteri	15
3.2.4. Liu-Tsai kriteri	15
3.2.5. Hoffman kriteri	16
3.2.6. Hashin kriteri	17
3.2.7. Puck ve Schürmann kriteri.....	17
4. KANAT YÜKLERİ VE BİLEŞENLERİ.....	19
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	23
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
6.1. Kanat Aerodinamik Tasarımı ve HAD Analizleri	30

6.1.1. Hücüm açısının belirlenmesi	31
6.1.2. Kanat boyutlandırılması.....	44
6.2. Kanat Yapısal Analizi	50
6.2.1. Kanat yapısal tasarımı.....	50
6.2.2. Malzeme özellikleri	56
6.2.3. Çözüm ağı	58
6.2.3.1. Kutu profil çözüm ağı	58
6.2.3.2. C profil çözüm ağı	61
6.2.3.3. I profil çözüm ağı.....	63
6.2.4. Kompozit modelleme.....	64
6.2.5. Bağlantılar.....	75
6.2.6. Sınır şartları.....	78
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	82
7.1. Kutu Profil Yapısal Analiz Sonuçları	82
7.2. C Profil Yapısal Analiz Sonuçları	85
7.3. I Profil Yapısal Analiz Sonuçları.....	88
7.4. Profillerin Karşılaştırılması.....	92
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	98
5.1. Sonuçlar	98
5.2. Öneriler	98
KAYNAKLAR	100
EKLER	105

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	: Elastisite modülü
E_{11}	: Boyuna elastisite modülü
E_{22}	: Enine elastisite modülü
E_{33}	: Kalınlık boyunca elastisite modülü
G_{12}	: Düzlem içi kayma modülü
G_{13}, G_{23}	: Düzlem dışı kayma modülü
ν	: Poisson oranı
S_{12}	: Düzlem içi kayma dayanımı
S_{13}, S_{23}	: Düzlem dışı kayma dayanımı
σ_{11}	: Boyuna normal gerilme
σ_{22}	: Enine normal gerilme
σ_{33}	: Kalınlık boyunca normal gerilme
X_t	: Boyuna çekme dayanımı
X_c	: Boyuna basma dayanımı
Y_t	: Enine çekme dayanımı
Y_c	: Enine basma dayanımı
Z_t	: Kalınlık boyunca çekme dayanımı
Z_c	: Kalınlık boyunca basma dayanımı
τ_{12}	: Düzlem içi kayma gerilmesi
τ_{23}	: Düzlem dışı kayma gerilmesi
τ_{31}	: Katmanlar arası kayma gerilmesi
S^L	: Boyuna düzlem içi kayma dayanımı
S^T	: Enine düzlem içi kayma dayanımı
ϵ_{11}	: Boyuna % şekil değiştirme
ϵ_{22}	: Enine % şekil değiştirme
X_{et}	: Boyuna çekme % şekil değiştirme sınırı
X_{ec}	: Boyuna basma % şekil değiştirme sınırı
Y_{et}	: Enine çekme % şekil değiştirme sınırı
Y_{ec}	: Enine basma % şekil değiştirme sınırı
γ_{12}	: Düzlem içi kayma şekil değiştirmesi
γ^{L12}	: Düzlem içi kayma şekil değiştirme sınırı
F^*_{xy}	: Normalize edilmiş etkileşim katsayısı
F_{ij}	: Dayanım parametreleri
C_i	: Hoffman malzeme parametreleri
Re	: Reynolds sayısı
L	: Taşıma kuvveti
D	: Sürükleme kuvveti
V	: Seyir hızı
ρ	: Hava yoğunluğu
μ	: Dinamik viskozite
D	: Karakteristik uzunluk (Ortalama veter uzunluğu)
I	: Kanat açıklığı
A	: Kanat izdüşüm alanı
C_l	: Taşıma katsayısı
I	: Türbülans yoğunluğu

W : Kalkış ağırlığı
n : Yük çarpanı

Kısaltmalar

ACP : ANSYS Composite Prepost
AYE : Akışkan-yapı etkileşimi
FMG : Full Multigrid (Çoklu ızgara yöntemi)
G : Yerçekimi ivmesi
GPa : Gigapascal
h : Saat
IRF : Inverse reserve factor (Ters güvenlik katsayısı)
HAD : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
kg : Kilogram
km : Kilometre
m : Metre
mm : Milimetre
MPC : Multi Point Constraint (Çok noktalı bağlama)
N : Newton
Pa : Pascal
PAI : Poliamid-imid
PBI : Polibenzimidazol
PEEK : Polieter eter keton
PEI : Polietrimid
PPS : Polifenilen sülfid
PSUL : Polisülfon
PVC : Polivinil klorür
s : Saniye
TEM : Taramalı elektron mikroskobu

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 3.1 Çapraz katmanlı bir yapıda hasar gelişiminin (a) mikro, (b) mezo ve (c) makro ölçekte gösterimi (Sause,2016).....	8
Şekil 3.2 Karbonfiber, çekme yükü altında fiber kopması şematik gösterimi ve elektron mikroskobu görünümü (Sause,2016).....	9
Şekil 3.3 Karbonfiber, basma yükü altında fiber parçalanması şematik gösterimi ve elektron mikroskobu görünümü (Sause,2016).....	10
Şekil 3.4 Basma yükü altında (a) asimetrik burkulma, (b) simetrik burkulma davranışı (Heslehurst, 2014).....	10
Şekil 3.5 Karbon-epoksi malzemenin standart yüklemeler altında matris hasarlarının şematik ve elektron mikroskobu altında görünümü (Sause,2016).....	11
Şekil 3.6 Fiber yönü boyunca basma yükü altında fiber-matris arayüzey hasarı (Heslehurst, 2014).....	12
Şekil 3.7 Delaminasyon hasarının şematik ve elektrom mikroskobu altındaki gösterimi	12
Şekil 3.8 Fiberler arası kırılma modları	18
Şekil 4.1 Kanat üzerine gelen yükler	20
Şekil 4.2 Kanat yapısal bileşenleri ve bölgeleri.....	21
Şekil 4.3 Farklı açılarda fiber yönelimleri (a) 0°; (b) ±22,5°; (c) ±45°; (d) ±67,5°; (e) 90°	22
Şekil 6.1 Akış şeması.....	30
Şekil 6.2 NACA 2415 Kanat profili geometrisi	31
Şekil 6.3 0. İterasyon kanat ölçüleri (a) kök veter uzunluğu; (b) uç veter uzunluğu; (c) kanat açıklığı.....	33
Şekil 6.4 0. İterasyon kanat tasarımı akış hacmi.....	34
Şekil 6.5 Hücum açısı parametrik script kodu	34
Şekil 6.6 Farklı hücum açılarında kanat geometrisinin script kodları ile güncellenmesi (a) 0° (b) 8°	35
Şekil 6.7 Akış hacmi çok yüzlü (polyhedral) çözüm ağı yapısı	36
Şekil 6.8 Kanat çevresinde çözüm ağı yapısı ve hücum ve finar kenarlarında sınır tabakaların detay görünümü.....	36
Şekil 6.9 HAD genel ayarlar	37
Şekil 6.10 Hız girişi bilgileri.....	38
Şekil 6.11 Basınç çıkışı bilgileri	38
Şekil 6.12 Hız girişi (mavi oklar) ve basınç çıkışı (kırmızı oklar) gösterimi	39
Şekil 6.13 Metod ayarları.....	40
Şekil 6.14 Yakınsama eğrileri.....	41
Şekil 6.15 Taşıma kuvveti yakınsama eğrisi	41
Şekil 6.16 Sürüklenme kuvveti yakınsama eğrisi	42
Şekil 6.17 Y ⁺ yakınsama eğrisi	42
Şekil 6.18 Hücum açısı - L/D grafiği.....	44
Şekil 6.19 2. İterasyon kanat boyutları (a) kök veter uzunluğu (b) uç veter uzunluğu (c) kanat açıklığı.....	46
Şekil 6.20 2. İterasyon akış hacmi	47
Şekil 6.21 Kanat üst yüzeyinde basınç dağılımı	48
Şekil 6.22 Kanat alt yüzeyinde basınç dağılımı.....	49
Şekil 6.23 Kanat kesitinde basınç dağılımı.....	49
Şekil 6.24 Alt ve üst kabuklar.....	50
Şekil 6.25 Kutu profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu.....	51

Şekil 6.26 Kutu profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu.....	51
Şekil 6.27 Kutu profil kiriş 3 boyutlu tasarımı	52
Şekil 6.28 C profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu	52
Şekil 6.29 C profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu	53
Şekil 6.30 C profil kiriş 3 boyutlu tasarımı	53
Şekil 6.31 I profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu	54
Şekil 6.32 I profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu	54
Şekil 6.33 I profil kiriş 3 boyutlu tasarımı.....	55
Şekil 6.34 Kutu profil kaburga-kiriş yapısı	55
Şekil 6.35 C profil kaburga-kiriş yapısı.....	56
Şekil 6.36 I profil kaburga-kiriş yapısı	56
Şekil 6.37 Global çözüm ağı ayarları.....	59
Şekil 6.38 Alt ve üst kabuk çözüm ağı yapısı.....	59
Şekil 6.39 Kutu profil kaburga ve kiriş çözüm ağı yapısı	60
Şekil 6.40 Kutu profil ağ yapısı eleman kalitesi dağılımı.....	61
Şekil 6.41 Kutu profil ağ yapısı eğrilik dağılımı	61
Şekil 6.42 C profil kaburga ve kiriş çözüm ağı yapısı.....	62
Şekil 6.43 C profil ağ yapısı eleman kalitesi dağılımı	62
Şekil 6.44 C profil ağ yapısı eğrilik dağılımı.....	63
Şekil 6.45 I profil çözüm ağı yapısı.....	63
Şekil 6.46 I profil ağ yapısı eleman kalitesi dağılımı	64
Şekil 6.47 I profil ağ yapısı eğrilik dağılımı	64
Şekil 6.48 Üst kabuk referans fiber yönleri	65
Şekil 6.49 Alt kabuk referans fiber yönleri.....	65
Şekil 6.50 Kaburgaların referans fiber yönleri	66
Şekil 6.51 Kutu profil kiriş referans fiber yönleri	66
Şekil 6.52 C profil kiriş referans fiber yönleri.....	67
Şekil 6.53 I profil kiriş referans fiber yönleri	67
Şekil 6.54 Kutu profil 0° fiber yönelimi	71
Şekil 6.55 Kutu profil 45° fiber yönelimi	71
Şekil 6.56 Kutu profil -45° fiber yönelimi.....	72
Şekil 6.57 C profil 0° fiber yönelimi	72
Şekil 6.58 C profil 45° fiber yönelimi	73
Şekil 6.59 C profil -45° fiber yönelimi	73
Şekil 6.60 I profil 0° fiber yönelimi.....	74
Şekil 6.61 I profil 45° fiber yönelimi.....	74
Şekil 6.62 I profil -45 ° fiber yönelimi	75
Şekil 6.63 Kutu profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi	75
Şekil 6.64 C profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi	76
Şekil 6.65 I profil kiriş başlıkları ve kiriş ağı arasında paylaşılan kenarların gösterimi	76
Şekil 6.66 I profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi	77
Şekil 6.67 Kanat MPC bağlantıları	78
Şekil 6.68 MPC bağlantıların detay görünümü	78
Şekil 6.69 Kutu profil kanat sabitleme noktası.....	79
Şekil 6.70 C profil kanat sabitleme noktası	79
Şekil 6.71 I profil kanat sabitleme noktası	80
Şekil 6.72 Basınç yükü ölçeği.....	81
Şekil 6.73 Basınç yükü konturları.....	81
Şekil 7.1 Kutu profil konfigürasyonlara göre taşıma yönünde deformasyon değişimi ..	83

Şekil 7.2 Kutu profil konfigürasyonlara göre sürüklenme yönünde deformasyon değişimi	84
Şekil 7.3 Kutu profil maksimum IRF değerlerinin değişimi	85
Şekil 7.4 C profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile taşıma yönünde deformasyon değişimi	86
Şekil 7.5 C profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile sürüklenme yönünde deformasyon değişimi	87
Şekil 7.6 C profil maksimum IRF değerlerinin değişimi.....	88
Şekil 7.7 I profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile taşıma yönünde deformasyon değişimi.....	89
Şekil 7.8 I profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile sürüklenme yönünde deformasyon değişimi	90
Şekil 7.9 I profil maksimum IRF değerlerinin değişimi	91
Şekil 7.10 Profillerin taşıma yönündeki deformasyonlarının karşılaştırması	93
Şekil 7.11 Profillerin sürüklenme yönünde deformasyonlarının karşılaştırılması	93
Şekil 7.12 Profillerin 0° serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırması	94
Şekil 7.13 Profillerin %40 oranda $\pm 45^\circ$ serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırılması	95
Şekil 7.14 Profillerin %60 oranda $\pm 45^\circ$ serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırılması	96

ÇİZELGE DİZİNİ

Tablo 6.1 PD-2 hava aracı spesifikasyonları	30
Tablo 6.2 3800 m irtifada havanın özellikleri (Anderson ve Bowden, 2016)	31
Tablo 6.3 Farklı hücum açılarına göre parametrik analiz sonuçları	43
Tablo 6.4 2. İterasyon için güncellenen kanat parametreleri	45
Tablo 6.5 İterasyonların karşılaştırması.....	48
Tablo 6.6 PVC köpük malzeme özellikleri.....	57
Tablo 6.7 T300-Epoksi malzeme özellikleri (Zhu ve diğ, 2019).....	58
Tablo 6.8 Alt-üst kabuk malzeme ve oryantasyon bilgisi	68
Tablo 6.9 Kaburga malzeme ve oryantasyon bilgisi.....	68
Tablo 6.10 1. Oryantasyon giriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%100 oranında 0° fiber kullanımı)	69
Tablo 6.11 2. Oryantasyon giriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%40 oranında 45° fiber kullanımı)	69
Tablo 6.12 3. Oryantasyon giriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%60 oranında 45° fiber kullanımı)	70
Tablo 6.13 Giriş konfigürasyon bilgisi	70
Tablo 7.1 Kutu profil maksimum IRF değerleri	85
Tablo 7.2 C profil maksimum IRF değerleri	88
Tablo 7.3 I profil maksimum IRF değerleri.....	91
Tablo 7.4 Profil kesitlerinin ağırlık-deformasyon ve ağırlık-IRF karşılaştırması	97

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, 20. Yüzyılın ortalarında modern teknolojiye yeni bakış açıları getiren, geleceği parlak mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkmıştır. Kompozit malzemeler, genel olarak içeriğinde farklı malzeme özelliklerine sahip ve aralarında belirgin farklar bulunan iki veya daha fazla bileşeni birlikte barındıran malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Vasiliev ve Morozov, 2013).

Modern kompozit malzemelerin çıkışı yakın geçmişte olsa da aslında kompozit malzemelerin doğadaki varlığı milyonlarca yıl öncesine dayanmaktadır. Ahşap, bambu ve kemikler kompozit malzemelerin doğadaki varlıklarına örnek olarak verilebilir. İnsan yapısı olan kanıtlanmış ilk kompozit malzemeler saman ile güçlendirilmiş çamur bloklardır. Kompozit teknolojisi zamanla ilerleyerek saman takviyeli çamur bloklardan, cam fiber, karbonfiber takviyeli polimerik kompozit malzemelere kadar gelmiştir.

Kompozit malzemelerin bakır, çelik, alüminyum, titanyum gibi metallere kıyasla en belirgin avantajları, özgül dayanım ve elastisite modülleridir. Özgül dayanımın tanımı; malzemenin dayanımının yoğunluğuna oranıdır. Bunun anlamı da söz konusu malzemenin yüksek dayanım ve elastik özellikler gösterirken görece hafif olmasıdır. Bu sebeple kompozit ağırlığın en önemli kriterlerden sayıldığı uzay ve havacılık endüstrisinde oldukça yaygın olarak kullanılır (Choo, 1990; Kaw,2006).

Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A350 XWB modelleri, büyük ölçekte karbonfiberden üretilen ilk sivil havacılık uçakları arasında yer almaktadır. Kanat, kuyruk ve gövde yapısında olmak üzere; Boeing 787 Dreamliner modelinin yaklaşık %50, Airbus A350 XWB modelininse %53'ünde karbonfiber kompozit malzeme kullanılarak ağırlıklarında ciddi kazanımlar sağlanmıştır (Hanna ve diğ, 2023).

İnsansız hava araçlarında da karbonfiber-epoksi malzemesi düşük ağırlık ve yüksek dayanım özellikleri sebeplerinden dolayı kanat yapıları başta olmak üzere yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple kompozit yapıların hasar durumunun değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Bu tez çalışmasında UKRSPECSYSTEMS markasının PD-2 modelinden referans alınarak 55 kg azami kalkış ağırlığına sahip sabit kanat bir insansız hava aracı için kanat tasarımı yapılmış ve ana kiriş yapısının yapısal davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Kiriş üzerinde serim açıları ve kiriş kesit profili değiştirilerek emniyet katsayıları değerlendirilmiştir.

2. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

Temelde fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemete sahip fiberlerin matris malzeme ile bir bütün oluşturmalarından oluşur. Bu şekilde iki malzeme tipi kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerini sürdürürken, tek başlarına kullanımında elde edilemeyen malzeme özelliklerinin kombinasyonları elde edilmiş olur. Bu kombinasyonda genel olarak fiberler yük taşıyıcı görevi görürken matris, fiberleri bir arada tutarak olması gereken konum ve oryantasyonda kalmalarını sağlamaktadır. Matris aynı zamanda fiberler arasında yük aktarımını gerçekleştirip, fiberleri sıcaklık, nem gibi dış etkenlerden de korumaktadır.

2.1. Fiber Tipleri

Piyasada kullanım alanlarına göre ayrılan çeşitli tipte fiberler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

- Cam fiber
- Karbonfiber
- Kevlar (Aramid)
- Boron
- Silikon Karbür
- Alüminyum oksit

Bu fiber tipleri arasında ticari amaçla yaygın olarak kullanılanlar cam fiber, karbonfiber ve kevlar'dır. Diğer fiber tiplerinin kullanımı oldukça sınırlıdır. Fiber seçimi yapılırken aşağıdaki etkenler kullanılacağı alana göre değerlendirilmektedir;

- Yoğunluk,
- Çekme dayanımı ve modülü,
- Basma dayanımı ve modülü,
- Yorulma dayanımı,
- Elektrik ve termal iletkenlik,
- Maliyet

2.1.1. Cam fiber

Cam fiber, düşük maliyeti sebebiyle uygulamada en sık kullanılan fiber tipidir. Kendi içinde farklı karakteristik özellikler gösteren cam fiber tipleri bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanlar;

- E-glass
- S-glass

- C-glass

E-glass, piyasada bulunan en ucuz fiber tipidir. Bundan ötürü endüstride kullanımı en yaygın olan fiberlerden biridir. S-glass ise cam fiberler arasında en yüksek çekme dayanımı olan fiber tipidir. Hava aracı komponentlerinde ve füze muhafazalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bileşimindeki farklılıklar ve yüksek üretim maliyetleri sebebiyle E-glass'a göre daha maliyetlidir. C-glass ise asitlere karşı yüksek korozyon direnci göstermesi sebebiyle kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır.

- **Cam fiber avantajları;**

- Yüksek çekme mukavemeti,
- Kimyasallara ve korozyona karşı yüksek dayanım,
- İyi yalıtım özellikleri,
- Düşük maliyet (E-glass).

- **Cam fiber dezavantajları;**

- Diğer fiber tiplerine göre düşük elastik modülü,
- Aşınmaya yatkın olması sebebiyle zamanla çekme dayanımının düşmesi,
- Görece düşük yorulma dayanımı,
- Yüksek sertlik (Kalıp ve kesme aletlerinde aşınmaya sebep olur)

2.1.2. Karbonfiber

Karbonfiberlerin piyasada 207 GPa – 1035 GPa aralığında çekme elastik modülüne sahip çeşitli tipleri mevcuttur. Genel olarak elastik modülü düşük olan karbonfiberler yüksek olanlara oranla daha düşük maliyetlidir ve daha az yoğunluğa, daha fazla basma-çekme dayanımına ve şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir. Yüksek maliyetleri sebebiyle çoğu endüstride kullanımı yaygın değildir. Ağırlık kazancının maliyetten daha ön planda olmasından dolayı en yaygın olarak kullanıldığı sektör havacılık sektörüdür.

- **Karbonfiber avantajları;**

- Yüksek özgül dayanım,
- Yoğunluğuna oranla yüksek elastisite modülü,
- Düşük termal genleşme katsayısı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek ısı iletkenlik.

- **Karbonfiber dezavantajları;**

- Düşük şekil değiştirebilme kabiliyetleri,
- Düşük darbe direnci,
- Yüksek elektrik iletkenliği,
- Yüksek maliyet.

2.1.3. Kevlar (Aramid)

Aramid fiberler, yüksek kristal yapıya sahip, aromatik poliamid fiberlerdir. Mevcut fiber tipleri arasında en yüksek çekme dayanımı – ağırlık oranına sahip olanıdır. Kevlar, aramid fiberden üretilmiş kumaşların piyasadaki adıdır. Kevların öne çıkan özelliklerinden biri, karbon ve cam fiberlerde görülmeyen bir özellik olarak, eğilme sırasında basma tarafında yüksek derecede akma sergilemesidir. Bu özellik, kevlarlara üstün bir darbe direnci sağlamaktadır. Yüksek çekme mukavemeti ve darbe direnci sebebiyle havacılık ve denizcilik alanında birçok uygulamada kullanılmaktadır. Karbonfibre benzer şekilde negatif bir termal genleşme katsayısına sahip olması sebebiyle düşük genleşme özelliğine sahip olması gereken kompozit panellerin üretiminde kullanım alanı bulunmaktadır. Kevlar aynı zamanda darbe direncinin yüksek olması sebebiyle askeri vücut koruma yeleği ve kask üretiminde kullanılmaktadır.

- **Kevlar (Aramid) avantajları;**
 - Fiberler arasında en yüksek özgül dayanıma sahip olanıdır,
 - Yüksek darbe direnci,
 - Düşük termal genleşme katsayısı,
- **Kevlar (Aramid) dezavantajları;**
 - Düşük basma dayanımı,
 - Kesmenin veya işlemenin zor olması.

2.2. Matrisler

Matrislerin kompozit malzemelerdeki görevi, fiberleri bir arada tutarak fiberler arasında gerilmeleri aktarmaktır. Aynı zamanda matrisler kompozit malzemeleri dış etkenlerden de korumaktadır. Matrislerin çekme yönünde yük taşımada rolü oldukça azdır. Bununla beraber kompozit malzemelerin basma, katmanlar arası ve düzlem kayma özelliklerini belirlemede büyük bir rol oynar. Matrisler basma yükü altında fiberlere destek görevi görerek fiber burkulmasına engel olur. Bu da büyük ölçüde kompozit malzemelerin basma dayanımını etkiler. Katmanlar arası kayma dayanımı, eğilme yüklemeleri altında önemli bir tasarım değişkeniyken, düzlem kayma dayanımı burulma yüklemelerinde önemlidir. Fiber ve matris arasındaki etkileşim de yapıların hasara

toleranslarında önemli bir rol oynar. Sonuç olarak kompozit malzemelerde üretim süreci ve hatalar önemli ölçüde matrislerin karakteristiklerine bağlıdır.

Kullanım alanlarına göre endüstride ve akademik araştırmalarda farklı matris tipleri kullanılmaktadır. Matrisler kendi aralarında da sınıflara ayrılmaktadır. Bunlar;

- Polimer matrisler,
- Metal matrisler,
- Seramik matrisler.

Bunun yanında metal ve seramik matrisler ağırlıkla yüksek sıcaklık içeren uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.2.1. Polimer matrisler

Polimer matrisler iki kategoride incelenir;

- Termoset polimer matrisler,
- Termoplastik polimer matrisler.

Termoplastik polimerlerde, moleküller kimyasal olarak birbirine bağlı değildir. Bunun yerine moleküller, Van der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi zayıf ikincil bağlar veya moleküller arası kuvvetler tarafından yerinde tutulur. Isı uygulandığında, katı bir termoplastik polimerdeki bu ikincil bağlar geçici olarak kırılabilir ve moleküller birbirine göre hareket edebilir veya üzerlerine basınç uygulandığında yeni bir konfigürasyona akabilir. Soğutma sırasında, moleküller yeni konfigürasyonlarında donabilir ve ikincil bağlar yeniden oluşarak yeni bir katı şekil ortaya çıkar. Bu nedenle, termoplastik polimerler ısı ile yumuşatılabilir, eritilebilir ve tekrarlayan bir şekilde yeniden şekillendirilebilir.

Termoset polimerlerde ise moleküller çapraz bağlarla kimyasal olarak birbirine bağlanarak sert, üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturur. Bu çapraz bağlar polimerizasyon reaksiyonu (kürleme reaksiyonu) sonucunda oluşur ve termoset polimerler ısı uygulanarak eritilemez. Ancak, çapraz bağ sayısı düşükse, yüksek sıcaklıklarda yumuşamaları mümkün olabilir.

Termoset polimer matrisler düşük viskoziteleri sayesinde kolay işlenebilirliklerinden dolayı genelde sürekli ve uzun fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılmaktadır. Termoplastik matrisler ise enjeksiyon kalıplama ile üretilen kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılmaktadır.

Termoset ve termoplastik polimer matrisler aşağıda verilmiştir;

- **Termoset**

- Epoksi (Havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılır.)
- Polyester, Vinil ester (Otomotiv, denizcilik, kimyasal ve elektrik uygulamalarında kullanılır.)
- Fenolik reçineler (Kalıplamada kullanılır)
- Polimidler ve polibenzimidazoller (PBI) (Yüksek sıcaklık havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılır.)

- **Termoplastik**

- Naylonlar (Kısa fiberler ile birlikte enjeksiyon kalıplamada kullanılırlar.)
- Poliamid-imid (PAI), polieter eter keton (PEEK), polisülfon (PSUL), polifenilen sülfid (PPS), polieterimid (PEI) (Sürekli liflerle birlikte orta derecede yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur.)

2.2.2. Metal matrisler

Metal matris, yüksek sıcaklık gibi zorlu ortam koşullarına uzun vadeli direnç gerektiren uygulamalarda polimer matrislere göre avantaj sağlar. Çoğu metalin akma dayanımı ve modülü, polimerlere kıyasla daha yüksektir ve bu durum, yüksek enine dayanım, modül ve basma dayanımı gerektiren kompozit uygulamalarında önemli bir faktördür. Metallerin bir diğer avantajı ise plastik olarak şekillendirilebilmeleri ve çeşitli termal ve mekanik işlemlerle güçlendirilebilmeleridir. Metal matrislerin dezavantajları arasında; yüksek yoğunlukları, yüksek erime sıcaklıkları sebebiyle zor işlenmeleri, korozyon geliştirme eğilimleri. Metal matrisler daha önce de bahsedildiği üzere yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır. Bazı metal matrisler aşağıda verilmiştir;

- Alüminyum ve alaşımları,
- Titanyum alaşımları, magnezyum alaşımları,
- Bakır bazlı alaşımlar,
- Nikel bazlı süperalaşımlar,
- Paslanmaz çelik.

2.2.3. Seramik matrisler

Seramikler, yüksek sıcaklıklarda stabil özellikler göstermeleri, yüksek termal şok dirençleri, yüksek elastik modülü, yüksek sertlik, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluklarıyla öne çıkmaktadır. Ancak, gevrek malzemeler olup çatlak ilerlemesine karşı dirençleri düşüktür. Bu da düşük kırılma tokluğu olarak kendini gösterir. Seramik bir matrisi güçlendirmenin temel amacı, kırılma tokluğunu artırmaktır. Matris olarak

kullanılan seramikler oksitli ve oksitsiz seramikler olarak iki ana başlıkta incelenir.

Yaygın kullanılan oksitli seramiklere;

- Alumina (Al_2O_3),
- Mulit ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$) örnek verilebilir.

Oksitli seramik matrisler, yüksek kimyasal ve termal stabiliteleriyle tanınırlar. Yaygın oksitli olmayan seramiklere ise;

- Silisyum karbür (SiC),
- Silisyum nitrür (Si_3N_4),
- Boron karbür (B_4C),
- Alüminyum nitrür (AlN) örnek verilebilir (Mallick,2007).



3. KOMPOZİT HASAR MEKANİZMALARI

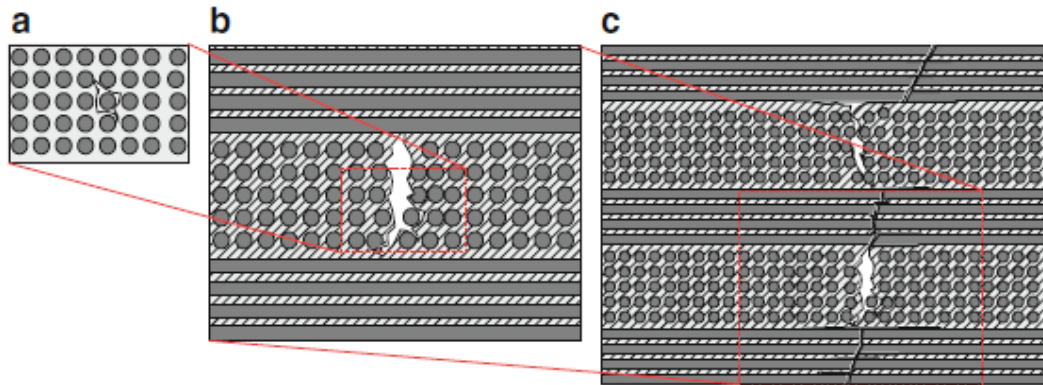
Fiber takviyeli kompozitlerde mekanik yükler altında çeşitli hasar mekanizmaları oluşabilmektedir. Gelişen hasar nihayetinde kompozitin göçmesi ile sonuçlanır. Matris malzemede mikro ölçekte çatlaklar meydana gelebilir, fiberler kopabilir veya her iki bileşen arayüzünde çatlaklar oluşabilir. Kırılma mekaniği açısından bakıldığında, durum daha karmaşık hale gelmektedir, çünkü bu temel mekanizmaların her biri, çeşitli makroskobik yükleme koşulları tarafından tetiklenebilir.

Hasar mekanizmaları 3 farklı ölçekte incelenir;

- **Mikros ölçek:** Lif ve matris seviyesindeki lokal deformasyonlar, çatlamlar ve boşluk oluşumları mikroskobik ölçekte incelenir. Lif-matris ara yüzeyindeki ayrılmalar da bu kategoriye girer.
- **Mezo ölçek:** Lif demetleri veya tabakalar arasındaki çatlamlar, delaminasyon ve lif kopmaları mezoskopik ölçekte değerlendirilir.
- **Makro ölçek:** Tam ölçekli yapıdaki taşıma kapasitesinin kaybı, büyük çaplı çatlakların ilerlemesi ve yük altında genel göçme gibi olayları makroskobik ölçekte incelenir.

Bu 3 grup aslında hasar mekanizmasının aşamalarıdır. Bu aşamalarda oluşan mekanizmalar, büyüyebilir, gelişebilir, etkileşime girebilir ve daha karmaşık mekanizmalara dönüşebilir. Örnek vermek gerekirse, mikro ölçekte oluşan bir hasar sırasıyla mezo ve makro ölçekteki hasar mekanizmalarına yol açabilmektedir (Sause,2016).

Şekil 3.1’de mikro, mezo ve makro ölçekte hasar mekanizması aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Çapraz katmanlı bir yapıda hasar gelişiminin (a) mikro, (b) mezo ve (c) makro ölçekte gösterimi (Sause,2016)

3.1. Temel Hasar Modları

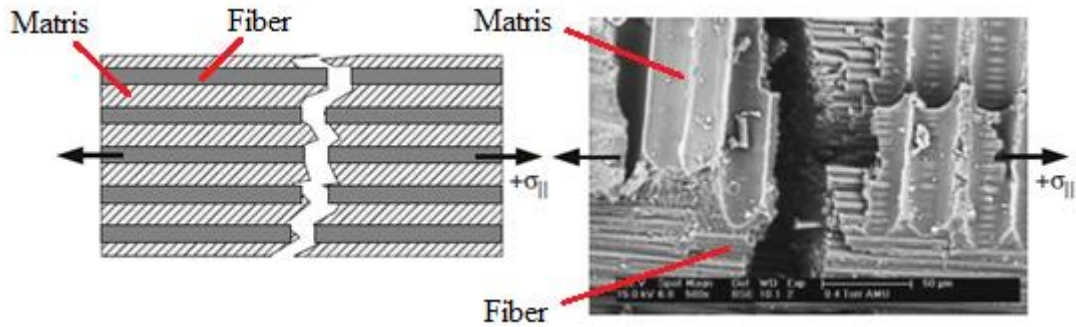
Kompozit malzemelerde hasar modları ve mekanizmaları, malzemenin yapısına, yükleme türüne ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Temel hasar modları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Fiber hasarı,
- Matris hasarı,
- Fiber – matris arayüzey ayrışması,
- Delaminasyon.

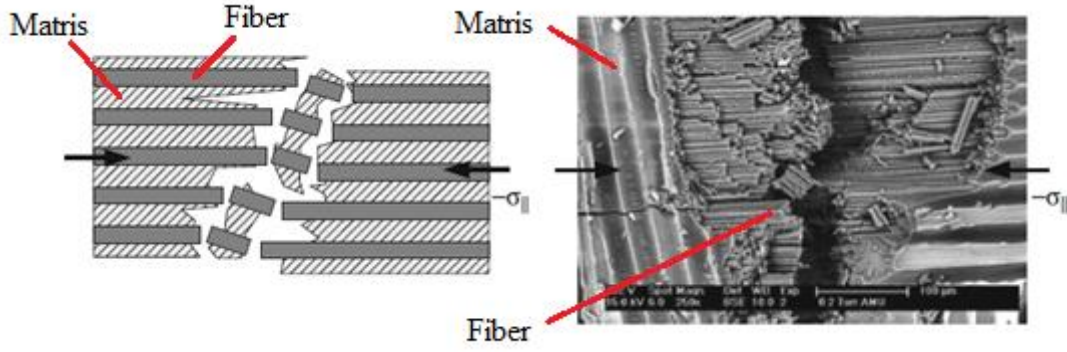
3.1.1. Fiber hasarı

Fiber hasarı, fiberlerin kopması şeklinde gerçekleşir ve genellikle çekme yükleri altında gerçekleşir. Fiberlerin kopması, malzemenin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltır. Fiber kopmaları, genellikle malzemenin aniden ve gevrek bir şekilde hasar görmesine neden olur (Heslehurst, 2014). Fiberler, çekme yükü altında kopma davranışı gösterirken, basma yükleri altında daha farklı bir davranış gösterirler. Basma yükleri sonucunda, matrisin fiberleri desteklemekte yetersiz kaldığı durumda mikro burkulmalar gözlemlenir ve fiberler parçalanması söz konusu olur (Sause,2016).

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te fiber kopması ve fiber parçalanmasının elektron mikroskobu ve şematik gösterimleri sunulmuştur.

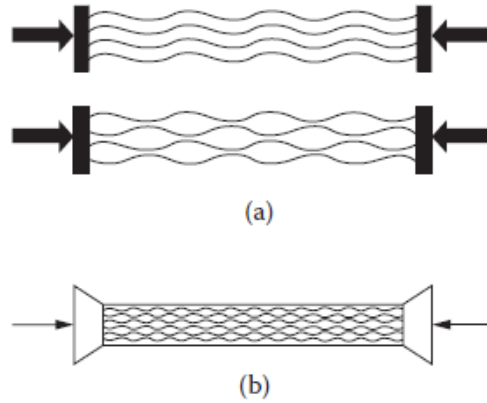


Şekil 3.2 Karbonfiber, çekme yükü altında fiber kopması şematik gösterimi ve elektron mikroskobu görünümü (Sause,2016)



Şekil 3.3 Karbonfiber, basma yükü altında fiber parçalanması şematik gösterimi ve elektron mikroskobu görünümü (Sause,2016)

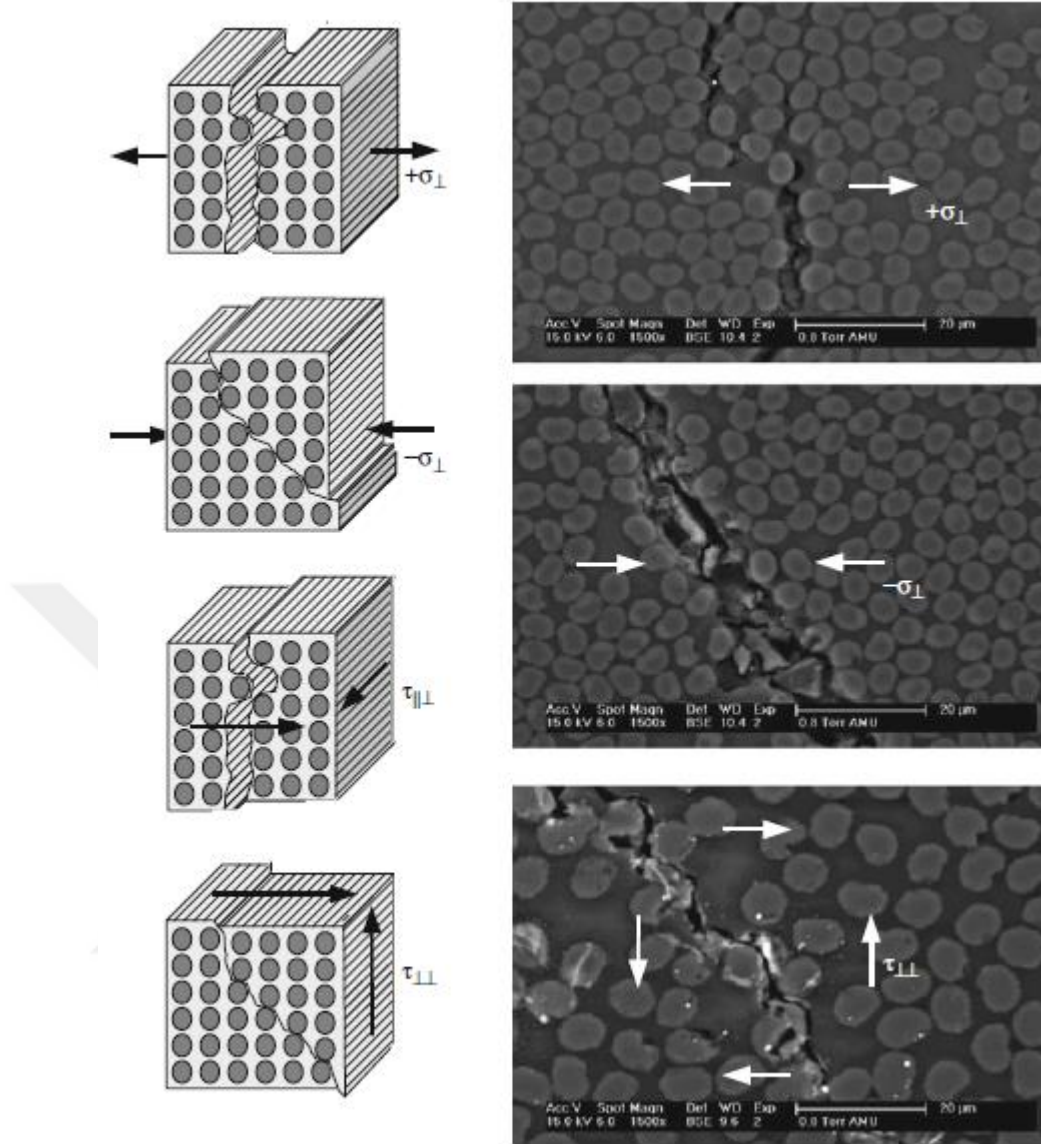
Mikro burkulma, fiberlerin basınç yükü altında kararsız hale gelerek burkulma davranışı göstermesi sonucu olur. Kompozitin yük taşıma kapasitesinde ciddi kayıplara sebep olur. Şekil 3.4'te basma yükü altında fiber burkulmasının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.4 Basma yükü altında (a) asimetric burkulma, (b) simetrik burkulma davranışı (Heslehurst, 2014)

3.1.2. Matris hasarı

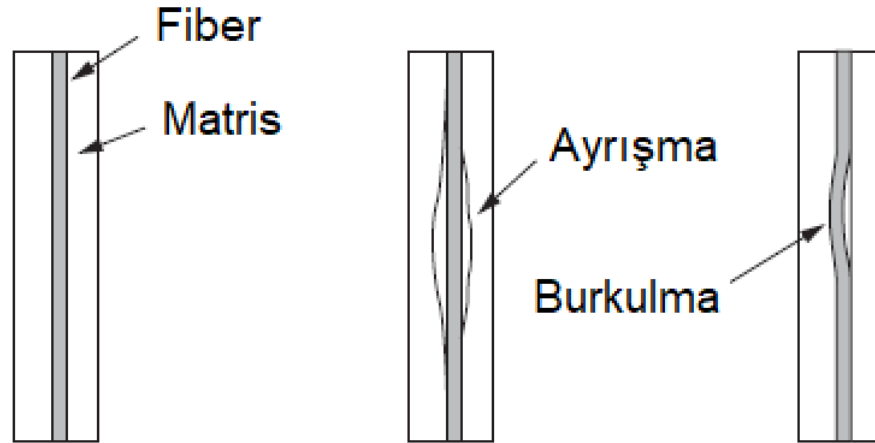
Kompozit katmanlardaki matrisin hasara uğraması, enine matris hasarı veya reçine sisteminde çatlamların oluşması şeklinde kabul edilir. Matris hasarları fiberlerden bağımsızdır. Enine matris hasarı aynı zamanda katman içi çatlama olarak da bilinir. Çevresel etkilerin reçine ile etkileşime girerek özelliklerinde düşüşe sebep olması da matris hasarı olarak kabul edilebilir (Heslehurst, 2014). Şekil 3.5'te farklı yüklemeler altında matris hasarlarının şematik ve elektron mikroskobu altındaki görünümeleri görülmektedir.



Şekil 3.5 Karbon-epoksi malzemenin standart yüklemeler altında matris hasarlarının şematik ve elektron mikroskobu altında görünümü (Sause,2016)

3.1.3. Fiber-matris arayüzey hasarı

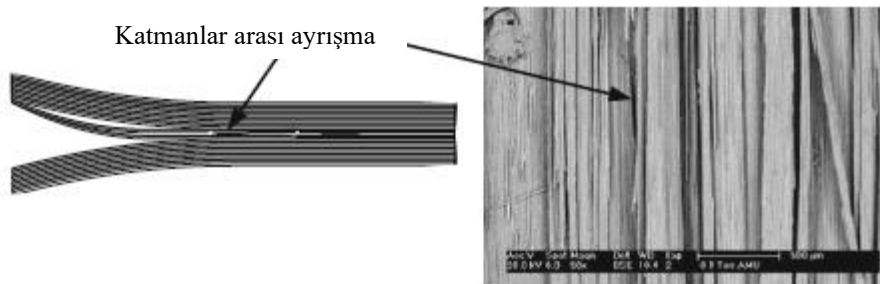
Fiber ve matris arasındaki bağın zayıflaması veya kopması durumunda fiber-matris arayüzey ayrışması meydana gelir. Bundan kaynaklı oluşan hasarlar arayüzey hasarı olarak adlandırılır. Bu tür hasarlar, özellikle yüksek kesme gerilmeleri altında ortaya çıkar ve malzemenin yük transfer kapasitesini azaltır (Heslehurst,2014). Bazı arayüzey hasarları Şekil 3.6'daki gibidir.



Şekil 3.6 Fiber yönü boyunca basma yükü altında fiber-matris arayüzey hasarı (Heslehurst, 2014)

3.1.4. Delaminasyon hasarı

Kompozit laminatlarda, katmanlar arasında oluşan ayrılmalar delaminasyon olarak adlandırılır. Aynı zamanda katmanlar arası çatlak oluşumu olarak da bilinir. Matris hasarının başka bir versiyonudur. Delaminasyon, özellikle basma yükleri altında ciddi bir sorun teşkil eder ve malzemenin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltır. Şekil 3.7’de delaminasyon hasarının şematik ve elektron mikroskobu altındaki gösterimleri verilmiştir.



Şekil 3.7 Delaminasyon hasarının şematik ve elektrom mikroskobu altındaki gösterimi

3.2. Kompozit Hasar Kriterleri

Fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik yapıları gereği metallere farklı hasar mekanizmalarına sahiptir. Fiber, matris ve tabaka arayüzeylerinde meydana gelebilen hasarlar, fiber takviyeli kompozit malzemelerin hasar mekanizmalarını kompleks, anlaması ve modellemesi zor bir hale getirmektedir (Nali ve Carrera, 2012).

Kompozit malzemelerin karmaşık hasar mekanizmaları ve görünmeyen iç kusurları, tasarım ve güvenilirlik açısından önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır (De Luca ve Caputo, 2017). Hasar kriterleri bu noktada kompozit yapıların maruz kaldıkları yükler altında nasıl hasara uğrayacağını tahmin etmek için geliştirilmiş teorik ve deneysel yaklaşımlar sunar (Echaabi ve diğ., 1996). Kompozit malzemelerin hasar kriterleri konusu birçok araştırmaya konu olmuştur. Önerilen yaklaşımların sayısı ve çeşitliliği fiber takviyeli kompozit malzemeler için hasar kriterlerinin hala önemli bir araştırma konusu olduğunu açıkça göstermektedir. Bu konuda önemli ilerlemeler katedilse de evrensel olarak kabul edilen bir hasar kriteri bulunmamaktadır (Camanho, 2002). Hasar kriterleri temelde 2 sınıfta incelenmektedir;

- Farklı gerilme bileşenleri arasındaki etkileşimi ihmal eden kriterler,
- Farklı gerilme bileşenleri arasındaki etkileşimi hesaba katan kriterler.

İlk gruba dahil olan hasar kriterleri, farklı eksenlerdeki gerilme veya gerinim bileşenlerini birbirinden bağımsız olarak incelemektedir. Matematiksel olarak modellenmesi basittir. Bu yaklaşımda, bir ekseninde veya düzlemde oluşan normal veya kayma gerilmelerinin veya gerinimlerinin diğer bileşenlerden etkilenmediği varsayılarak gerilme ve şekil değiştirmeler ayrı olarak değerlendirilir. Gerilme bileşenleri arasındaki etkileşimi ihmal eden kriterler arasında;

- Maksimum gerilme kriteri,
- Maksimum şekil değiştirme kriteri yer almaktadır.

Bir diğer gruba dahil hasar kriterleri ise, gerilme bileşenlerinin birbiri üzerindeki etkilerini hesaba katarak gerilmeler arasındaki etkileşimleri göz önünde bulundurmaktadır. Farklı yönlerdeki gerilmeler birbirini etkileyerek malzemenin daha erken veya daha geç hasara uğramasına neden olabilir. Daha gerçekçi bir yaklaşım olmasına rağmen modellenmesi daha zordur. Bu gruptaki kriterler ise hasar gelişimini tek bir eşitsizlik ile ilişkilendiren ve etkileşimli ve etkileşimli olmayan koşulların bir kombinasyonunu öne süren kriterler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu iki grup arasından ilkinde dahil olan bazı hasar kriterleri arasında;

- Tsai Wu,
- Tsai Hill
- Hoffman
- Liu Tsai kriterleri yer almaktadır.

İkinci grup ise gerilme bileşenleri arasındaki etkileşimi sadece matematiksel değil, aynı zamanda fiziksel hasar mekanizmalarıyla da açıklama kabiliyetine sahiptir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir;

- Hashin ve Rotem,
- Hashin,
- Puck ve Schürmann,
- LaRC03.

Her bir hasar kriterinde hasar endeksi adı verilen bir değer elde edilmesi amaçlanmaktadır. Hasar endeksi, referans alınan hasar kriterine göre yapının hasar görüp görmediğini belirten değerdir (Nali ve Carrera, 2012).

3.2.1. Maksimum gerilme ve maksimum şekil değiştirme kriteri

Maksimum gerilme kriteri, hasar modları arasındaki etkileşimi hesaba katmaz. Bu kriter gereğince, asal eksenlerdeki her bir gerilme değeri bu eksenlerdeki malzeme dayanımlarından düşük olmalıdır. Aksi takdirde hasar meydana gelecektir (Jones, 1999).

$$\sigma_{11} < X_t, \quad \sigma_{22} < Y_t \quad (3.1)$$

$$\sigma_{11} > X_c, \quad \sigma_{22} > Y_c \quad (3.2)$$

$$|\tau_{12}| < S^L \quad (3.3)$$

Maksimum şekil değiştirme kriteri de benzer mantıkta çalışmaktadır. Gerilmeler yerine şekil değiştirmelerin kısıtları ele alınmaktadır.

$$\varepsilon_{11} < X_{et}, \quad \varepsilon_{22} < Y_{et} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{11} > X_{ec}, \quad \varepsilon_{22} > Y_{ec} \quad (3.5)$$

$$|\gamma_{12}| < \gamma_{12}^L \quad (3.6)$$

3.2.2. Tsai – Hill kriteri

Tsai-Hill kriteri, çarpılma enerjisini baz alarak türetilmiştir (Hill, 1965), (Tsai, 1968). Böylelikle, düzlem kayma gerilmelerini hesaba katan interaktif bir hasar kriteridir. Hasar durumu aşağıdaki eşitsizlik ile açıklanır;

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (3.7)$$

Dayanım sınırları olan X ve Y gerilmenin koordinat sisteminin hangi çeyreğinde yer aldığına bağlıdır. $\sigma_{11} \geq 0$ durumunda $X = X_t$, $\sigma_{11} < 0$ durumunda $X = X_c$ şeklinde çekme veya basma dayanımı olarak güncellenir. Benzer şekilde $\sigma_{22} \geq 0$ durumunda $Y = Y_t$, $\sigma_{22} < 0$ durumunda $Y = Y_c$ 'dir (Nali ve Carrera, 2012).

3.2.3. Tsai – Wu kriteri

Tsai-Wu kriteri, fiziksel temellerden türetilerek değil, deneysel sonuçlara uydurularak formülize edilmiştir. Önceki iki eksenli hasar kriterleri, deneysel verileri temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu noktada kriter ile deney sonuçları arasındaki tutarlılığı arttırmak için hasar denklemindeki terim sayısı artırılmalıdır. Eğri uydurma ve çeşitli mukavemetlerin tensör olarak temsil edilmesi yöntemlerini kullanarak Tsai ve Wu (1971) deneysel veriler ile hasar kriteri arasında uyumu sağlamışlardır. Bu süreçte iki yöndeki gerilmeler arasındaki etkileşimi temsil edebilmek adına yeni bir mukavemet tanımına ihtiyaç duyulmuştur (Jones,1999). Tsai-Hill kriteri ile benzer olarak düzlem kayma gerilmelerini hesaba katan interaktif bir hasar kriteridir (Nali ve Carrera, 2012). Hasar durumu aşağıdaki eşitsizliğe dayanır;

$$A_{11}\sigma_{11}^2 + 2A_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + A_{22}\sigma_{22}^2 + A_{66}\tau_{12}^2 + B_1\sigma_{11} + B_2\sigma_{22} \geq 1 \quad (3.8)$$

Bu eşitsizlikteki A ve B değişkenleri aşağıda verilmiştir;

$$A_{11} = \frac{1}{X_t X_c} \quad (3.9)$$

$$A_{12} = \frac{1}{2\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} \quad (3.10)$$

$$A_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c} \quad (3.11)$$

$$A_{66} = \frac{1}{(S^L)^2} \quad (3.12)$$

$$B_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (3.13)$$

$$B_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (3.14)$$

3.2.4. Liu-Tsai kriteri

Geleneksel hasar analizlerinde genellikle ilk katman hasarı üzerinde durulurken, Liu-Tsai kriteri, katman bazında gelişen bir hasar modelini incelemektedir. Gerçek hayatta kompozit yapılarda hasar başladığında yapı tamamen yük taşıma kabiliyetini kaybetmez. Bazı katmanlar hasar alsa da kompozit yapı bir süre daha yük taşımaya devam edebilir. Diğer hasar kriterleri ilk katman hasarının oluşmasını ele alırken, Liu-Tsai kriteri, hasar gelişiminin katmanlarda ilerlemesi ve son katman hasarlarını inceler. Hasar oluşumunun sonucunda yapının direngenliğindeki düşüş göz önüne alınarak yeniden gerilme dağılımları hesaplanır. Son katmanda hasar oluşumu gözlemlendiğinde yapının

artık yük taşımayacağı kabul edilir. (Liu ve Tsai, 1996) Hasar durumu aşağıdaki eşitsizlik ile ilişkilendirilir;

$$\frac{\sigma_x^2}{X_t X_c} + \frac{2F_{xy}^* \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} + \frac{\sigma_y^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}}{S_L} + \left[\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right] \sigma_x + \left[\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right] \sigma_y \geq 1 \quad (3.15)$$

Burada F_{xy}^* etkileşim katsayısıdır ve en sağlıklı şekilde kombine gerilme testleri ile elde edilir.

$$F_{xy}^* = \frac{F_{xy}}{\sqrt{F_{xx} F_{yy}}} \quad (3.16)$$

3.2.5. Hoffman kriteri

Hoffman kriteri geliştirilirken, Mises (1928) ve Schleicher (1926) izotropik ve Hill'in (1948) ortotropik akma koşullarından faydalanılmıştır. Temelde Hoffman kriterini benzer hasar kriterlerinden ayıran özelliği, farklı yönlerde basma ve çekme dayanımlarını ayrı olarak incelemesidir (Hoffman, 1967).

Hoffman kriterine göre hasar oluşumunu incelemek için 9 adet malzeme parametresi kullanılmaktadır. Hasar oluşumu aşağıdaki eşitsizlik ile açıklanır;

$$C_1(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + C_2(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + C_3(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + C_4\sigma_{11} + C_5\sigma_{22} + C_6\sigma_{33} + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{31}^2 + C_9\tau_{12}^2 \geq 1 \quad (3.17)$$

Burada $C_1 \dots C_9$ malzeme parametreleridir ve temel 9 malzeme dayanımından hesaplanır;

- Üç eksen de çekme dayanımı: X_t, Y_t, Z_t
- Üç eksen de basma dayanımı: X_c, Y_c, Z_c
- Üç düzlemde saf kayma dayanımı: S_{23}, S_{31}, S_{12}

Bu verilerden aşağıdaki şekilde parametreler hesaplanır;

$$C_1 = \frac{1}{2} [(Y_t Y_c)^{-1} + (Z_t Z_c)^{-1} - (X_t X_c)^{-1}] \quad (3.18)$$

C_2 ve C_3 x,y,z'nin permütasyonu ile bulunur.

$$C_4 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (3.19)$$

C_5 ve C_6 x,y,z'nin permütasyonu ile bulunur.

$$C_7 = (S_{23})^{-2} \quad (3.20)$$

C_8 ve C_9 x,y,z'nin permütasyonundan bulunur.

3.2.6. Hashin kriteri

Hashin kriteri, 4 adet interaktif ve interaktif olmayan koşulu ele alarak, fiber ve matris üzerinde çekme veya basma etkilerinden dolayı oluşan hasarları ayırt etmeyi amaçlar. İlk önce Hashin ve Rotem (1973) tarafından yapılan çalışmada geliştirilmiş, daha sonra Hashin (1980) üzerinde revizyonda bulunmuştur. Daha sonraları Sun ve diğ. (1996) tarafından deneysel modifikasyonlar yapılarak daha kapsamlı bir versiyonu ortaya atılmıştır (Nali ve Carrera, 2012). İnteraktif bir hasar kriteri olmakla birlikte farklı koşullar için hasar durumları aşağıda verilen eşitsizliklere dayanır;

Çekmeye dayalı matris hasarı ($\sigma_{22} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (3.21)$$

Basmaya dayalı matris hasarı ($\sigma_{22} < 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S^L}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (3.22)$$

Çekmeye dayalı fiber hasarı ($\sigma_{11} > 0$):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \geq 1 \quad (3.23)$$

Basmaya dayalı fiber hasarı ($\sigma_{11} < 0$):

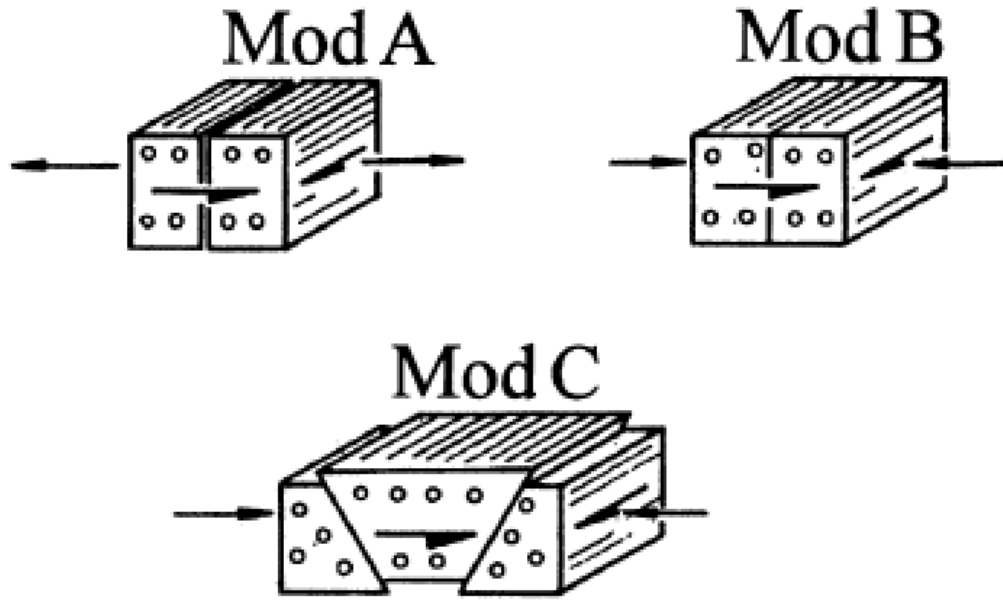
$$-\frac{\sigma_{11}}{X_c} \geq 1 \quad (3.24)$$

3.2.7. Puck ve Schürmann kriteri

Puck ve Schuermann (1998), geliştirdikleri kriterde, yalnızca fiber kırılmasının yanı sıra, fiberler arası kırılma adı altında matris üzerinde meydana gelen hasarları kırılma mekaniği kapsamında incelemeyi amaçlamışlardır. Bu kriter, yalnızca kırılmaya sebep olan gerilme düzeylerini belirlemekle kalmayıp, çatlak yönünü de göstermektedir. Çatlak yönünün belirlenmesi, kırılmanın olası etkilerinin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Çatlak oluşumu sonucunda etkilenen katmanların direngenlikleri, fiber kırılması gerçekleşip katmanı tamamen hasara uğratana kadar yükün artmasıyla birlikte gitgide düşmektedir. Bunun yanı sıra kenarları açılı kama şeklinde bir fiber arası çatlak da nihai hasara sebep olabilmektedir. Bu kriter, bu tür mekanizmalarda meydana gelen kırılma risklerini değerlendirmektedir. Bu noktada kırılma açısının belirlenmesi kritiktir.

Fiberler arası kırılma A,B ve C modları olmak üzere 3 farklı modda incelenmektedir. A, B ve C modları Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Fiberler arası kırılma modları

Tüm hasar kriterleri değerlendirildiğinde, düzlem kayma gerilmelerini hesaba katması ve deneysel sonuçlarla desteklenen bir hasar kriteri olması sebebi ile bu tez çalışmasında kompozit hasarlarının Tsai-Wu kriterine göre değerlendirilmesine karar verilmiştir.

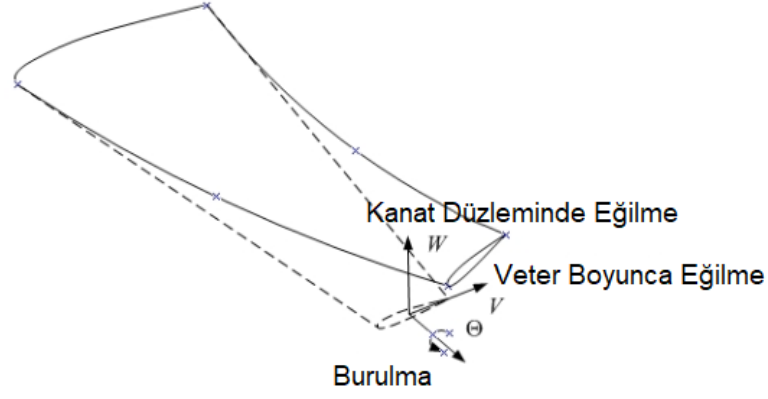
4. KANAT YÜKLERİ VE BİLEŞENLERİ

Kanatlar, hava araçlarında motorların oluşturduğu itki sonucunda, hareket yönünde hava ile etkileşime girerek hava araçlarının havalandırmasını sağlayan taşıma kuvvetini oluşturan bileşenlerdir. Uçak kanatları, kanat profili ismi verilen özel geometrileri dolayısıyla, hücum kenarı tarafından gelen havanın kanat geometrisi üzerinden geçerek firar kenarından kanadı terk etmesi esnasında, profilin alt ve üst yüzeylerindeki basınç farkları dolayısıyla kaldırma kuvveti üretmesi prensibi ile çalışır. Bu çalışma şekli “Bernoulli Prensibi” ile açıklanır. Bernoulli Prensibi’ne göre, kubbe şeklinde olan kanat profilinin üst kısmında hava akışı, alt yüzeyden daha hızlıdır ve hava akışı hızlandıkça basınç düşmektedir. Bu şekilde, kanat altı basınçları üst taraftan fazla olduğu için taşıma kuvvetleri oluşur (GlascoffIII, 1969).

Uçak kanatları çalışma şartları esnasında farklı eksenlerde yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Bunlardan birincisi ve en baskın olanı, taşıma kuvvetinin oluşturduğu eğilme momentleridir. Kanatların uzun yapıları ve kök kısmından uçak gövdesine bağlanması sebebiyle kaldırma kuvveti, kanatlar üzerinde eğilme momentlerine sebep olmaktadır.

Bir diğer yükleme ise, veter boyunca yük dengesizliklerinden kaynaklanan ve kanadı yunuslama eksenini etrafında dönmeye zorlayan burulma momentidir. Eğilme momentleri kadar etkili olmasa da kanatların burulma davranışları da göz ardı edilmeyecek kadar önemlidir.

Kanatların maruz kaldığı başka bir yük, sürüklenme kuvvetidir. Bu kuvvet, hareket yönüne ters yönde etki eder. Sürüklenme kuvveti, hava direnci ve türbülans gibi çeşitli nedenlerden oluşur. Sürüklenme kuvveti, hava aracının önden bakıldığındaki izdüşüm alanı ile orantılıdır ve kanat hücum kenarları nispeten oldukça küçük izdüşüm alanına sahip olduğu için, sürüklenme kuvvetlerine bağlı yüklemeler ses altı hızlarda uçan hava araçlarında diğerlerine oranla oldukça düşük kalmaktadır (Wright ve Cooper, 2008). Kanat yüklerinin görsel anlatımı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Kanat üzerine gelen yükler

Uçak kanatları, Şekil 4.1’de bahsedilen yüklemelere dayanacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu sebeple kanatların iç yapısı, bir iskelet yapısından oluşmaktadır. Bu yapı bazı temel bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler;

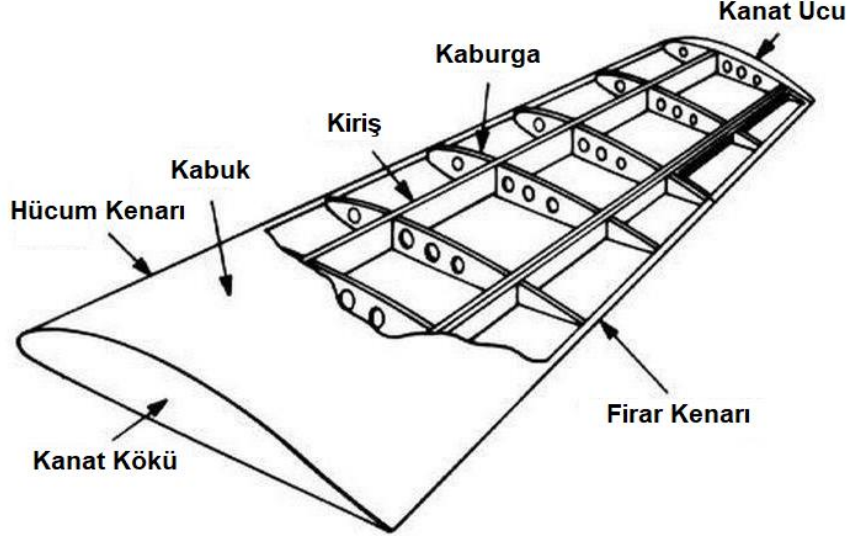
- Alt ve üst kabuklar
- Kaburgalar
- Kirişler olarak ayrılır.

Alt ve Üst Kabuklar: Bu bileşenler, kanat yapısının dışını kaplayarak kanadın bütünlüğünü ve asıl aerodinamik geometrisini oluşturan bileşenlerdir. Çoğunlukla kompozit malzemelerden imal edilirler.

Kaburgalar: Kabukların iskelet yapısı ile birleşme yüzeylerini oluştururlar ve kanadın profil şeklini korumasını sağlarlar. Kanat yapısı içerisine belirli aralıklarla yerleştirilerek kabuk bütünlüğünü sağlar ve dayanımını arttıırırlar.

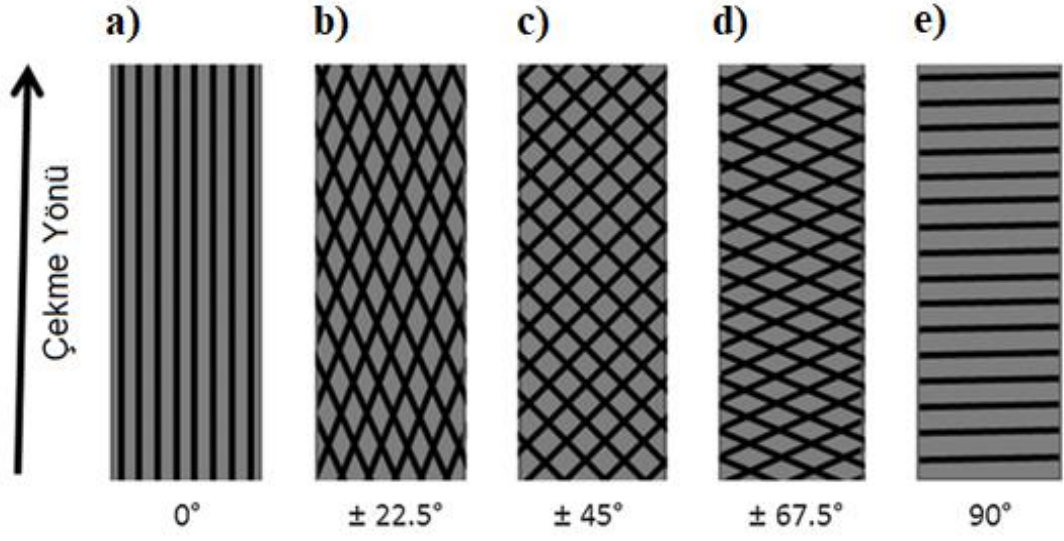
Kirişler: Kanat yapılarının en önemli taşıyıcı yapısıdır. Eğilme momenti ve kesme yüklerini taşırlar (Xavier ve diğ., 2018).

Kanat bileşenleri ve kanadın bölgeleri Şekil 4.2’deki görselde verilmektedir.



Şekil 4.2 Kanat yapısal bileşenleri ve bölgeleri

Taşıyıcı kirişler, çeşitli geometrilerde ve üretim yöntemleriyle üretilmektedir. Bu parametreler, üretim kolaylığı, ağırlık, maliyet gibi faktörlere göre şekillenir. İhtiyaçları karşılayan optimum tasarımı yapmak özellikle havacılıkta önemlidir. Farklı geometriler, farklı dayanımsal özellikler getirir. Bu özelliklerden en önemlisi, eğilme ve burulma gerilmeleri hesaplanırken kullanılan atalet momentleridir. Atalet momentleri, parçaların kesit alanlarından hesaplanır ve genel tanım olarak, eğilme ve burulmaya karşı dirençlerini temsil ettiği söylenebilir (Sun ve Adnan, 2021). Yapısal dayanımları etkileyen bir diğer faktör ise kompozit malzemeler için fiber oryantasyonlarıdır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden biri de izotropik malzeme özellikleri göstermemeleridir. Mekanik özellikleri, 3 eksenle yöne bağlı olarak değişmektedir ve bu gibi malzemelere ortotropik malzeme denilmektedir. Yöne bağlı değişen mekanik özellikler kullanılarak, fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı yükleme koşullarına karşı dirençleri kontrol edilebilir. Bu kontrol, fiber yönelim açılarının değiştirilmesiyle gerçekleşir. Fiber yönelimlerinin değişmesi ile yapı üzerindeki yük dağılımlarının da farklılık gösterdiği bilinmektedir (Ferreira ve Ashcroft, 2020). Fiber yönelimlerinin farklı örnekleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Farklı açılarda fiber yönelimleri (a) 0° ; (b) $\pm 22.5^\circ$; (c) $\pm 45^\circ$; (d) $\pm 67.5^\circ$; (e) 90°

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde, kompozit yapıların ve kanat kiriş yapılarının yapısal davranışlarının incelendiği parametrik çalışmaların yürütüldüğü çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Bu alanda araştırmacılar, karşılaştırılan parametreler ve sınır şartlarının belirlenmesi konularında farklı yaklaşımlarda bulunmuşlardır. Parametrelerin karşılaştırılmasında genel yaklaşımlar, kiriş profilleri ve serim açılarının karşılaştırılmasıdır.

Aung ve diğ. (2020), hafif hava araçlarının kompozit kanatlarının optimizasyonu üzerine yürüttükleri çalışmada kanat kirişlerinin serim açılarını ve et kalınlıklarını karşılaştırmışlardır. Malzeme olarak T300 karbonfiber-epoksi kullanmışlardır. Kanat boyunca gelen yük dağılımlarını, Zhitomirskii (2005) ve Neubaer ve Günther (2000)'in geliştirmiş olduğu yaklaşımlardan yola çıkarak hesaplamışlardır. Plaka şeklindeki kirişler için, (a) $+45^\circ$, -45° , 90° , 0° , 90° , 0° , -45° , $+45^\circ$; (b) $+45^\circ$, -45° , 0° , -45° , $+45^\circ$; (c) 90° , 0° , 90° ; (d) 0° olmak üzere 4 farklı oryantasyon üzerinde çalışan Aung ve diğ., kanat yapısının esneme miktarını baz alarak kirişler özelinde en uygun serim açısının 0° , et kalınlığını ise 4.625 mm olarak belirlemişlerdir.

An ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmada şekil dönüştürücü (shape transformer) yöntemini kompozit yapılara uyarlamaktadırlar. Eğilme ve burulma yüklemeleri altındaki lamine kompozit yapıların tasarımında, serim açıları, katman sayısı, kesit şeklini ve lamine malzemesini ele almışlardır. Bu yaklaşım tasarım aşamasında kavramsal bir destek aracı ve karşılaştırma metodu olarak kullanım alanı sunmaktadır. Bulgularda, 45° fiberlerin burulma, 0° fiberlerin ise eğilme rijitliğinde en yüksek değerleri verdiklerini belirtmişlerdir. Kesit geometrisi açısından yapılan değerlendirmede, I, Z, kutu ve tüp profillerle çalışılmış, kapalı kesitli profillerin açık kesitli olanlara göre özellikle burulma açısından daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. I kesitin en iyi eğilme performansını sergilediğini, kutu kesitin eğilme ve burulma altında dengeli bir performans gösterdiğini ve tüp profilin önüne geçtiğini, tüp profilin burulma açısından iyi performans sergilerken eğilme konusunda kutu profilin yaklaşık 1,65 kat daha iyi olduğunu sonucuna ulaşmışlardır.

Gerçekleştirdikleri araştırmada karbon ve cam fiber takviyeli kompozit kirişlerin tasarım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilecek basitleştirilmiş bir yaklaşım öneren Moazed ve diğ. (2021) fiber yönelimi, laminat kalınlığı, malzeme tipi, kiriş kesit profili ve kütle gibi parametreleri dikkate almışlardır. Bu parametrelerin entegre biçimde seçilebilmesini sağlamak amacıyla yapısal endeksler ve verimlilik ölçütleri geliştirilmiş ve tasarım diyagramları şeklinde sunulmuştur. Bu diyagramlar sayesinde kullanıcıların

tasarım aşamasında hedefledikleri direngenlik ve kütle hedeflerine ulaşabilmeleri için optimum fiber yönelimi, katman sayısı, kesit profili, malzeme kombinasyonlarını hızlı ve etkili biçimde belirlemeleri amaçlanmıştır. Tasarım doğruluğu sonlu elemanlar analizi ile doğrulanmıştır. Bulunan yöntem, bir robot kolun eğilme ve burulma rijitliğini artırılması çalışmasında uygulanmış geleneksel alüminyum yapılara göre daha hafif ve direngen çözümlere ulaşılmıştır. Ulaşılan sonuçlarda eğilme ve çekme rijitliğinin 0° 'de maksimum olduğunu, 0° - 10° arası fiber açılarının rijitliğinde önemli bir azalma görülmezken 10° - 45° arası açılarda hızlı bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca 45° fiber açısının burulma açısından maksimum performansı gösterdiğini bulmuşlardır. Bulgularda 90° fiber yönelimi tüm durumlarda en zayıf performansı göstermiştir. Kesit profillerini karşılaştırdıklarında kare kesitin dairesel ve I kesite göre en yüksek eğilme rijitliğine sahip olduğu, burulma rijitliğinde ise yine kare profilin dairesel profilin önüne geçtiğini ve 45° fiber yöneliminde en iyi sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Karbon fiber takviyeli kompozitin cam fibere göre daha rijit ve daha hafif olduğu sonucuna varmışlardır.

Yapılan başka bir araştırmada, Solovveyev ve diğ. (2017), karbonfiber-polimid U profilli kanat kirişlerinde farklı serim açılarının yapısal etkilerini araştırmışlardır. Kirişlerde sadece eğilme değil, burulma etkilerinin de ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ kombinasyonları ile çalışmış, minimum deformasyonların 0° serim açısında ortaya çıktığı sonucuna varmışlar fakat gerilme durumundaki riskleri azaltmak için $0^\circ/90^\circ$ ortogonal serim önermişlerdir.

Shevtsov ve diğ. (2018), taşıyıcı yapıda kullanılan uzun, ince cidarlı bir kompozit tüp kiriş üzerinde farklı serim açıları ve katman dizilimlerinin mekanik performansa etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, cam fiber takviyeli kompozitten imal edilen yapının, eğilme ve burulma yükleri altında göstereceği davranış optimize edilmeye çalışılmıştır. Farklı serim açılara sahip beş ayrı simetrik ve dengeli katman dizilimi belirlenmiştir. Sonraki aşamada serim açılarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmiş ve elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranlarının serim açısına bağlı olarak nasıl değiştiği grafiksel olarak analiz edilmiştir. Eğilme ve burulma davranışları incelendikten sonra optimizasyon için aday katman dizilimleri belirlenmiş, eğilme deformasyonları ve burulma açıları karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçlarda öne çıkan dizilimlerin $(\pm 30^\circ/0^\circ)$, $(\pm 30^\circ)$, $(\pm 30^\circ/\pm 15^\circ)$, $(\pm 45^\circ/\pm 15^\circ)$ kombinasyonları olduğunu görmüşlerdir. Eğilme rijitliği ve toplam şekil değiştirme enerjisinin düşüklüğü açısından $(\pm 30^\circ/0^\circ)$ kombinasyonu öne çıkarken minimum burulma açısını $(\pm 45^\circ/\pm 15^\circ)$ kombinasyonunda gözlemlemişlerdir. Eğilme ve burulma davranışları birlikte

değerlendirildiğinde ise en dengeli performansı ($\pm 30^\circ$) kombinasyonunun sağladığı sonucuna varmışlardır.

Uçak kanat kutusu adı verilen, ön-arka kiriş ve üst-alt kanat kaplamalarının birleşiminden oluşan ve kanat boyunca uzanan taşıyıcı yapıların fiber oryantasyonları ile flutter davranışlarının optimize edilmesi üzerine çalışma yapan Guo ve diğ. (2006), karbon-epoksi kanat kutusu yapılarında fiber açılarının eğilme ve burulma davranışına doğrudan etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda, 0° yönelimdeki fiberlerin eğilme rijitliğine olumlu etki ettiği, $\pm 45^\circ$ fiber oryantasyonu kullanımının ise burulma rijitliğini arttırdığı kanısına varmışlardır.

Guo ve diğ. (2003), kompozit malzemeden yapılmış bir kanat kutusu yapısında fiberlerin serim açıları değiştirilerek çırpınma (flutter) hızının artırılması hedeflenmiştir. İlk aşamada $[\pm 30^\circ]$ ve $[\pm 45^\circ]$ gibi simetrik serim açıları, ardından farklı açılarda asimetrik serim açıları denenmiş ve bu açıların kanadın eğilme, burulma ve eğilme-burulma bileşke rijitliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle asimetrik serim açıları kullanıldığında çırpınma hızının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. En iyi sonuç, $40,6^\circ$ ile $52,1^\circ$ arasında değişen açılarla asimetrik bir serim sonucunda elde edilmiş ve çırpınma hızı başlangıç tasarımına göre %18 artırılmıştır. İkinci aşamada ise, serim açılarının neden olduğu mukavemet düşüşünü dengelemek için kesit geometrisi optimize edilmiş, böylece hem mukavemet artırılmış hem de yapının ağırlığı %13 oranında azaltılmıştır. Ulaştıkları sonuçlarda, burulma rijitliğinin çırpınma hızı üzerindeki en büyük etkiye sahip olduğunu, asimetrik katman dizilimleri ile burulma ve eğilme-burulma bileşke rijitliğini arttırarak çırpınma hızında artış sağlanabileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca kanat kutusu yapısında ön ve arka kirişlerin kanat direngenliği üzerinde önemli bir etkisi olmasına rağmen kanat kutusunun alt ve üst yüzeylerinin serim açılarının çırpınma hızı üzerinde daha fazla etki sahibi olduğu ve kirişlerin serim açılarının çırpınma hızı üzerinde etkisinin olmadığını fark etmişlerdir.

Guo ve diğ. (2012), yaptıkları bir başka araştırmada ise büyük bir yolcu uçağının kanat yapısının yapısal dayanımı, hasar toleransı ve aeroelastik kararlılığı gibi çoklu kısıtlamalar altında çok amaçlı optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Temelde kompozit malzemelerin yönlenebilir direngenlik avantajını kullanarak minimum ağırlıkta ve olabildiğince yüksek dayanım gösteren bir kanat tasarımı gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile detaylı tasarım seviyesinde bir optimizasyon süreci gerçekleştirilmiştir. İki aşamada süre gelen çalışmanın ilk aşamasında kanat kabuk yapısı katman kalınlığı ve fiber yönelimleri tasarım değişkeni olarak belirlenmiş, Tsai-Wu

kriteri, maksimum şekil değiştirme kriteri ve çırpınma hızı gibi kısıtlamalar dikkate alınarak minimum ağırlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ağırlık %44,6 azaltılırken kanadın türbülans tepkisinin artması sebebiyle 2. Aşamada aeroelastik davranışlar ele alınarak türbülans tepkisinin azaltılmasına yönelik bir optimizasyon uygulanmıştır. İkinci aşamada uygulanan lif yönelimlerinin değiştirilmesi ve katman kalınlıklarının optimizasyonu sonucunda bir miktar ağırlık artışıyla toplamda %34,5 ağırlık kazancı sağlamışlardır.

Yaptıkları araştırmada, Widyavasta ve Wikarta (2024), farklı profillerdeki alüminyum kanat kirişleri üzerinde çalışmışlardır. 4G yükleme altında dikdörtgen ve I profilleri karşılaştırmış, oluşan normal gerilmelerde birbirine oldukça yakın sonuçlar alırken, kök kısmında oluşan maksimum kesme gerilmelerinde kare profillerin neredeyse 2 kat düşük gerilmelere sahip olduklarını fakat gerilme değerlerinin düşük olması sebebiyle I profilin de kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Yük dağılımının belirlenmesinde kirişleri bölümlere ayırarak kiriş boyunca eliptik yük dağılımı olduğu kabulünü yapmışlardır. Dolayısıyla burulma davranışı ortaya çıkmamıştır.

Loughlan ve Ata (1997) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ince cidarlı açık (Z, C ve L) ve kapalı (kutu) kesitli karbon fiber kompozit kirişlerin burulma altındaki davranışları teorik olarak incelenmiştir. Kirişlerin cidarları, düzlemsel ortotropi gösteren ve kendi orta düzlemleri etrafında simetrik olarak serilmiş kompozit katmanlardan oluşturulmuştur. Bu sayede, global düzeyde eksenel-burulma bileşkesi engellenmiş ve analiz sadeleştirilmiştir. Çalışmada klasik St. Venant ve Bredt-Batho teorileri, kompozit malzemelerin anizotrop özelliklerini hesaba katacak şekilde modifiye edilmiştir. "Etkili kalınlık" ve "eşdeğer mühendislik elastik sabitleri" gibi kavramlar kullanılarak, farklı dizilim konfigürasyonlarının rijitlik üzerindeki etkileri modellenmiştir. Açık kesitli kirişlerde birincil (membran) ve ikincil (lokal eğilme) burulma nedeniyle eksenel şekil değiştirme hareketi (warping) türleri birbirinden ayrılarak değerlendirilmiş; kapalı kesitli kirişlerde ise eksenel şekil değiştirmelerin torka katkısının tamamen kendini dengelediği gösterilmiştir. Çalışmada, serim dizilimlerinin doğrudan burulma ve burulmaya bağlı eksenel şekil değiştirme rijitlikleri üzerinde etkili olduğu belirtilmiş, farklı bölgelerde farklı serim açıları kullanılması sonucu kayma akısı dağılımında süreksizlikler olduğu ise şekillerden ve sonuçlardan yorumlanmıştır. Teorik analiz sonuçları, sonlu elemanlar yöntemiyle ve deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yüksek düzeyde uyum sağlandığı görülmüştür. Bu doğrultuda, simetrik dizilim ile üretilmiş kompozit kirişlerin burulma

davranışının basitleştirilmiş teorik modellerle güvenilir biçimde tahmin edilebileceği ortaya konmuştur.

Yolcu uçakları için karbonfiber takviyeli kompozit ve alüminyum kirişlerde farklı kesit profillerini karşılaştıran bir başka araştırmada, I, C, kutu ve silindir tüp şeklindeki kiriş kesitleri karşılaştırılmıştır. Yük dağılımı kiriş uzunluğu boyunca azalacak bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Burulma davranışları veter boyunca yük dağılımları ihmal edilerek, profillerin geometrik asimetrisi sebebiyle oluşan burulmalar özelinde incelenmiştir. Çalışma sonuçlarında en iyi sonuçlar I ve silindir tüp profillerde elde edilmiştir. Tüp profillerin montaj zorluğu sebebiyle I profiller önerilmektedir. Kutu profiller ortalama performans gösterirken C profil, stabilite ve burulma eğilimi olarak en zayıf bulunan profil olmuştur. Buna rağmen, I ve C profiller, destek plakaları eklenerek karşılaştırıldığında neredeyse aynı dayanımlara ulaştığı, C profilin burulma açısından daha iyi performans sergilendiği gözlemlenmiştir (Wang, 2022).

Raja ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uçak kanat yapısının ana yük taşıyıcı elemanı olan kanat kirişlerinin cam fiber takviyeli kompozit malzemelerden üretilmiş bir versiyonu yapısal analiz ve statik testlere tabi tutulmuştur. Çalışmanın temel amacı, kanat kirişlerinde kullanılan geleneksel metal malzemelerin kompozit malzemeler ile yer değiştirmesi sonucu maliyet ve ağırlık bakımından daha verimli bir yapı elde etmektir. Tasarım sürecinde, Embraer EMB 150 Brasilia hava aracını referans alarak XFLR yazılımı ile aerodinamik yük dağılımlarını elde ederek statik testlere ve yapısal analizlere girdi sağlamışlardır. Çalışma sonucunda, kompozit kanat kirişi yapısının geleneksel metallere kıyasla önemli ölçüde ağırlık avantajı sağladığı, yapısal yeterliliğini koruduğu ve uçak yapılarında kullanılabilirliğinin yüksek olduğu ortaya konulmuştur.

Mohamed ve Abdelbary (2023), yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90° serim açılarındaki değişimini deneysel ve numerik olarak incelemişlerdir. En yüksek çekme dayanımını 0° fiberlerin gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Fiber açısı arttıkça dayanımda düşüş olduğunu açıkça görmüşlerdir. 90° fiberlerde yük matris tarafından taşınmaktadır, matris çatlaması ve fiber delaminasyonu gözlemlenmektedir. Ayrıca en yüksek maksimum uzamanın ise 45° yönelimde olduğu sonucuna varmışlardır.

Karbon fiber takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımlarının 45° yönlendirilmiş fiberlerin kullanımıyla değişimini inceleyen Subhedar ve diğ. (2021), 45° fiberlerin miktarını ve katman dizilimi içerisindeki konumlandırmasını kontrol ederek 3 nokta eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. Ulaştıkları sonuçlarda, tamamen 0° ile

yönlendirilmiş numunelerin maksimum eğilme dayanımı gösterirken, 45° ile yönlendirilmiş fiberlerin çatlak ilerlemesini azaltması sebebiyle daha fazla deformasyona izin verdiğini gözlemlemişlerdir. 0° ile yönlendirilmiş numunelerde fiber-matris arayüzünde oluşan çatlakların ilerlemesi sebebiyle daha düşük deformasyon ve ani kırılmalar görülmüştür. Bulgularda, 45° fiberlerin miktarının artması deformasyonu artırırken eğilme dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca çapraz açılanmış katmanların konumlarının da eğilme dayanımı ve deformasyon üzerinde etkisi olduğunu belirtmişlerdir. 45° açılı fiberlerin yüzeye yakın katmanlarda kullanılması durumunda, merkezde kullanılmasına göre eğilme dayanımının arttığı, eğilme modülünün ise azaldığı sonucuna varmışlardır.

Annadorai ve diğ. (2024), karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını inceledikleri araştırmalarında farklı kalınlıklarda ve 0° , 90° ve $\pm 45^\circ$ serim açılarıyla ürettikleri numuneleri karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda, kalınlığın artmasıyla tüm yönelimlerde dayanımların arttığını, çekme ve eğilme yönünden en iyi dayanımı 0° yönelim ile üretilmiş numunelerin sağladığını bulmuşlardır. Darbe dayanımında ise en iyi sonucu $\pm 45^\circ$ yönelimlerinin 0° ve 90° ile birlikte kullanımında gözlemlemişlerdir. Bulgularda, 2. En iyi çekme ve darbe dayanımının 0° - 90° ile üretilen numunelerde gözlemlendiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak farklı serim açılarının birlikte kullanımı ile daha karmaşık davranış sergileyen kompozit yapıların oluşturulmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Yapılan bir diğer çalışmada cam fiber takviyeli kompozitlerin 0° , 90° ve rastgele yönlenmiş fiberlerden oluşan kombinasyonlarını katmanlar arası ve düzlem içi kayma dayanımları bakımından inceleyen Almeida Jr, ve diğ. (2015), katman yönelimlerinin kayma davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmışlardır. Test yöntemi olarak kısa kiriş testi, çift çentikli kayma testi, V çentikli kayma testi ve Losipescu testi kullanmışlardır. Bulgularda, katmanlar arası kayma dayanımı en yüksek olan numuneler 0° iken en düşük 90° numuneler olduğu gözlemlenmiştir. Rastgele yönlenmiş ve 0° - 90° numuneler ise benzer ara değerler vermiştir. Düzlem içi kayma dayanımları incelendiğinde ise rastgele yönlenmiş fiberlerin oluşturduğu numuneler açık ara en yüksek düzlem içi kayma dayanımını sağlamıştır.

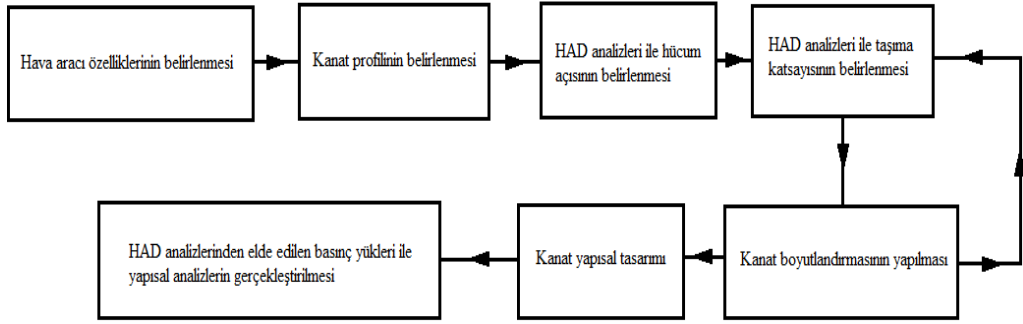
Seshaiah ve Reddy (2018), cam fiber takviyeli kompozitlerin çekme, eğilme, basma ve katmanlar arası kayma dayanımlarının fiber oryantasyonuna göre değişimini inceledikleri çalışmalarında 0° , 90° , 0° - 90° ve $\pm 45^\circ$ dizilimler kullanmışlardır. Sonuçları

TEM (Taramalı elektron mikroskobu) yöntemiyle gözlemlenmişlerdir. 0° ve 90° numunelerde 10 katman kullanırken, 0° - 90° ve $\pm 45^\circ$ numunelerde 14 katman kullanmışlardır. Ulaştıkları sonuçlarda en yüksek çekme dayanımı ve modülünün 0° numunelerde ortaya çıktığını, en düşük çekme dayanımının ise yüklemenin lif eksenine dik olması ve zayıf yapışma özelliklerinden dolayı 90° numunelerde olduğunu gözlemlenmiştir. Eğilme davranışında ise bulgular, maksimum dayanımı yine 0° numunelerde olduğunu gösterirken, $\pm 45^\circ$ ve 90° numunelerin en düşük değerleri verdiğini göstermektedir. Basma davranışında da benzer şekilde 0° ile üretilen numuneler maksimum dayanımları sağlarken, 90° ve $\pm 45^\circ$ numunelerde matris ayrılması ve burkulma etkileri baskın olarak görülmüştür. Katmanlar arası kayma gerilmeleri karşılaştırıldığında, 0° numuneler diğerlerinde olduğu gibi maksimum dayanımı vermiştir. 90° ve $\pm 45^\circ$ numunelerde ise ani kırılmalar ve düşük taşıma kapasitesi gözlemlenmiştir. TEM bulgularında, 0° numunelerde lif kopması baskınken, 90° ve $\pm 45^\circ$ numunelerde lif-matris ayrılması ve lif çekilmesi gibi kırılma modları görülmektedir.

Naresh ve diğ. (2017), karbon ve cam fiber takviyeli kompozitlerin eğilme ve katmanlar arası kayma davranışlarını incelemişlerdir. (0° , 45° , $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ)_s$, $(\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ)_s$ ve 90°) fiber oryantasyonları ile çalışmışlardır. 3 nokta eğilme testi ve çift çentikli çekme testi ile katmanlar arası kayma dayanımlarını ölçmüşlerdir. Her iki tip malzeme için de benzer sonuçlar bulmuşlardır. En yüksek eğilme mukavemeti 0° numunelerde gözlemlenirken, en yüksek deformasyonlar diğer çalışmalarla benzer şekilde $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ)_s$ yönelimdeki numunelerde meydana gelmiştir. Katmanlar arası kayma gerilmelerinde ise yine 0° numuneler en iyi performansı gösterirken en düşük dayanım 90° numunelerde bulunmuştur. TEM sonuçlarında 0° katmanlarda fiber kırılması ve fiber-matris ayrılması görülmüştür. 45° ve 90° laminatlar ise zayıf bölgelerde matris çatlaklarına neden olan kayma gerilmeleriyle hasar görmüştür. 0° , 45° ve 90° gibi aynı yönelime sahip laminatlarda fiber-matris ayrılması ve matris çatlaması gözlemlenirken, çapraz yerleşimli $(45^\circ/-45^\circ/45^\circ)_s$, $(\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ)_s$ katmanlarda delaminasyon gözlemlenmiştir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, öncelikle belirlenen spesifikasyonlarda bir insansız hava aracı için kanat tasarımı ve boyutlandırılması HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizleri ile desteklenerek yapılmış, daha sonra boyutları belirlenen kanadın 3 farklı giriş tipi içeren yapısal tasarımları gerçekleştirilmiştir. Farklı giriş tipleri için tasarlanan kanat konfigürasyonları, HAD analizlerinden elde edilen basınç yükleri ile tek yönlü AYE (Akışkan-Yapı Etkileşimi) analizlerine tabi tutulmuş, farklı serim açılarında yapısal dayanımları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 Akış şeması

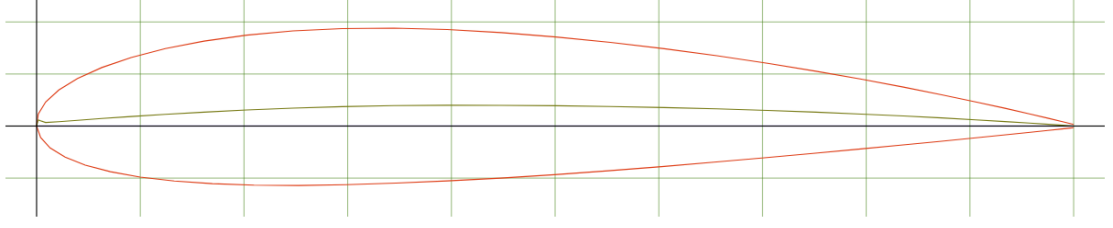
6.1. Kanat Aerodinamik Tasarımı ve HAD Analizleri

Hava aracı konfigürasyonu belirlenirken dikkat edilecek ana parametreler, hava aracının maksimum kalkış ağırlığı, seyir hızı ve irtifa olarak belirlenmiştir. Hava aracı konfigürasyonu için UKRSPECSYSTEMS PD-2 insansız hava aracı referans alınmıştır. PD-2 insansız hava aracının spesifikasyonları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 PD-2 hava aracı spesifikasyonları

Parametre	Değer	Birim
Maksimum Kalkış Ağırlığı	55	kg
Seyir Hızı	100	km/h
İrtifa	3800	m

Bu veriler eşliğinde kanat boyutlandırması yapılarak, maksimum kalkış ağırlığını kaldırabilecek taşıma kuvvetine sahip bir kanat tasarımı yapılmıştır. Kanat profili olarak Şekil 6.2’de geometrisi verilen NACA 2415 seçilmiştir.



Şekil 6.2 NACA 2415 Kanat profili geometrisi

6.1.1. Hücüm açısının belirlenmesi

İlk aşamada belirlenen kanat profili ve Reynolds sayısı için L/D (taşıma/sürüklenme) oranının maksimum olduğu hücüm açısı belirlenmelidir. Reynolds sayısı ≈ 600000 olarak belirlenmiştir. Başlangıç için bu Reynolds sayısını sağlayacak şekilde bir kanat boyutlandırması yapılmıştır. Reynolds sayısı aşağıdaki formül aracılığıyla bulunur;

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (6.1)$$

- ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)
- V : Seyir hızı (m/s)
- D : Karakteristik uzunluk (m)
- μ : Dinamik viskozite

Burada hesaplamaların başlaması için 3800 m irtifa için havanın yoğunluk ve viskozitesine ihtiyaç vardır. Yoğunluk, basınç ve dinamik viskozite değerleri 3800 m için Tablo 6.2’de verilmektedir.

Tablo 6.2 3800 m irtifada havanın özellikleri (Anderson ve Bowden, 2016)

Yoğunluk (kg/m^3)	Basınç (Pa)	Dinamik Viskozite (10^{-5} N s/m^2)
0,83676	63282	1,67

Reynolds Sayısı ≈ 600000 değerini yakalayacak şekilde hız ve karakteristik uzunluk belirlenmiştir. Reynolds sayısının sabit tutulmak istenmesinin sebebi ileride yapılacak C_l (taşıma katsayısı) ve hücüm açısının belirlenmesi aşamalarında kolaylık sağlamaktır. Reynolds sayısı ve hücüm açısı sabit olduğu sürece C_l değeri sabit kalacaktır.

Bu şekilde, iterasyonlar arasında güncellenen kanat boyutları arasında bir geometrik benzerlik yakalanmaktadır.

Karakteristik uzunluk kanatlarda ortalama veter uzunluğu olarak kabul edilir. Bu durumda;

$$Re = \frac{0,83676 * 34,16 * 0,35}{0,0000167} = 599060,0335 \approx 600000 \quad (6.2)$$

Burada $V = 34,16$ m/s, $D = 0,35$ m olarak kabul edilerek hesaplamalara devam edilmiştir. Bu değerlere ek olarak kanat profilinin C_l (taşıma katsayısı) değeri bilinmediği için başlangıçta ortalama bir değer olarak 0,6 kabul edilmiştir. Taşıma katsayısı deneysel veya HAD analizi yöntemi ile elde edilir. Analizler sonucunda okunacak C_l değerlerine göre iteratif olarak düzeltmeler yapılacaktır. Kanat boyutlandırılması yapılırken taşıma kuvveti formülü temel alınmıştır;

$$L = C_l \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) A \quad (6.3)$$

Burada;

- L : Taşıma kuvveti (N)
- C_l : Taşıma katsayısı
- ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)
- V : Seyir hızı (m/s)
- A : Kanat izdüşüm alanı (m^2)

Tek bir kanat için işlem yapılacağı için taşıma kuvveti olarak hava aracının ağırlığının yarısı kabul edilmiştir. Bu durumda;

$$L = \frac{55 * 9,81}{2} = 269,775 \text{ N} \quad (6.4)$$

Denklem 6.4'ten elde edilen taşıma kuvveti ile kanat alanı hesaplanacak olursa;

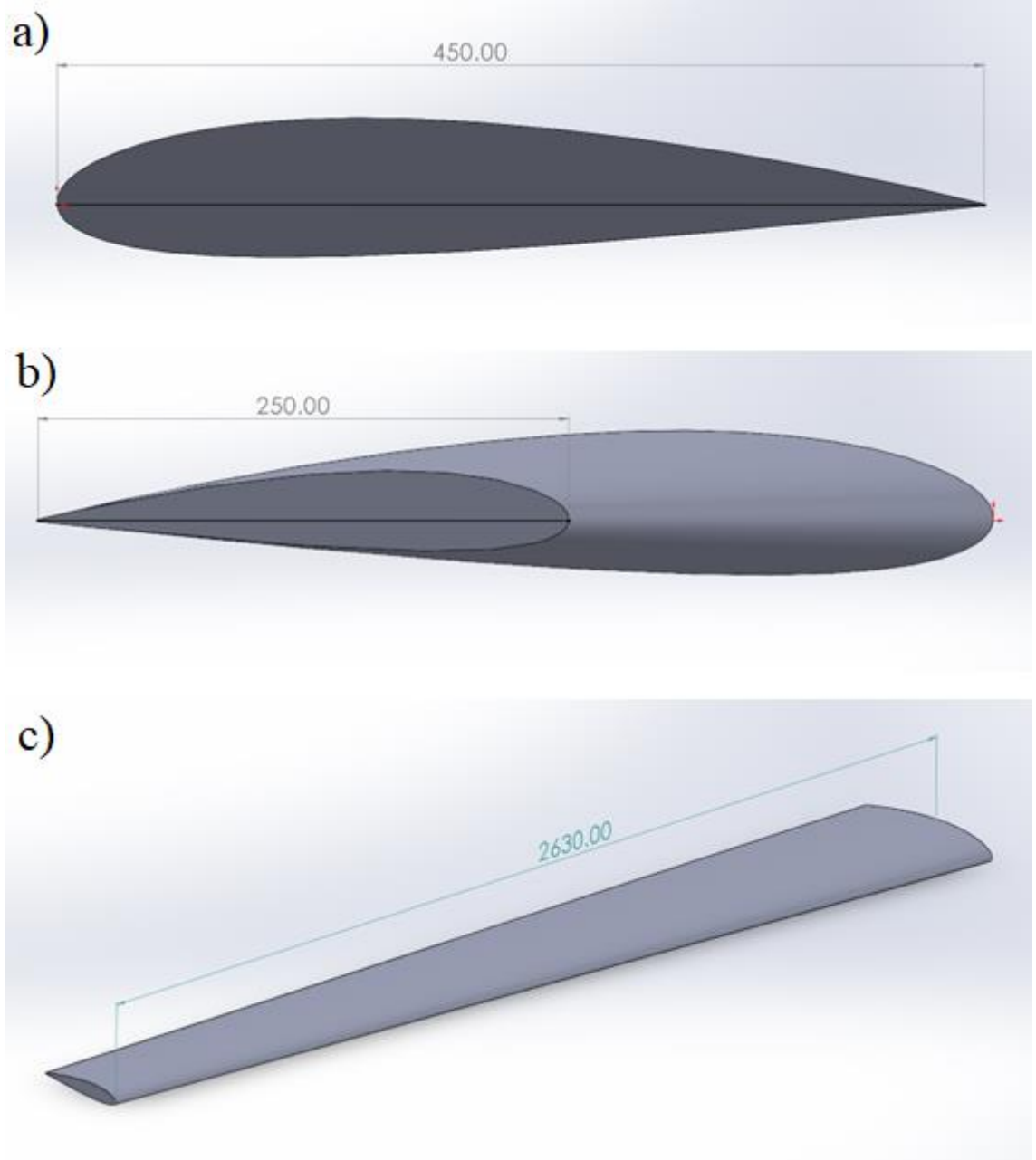
$$269,775 = 0,6 \left(\frac{1}{2} * 0,83676 * 34,16^2 \right) A \quad (6.5)$$

Denklem 6.5'ten kanat alanı $0,92 \text{ m}^2$ hesaplanmıştır.

$$A = D * l \quad (6.6)$$

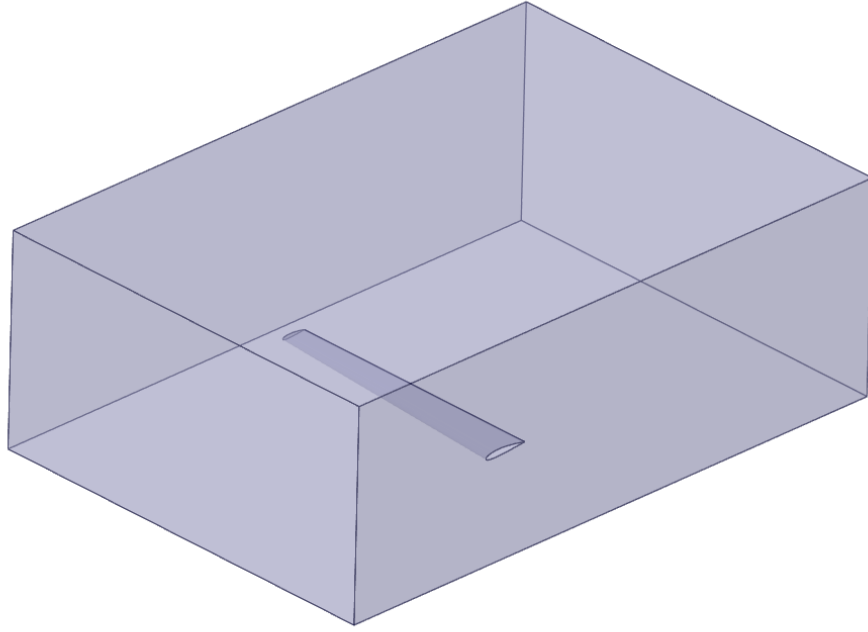
Denklem 6.6'ya göre kanat boyu $l = 2.63$ m olarak belirlenmiştir.

Bu aşamada belirlenen boyutlarda NACA 2415 kanat profili eğrileri Solidworks yazılımına aktarılarak kanadın katı bir modeli HAD analizleri gerçekleştirmek üzere oluşturulmuştur. $D = 0,35$ m olacak şekilde kök ve uç veter uzunlukları sırasıyla 450 ve 250 mm olacak şekilde loft yöntemi ile çizilmiştir. 0. İterasyon için veter ve kanat açıklığı ölçüleri Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3 0. İterasyon kanat ölçüleri (a) kök veter uzunluğu; (b) uç veter uzunluğu; (c) kanat açıklığı

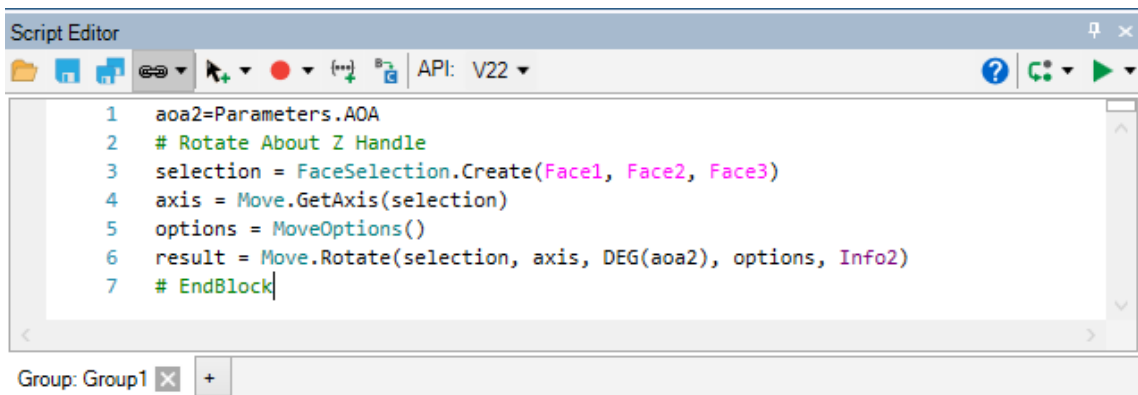
Kanat geometrisi ANSYS yazılımına atılarak HAD analizleri için geometri hazırlığı olarak akış hacmi oluşturulmuştur. Akış hacmi Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



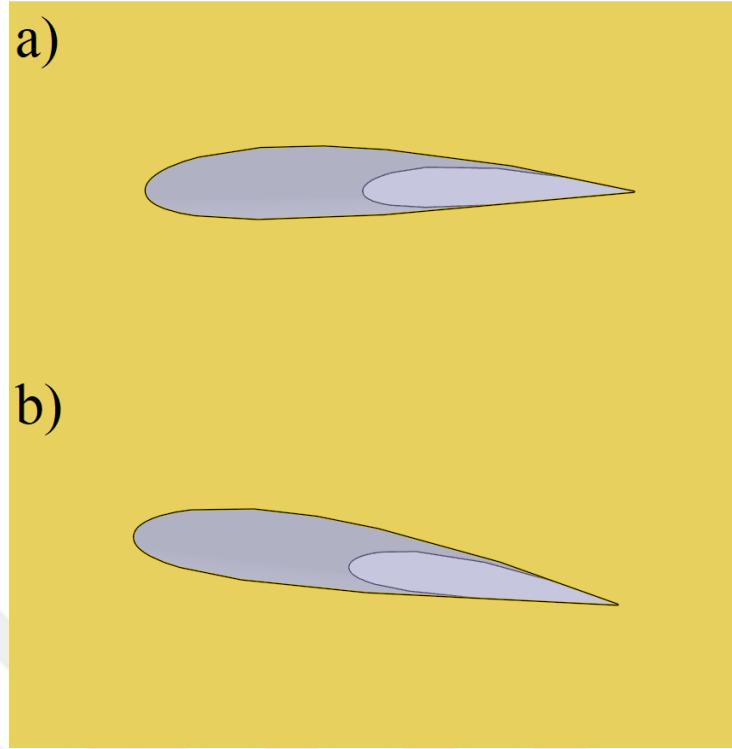
Şekil 6.4 0. İterasyon kanat tasarımı akış hacmi

Hava giriş-çıkışı, simetri düzlemi ve çözüm ağı oluşturma ve taşıma, sürüklenme kuvvetlerinin okunması aşamalarında kullanılmak üzere kanat yüzeyi, firar kenarı gibi bölgelere isimlendirmeler yapılmıştır.

Kanat geometrisi, farklı hücum açılarında analiz edileceği için akış hacmini farklı hücum açılarında güncelleyerek parametrik analize hazır hale getirilecek şekilde Phyton kodları ile script yazılmıştır. Yazılan script kodu ve kanadın açısı değişimi Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilmiştir.

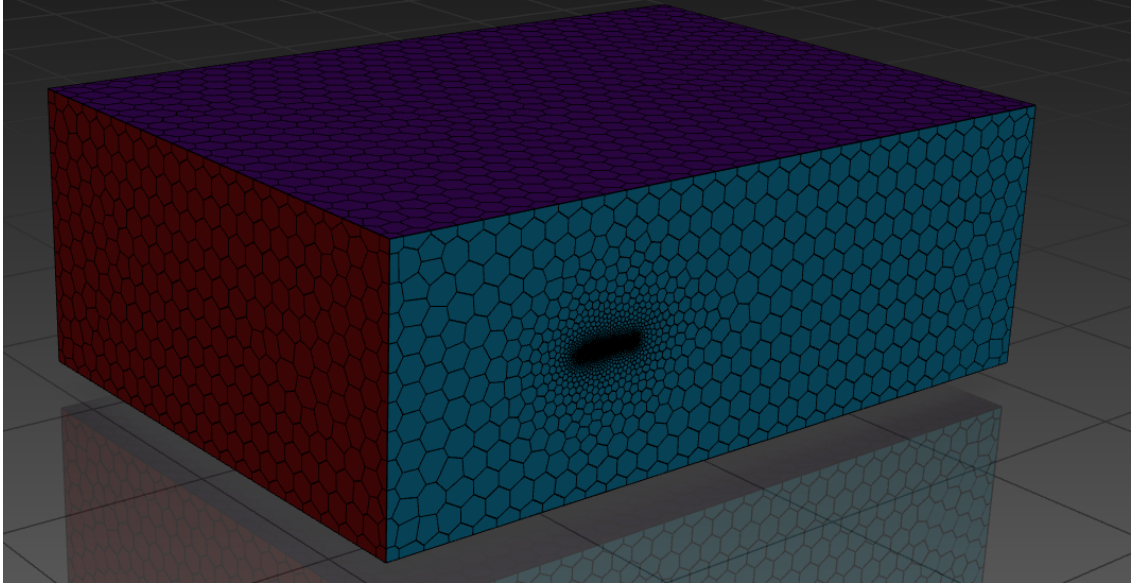


Şekil 6.5 Hücum açısı parametrik script kodu



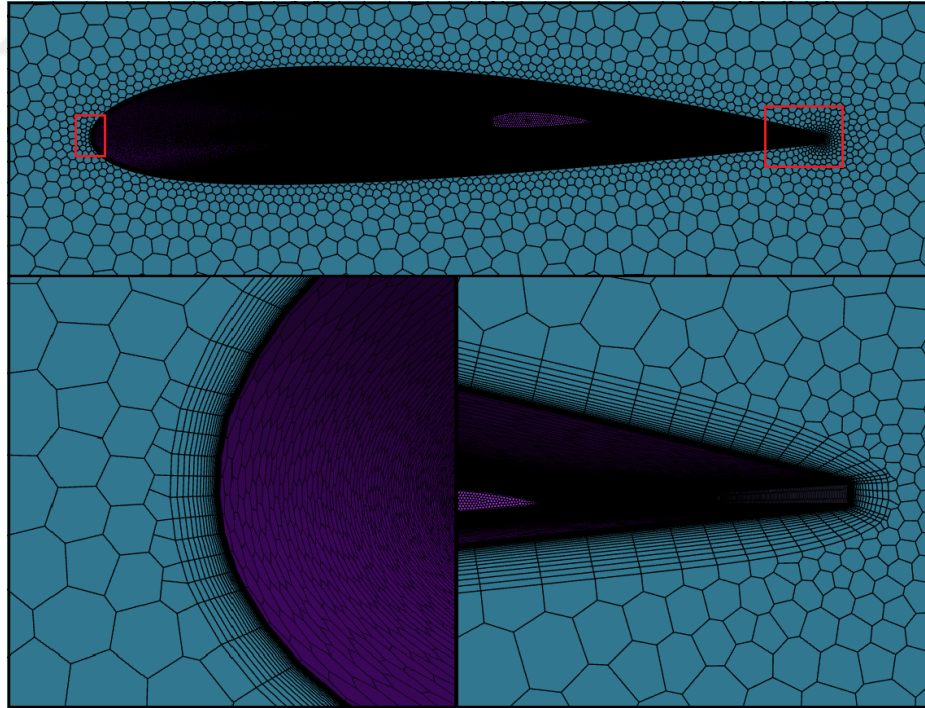
Şekil 6.6 Farklı hücum açılarında kanat geometrisinin script kodları ile güncellenmesi (a) 0° (b) 8°

Geometri düzenlemeleri tamamlandıktan sonra çözüm ağı oluşturma işlemine geçilmiştir. Çözüm ağı, daha hızlı çözümler elde ederken sonuçların doğruluğunu koruma özelliklerinden dolayı çok yüzlü (polyhedral) elemanlar ile örülmüştür. Kanat yüzeyinde hız profillerini çözebilmek için sınır tabaka tanımlaması yapılmıştır. Sınır tabaka, ilk katman kalınlığı 0,025 mm ve 1.15 büyüme oranıyla 20 katman olacak şekilde tanımlanarak $y^+ \leq 1$ şartı sağlanmaya çalışılmıştır. Çok yüzlü elemanlar ile örülmüş akış hacmi görseli Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



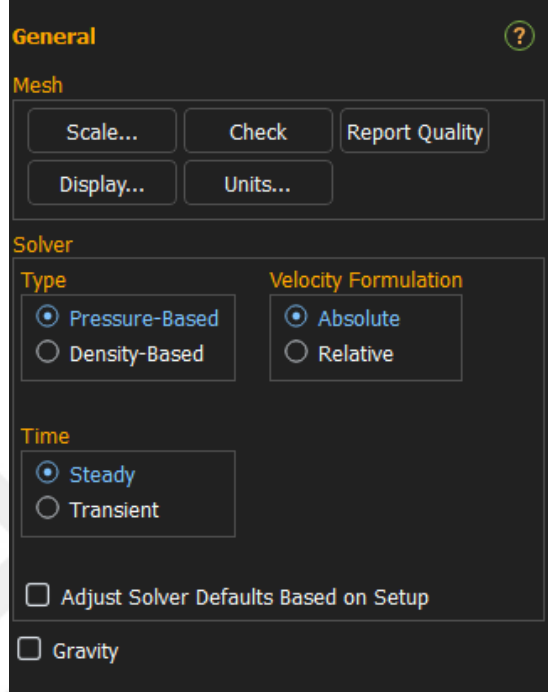
Şekil 6.7 Akış hacmi çok yüzlü (polyhedral) çözüm ağı yapısı

Sınır tabakada kullanılan çözüm ağı yapısının kırmızı dikdörtgen içerisine alınmış hücum ve firar kenarı gibi kritik bölgelerdeki detayları ve düzenli yapısı Şekil 6.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.8 Kanat çevresinde çözüm ağı yapısı ve hücum ve finar kenarlarında sınır tabakaların detay görünümü

Çözüm ağı oluşturulduktan sonra HAD analizi kurulmaya başlanmıştır. Akış analizi sürekli sıkıştırılmaz akış olarak belirlenmiştir. Bunun doğrultusunda Şekil 6.9'da gösterilen ayarlar seçilmiştir.



Şekil 6.9 HAD genel ayarlar

Türbülans modeli olarak sınır tabakada hız vektörlerini daha verimli ve doğru modellemesinden dolayı k-omega SST türbülans modeli seçilmiştir. Akışkan olarak hava belirlenerek yoğunluk, viskozite ve basınç değerleri Tablo 6.2'den referans alınmıştır.

Sınır şartı olarak hız girişi ve basınç çıkışı tanımlanmıştır. Hız girdisi olarak sabit 34.16 m/s , basınç çıkışı için 0 atm girilmiştir. Atmosfer basıncı Tablo 6.2'de belirtilen basınç değeridir. Her iki değer için de türbülans yoğunluğu Denklem 3.7 kullanılarak $Re = 600000$ değerine göre 0,03 olarak hesaplanarak girilmiştir. Hız girişi ve basınç çıkışı ekranları Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de gösterilmektedir.

$$I = 0,16 * Re^{-0,125} \quad (6.7)$$

Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude [m/s] 34.16

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] 0

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%] 0.03

Turbulent Viscosity Ratio 2

Apply Close Help

Şekil 6.10 Hız girişi bilgileri

Pressure Outlet

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 0

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

☐ Prevent Reverse Flow

☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

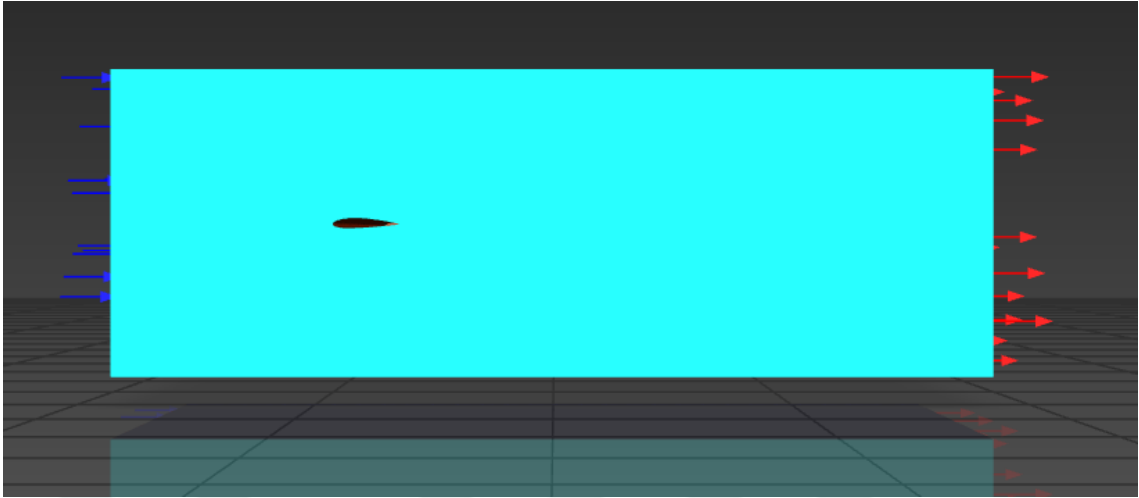
Backflow Turbulent Intensity [%] 0.03

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 2

Apply Close Help

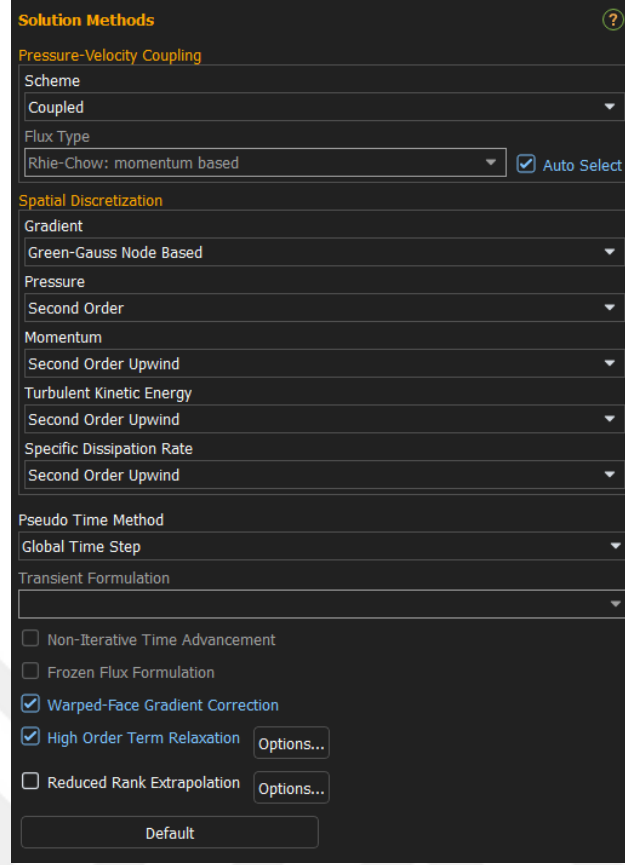
Şekil 6.11 Basınç çıkışı bilgileri

Şekil 6.12’de akış hacmindeki hız girişi mavi, basınç çıkışı ise kırmızı oklar ile gösterilmiştir.



Şekil 6.12 Hız girişi (mavi oklar) ve basınç çıkışı (kırmızı oklar) gösterimi

Şekil 6.13’te gösterildiği üzere Çözüm metodu olarak Bağlı (Coupled) çözüm yöntemi seçilmiştir. Bu çözüm yönteminin özelliği basınç ve hız denklemlerini birlikte çözmesidir. 2. Derece denklemlerin çözülmesi için basınç, momentum türbülans kinetik enerjisi ve özgül yayılım oranı için ikinci derece (second order) seçeneği aktif hale getirilmiştir.



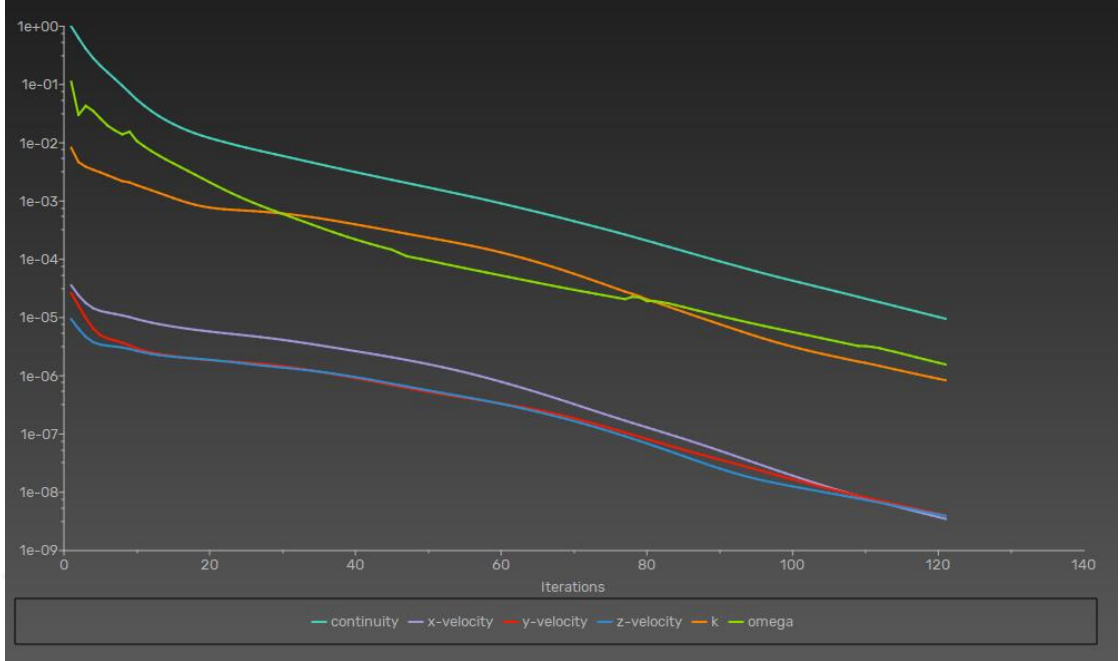
Şekil 6.13 Metod ayarları

Başlangıç ayarları için FMG (Full Multigrid) (Çok Kademeli Izgara) başlangıç ardından hibrit başlangıç seçenekleri kullanılmıştır. FMG kullanımı, analizin başlangıç aşamasında daha yüksek yakınsama ile analize başlamasına olanak vererek daha az iterasyonda yakınsama sağladığı için kullanılmıştır.

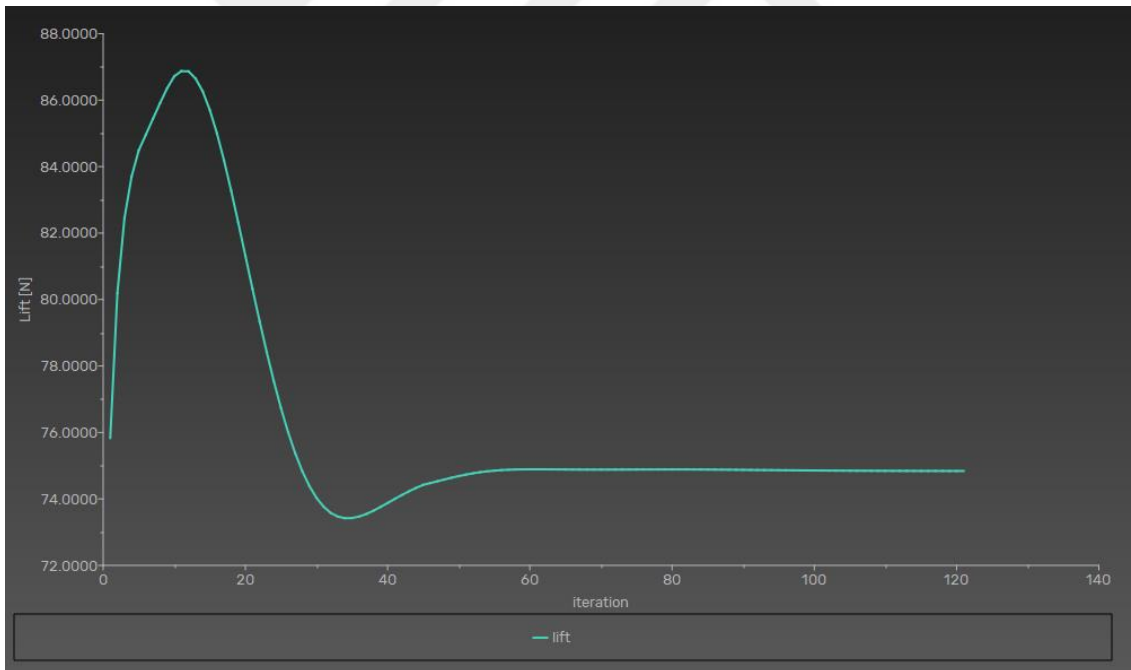
Analiz 400 iterasyon için koşturulmuş 120. İterasyonlarda yakınsamıştır. Yakınsama (Residual) eğrileri, taşıma, sürüklenme kuvvetleri ve y^+ eğrileri Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de verilmiştir.

Şekil 6.14’te verilen yakınsama eğrileri kütle korunumu (continuity), x,y,z hız değerleri ve k-omega türbülans modelinde kullanılan k ve omega değerlerinin yakınsama değerleri için farklı renklerle belirtilmiştir. X eksenini iterasyon sayısını ifade ederken Y eksenini her iterasyonda bir önceki ile arasındaki yakınsama miktarını temsil eder. Değerler 0’a yaklaştığı takdirde analizin yakınsadığı anlaşılır.

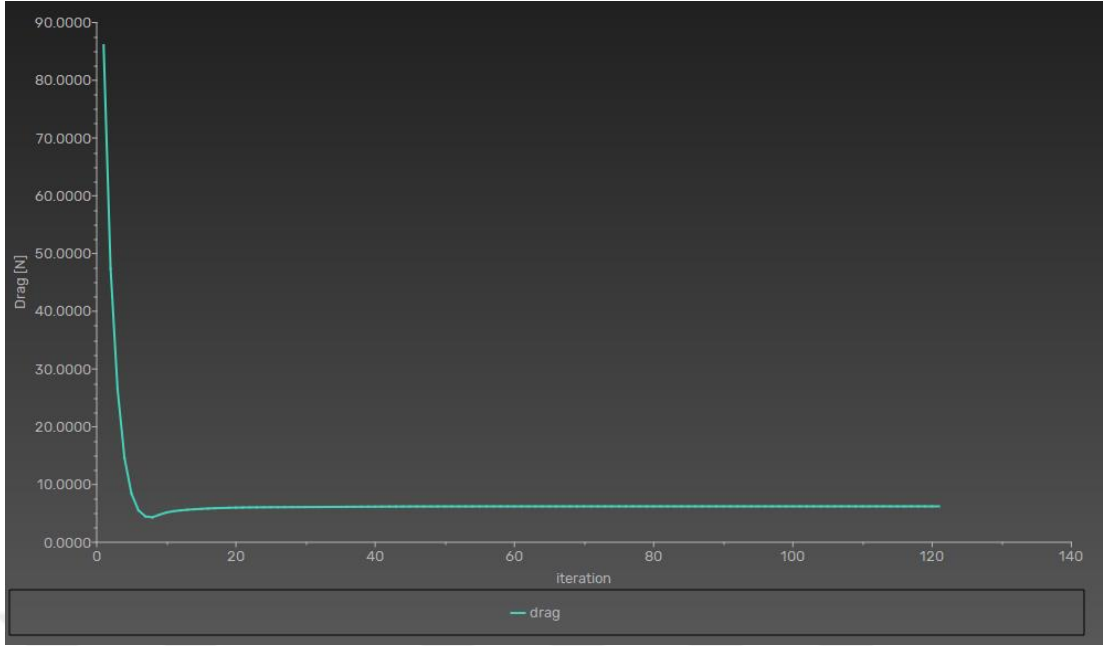
Şekil 6.15’te taşıma kuvvetinin bir dalgalanma sonrası 50. İterasyon civarında 74 N değerinde sabitlendiği görülmektedir. Şekil 6.16’da ise benzer bir durum sürüklenme kuvveti için geçerlidir. Sürüklenme kuvveti daha erken yakınsayarak 20. İterasyondan itibaren stabil olarak ilerlemiştir.



Şekil 6.14 Yakınsama eğrileri

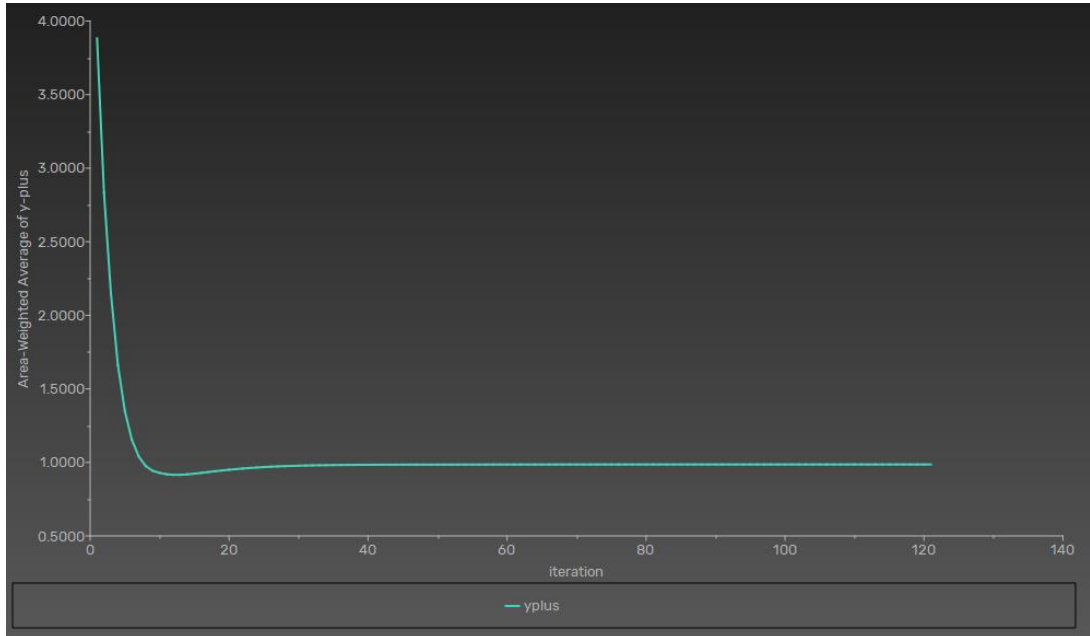


Şekil 6.15 Taşıma kuvveti yakınsama eğrisi



Şekil 6.16 Sürüklenme kuvveti yakınsama eğrisi

Y^+ , duvar yüzeyine en yakın hücrenin mesafesini, viskoz alt tabaka ile karşılaştıran boyutsuz bir duvar mesafesidir. Y^+ değerinin ≤ 1 olması analizin sınır tabaka çözümlerinin doğruluğunu gösterir. Analiz sonucunda da 30. iterasyondan itibaren Şekil 6.17’de görüldüğü üzere yaklaşık 0,98 dolaylarında sabitlenmiştir ve geçerli bir değerdir.



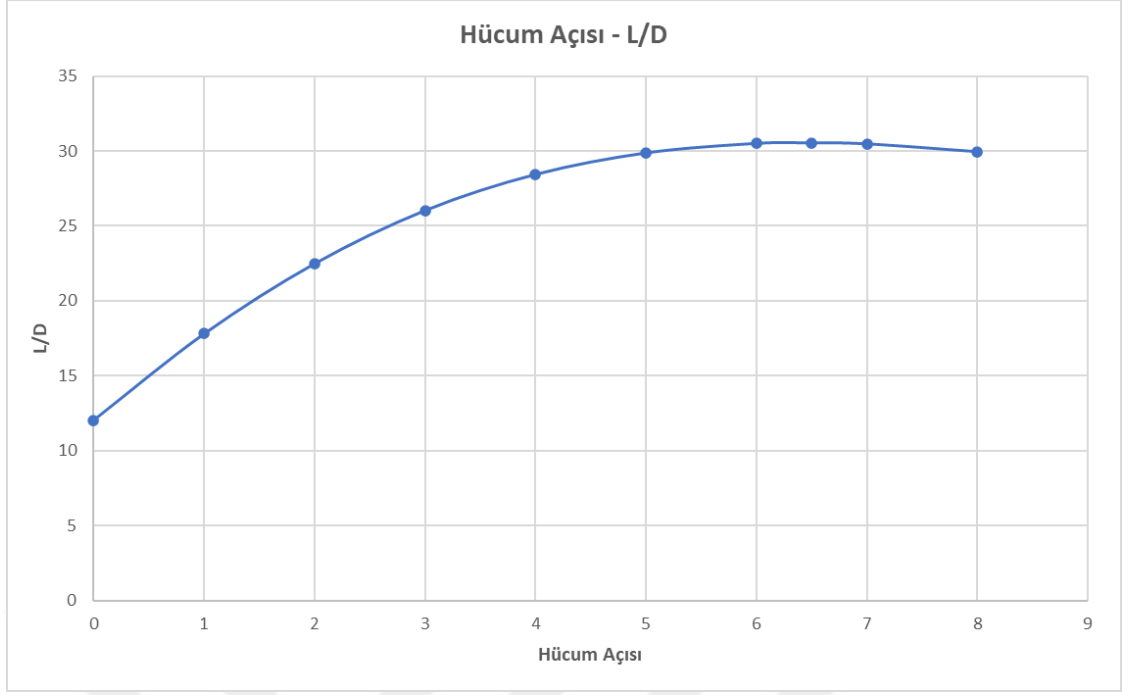
Şekil 6.17 Y^+ yakınsama eğrisi

Analiz sonuçlandıktan sonra hücum açıları değiştirilerek parametrik bir analiz koşturulmuş, L (taşıma kuvveti), D (sürüklenme kuvveti), L/D ve Y^+ değerleri her hücum açısı için elde edilmiştir. Sonuçlardan yola çıkarak L/D oranının maksimum olduğu hücum açısı seçilmiştir. 0-8° arasında birer derece artış ile hücum açıları değiştirilmiş, dönüm noktasının olduğu bölgede artış yarım dereceye düşürülmüştür. Parametrik analizlerin sonuçları Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Farklı hücum açılarına göre parametrik analiz sonuçları

Hücum Açısı (°)	L/D	L (N)	D (N)	Y^+
0	12,032	74,84	6,2201	0,98601
1	17,802	116,62	6,5508	0,99154
2	22,48	157,86	7,0226	0,98954
3	26,03	199,15	7,6508	0,98669
4	28,438	240,31	8,4502	0,9831
5	29,872	281,04	9,4083	0,97833
6	30,505	321,41	10,536	0,97272
6,5	30,536	341,3	11,177	0,96953
7	30,476	360,98	11,845	0,96603
8	29,954	399,5	13,337	0,9581

Tablo 6.3'te verilen parametrik sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi maksimum L/D oranı 6,5° hücum açısında 30,536 olarak gözlemlenmiştir. İdeal hücum açısı 6,5° olarak belirlenerek hesaplamalara devam edilmiştir. L/D oranının hücum açısına göre değişimi Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18 Hücum açısı - L/D grafiği

6.1.2. Kanat boyutlandırılması

Önceki bölümde yapılan analizler sonucunda 6,5 derece hücum açısında mevcut kanat boyutlarında 341,3 N taşıma kuvveti olduğu Tablo 6.3'te görülmektedir. Bu değer kanat tasarımı yapılan hava aracı için belirlenen değerden yüksektir. Bunun sebebi 0. İterasyonda $C_l = 0,6$ olarak tahminde bulunarak tasarıma başlanmış olmasıdır. Analiz sonuçlarından elde edilen taşıma kuvveti Denklem 6.3'te yerine yazılarak gerçek C_l değeri bulunabilir.

$$341,3 = C_l \left(\frac{1}{2} * 0,83676 * 34,16^2 \right) 0,92 \quad (6.8)$$

Buradan 1. İterasyon için $C_l \approx 0,76$ olarak bulunur. Tahmin edilen ile gerçek C_l değerleri arasındaki sapma miktarı % 21'dir. Yeni C_l değeri ile iterasyona devam edilecektir.

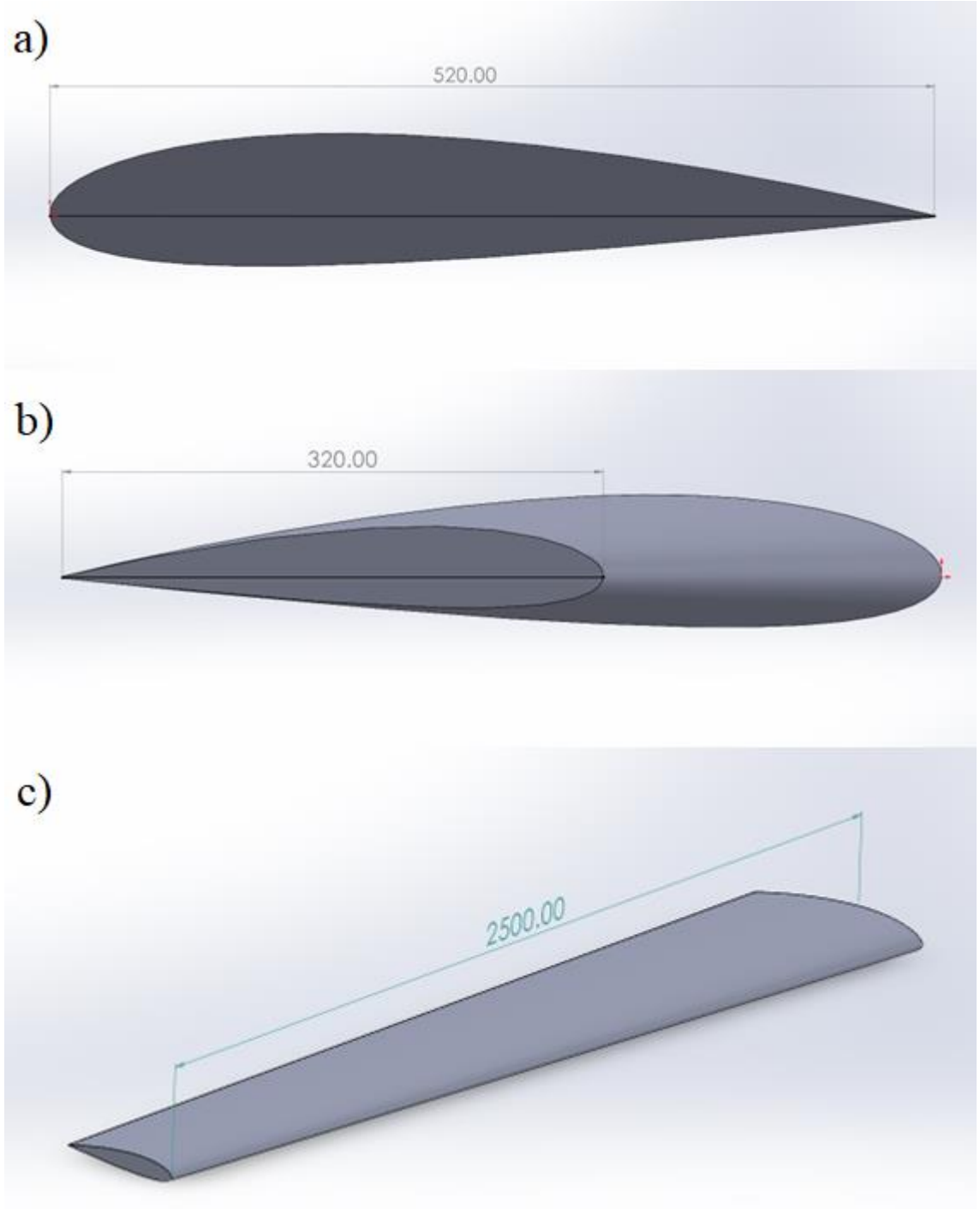
Hava aracının tek kanadının üretmesi gereken taşıma kuvveti $L \approx 270$ N olarak belirlenmiştir. Hücum açısı ve Reynolds sayısı sabit tutulduğu takdirde C_l değeri de sabit kalacaktır. Bu durumda Reynolds sayısı $Re \approx 600000$ ve $L = 270$ N şartlarını sağlayacak şekilde Denklem 6.1'e göre kanat boyutları ve seyir hızı güncellendiğinde belirlenen taşıma katsayısı (C_l), seyir hızı (V), kanat alanı (A), ortalama veter uzunluğu (D) ve kanat açıklığı (l) parametreleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 2. İterasyon için güncellenen kanat parametreleri

C_l	V (m/s)	A (m ²)	D (m)	l (m)
0,76	28,442	1,05	0,42	2,50

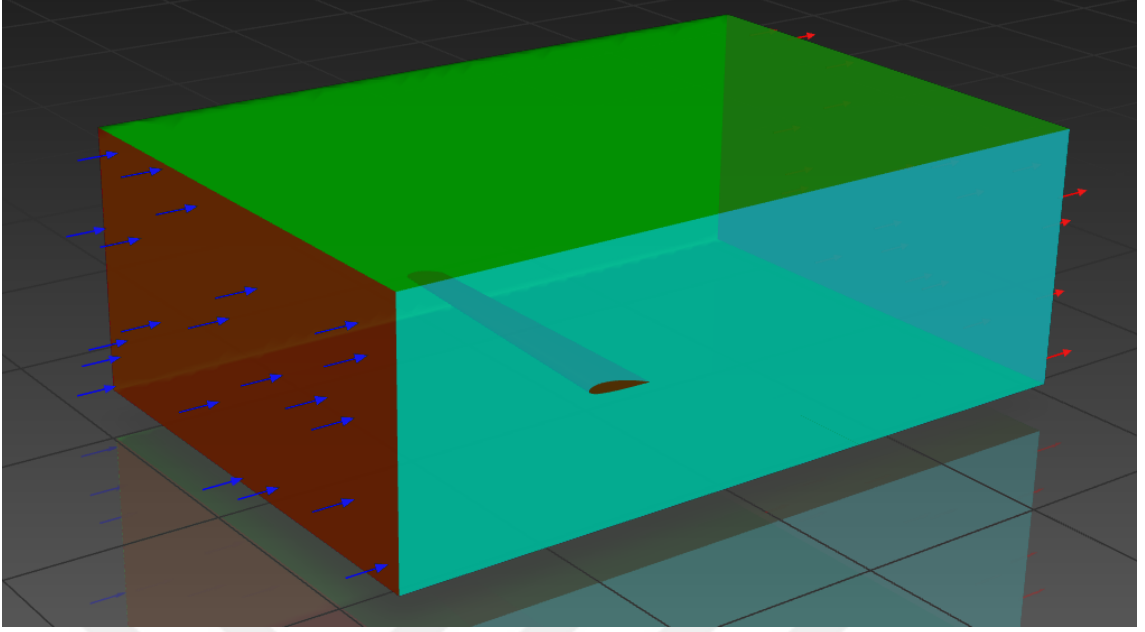
Güncellenen parametrelere göre kanat tasarımı da güncellenmiştir. Ortalama veter uzunluğu $D = 0,42$ m olacak şekilde sırasıyla kök ve uç veter uzunlukları 0,52 ve 0,32 m olarak belirlenmiştir. Kanat açıklığı $l = 2,5$ m olacak şekilde tasarlanan kanat önceden kurulan analize entegre edilmiştir. Yeni kanat ölçüleri Şekil 6.19’da verilmiştir.





Şekil 6.19 2. İterasyon kanat boyutları (a) kök veter uzunluğu (b) uç veter uzunluğu (c) kanat açıklığı

Kanat geometrisi güncellenip $6,5^\circ$ hücum açısına getirildikten sonra yeni kanat için aynı ölçülerde akış hacmi oluşturulmuş, önceki analiz ile aynı ayarlarda çözüm ağı ve sınır tabakalar oluşturulmuş ve analiz şartları belirlenmiştir. Önceki analize göre değişen tek parametre, seyir hızıdır. Seyir hızı $V = 34,16$ m/s değerinden $V = 28,442$ m/s değerine çekilmiştir. Kalan ayarlara dokunulmamıştır. Yeni kanat konfigürasyonu için akış hacmi Şekil 6.20’de gösterilmektedir.



Şekil 6.20 2. İterasyon akış hacmi

Yapılan analiz sonucunda taşıma kuvveti $L = 265,92$ N olarak okunmuştur. Buradan yeni C_l hesaplanırsa;

$$265,92 = C_l \left(\frac{1}{2} * 0,83676 * 28,442^2 \right) 1,05 \quad (6.9)$$

Yeni $C_l = 0,748$ olarak bulunmuştur. Önceki iterasyondaki C_l değeri ile arasındaki sapma %1 mertebesinde. Sapma oldukça düşük olduğu için son bulunan C_l değeri için son bir iterasyon koşturularak $L = 270$ N taşıma kuvveti elde edilecek şekilde yeni seyir hızı hesaplanarak girdi sağlanmıştır.

$$270 = 0,748 \left(\frac{1}{2} * 0,83676 * V^2 \right) 1,05 ; V = 28,665 \text{ m/s} \quad (6.10)$$

Son iterasyonun HAD analizi sonucunda elde edilen taşıma kuvveti $270,14$ N'dur. Buradan hesaplanan C_l değeri aşağıdaki gibi bulunmuştur;

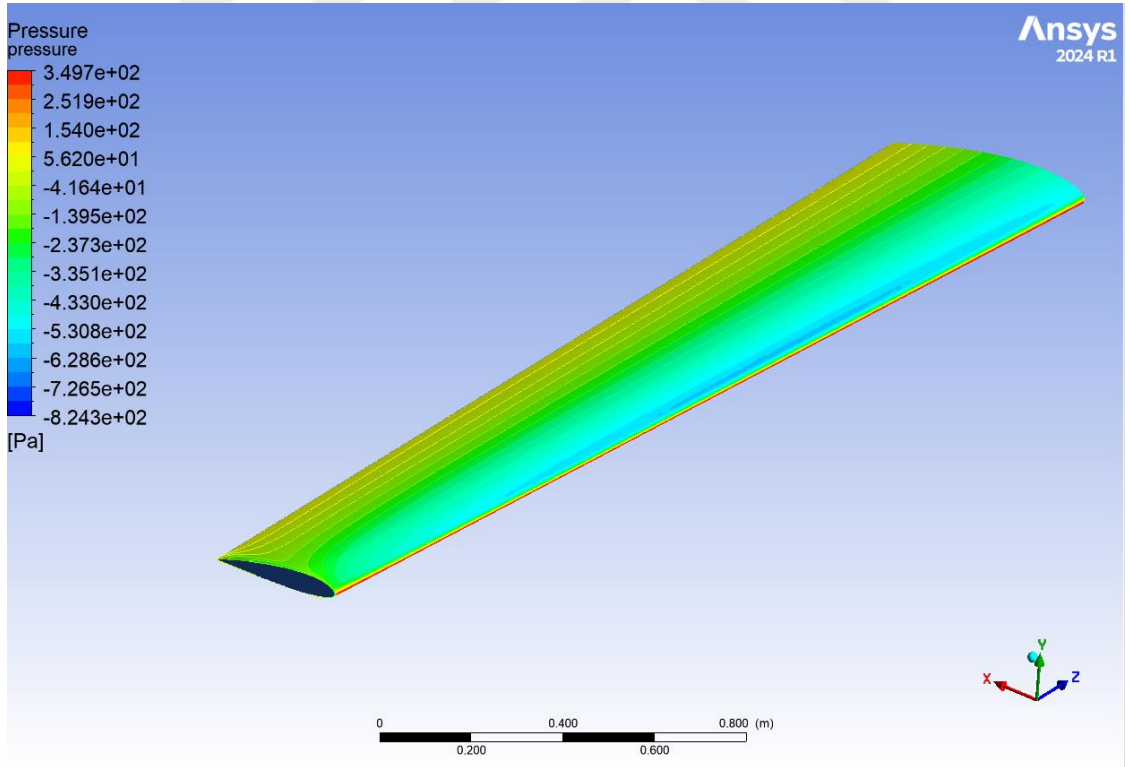
$$270,14 = C_l \left(\frac{1}{2} * 0,83676 * 28,665^2 \right) 1,05 ; C_l = 0,748 \quad (6.11)$$

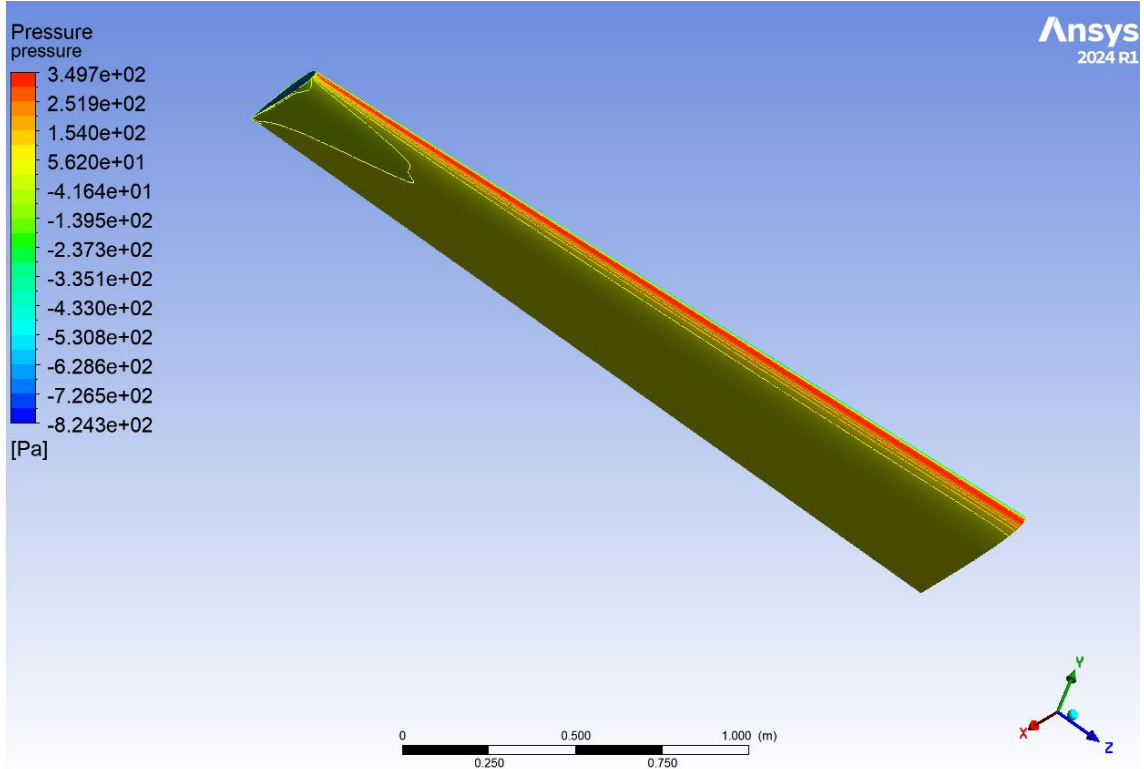
Son iterasyonda bulunan C_l değeri önceki iterasyon ile aynı olduğu ve kuvvet değerindeki sapma da %0,0005 mertebelerinde olduğu için iterasyonların yakınsadığı söylenebilir ve yeni bir iterasyon yapılmasına gerek yoktur. İterasyonların sonuçları Tablo 6.5'te toplu olarak verilmiştir.

Tablo 6.5 İterasyonların karşılaştırması

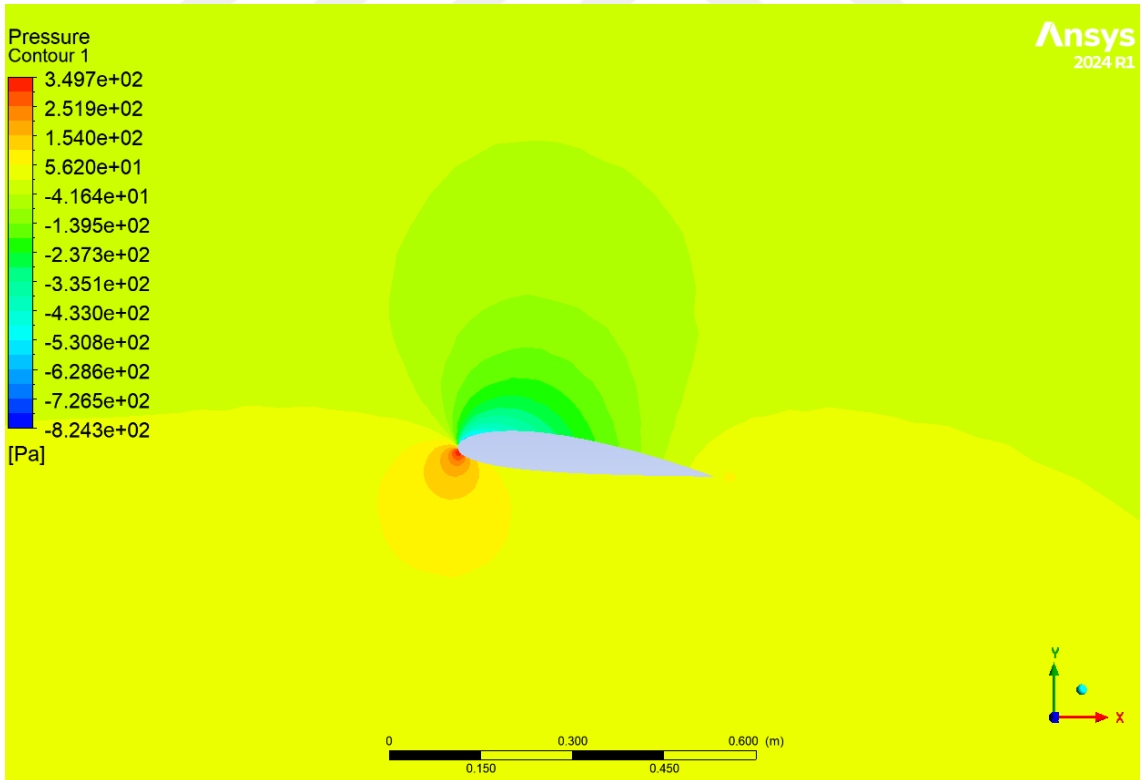
İt. No.	ρ (kg/m ³)	C_l	V (m/s)	A (m ²)	μ (10 ⁻⁵ N s/m ²)	L (N)	D (m)	Re	l (m)
0	0,83676	0,6	34,16	0,92	1,67	269,64	0,35	599060	2,63
1	0,83676	0,7598	34,16	0,92	1,67	341,3	0,35	599060	2,63
2	0,83676	0,748	28,442	1,05	1,67	265,92	0,42	598541	2,5
3	0,83676	0,748	28,665	1,05	1,67	270,14	0,42	603233	2,5

Sonuçları yapısal analizlerde kullanılacak olan 3. İterasyonun basınç dağılımları Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te verilmiştir. Basınç dağılımları beklendiği üzere kanadın üst bölgesinde daha düşük değerlere sahipken alt bölgesinde yüksektir. Taşıma kuvveti de Şekil 6.21'de görülen +Y yönünde oluşmaktadır. Basınç farkları Şekil 6.23'te daha detaylı görülmektedir. Kanat üzerindeki sürüklenme kuvvetinin büyük bir kısmını oluşturan hücum kenarındaki yüksek basınç değerleri de her 3 şekilde bariz bir şekilde görülmektedir.

**Şekil 6.21** Kanat üst yüzeyinde basınç dağılımı



Şekil 6.22 Kanat alt yüzeyinde basınç dağılımı



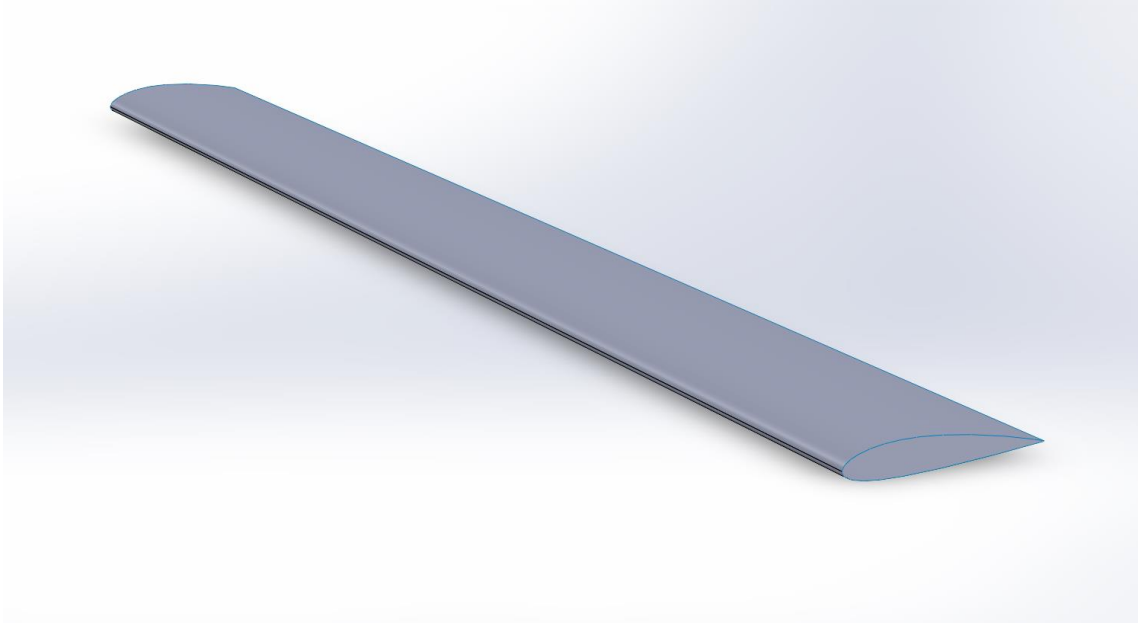
Şekil 6.23 Kanat kesitinde basınç dağılımı

6.2. Kanat Yapısal Analizi

Bu bölümde, 3 farklı kiriş profili ve her profil tipi için 3'er farklı serim açısı kombinasyonu ile toplamda 9 farklı kanat kombinasyonu modellenerek yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir.

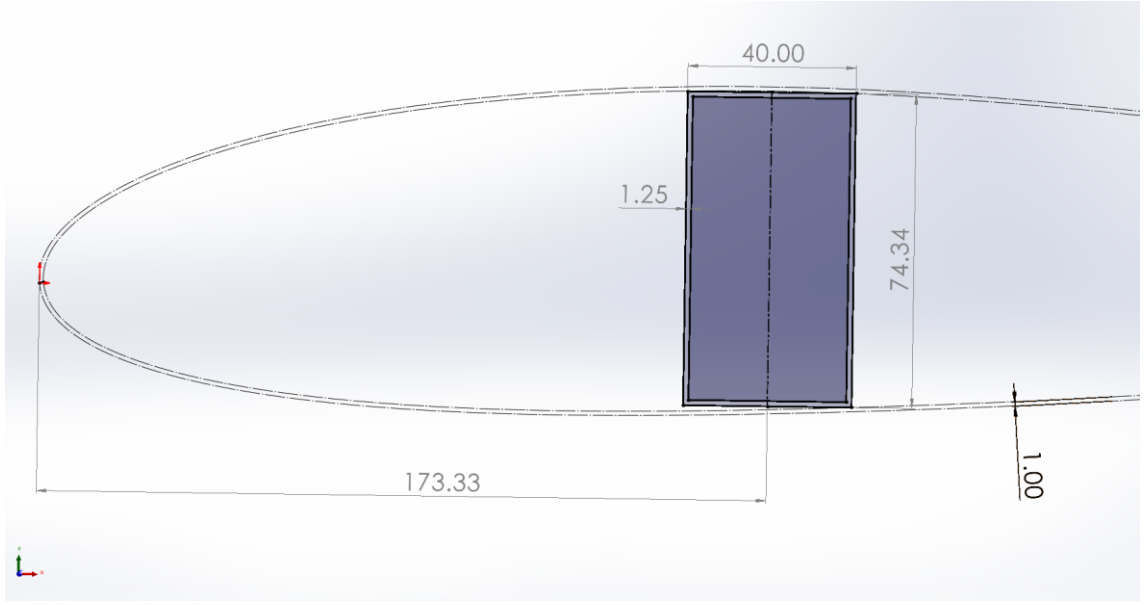
6.2.1. Kanat yapısal tasarımı

3 farklı kiriş profili için kanat yapısı tasarlanmıştır. Tüm bileşenler daha sonra analiz aşamasında kalınlıkları tanımlanmak üzere 2 boyutlu yüzey olarak tasarlanmıştır. İlk olarak HAD analizlere hazırlık aşamasında tasarlanan kanadın katı modelinin dış yüzeyleri ötelenip ikiye bölünerek alt ve üst kabuklar oluşturulmuştur. Alt ve üst kabuğun görseli Şekil 6.24'te gösterilmiştir.

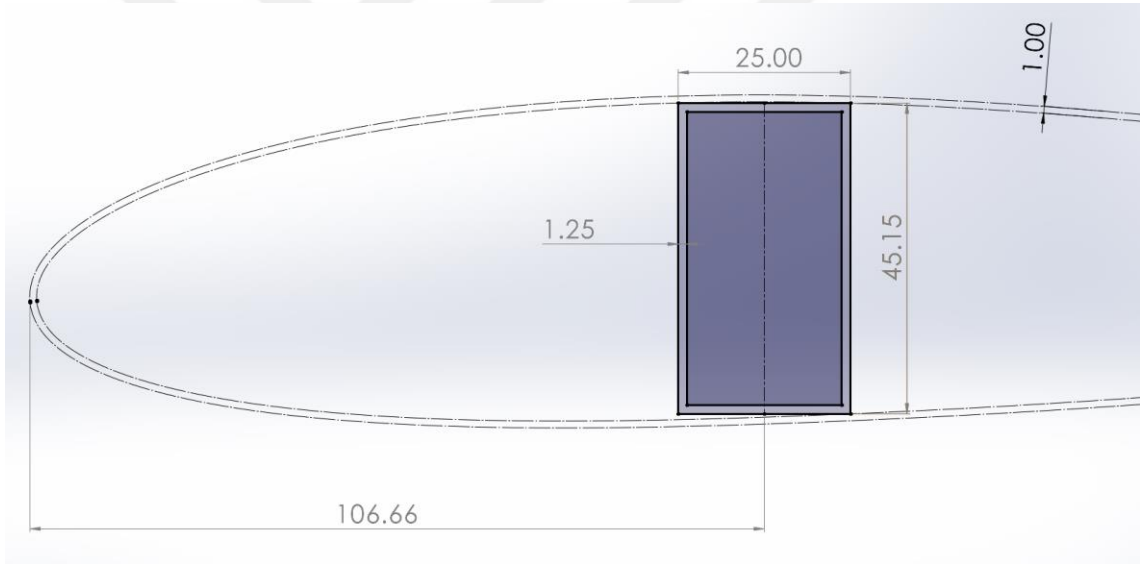


Şekil 6.24 Alt ve üst kabuklar

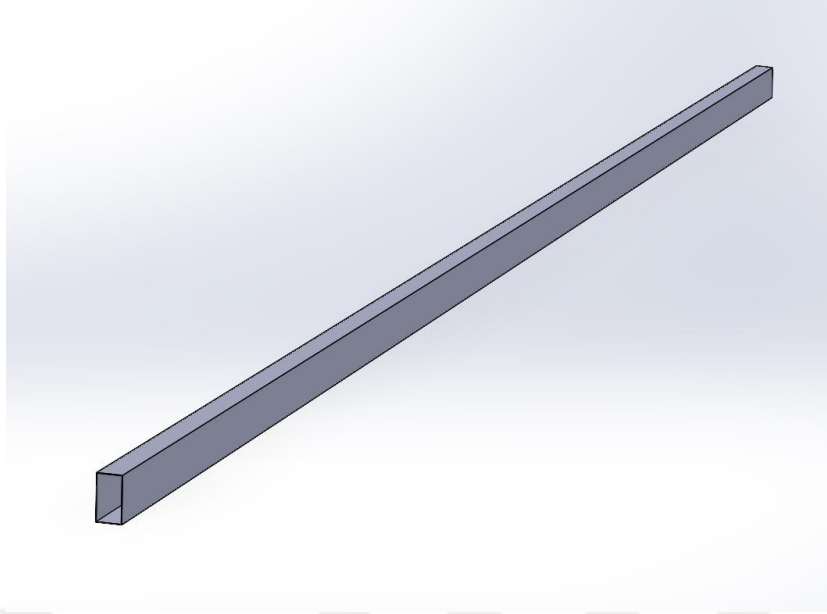
Kiriş konumları her 3 konfigürasyonda da veter uzunluğunun 1/3'lik kısmına yerleştirilmiştir. Kutu profil genişliği 40 mm olarak belirlenmiş ve yüksekliği kanat profilinin iç yüzeyine oturacak şekilde modifiye edilmiştir. İlk olarak kutu profil tasarımı yapıp, C ve I profil bu tasarım üzerinden türetilmiştir. Kutu profil ölçüleri, kök ve uç veterdeki konumlandırmaları ve 3 boyutlu tasarımları Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.25 Kutu profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu

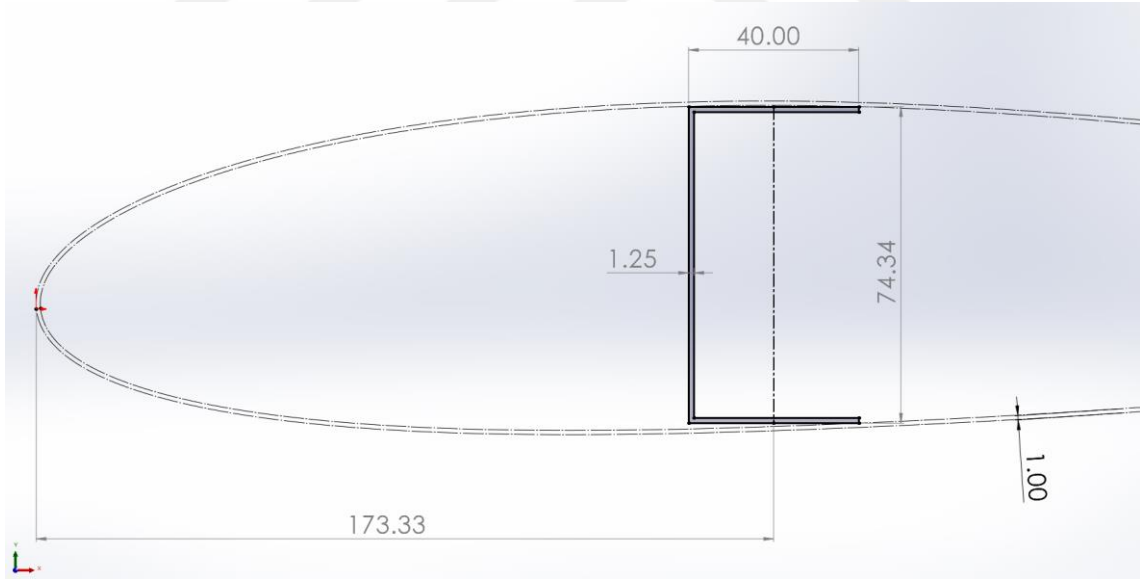


Şekil 6.26 Kutu profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu

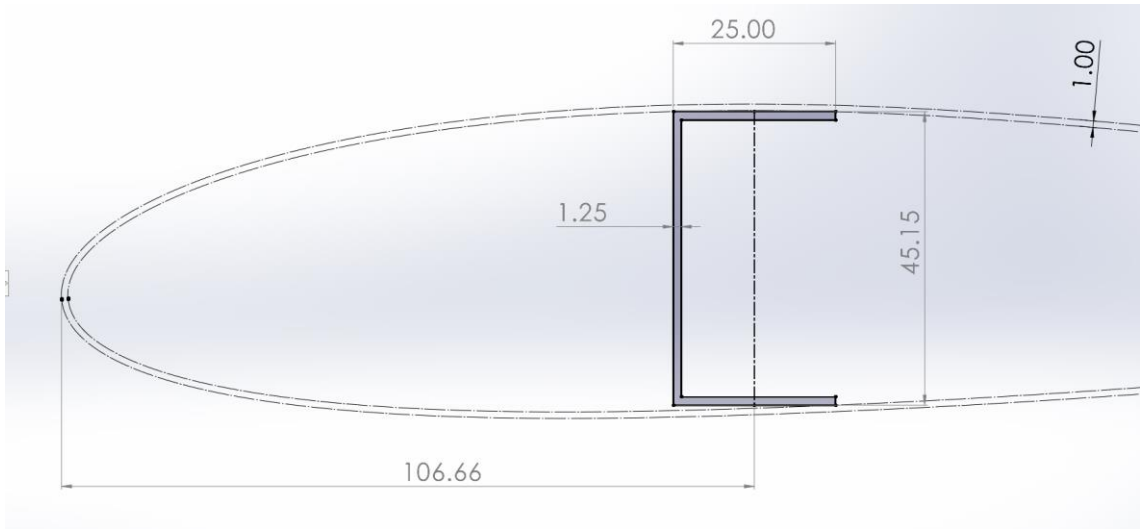


Şekil 6.27 Kutu profil kiriş 3 boyutlu tasarımı

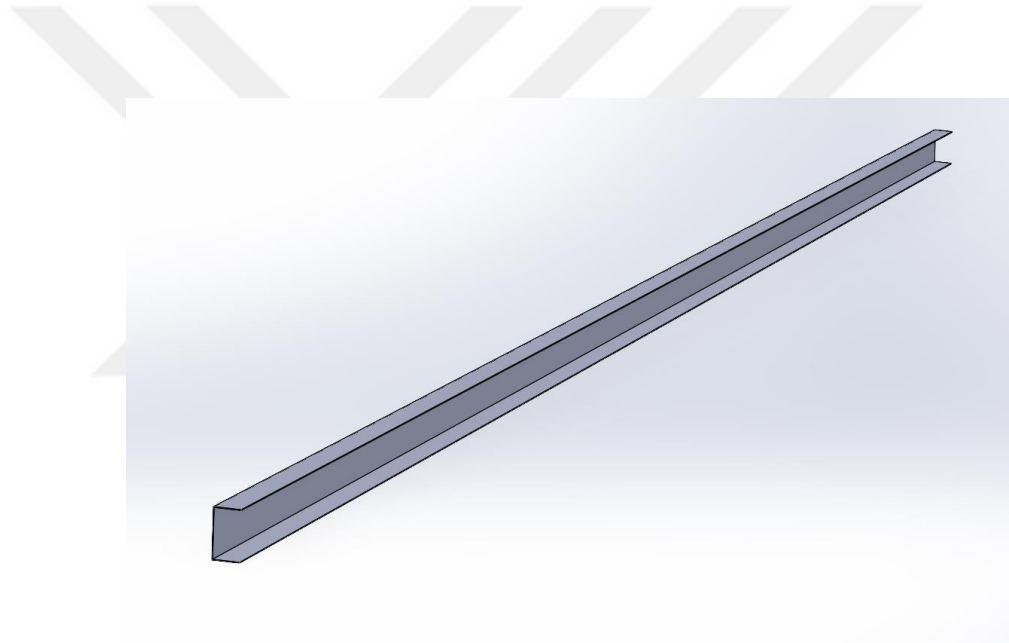
Kutu profilin firar kenarına yakın taraftaki yüzeyi iptal edilerek C profil elde edilmiştir. C profilin 3 boyutlu tasarımı, kök ve uç veterdeki ölçü ve konumlandırılmaları Şekil 6.28, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30’da gösterilmektedir.



Şekil 6.28 C profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu

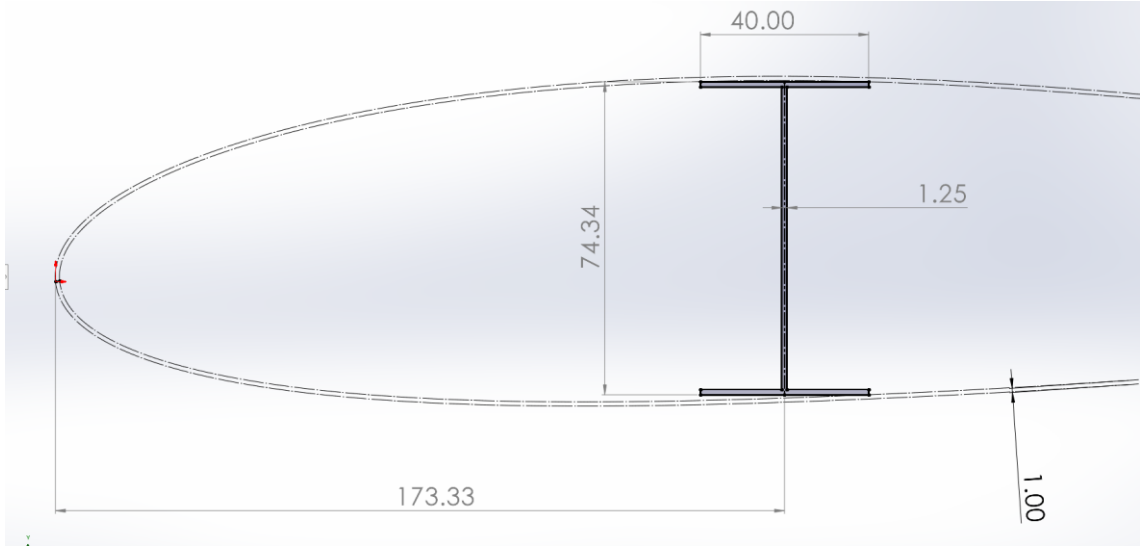


Şekil 6.29 C profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu

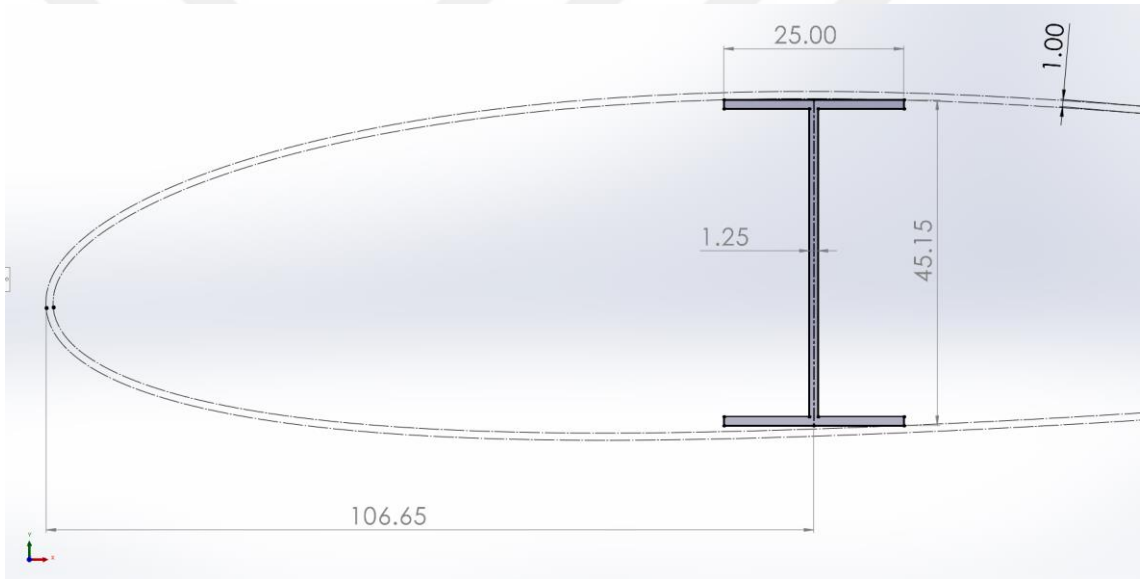


Şekil 6.30 C profil kiriş 3 boyutlu tasarımı

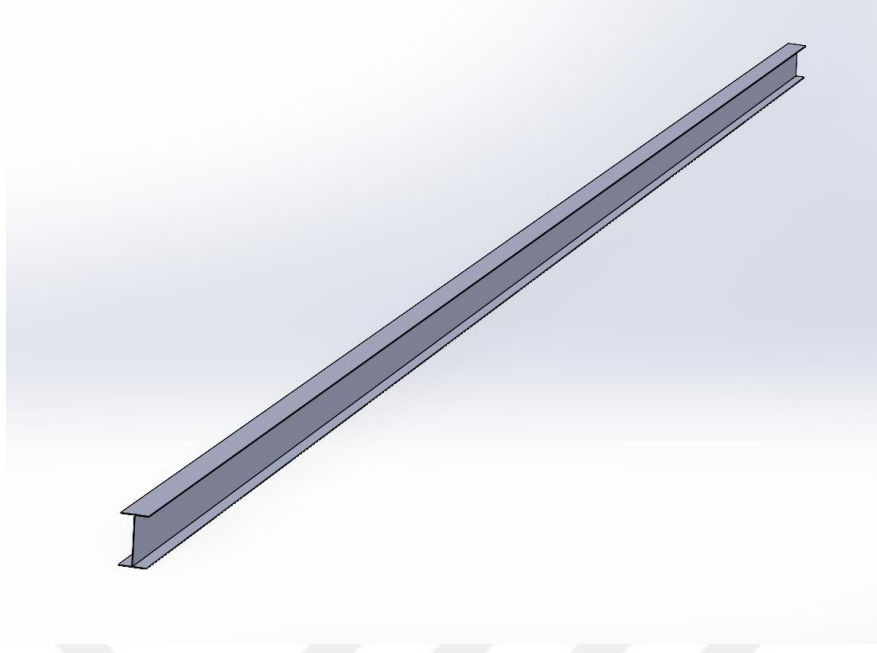
C profilin dikey yüzeyi iptal edilip orta düzleminden dikey bir düzlemsel yüzey çizilerek I profil elde edilmiştir. I profilin 3 boyutlu tasarımı, kök ve uç veterdeki ölçü ve konumlandırmaları Şekil 6.31, Şekil 6.32 ve Şekil 6.33'te belirtilmiştir.



Şekil 6.31 I profil kök veter kesiti ölçüleri ve konumu



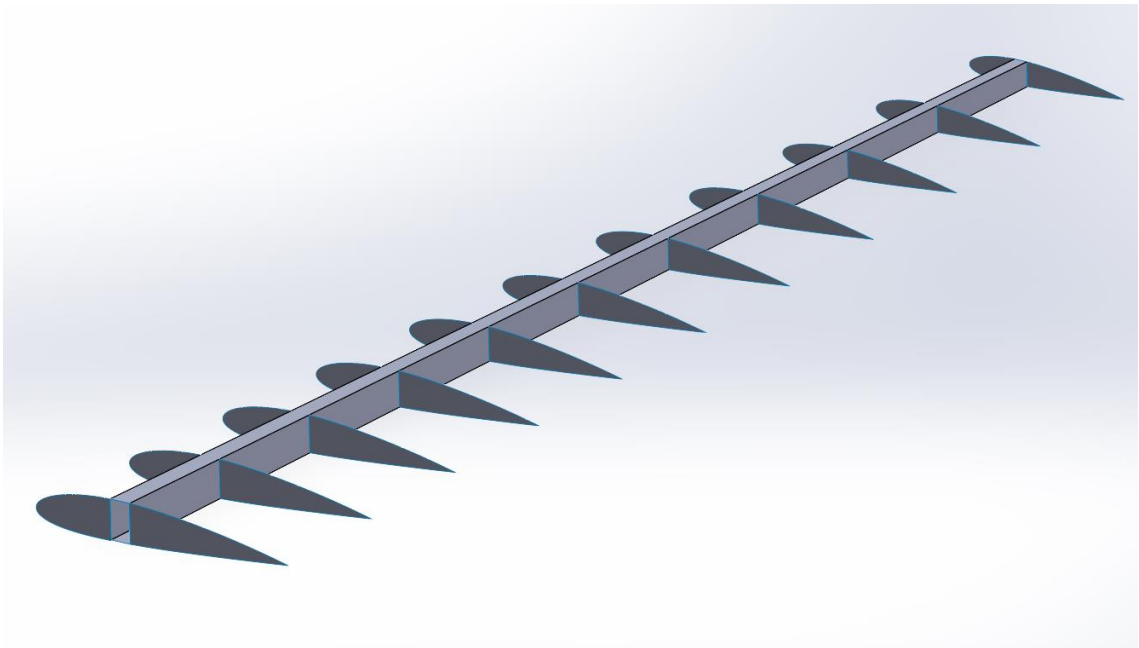
Şekil 6.32 I profil uç veter kesiti ölçüleri ve konumu



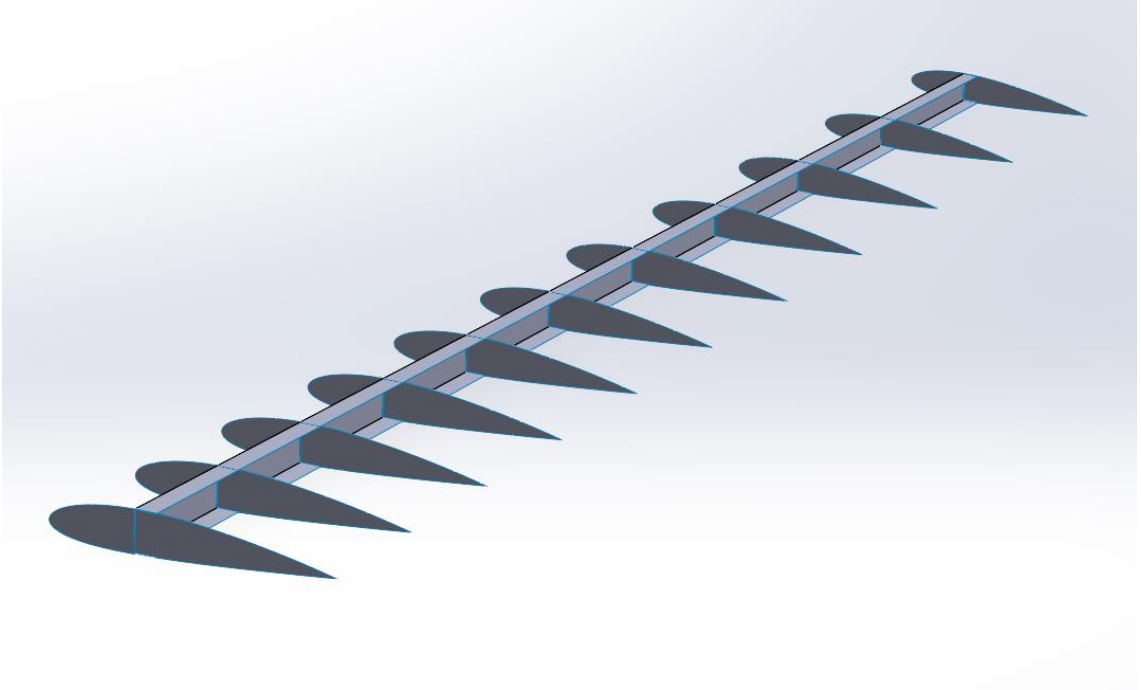
Şekil 6.33 I profil kiriş 3 boyutlu tasarımı

Bu şekilde her 3 profilin de aynı en-boy oranına ve konuma sahip olması sağlanmıştır.

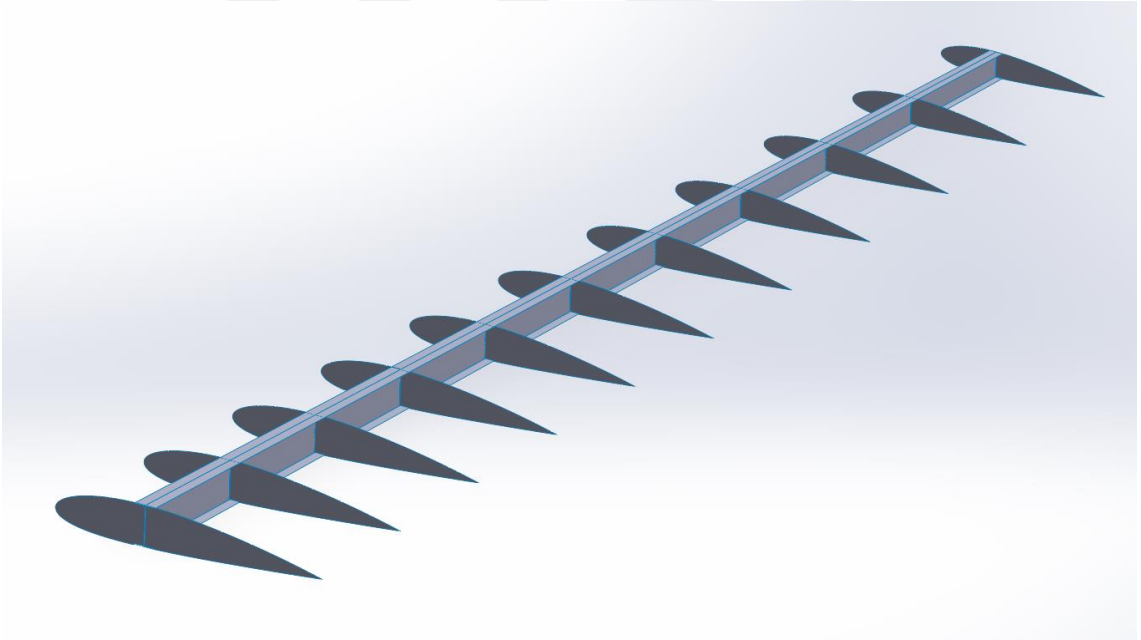
Kiriş geometrilerine ve kanat profiline uygun şekilde kaburgalar tasarlanarak kanat tasarımı sonlandırılmıştır. Kaburgalar eşit 250 mm aralıklar ile 11 adet olacak şekilde tasarlanmıştır. Kaburgaların kirişler üzerindeki yerleşimleri Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da verilmektedir.



Şekil 6.34 Kutu profil kaburga-kiriş yapısı



Şekil 6.35 C profil kaburga-kiriş yapısı



Şekil 6.36 I profil kaburga-kiriş yapısı

6.2.2. Malzeme özellikleri

Yapısal analizlerde 2 farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlar;

- PVC köpük
- T300-epoksi tek yönlü karbonfiber prepreg

T300-epoksi tek yönlü karbonfiber prepreg malzemesi kiriş ve alt-üst kabuklarda kullanılırken, PVC köpük ise kaburgalarda T300 ile birlikte çekirdek malzeme olarak sandviç yapı oluşturmak için kullanılmıştır.

PVC köpük ve T300 malzeme özellikleri verilmiştir. PVC köpük malzeme özellikleri ANSYS malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Malzeme bilgileri Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de verilmektedir.

Tablo 6.6 PVC köpük malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Değer	Birim
Elastik Modül, E	70	MPa
Poisson Oranı, ν	0,3	
Çekme Dayanımı $X_t = Y_t$	1,5	MPa
Basma Dayanımı $X_c = Y_c$	1,5	MPa
Kayma Dayanımı $S_{12} = S_{13} = S_{23}$	0,93	MPa

Tablo 6.7 T300-Epoksi malzeme özellikleri (Zhu ve diğ, 2019)

Malzeme Özellikleri	Değer	Birim
Uzunlamasına Elastik Modül, E_{11}	127,34	GPa
Enine Elastik Modül, E_{22}	7,78	GPa
Kalınlık Boyunca Elastik Modül, E_{33}	7,78	GPa
Poisson Oranı, ν_{12}	0.27	
Poisson Oranı, ν_{13}	0,27	
Poisson Oranı, ν_{23}	0,42	
Düzlem İçi Kayma Modülü, G_{12}	5	GPa
Düzlem Dışı Kayma Modülü, G_{13}	5	GPa
Düzlem Dışı Kayma Modülü, G_{23}	3,08	GPa
Uzunlamasına Çekme Dayanımı, X_t	2114	MPa
Uzunlamasına Basma Dayanımı, X_c	704	MPa
Enlemesine Çekme Dayanımı, Y_t	80	MPa
Enlemesine Basma Dayanımı, Y_c	68	MPa
Düzlem içi Kayma Dayanımı, S_{12}	80	MPa
Düzlem Dışı Kayma Dayanımı, S_{13}	80	MPa
Düzlem Dışı Kayma Dayanımı, S_{23}	55	MPa

6.2.3. Çözüm ağı

Her 3 geometri için de aynı ayarlarda çözüm ağı oluşturulmuştur. Tamamen yüzey gövdelerden oluşan geometrilerin çözüm ağları, Quad elemanlar ile örülmüştür.

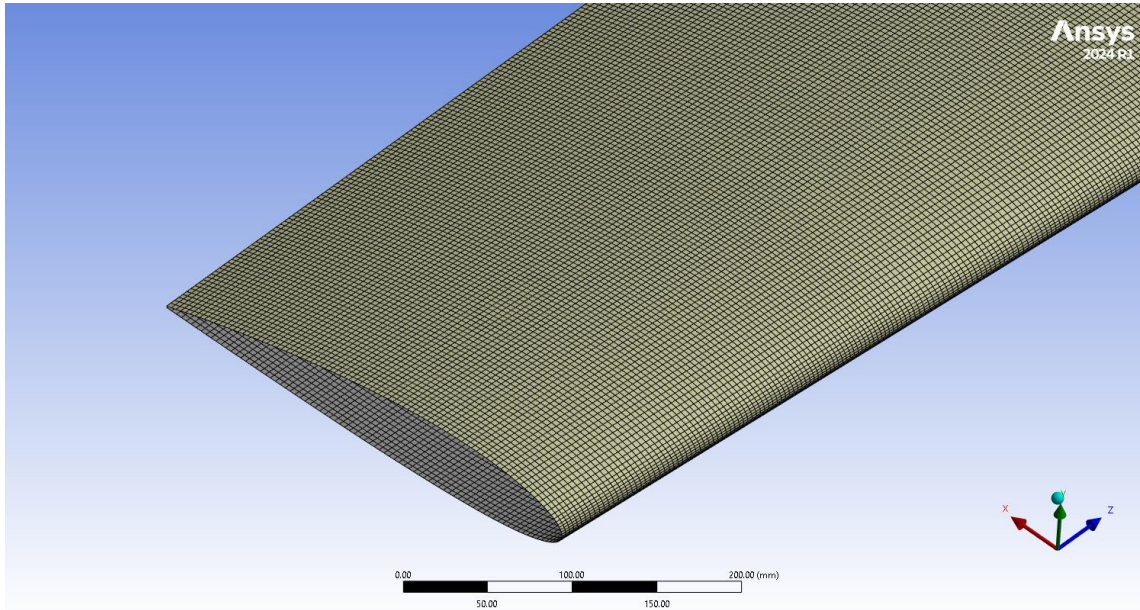
6.2.3.1. Kutu profil çözüm ağı

Kutu profil için çözüm ağı oluşturulurken Şekil 6.37’de verilen global ayarlar kullanılmıştır.

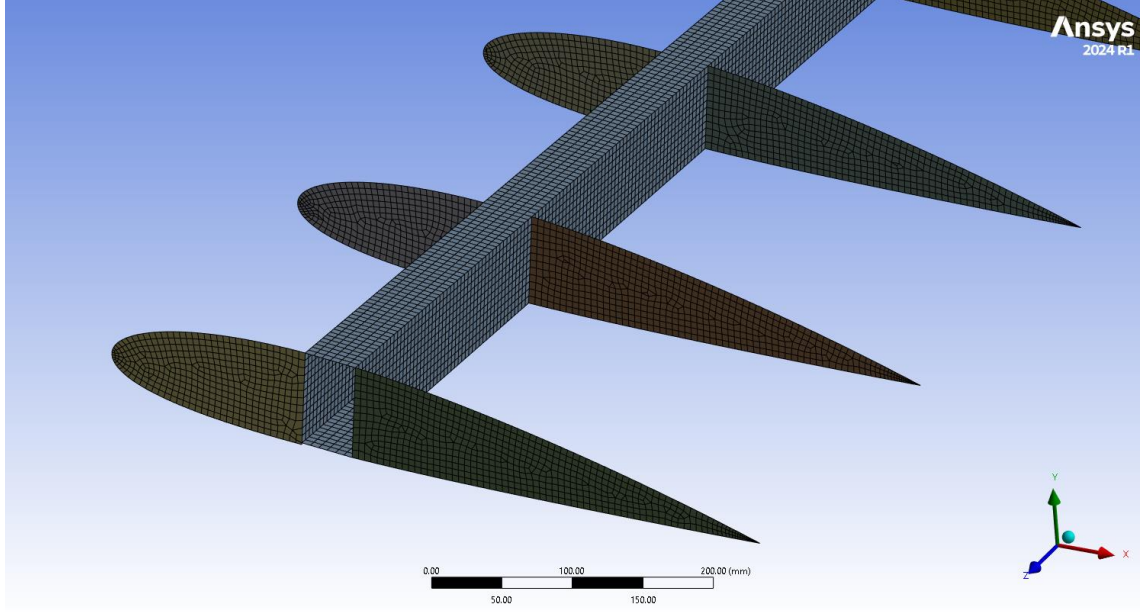
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
☐ Element Size	5.0 mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
☐ Growth Rate	Default (1.2)
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default (2.5e-002 mm)
Capture Curvature	Yes
☐ Curvature Minimum	2.0 mm
☐ Curvature Normal	10.0°
Capture Proximity	Yes
☐ Proximity Minimum	0.5 mm
☐ Proximity Gap	Default (3.0)
Proximity Size Selection	Faces and Edges
Bounding Box Dimension	2554.5 mm
Average Surface Area	22387 mm ²
Minimum Edge Length	2.7843e-002 mm

Şekil 6.37 Global çözüm ağı ayarları

Yukarıdaki Şekil 6.37’de görülen ayarlardan anlaşıldığı üzere eleman boyutu 5 mm olarak tanımlanmıştır. Curvature ayarı ile eğri yüzeylerin detayları daha iyi yakalanmış ve proximity ile kaburgaların firar kenarına yakın kısımları gibi dar alanlar 3 katmanda geçilerek detaylar artırılmıştır. Kabuk, kaburga ve kirişlerdeki genel ağ yapısının görünümü Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da gösterilmiştir.

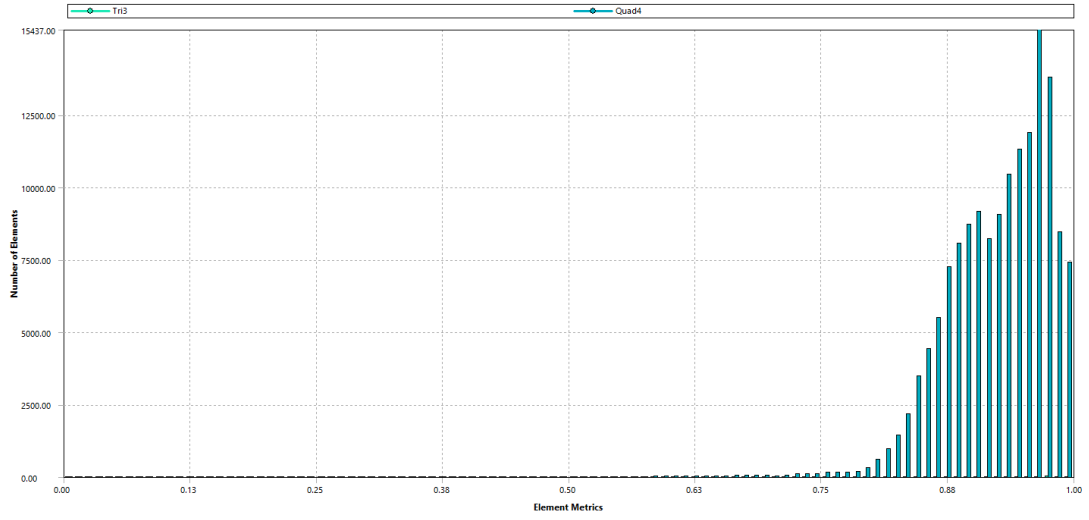


Şekil 6.38 Alt ve üst kabuk çözüm ağı yapısı

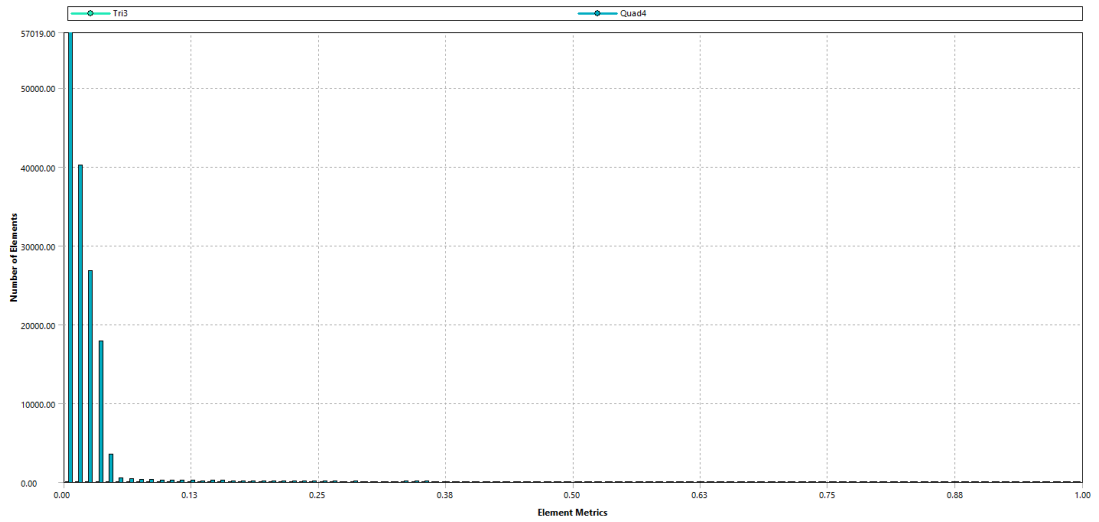


Şekil 6.39 Kutu profil kaburga ve kiriş çözüm ağı yapısı

Kutu profil konfigürasyonunda kullanılan elemanların kalitesi eleman kalitesi (element quality) ve eğrilik (skewness) kriterleri ile değerlendirilmiştir. Eğrilik değerinin 0,95'ten büyük olması durumunda elemanlar geçersiz sayılmaktadır ve bu elemanların bulunduğu bölgelerde sonuçların doğruluğu değerlendirilmelidir. Ansys dökümanlarında önerilen maksimum eğrilik değeri 0,9'dur. Eğrilik değerlerinin 0,9'un altında ve mümkün olduğunca 0'a yakın olması amaçlanır. Eleman kalitesinin de olabildiğince 1'e yakın olması uygundur. Kutu profil için eğrilik ve eleman kalitesi dağılımı Şekil 6.40 ve Şekil 6.41'de verilmektedir. Bu grafiklerde x eksen 0-1 arasında kalite kriterini belirtirken, y eksen eleman sayılarını gösterir. Şekil 6.40 ve Şekil 6.41'de görüldüğü üzere eleman kalitesi 1'e yakın bölgelerde yoğunlaşırken eğrilik ise 0'a yakın bölgelerde yoğunlaşmaktadır.



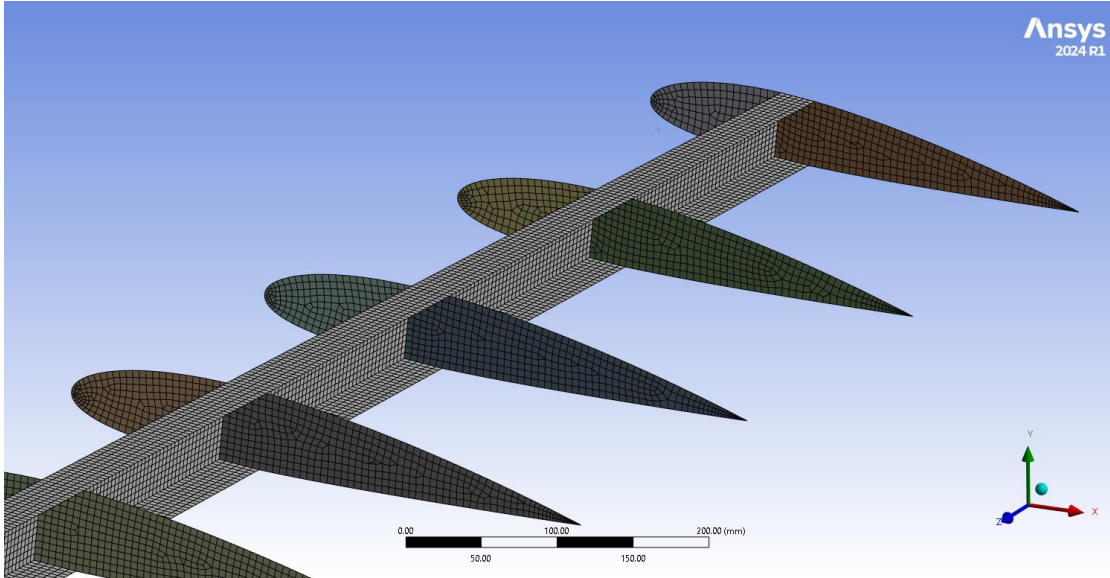
Şekil 6.40 Kutu profil ağ yapısı eleman kalitesi dağılımı



Şekil 6.41 Kutu profil ağ yapısı eğrilik dağılımı

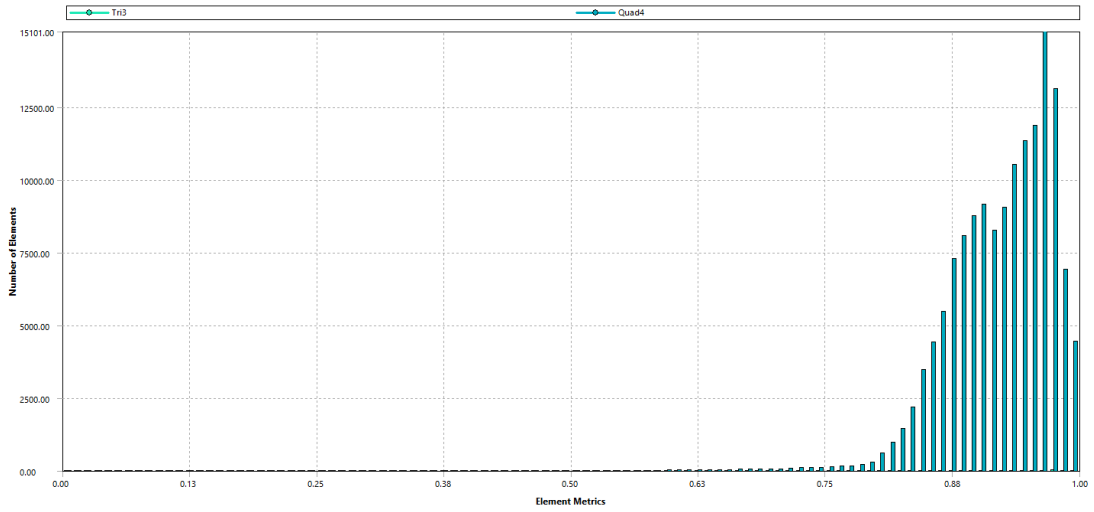
6.2.3.2. C profil çözüm ağı

C profil konfigürasyonunun da çözüm ağı Şekil 6.37’de verilen global ayarlarda oluşturulmuştur. C profil için kaburga ve kirişin çözüm ağı yapısının görünümü Şekil 6.42’de gösterilmiştir.

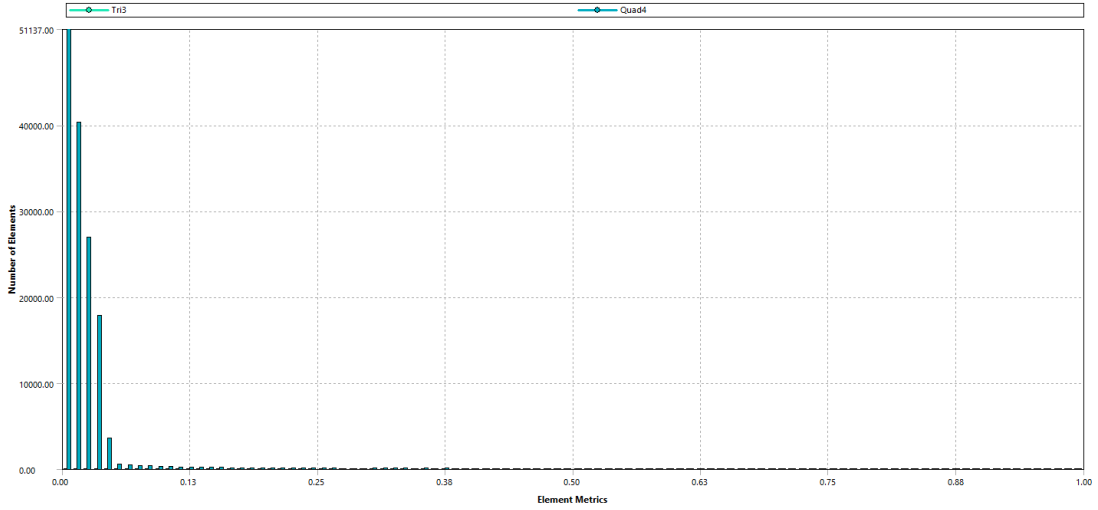


Şekil 6.42 C profil kaburga ve kiriş çözüm ağı yapısı

C profilde de kutu profil ile benzer ağı yapısı kurulduğu için eğrilik ve eleman kalitesi dağılımları kutu profildekiyle benzerdir. C profil için eğrilik ve eleman kalitesi dağılım grafikleri Şekil 6.43 ve Şekil 6.44'te verilmiştir.



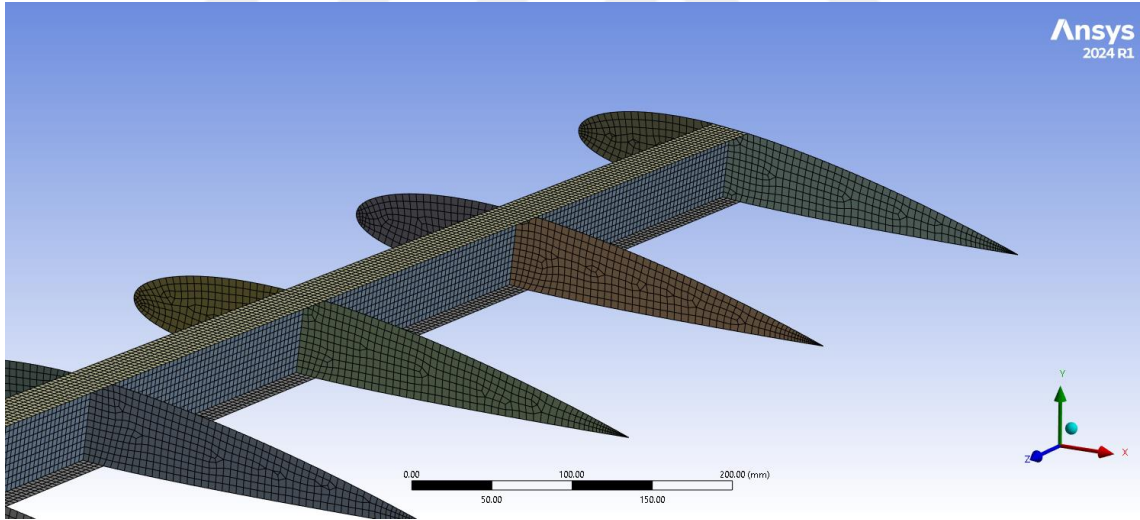
Şekil 6.43 C profil ağı yapısı eleman kalitesi dağılımı



Şekil 6.44 C profil ağ yapısı eğrilik dağılımı

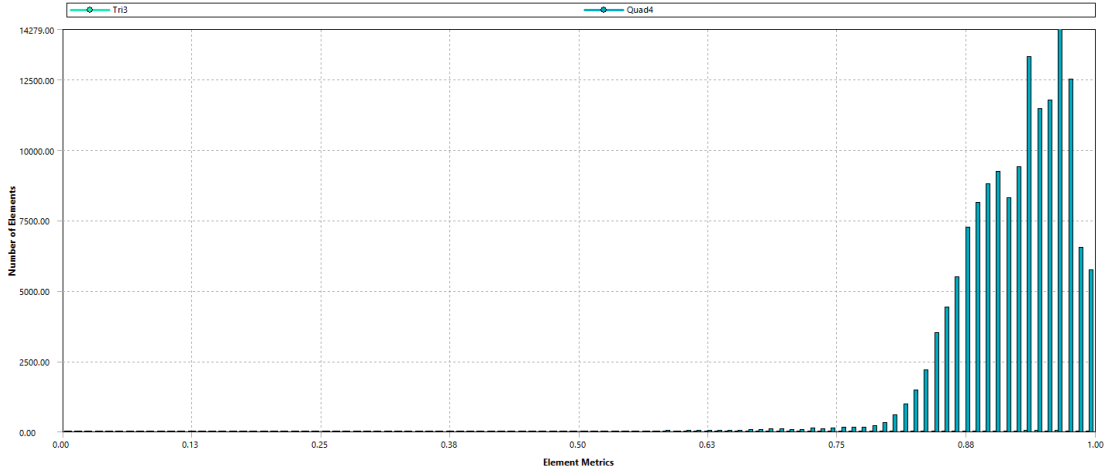
6.2.3.3. I profil çözüm ağı

I profil konfigürasyonunun da çözüm ağı Şekil 6.37’de verilen global ayarlarda oluşturulmuştur. I profil kaburga ve kirişlerin çözüm ağı yapısının görünümü Şekil 6.45’te gösterilmiştir.

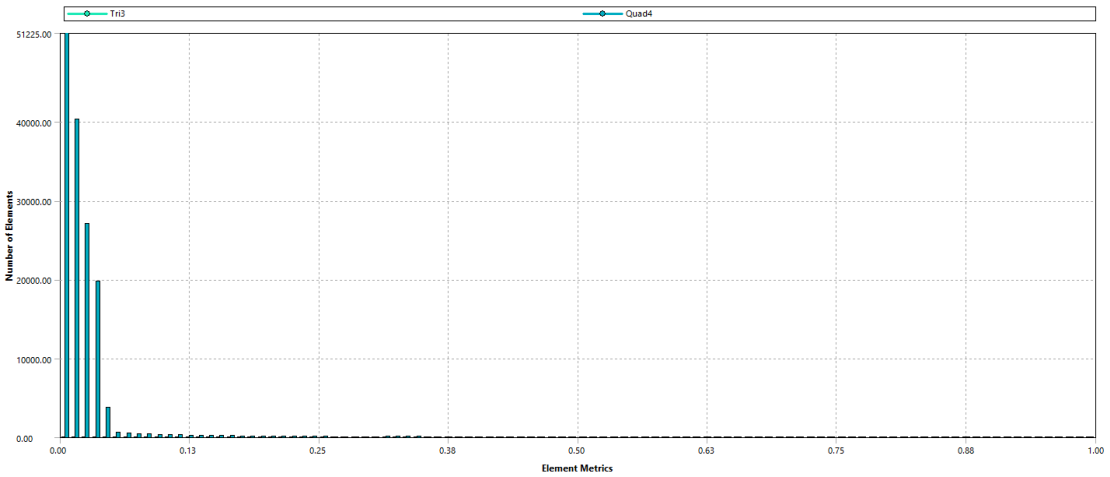


Şekil 6.45 I profil çözüm ağı yapısı

Eğrilik ve eleman kalitesi dağılımları kutu ve C profildekiyle benzerdir. I profil için eğrilik ve eleman kalitesi dağılım grafikleri Şekil 6.46 ve Şekil 6.47’de verilmiştir.



Şekil 6.46 I profil ağ yapısı eleman kalitesi dağılımı

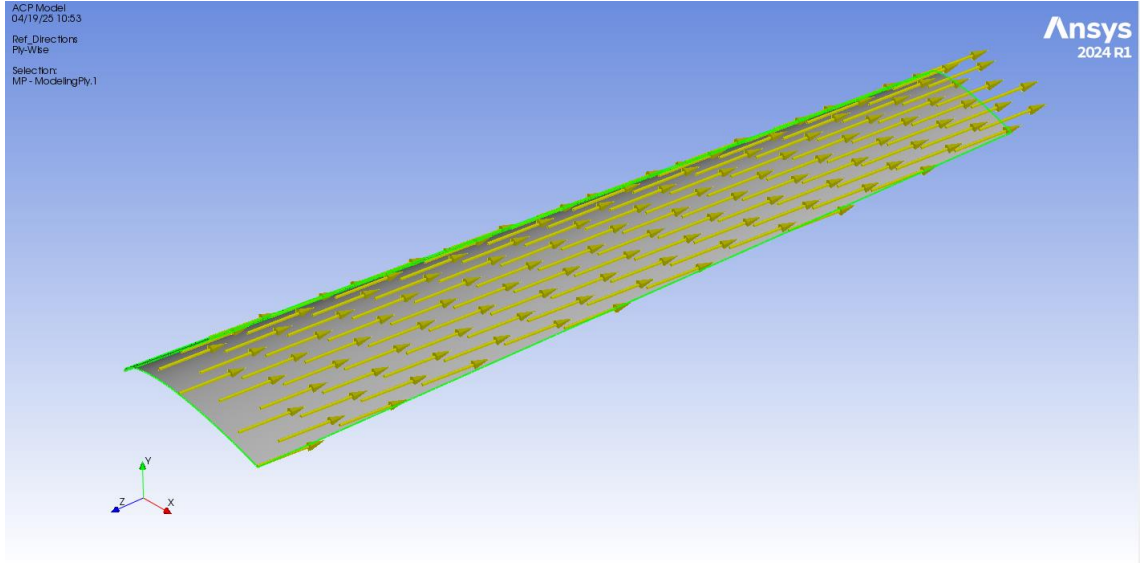


Şekil 6.47 I profil ağ yapısı eğrilik dağılımı

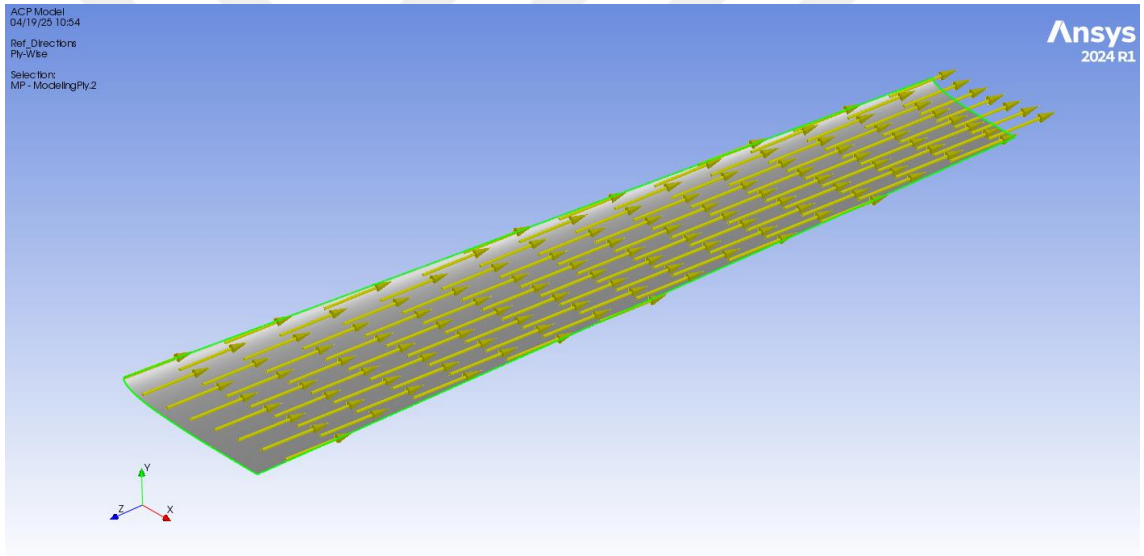
6.2.4. Kompozit modelleme

Tüm konfigürasyonlar için ACP (Ansys Composite Prepost) modülünde kompozit modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme katmanlarının kalınlık bilgileri girilmiş ve alt-üst kabuk, kaburgalar ve kirişler için farklı oryantasyonlar tanımlanmıştır. Katman dizilimleri simetrik olacak şekilde belirlenmiştir. Yalnızca kirişlerin yapısal davranışları karşılaştırılacağı için tüm konfigürasyonlarda kabuk ve kaburgalarda aynı oryantasyon kullanılmıştır. Alt-üst kabuk ve kirişler T300-Epoksi'den oluşurken, kaburgalar T300-Epoksi ve PVC köpük ile sandviç yapı olarak modellenmiştir.

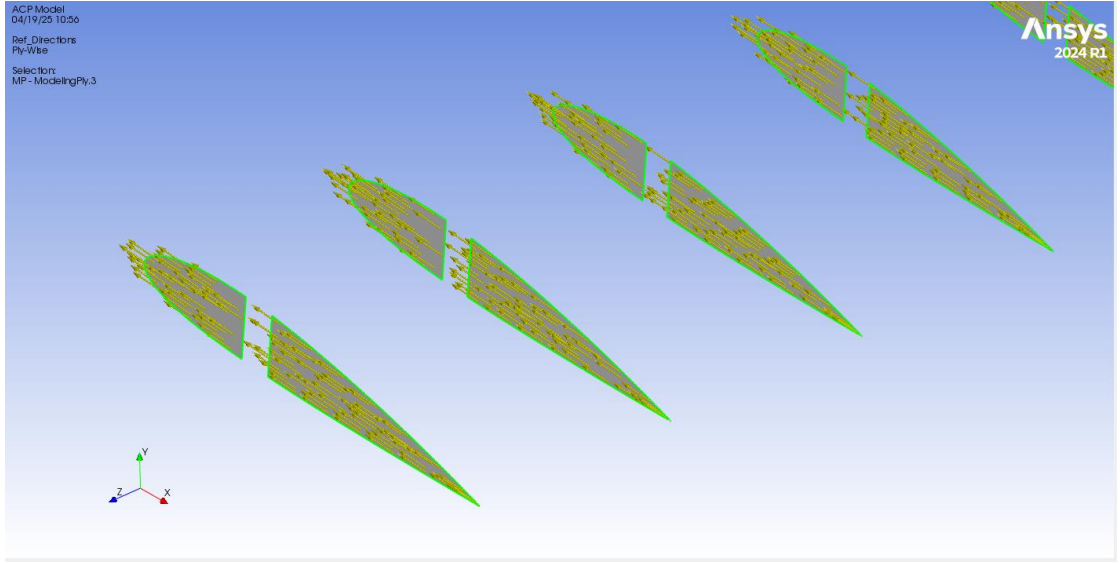
Alt-üst kabuk, kiriş ve kaburgalara rozet tanımlamaları yapılarak referans yönleri belirlenmiştir. Bileşenlerin referans yönleri Şekil 6.48, Şekil 6.49, Şekil 6.50, Şekil 6.51, Şekil 6.52 ve Şekil 6.53'te sarı oklar ile gösterilmiştir.



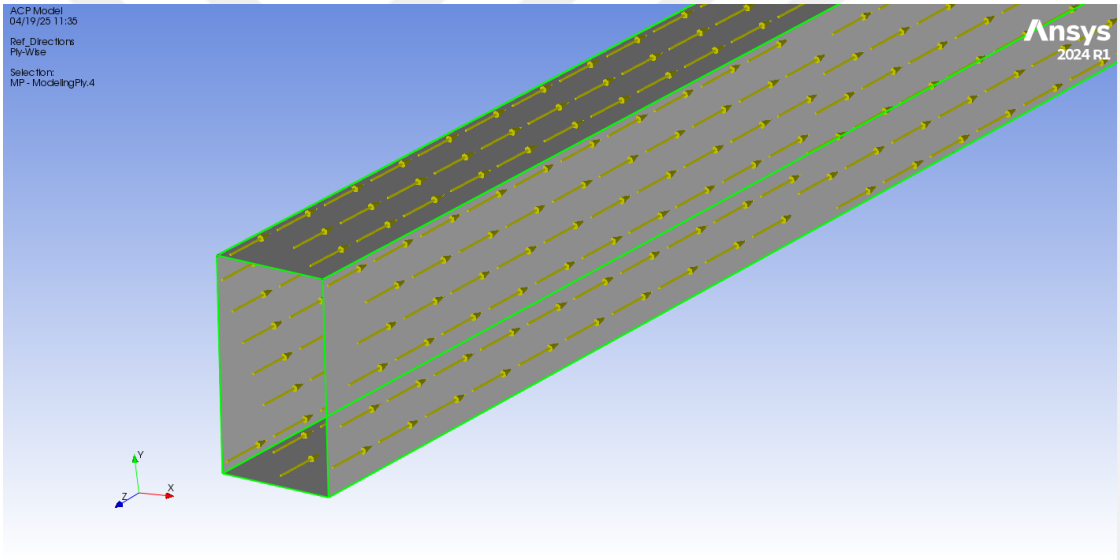
Şekil 6.48 Üst kabuk referans fiber yönleri



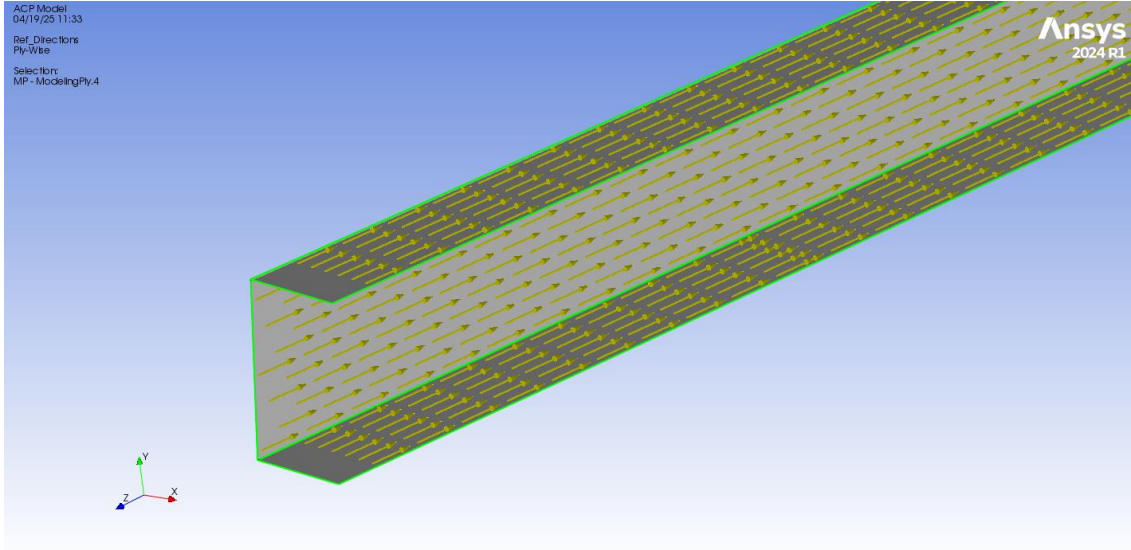
Şekil 6.49 Alt kabuk referans fiber yönleri



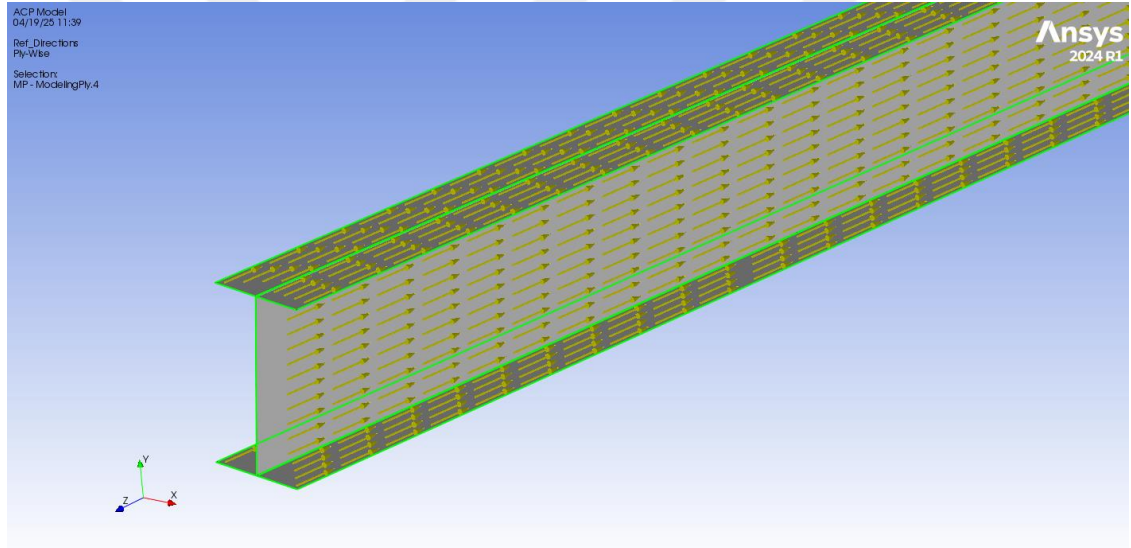
Şekil 6.50 Kaburgaların referans fiber yönleri



Şekil 6.51 Kutu profil kiriş referans fiber yönleri



Şekil 6.52 C profil kiriş referans fiber yönleri



Şekil 6.53 I profil kiriş referans fiber yönleri

Referans yönleri belirlendikten sonra daha önceden oluşturulmuş katman grupları bileşenlere atanarak katmanlar oluşturulmuştur. Alt-üst kabuk ve kaburgalar için katman gruplarının malzeme, serim açısı ve kalınlık bilgileri Tablo 6.8 ve Tablo 6.9 içerisinde katman bazında belirtilmiştir

Tablo 6.8 Alt-üst kabuk malzeme ve oryantasyon bilgisi

Katman No	Malzeme	Oryantasyon	Katman Kalınlığı (mm)
1	T300-Epoksi	0°	0,125
2	T300-Epoksi	45°	0,125
3	T300-Epoksi	-45°	0,125
4	T300-Epoksi	0°	0,125
5	T300-Epoksi	0°	0,125
6	T300-Epoksi	-45°	0,125
7	T300-Epoksi	45°	0,125
8	T300-Epoksi	0°	0,125
Toplam Katman Kalınlığı:			1

Tablo 6.9 Kaburga malzeme ve oryantasyon bilgisi

Katman No	Malzeme	Oryantasyon	Katman Kalınlığı (mm)
1	T300-Epoksi	45°	0,125
2	T300-Epoksi	-45°	0,125
3	T300-Epoksi	45°	0,125
4	T300-Epoksi	-45°	0,125
5	PVC Köpük	0°	7
6	T300-Epoksi	-45°	0,125
7	T300-Epoksi	45°	0,125
8	T300-Epoksi	-45°	0,125
9	T300-Epoksi	45°	0,125
Toplam Katman Kalınlığı:			8

Kirişler için fiber serim açılarının karşılaştırması yapılacağı için 3 farklı oryantasyon kullanılmıştır. Bu oryantasyonlar 45° ve 0° açılı kumaşların farklı oranlarda kullanılması ile oluşmaktadır. İlk katmanlarda 0° kumaş kullanılıp, ara katmanlara 45° kumaşlar dağıtılmıştır. Burada 1. Katmanlar en dış katmanken, 10. Katmanlar iç yüzeydeki katmanlardır Kirişler için 3 farklı katman grubunun içerikleri Tablo 6.10, Tablo 6.11, ve Tablo 6.12'deki gibidir.

Tablo 6.10 1. Oryantasyon kiriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%100 oranında 0° fiber kullanımı)

Katman No	Malzeme	Oryantasyon	Katman Kalınlığı (mm)
1	T300-Epoksi	0°	0,125
2	T300-Epoksi	0°	0,125
3	T300-Epoksi	0°	0,125
4	T300-Epoksi	0°	0,125
5	T300-Epoksi	0°	0,125
6	T300-Epoksi	0°	0,125
7	T300-Epoksi	0°	0,125
8	T300-Epoksi	0°	0,125
9	T300-Epoksi	0°	0,125
10	T300-Epoksi	0°	0,125
Toplam Katman Kalınlığı:			1,25

Tablo 6.11 2. Oryantasyon kiriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%40 oranında 45° fiber kullanımı)

Katman No	Malzeme	Oryantasyon	Katman Kalınlığı (mm)
1	T300-Epoksi	0°	0,125
2	T300-Epoksi	45°	0,125
3	T300-Epoksi	-45°	0,125
4	T300-Epoksi	0°	0,125
5	T300-Epoksi	0°	0,125
6	T300-Epoksi	0°	0,125
7	T300-Epoksi	0°	0,125
8	T300-Epoksi	-45°	0,125
9	T300-Epoksi	45°	0,125
10	T300-Epoksi	0°	0,125
Toplam Katman Kalınlığı:			1,25

Tablo 6.12 3. Oryantasyon kiriş malzeme ve oryantasyon bilgisi (%60 oranında 45° fiber kullanımı)

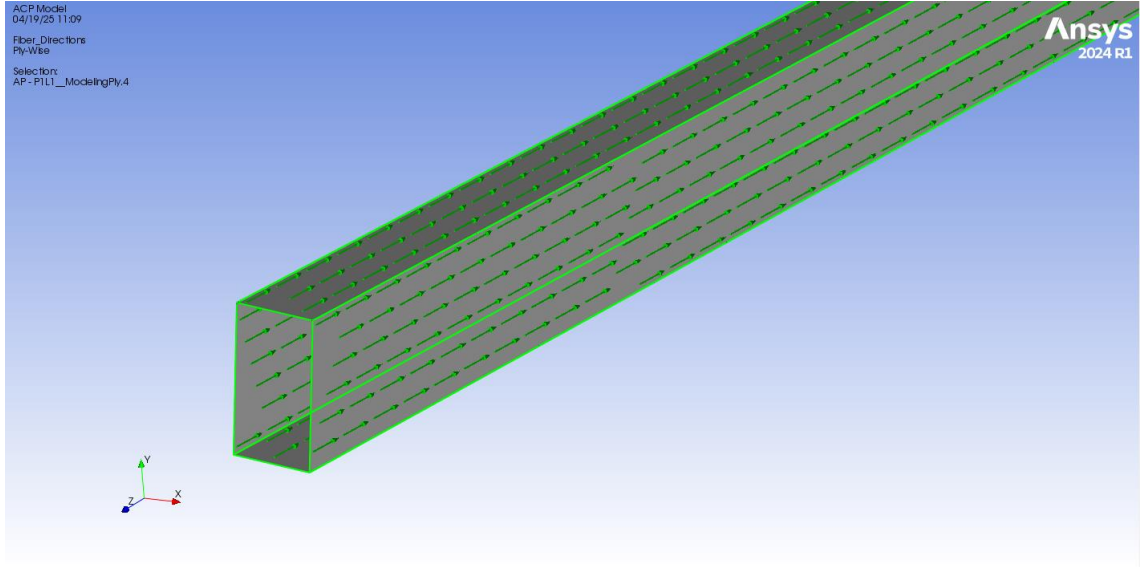
Katman No	Malzeme	Oryantasyon	Katman Kalınlığı (mm)
1	T300-Epoksi	0°	0,125
2	T300-Epoksi	45°	0,125
3	T300-Epoksi	-45°	0,125
4	T300-Epoksi	0°	0,125
5	T300-Epoksi	45°	0,125
6	T300-Epoksi	-45°	0,125
7	T300-Epoksi	0°	0,125
8	T300-Epoksi	45°	0,125
9	T300-Epoksi	-45°	0,125
10	T300-Epoksi	0°	0,125
Toplam Katman Kalınlığı:			1,25

Sonuç olarak 3 farklı kiriş profili ve 3 farklı serim oryantasyonu için toplamda 9 farklı konfigürasyon bulunmaktadır. Bu konfigürasyonların bilgileri Tablo 6.13'te verilmiştir.

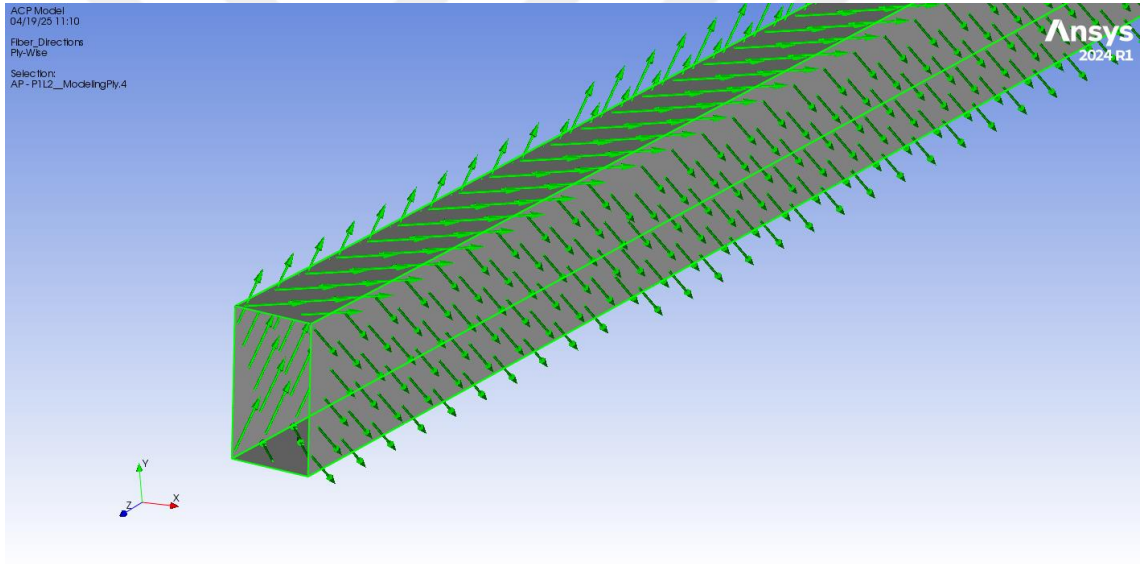
Tablo 6.13 Kiriş konfigürasyon bilgisi

Konfigürasyon No	Kiriş Profili	Oryantasyon No
1	Kutu	1
2	Kutu	2
3	Kutu	3
4	C	1
5	C	2
6	C	3
7	I	1
8	I	2
9	I	3

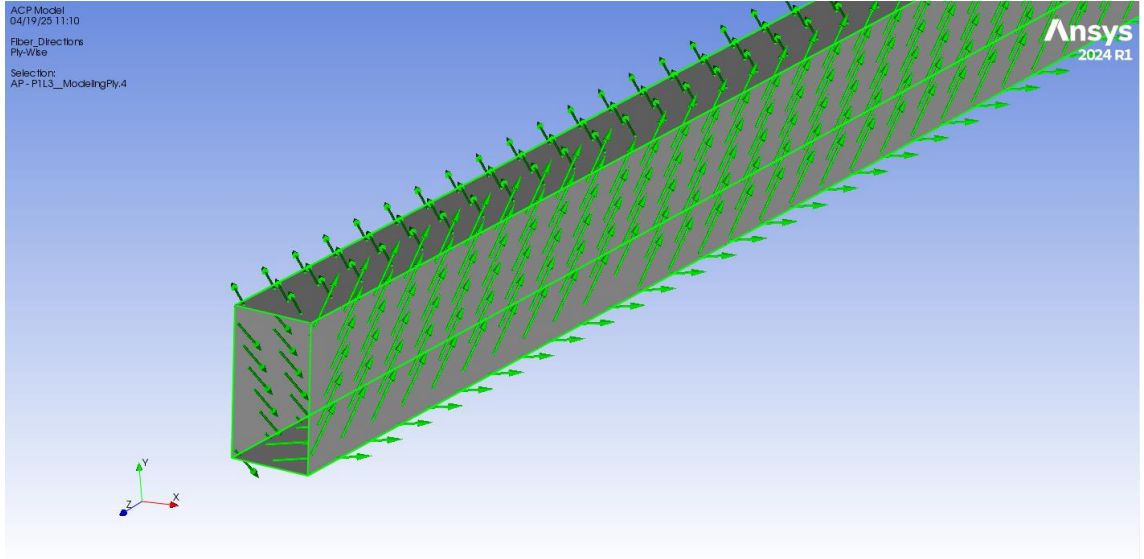
Kirişlere yapılan katman atamaları sonrası fiber yönleri Şekil 6.54, Şekil 6.55, Şekil 6.56, Şekil 6.57, Şekil 6.58, Şekil 6.59, Şekil 6.60, Şekil 6.61 ve Şekil 6.62'de yeşil oklarla gösterilmiştir.



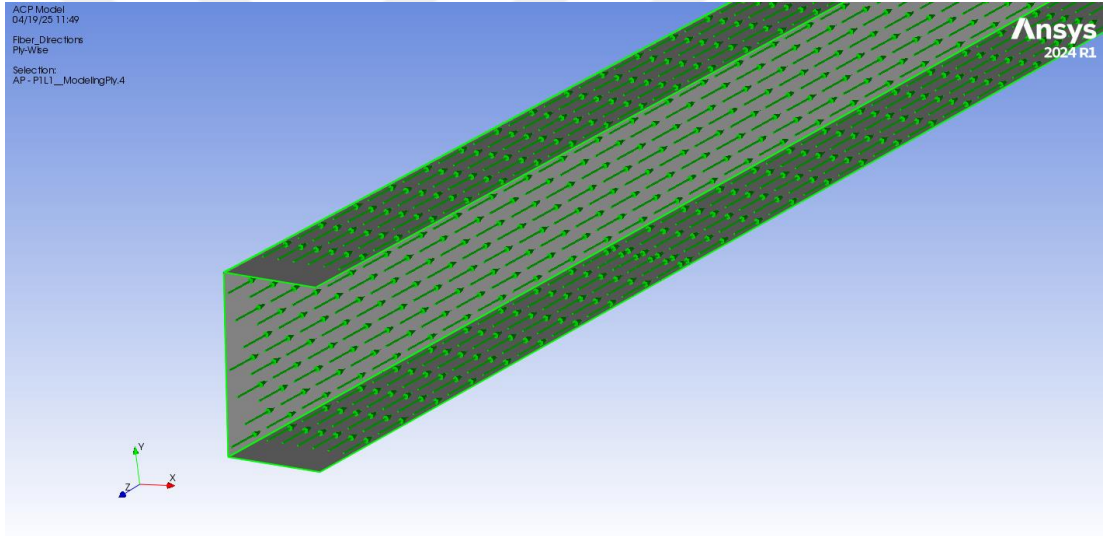
Şekil 6.54 Kutu profil 0° fiber yönelimi



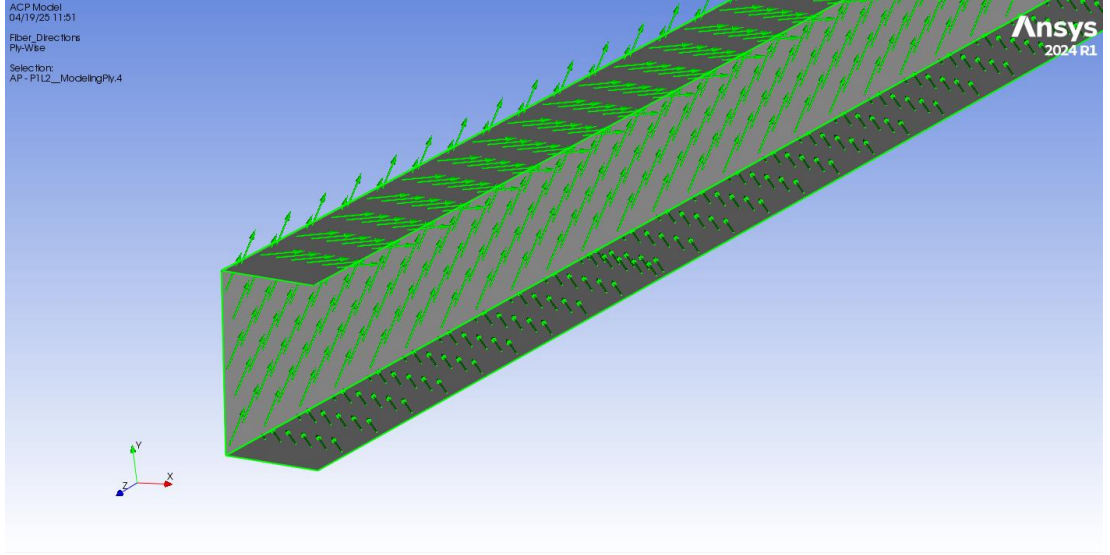
Şekil 6.55 Kutu profil 45° fiber yönelimi



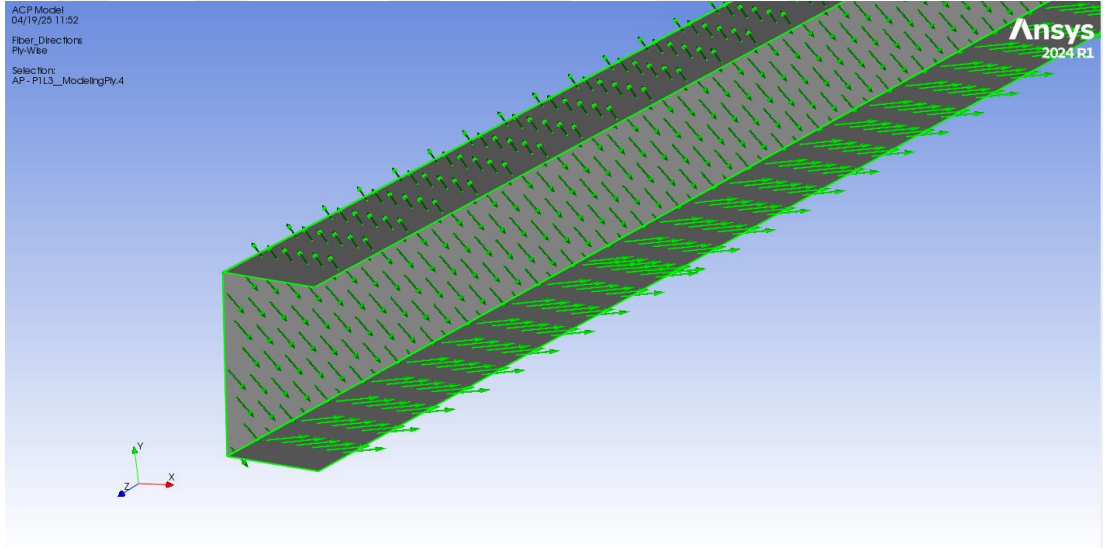
Şekil 6.56 Kutu profil -45° fiber yönelimi



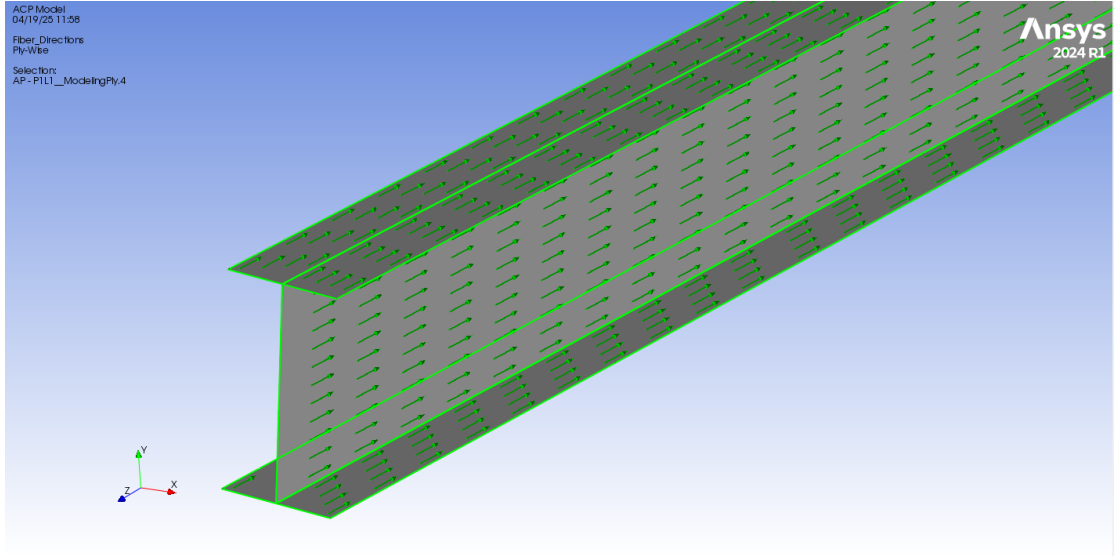
Şekil 6.57 C profil 0° fiber yönelimi



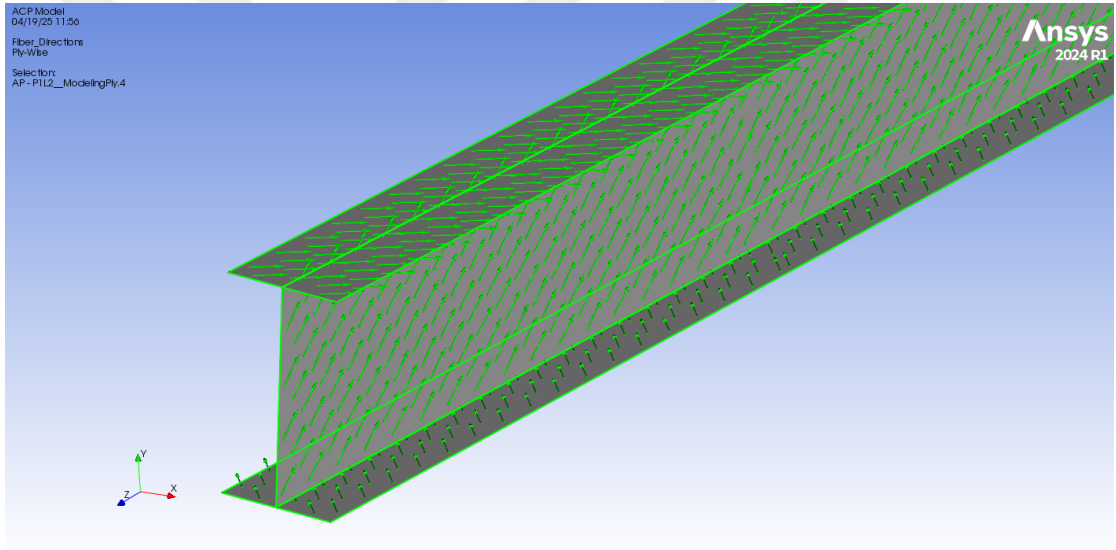
Şekil 6.58 C profil 45° fiber yönelimi



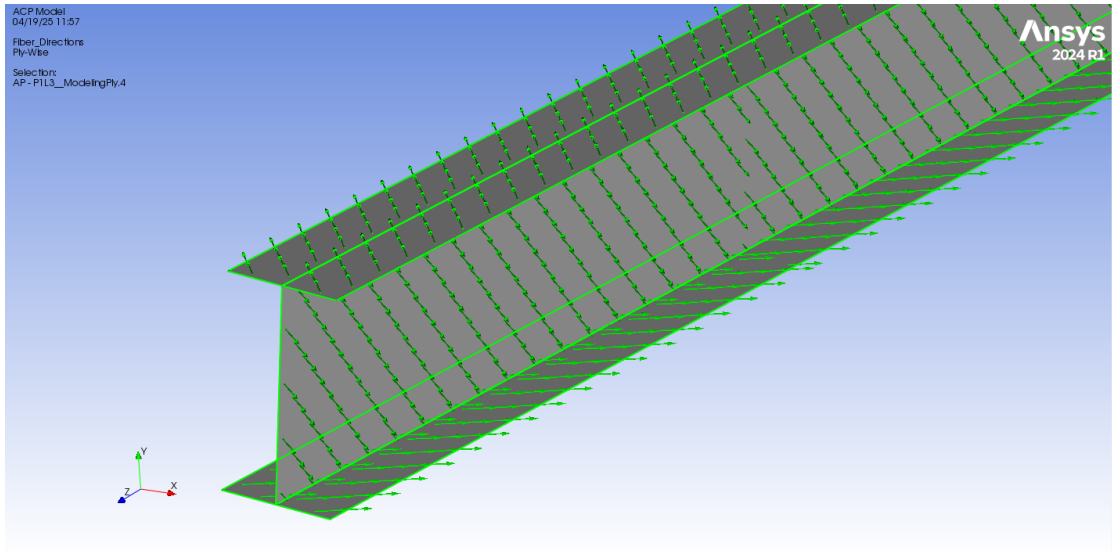
Şekil 6.59 C profil -45° fiber yönelimi



Şekil 6.60 I profil 0° fiber yönelimi



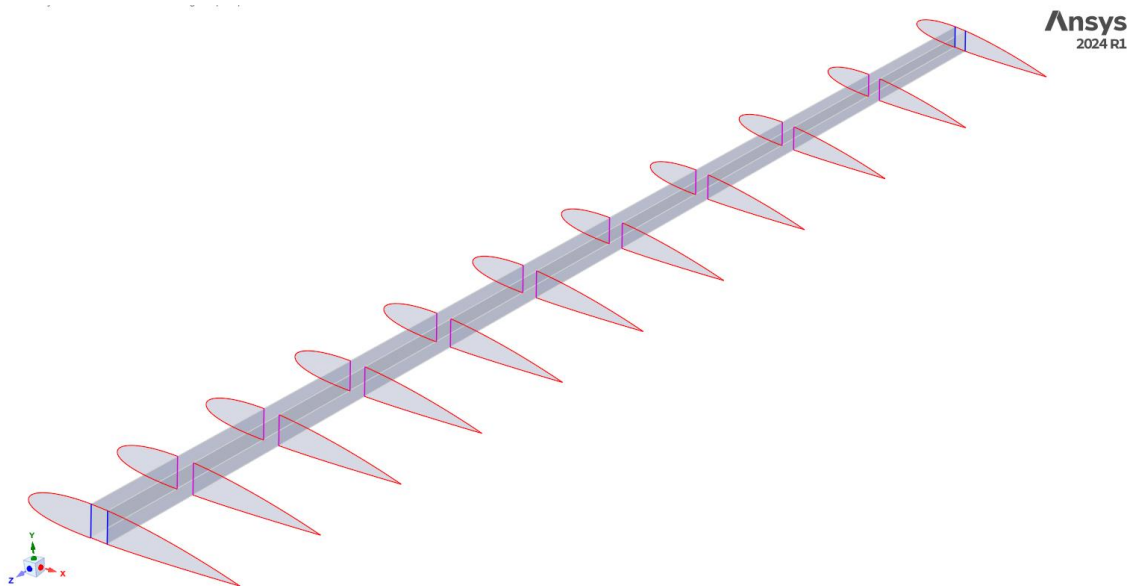
Şekil 6.61 I profil 45° fiber yönelimi



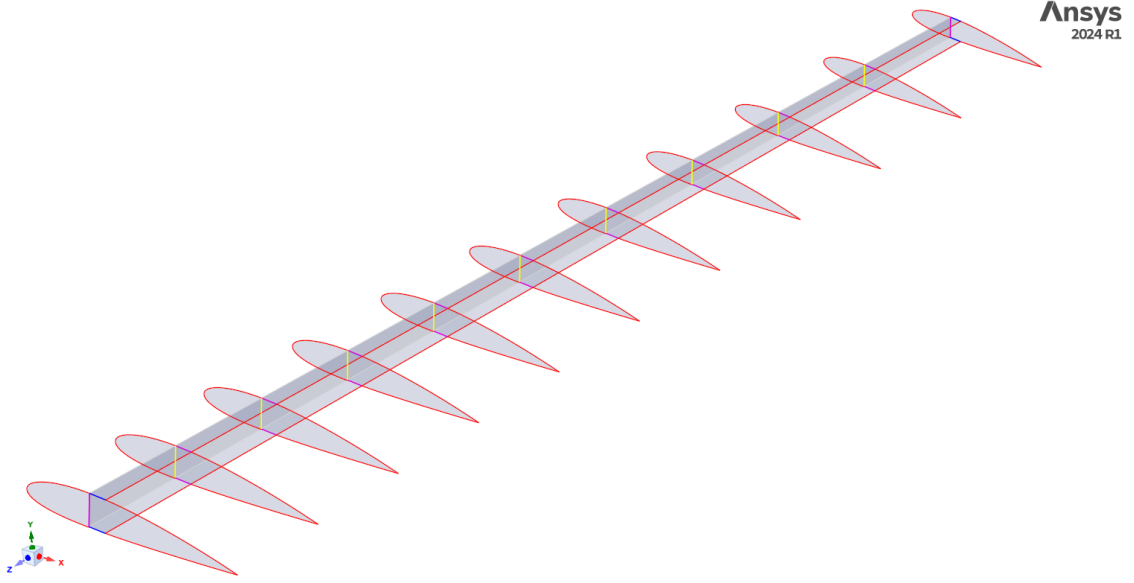
Şekil 6.62 I profil -45 ° fiber yönelimi

6.2.5. Bağlantılar

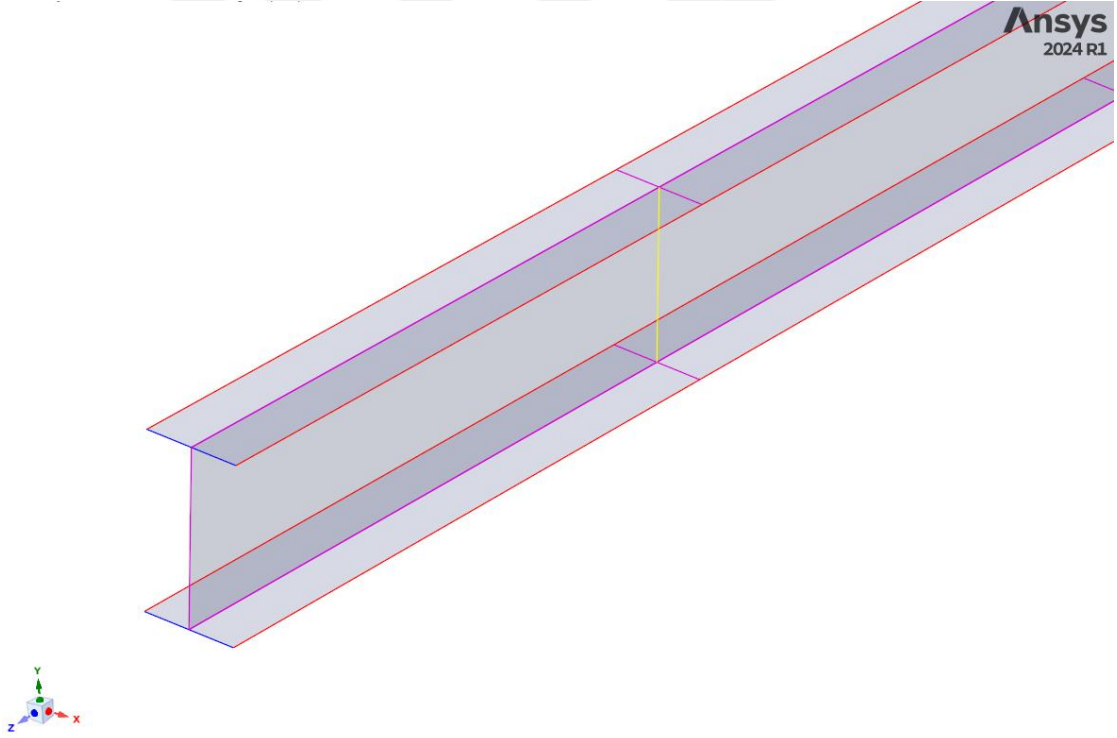
Kanat yapısal bileşenleri gerçek uygulamada yapıştırılarak birleştirildiği için analiz ortamında da katı bağlı olarak modellenmiştir. Kiriş ve kaburgalar arasında düğüm noktası paylaşımı yöntemi ile bağlantı sağlanmıştır. Bu yöntem ile çözüm ağı oluşturulurken iki bileşen arasında ortak bir çözüm ağı oluşturularak temas ettiği kenar veya yüzeylerdeki düğüm noktalarını paylaşmaları ve birbirleri ile katı bağlanmış gibi davranmaları sağlanır. Aynı yöntem ile I profil de üst-alt kiriş başlığı ve kiriş ağı olmak üzere katı bağlı 3 adet plaka şeklinde modellenmiştir. Paylaşımlı olarak modellenen kanat bileşenleri Şekil 6.63, Şekil 6.64, Şekil 6.65 ve Şekil 6.66’da gösterilmektedir.



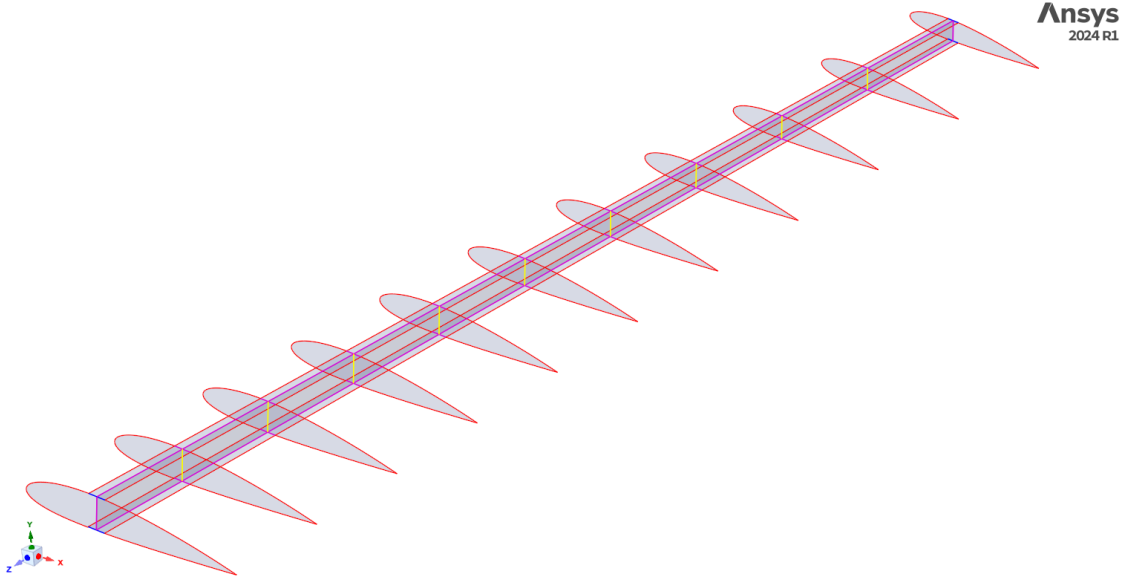
Şekil 6.63 Kutu profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi



Şekil 6.64 C profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi



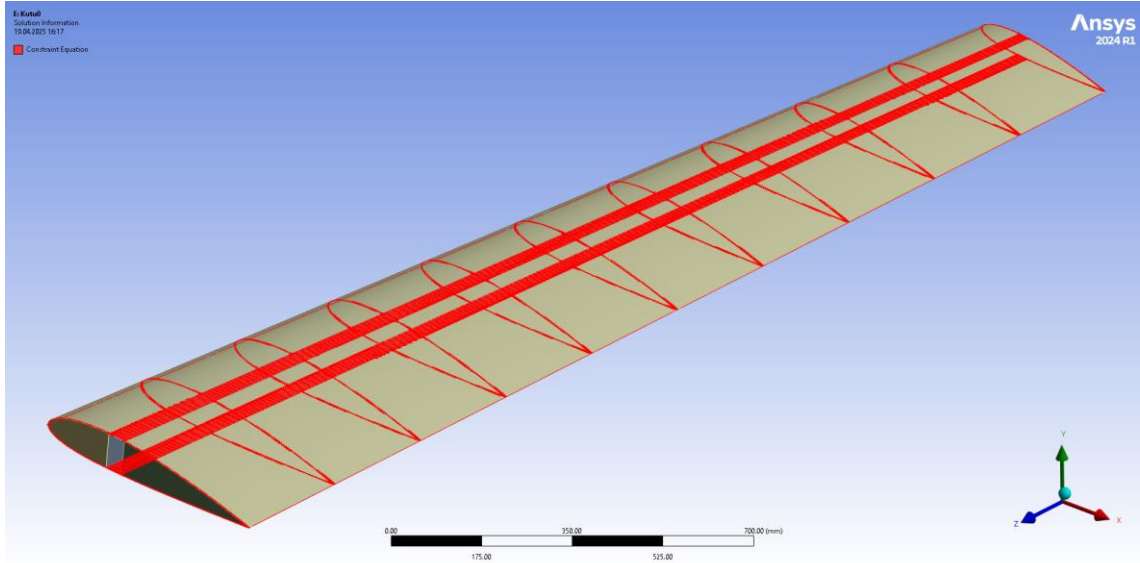
Şekil 6.65 I profil kiriş başlıkları ve kiriş ağı arasında paylaşılan kenarların gösterimi



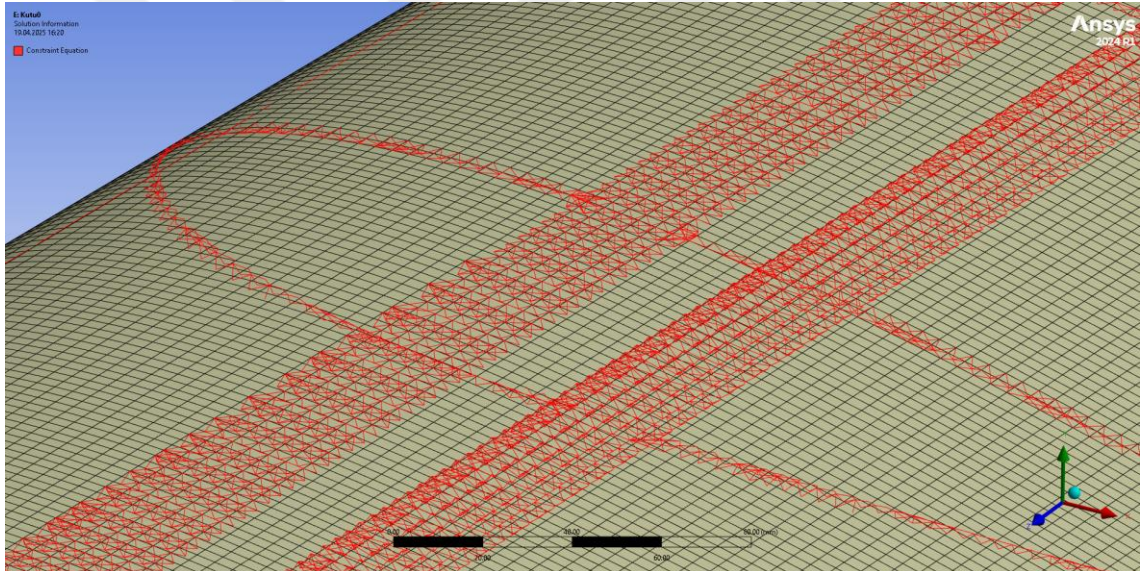
Şekil 6.66 I profil kiriş ve kaburgalar arasında paylaşılan kenarların gösterimi

Bu gösterimlerde kırmızı renkli kenarlar serbest ve paylaşılmayan kenarları temsil ederken, mavi renkli olanlar 2 yüzey arasında, pembe renkli kenarlar 3 yüzey ve sarı renkliler ise 3'ten fazla yüzey arasında paylaşılan kenarlar olduğunu belirtmektedir. Kabuklar ve kanat yapısal elemanları arasında da yapıştırma ile birleşim olduğu için katı bağlantı yapılmıştır.

Kabuğun dış yüzeyi alınarak kompozit modellemesi yapıldığı için kanat yapısal bileşenleri ve alt-üst kabuk arasında kabukların et kalınlıkları kadar boşluk bulunmaktadır. Bu yüzden MPC (Multi Point Constraint) (Çok Noktalı Bağlama) elemanları ile bu bileşenler birbirine katı bağlanmıştır. MPC yöntemi, iki bileşenin temas ettiği yüzey veya kenarlarındaki düğüm noktalarının sonsuz rijitlikte çubuk elemanlar ile birbirlerine bağlanmaları şeklinde çalışır. Bahsi geçen MPC elemanları kutu profilli konfigürasyon için Şekil 6.67 ve Şekil 6.68'de gösterilmiştir. Diğer 2 konfigürasyonda da benzer bağlantılar bulunmaktadır.



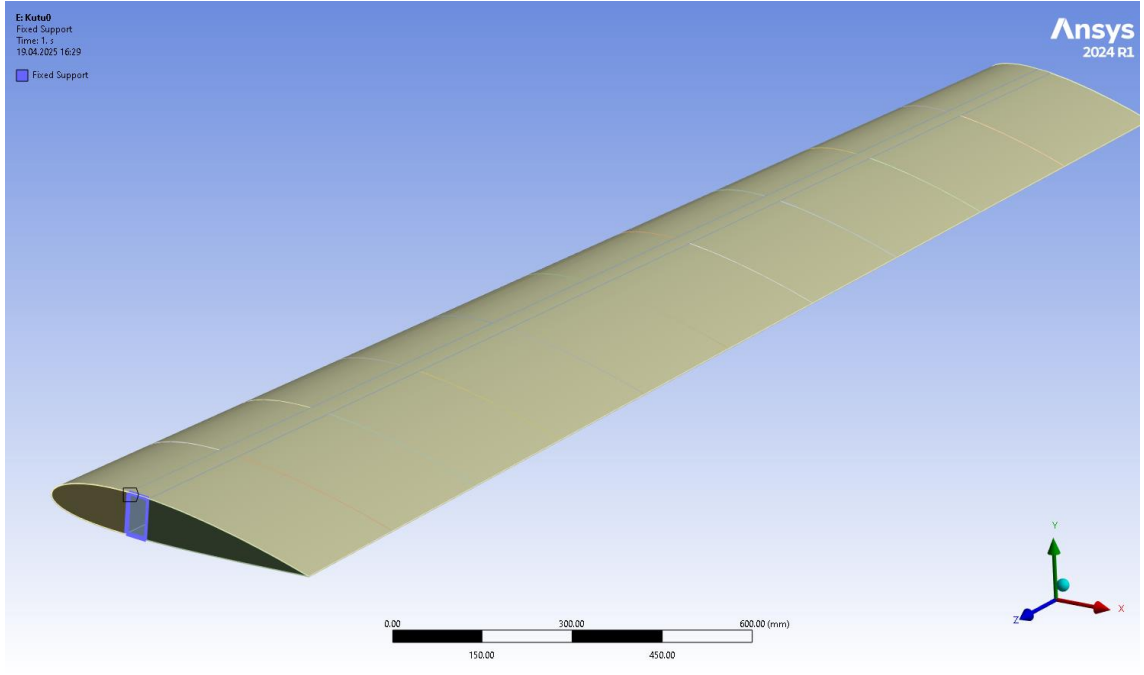
Şekil 6.67 Kanat MPC bağlantıları



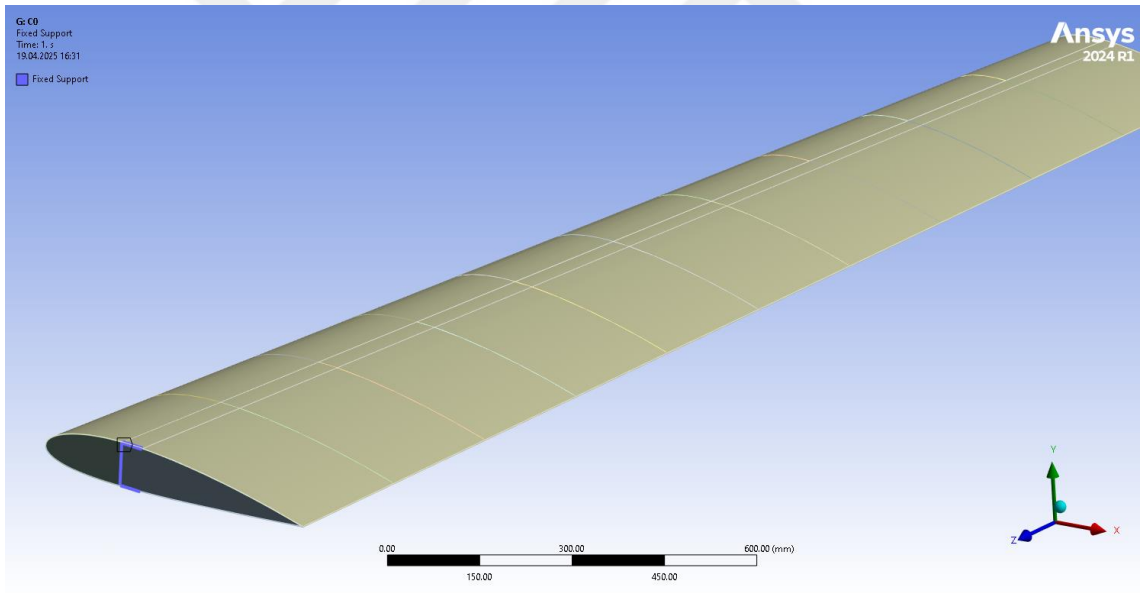
Şekil 6.68 MPC bağlantıların detay görünümü

6.2.6. Sınır şartları

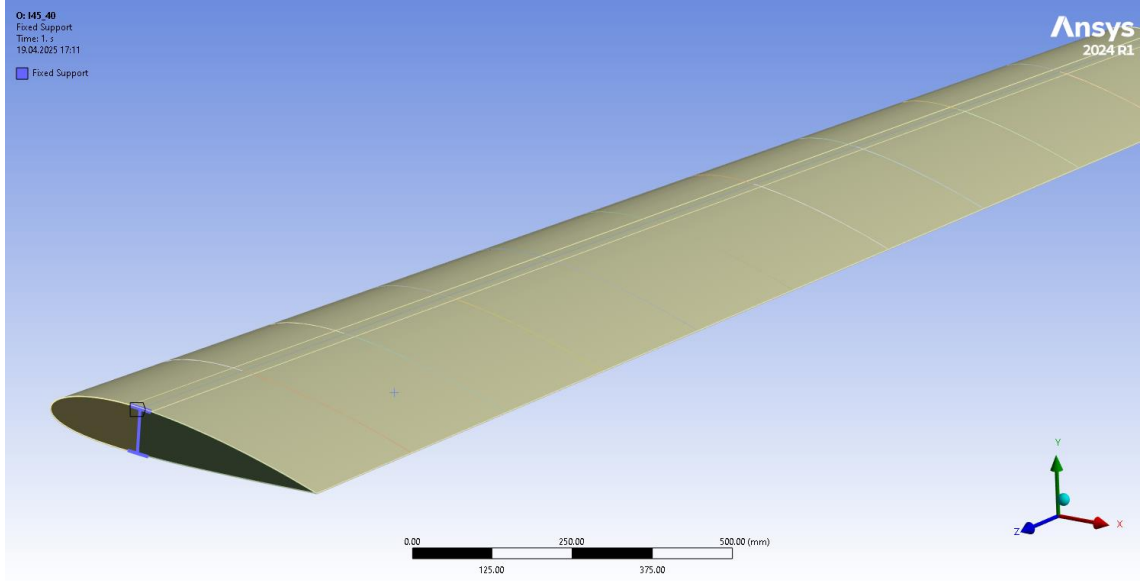
Sınır şartları olarak kanat kirişlerin uç noktalarından 6 serbestlik derecesinde sabitlenerek HAD analizleri sonucunda elde edilen basınç yükleri alt ve üst kabuk yüzeylerine uygulanmıştır. Kanatların sabitlendiği geometriler Şekil 6.69, Şekil 6.70 ve Şekil 6.71’de mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 6.69 Kutu profil kanat sabitleme noktası



Şekil 6.70 C profil kanat sabitleme noktası



Şekil 6.71 I profil kanat sabitleme noktası

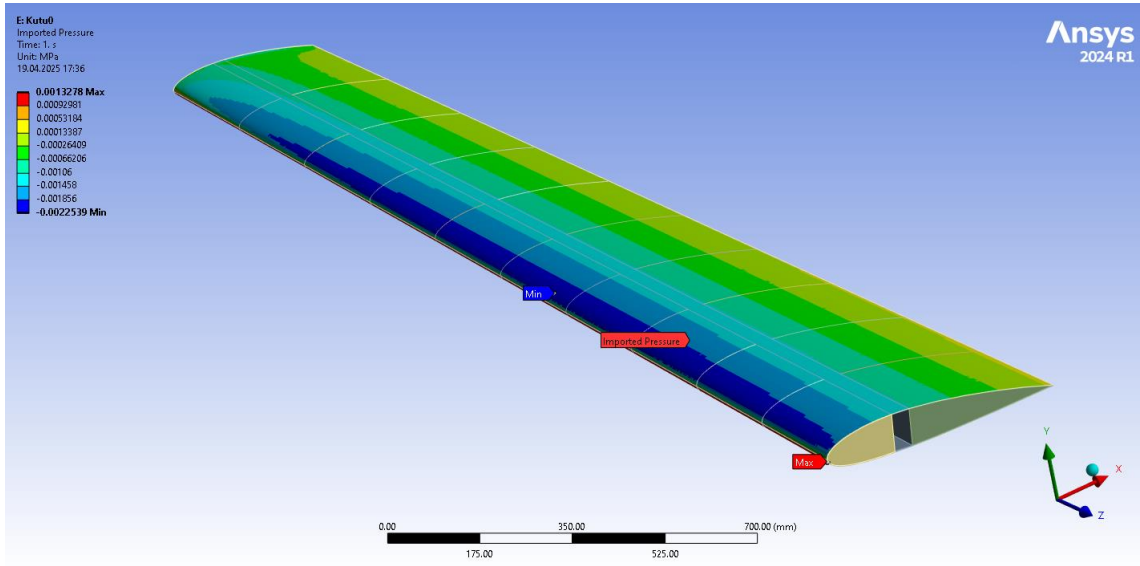
Sabitleme işlemi bittikten sonra HAD analizlerinden elde edilen basınç yükleri alt ve üst kabuk üzerinden sisteme uygulanmıştır. HAD analizlerinden elde edilen basınç yükleri 1G altında elde edilmiş değerlerdir. Manevra esnasında emniyeti sağlamak için bu değerlerin bir yük çarpanı ile çarpılarak uygulanması gerekir. Yük çarpanını belirlemek için “*STANAG 4671 UNMANNED AERIAL VEHICLES SYSTEMS AIRWORTHINESS REQUIREMENTS*” dokümanından faydalanılmıştır. Dokümanın 337. Maddesine göre; “Pozitif yönde minimum manevra yük çarpanı $[2,1 + 10900/(W+4536)]$ ve 3,8 değerinden minimum olanı olarak alınır.” Şeklinde belirtilmektedir. Burada W kg cinsinden hava aracının maksimum kalkış ağırlığı olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada referans alınan hava aracının maksimum kalkış ağırlığına göre bu değeri hesaplırsak aşağıdaki değeri buluruz;

$$n = 2,1 + \frac{10900}{55 + 4536} = 4,47 \quad (6.12)$$

4,47 > 3,8 olduğu için ise yük çarpanı olarak 3,8 kabul edilmiştir. Bu durumda basınç yükleri modele dahil edilirken 3,8 kat ölçeklendirilerek uygulanmıştır. Basınç yükünün ölçek ayarları ve konturları Şekil 6.72 ve Şekil 6.73’te verilmiştir.

Data View					
Imported Pressure					
	Source Time (s)	Source Time Step	Analysis Time (s)	Scale	Offset (MPa)
1	0.	-1.	1	3.8	0
*					

Şekil 6.72 Basınç yükü ölçeği



Şekil 6.73 Basınç yükü konturları

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapısal analiz sonuçları değerlendirilmiş, I,C ve kutu profili kirişlerin farklı serim açılarındaki deformasyon ve IRF (Inverse reserve factor) (ters güvenlik faktörü) değerleri karşılaştırılmıştır. IRF değeri, emniyet katsayısının tersi gibi düşünülebilir. 0'a yaklaştıkça yapı güvenli anlamına gelirken $IRF \geq 1$ olması durumunda kompozit yapı hasar görüyor demektir. Deformasyon miktarları, kirişin uzunluğuna oranla %5' in altında kaldığı için, büyük şekil değiştirmelere bağlı sapmalar ve burkulma gibi doğrusal olmayan davranışlar ihmal edilmiştir. Analizler statik doğrusal olarak koşturulmuştur.

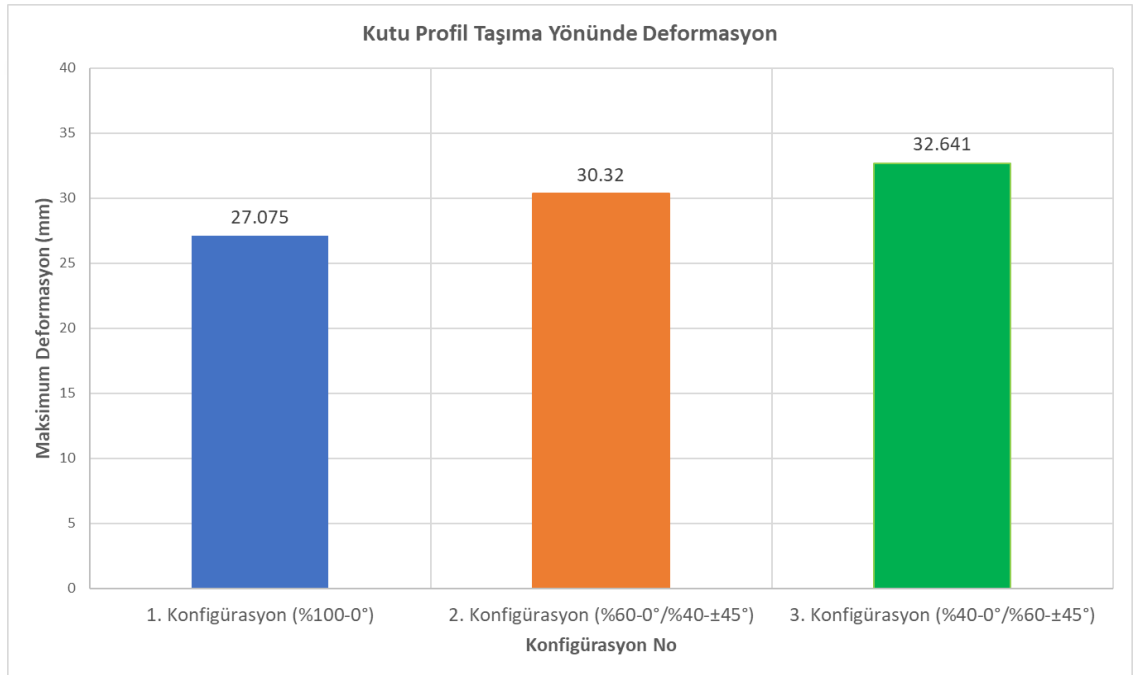
Öncelikle profillerin kendi içerisinde farklı serim açıları, daha sonra da aynı serim açılarında profil kesitleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Bulunan değerler grafikler aracılığıyla görselleştirilerek sunulmuştur. Beklenildiği üzere maksimum deformasyonlar kirişin uç bölgesinde oluşurken, maksimum IRF değerleri kanadın hava aracına bağlandığı kök kısımlarında okunmuştur. Kiriş profillerindeki genel trend, $\pm 45^\circ$ fiber serimlerinin kullanıldığı kirişlerde açılı katmanların yüzdesinin artması ile kiriş üzerindeki deformasyonun arttığı yönünde olmuştur. IRF değerleri karşılaştırıldığında ise $\pm 45^\circ$ katmanlarda değerlerin düştüğü ve hasar oluşma risklerinin azaldığı görülmüştür. $\pm 45^\circ$ ile serilen katmanların kayma gerilmelerini daha düzenli şekilde aktardığı ve kayma gerilmeleri karşısında daha iyi performans sergiledikleri bilinmektedir. Özellikle dış katmanlara yakın bölgelerde kullanılan $\pm 45^\circ$ katmanlarda IRF değerlerindeki düşüşler bu sebebe bağlanmaktadır. Diğer yandan, $\pm 45^\circ$ katmanların sayısı arttıkça 0° katmanlar üzerindeki IRF değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi de, $\pm 45^\circ$ katmanların kullanımıyla deformasyonların eğilme yönünde artmasından dolayı katmanlar üzerindeki normal gerilmelerin artışıdır. Tüm konfigürasyonlar için IRF değerleri katman bazında değerlendirilerek maksimum değerlerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Deformasyon ve IRF dağılımları EKLER başlığı altında verilmiştir.

7.1. Kutu Profil Yapısal Analiz Sonuçları

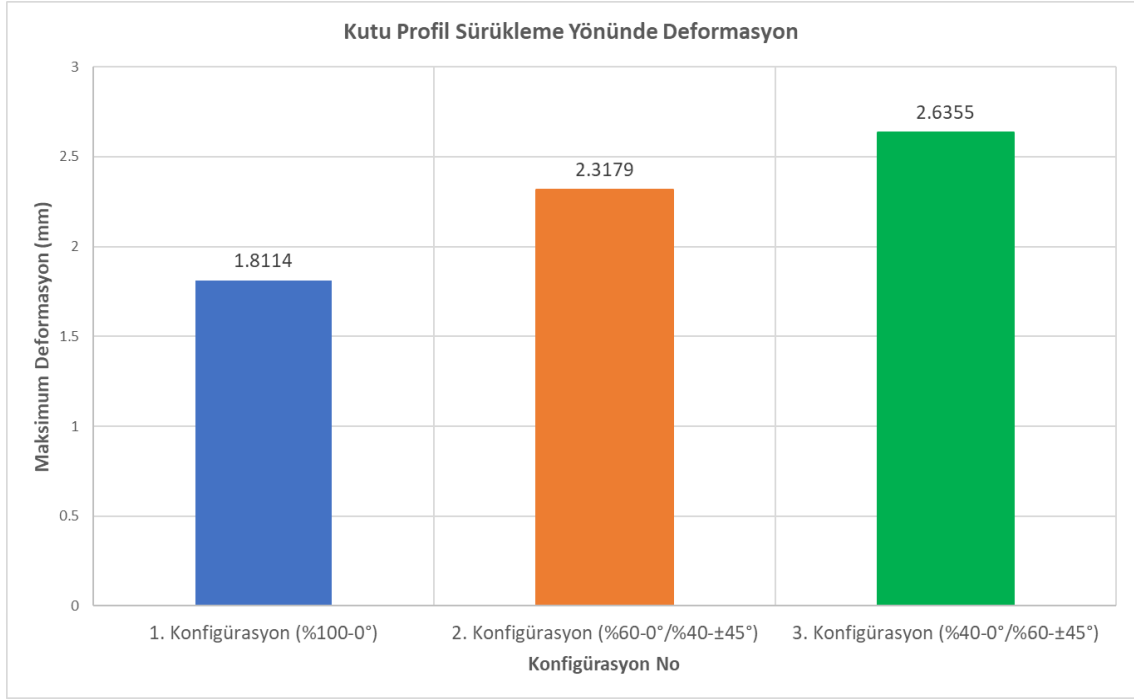
Tablo 6.13'te verilen 1,2 ve 3. konfigürasyon için öncelikle taşıma ve sürüklenme yönündeki deformasyonlar değerlendirilmiştir.

Bulunan sonuçlarda, $\pm 45^\circ$ katmanların artışıyla taşıma ve sürüklenme yönündeki deformasyonlarda artış gözlemlenmiştir Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de $\pm 45^\circ$ katmanların tüm katmanlara yüzdesel oranıyla deformasyon miktarları taşıma ve sürüklenme yönlerinde ilişkilendirilmiştir. Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'deki grafiklerde de görüldüğü üzere, tamamen

0° fiberlerden oluşan 1. Konfigürasyondan, %40 oranında $\pm 45^\circ$, %60 oranında 0° fiber içeren 2. Konfigürasyona geçildiğinde deformasyon taşıma yönünde 27,075 mm'den 30,32 mm'ye yükselerek %12, sürüklenme yönünde 1,8114 mm'den 2,3179 mm'ye yükselerek %28 artmış, 2. Konfigürasyondan %60 oranında $\pm 45^\circ$, %40 oranında 0° fiber içeren 3. Konfigürasyona geçildiğinde ise taşıma yönünde 32,641 mm deformasyon yaparak deformasyon miktarında %7,65 ; sürüklenme yönünde ise 2,6355 mm deformasyon yaparak %13,7 artmaktadır. Tablo 6.13'ten konfigürasyonlardaki $\pm 45^\circ$ katmanların yüzdesel oranlarına bakılırsa açılı katmanların artışıyla deformasyonun lineere yakın bir artış gösterdiği görülmektedir.

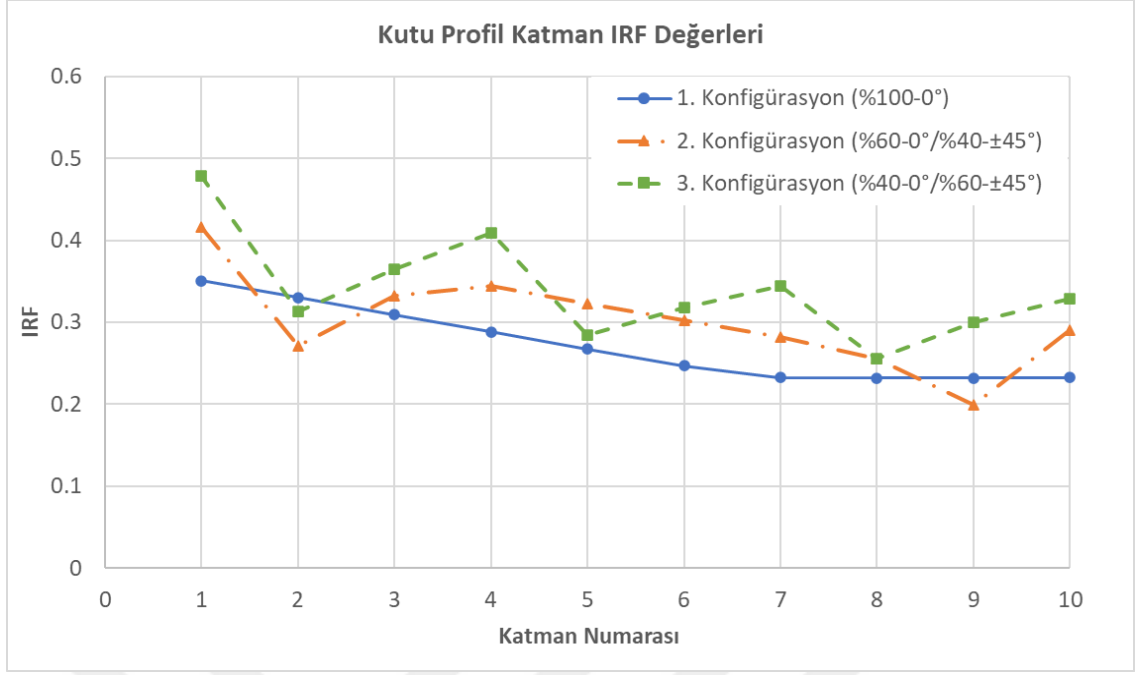


Şekil 7.1 Kutu profil konfigürasyonlara göre taşıma yönünde deformasyon değişimi



Şekil 7.2 Kutu profil konfigürasyonlara göre sürüklenme yönünde deformasyon değişimi

Katman bazında IRF değerleri incelendiğinde maksimum değerlerin ilk katmanlarda olduğu ve $\pm 45^\circ$ katmanlarda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. $+45^\circ$ katmanlarda daha düşük IRF değerleri okunurken, -45° katmanlarda görece daha yüksek okunmuştur. Tamamen 0° kullanılan 1. Konfigürasyonda IRF değerleri daha düzenli bir şekilde dağıldığı, %40'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 2. Konfigürasyon ve %60'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 3. Konfigürasyonlarda ise 0° katmanlarda maksimum IRF değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Minimum IRF değerleri 2. Konfigürasyonun 2 ve 9. Katmanında okunmuştur. Bu katmanlar $+45^\circ$ fiber içeren katmanlardır. 1,2 ve 3. Konfigürasyonun karşılaştırması Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3 Kutu profil maksimum IRF değerlerinin değişimi

Kutu profil için katman bazında maksimum IRF değerleri 1,2 ve 3. konfigürasyonlar için Tablo 7.1’de verilmiştir.

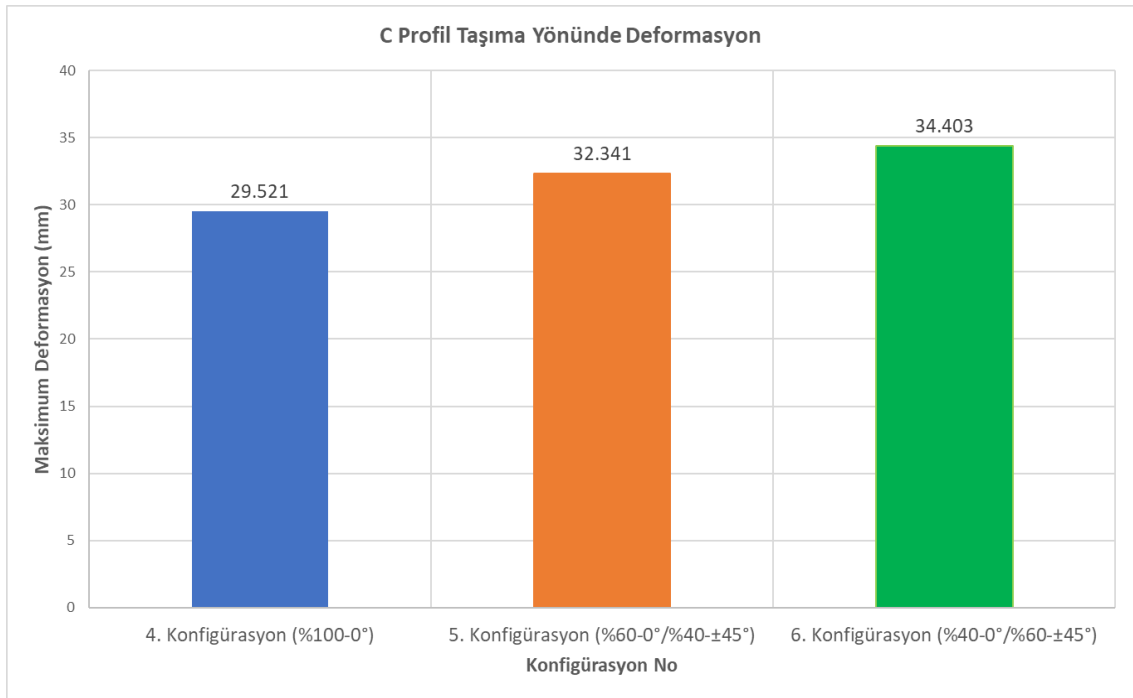
Tablo 7.1 Kutu profil maksimum IRF değerleri

Katman No.	Konfigürasyon		
	1 (%100/0°)	2 (%40/±45°)	2 (%60/±45°)
1	0.35089	0.41631	0.47843
2	0.33	0.27079	0.31351
3	0.30915	0.33288	0.3645
4	0.28834	0.34374	0.40964
5	0.26758	0.32294	0.28382
6	0.24689	0.30222	0.31768
7	0.23247	0.28162	0.34381
8	0.23224	0.2551	0.25556
9	0.23221	0.19881	0.29972
10	0.23242	0.28998	0.3284

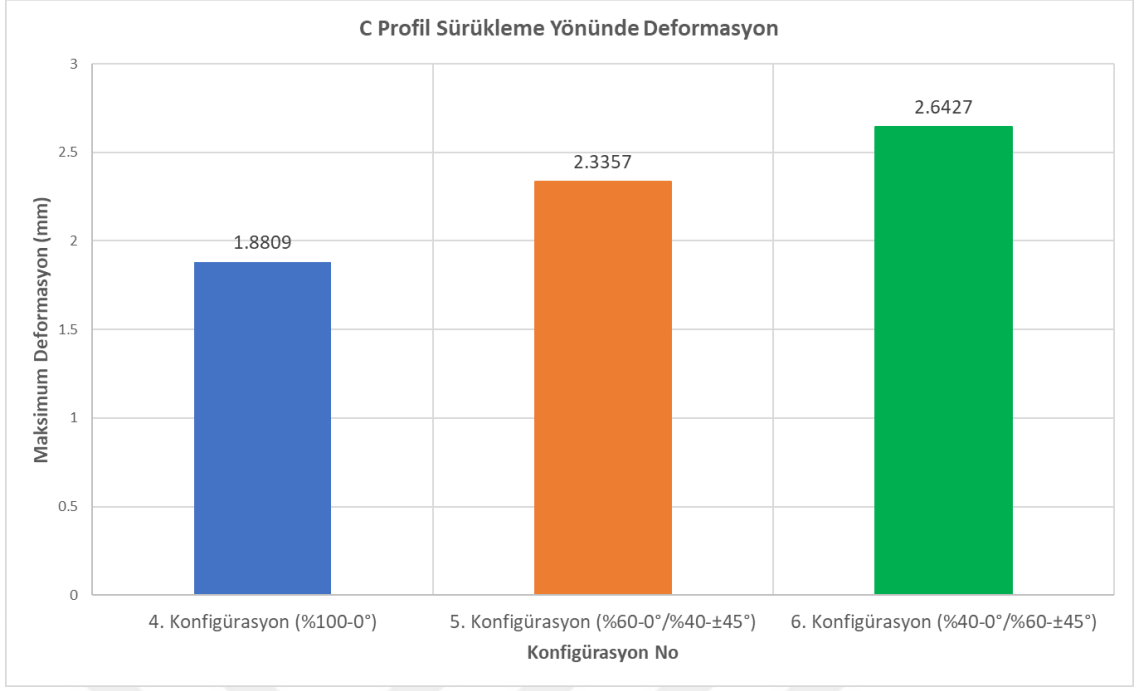
7.2. C Profil Yapısal Analiz Sonuçları

C profilli kirişte de kutu profil ile benzer davranışlar gözlemlenmiştir. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’te Tablo 6.13’ten 4,5 ve 6. konfigürasyonlarda $\pm 45^\circ$ katmanların tüm katmanlara yüzdesel oranıyla deformasyon miktarları taşıma ve sürüklenme yönlerinde

ilişkilendirilmiştir. Çıkan sonuçlarda tamamen 0° fiberlerden oluşan 1. Konfigürasyondan, , %40 oranında $\pm 45^\circ$, %60 oranında 0° fiber içeren 2. Konfigürasyona geçildiğinde deformasyon taşıma yönünde 29,521 mm'den 32,341 mm'ye yükselerek %9,55 ve sürüklenme yönünde 1,8809 mm'den 2,3357 mm'ye yükselerek %24,2 artış göstermiş, 2. Konfigürasyondan %60 oranında $\pm 45^\circ$, %40 oranında 0° fiber içeren 3. Konfigürasyona geçerken ise taşıma yönünde %6,375 artışla 34,403 mm'ye ve sürüklenme yönünde %13,14 artışla 2,6427 mm'ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

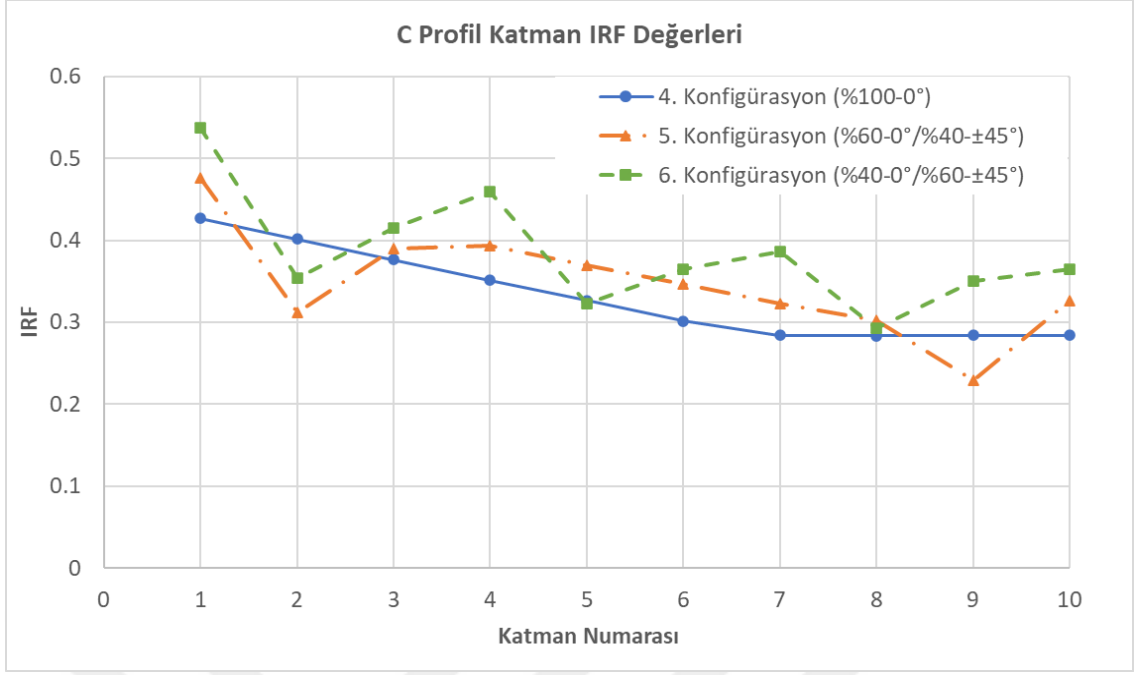


Şekil 7.4 C profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile taşıma yönünde deformasyon değişimi



Şekil 7.5 C profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile sürüklenme yönünde deformasyon değişimi

C profil katmanlarının maksimum IRF değerleri karşılaştırıldığında, kutu profile benzer bir eğilim görülse de değerler farklıdır. Tamamı 0° fiberlerden oluşan 4. Konfigürasyonda düzenli bir dağılım gözlemlenirken 40° 'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 5. konfigürasyon ve 60° 'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 6. Konfigürasyonlarda $+45^\circ$ fiberlerin kullanıldığı katmanlarda ani düşüşler görülmüştür. Bunun yanında 5. ve 6. Konfigürasyonda 0° fiberlerde kutu profilde olduğu gibi artış gözlemlenmiştir. Minimum IRF değerleri 5. Konfigürasyonun 2 ve 9. Katmanlarında $+45^\circ$ fiberlerde gözlemlenmiştir. 5. Konfigürasyon, 6. Konfigürasyona oranla daha düzenli bir davranış göstermiştir. Maksimum IRF değerlerinin $\pm 45^\circ$ fiber miktarına göre değişimi Şekil 7.6'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.6 C profil maksimum IRF değerlerinin değişimi

C profil için katman bazında maksimum IRF değerleri 4,5 ve 6. Konfigürasyon için Tablo 7.2’de verilmektedir.

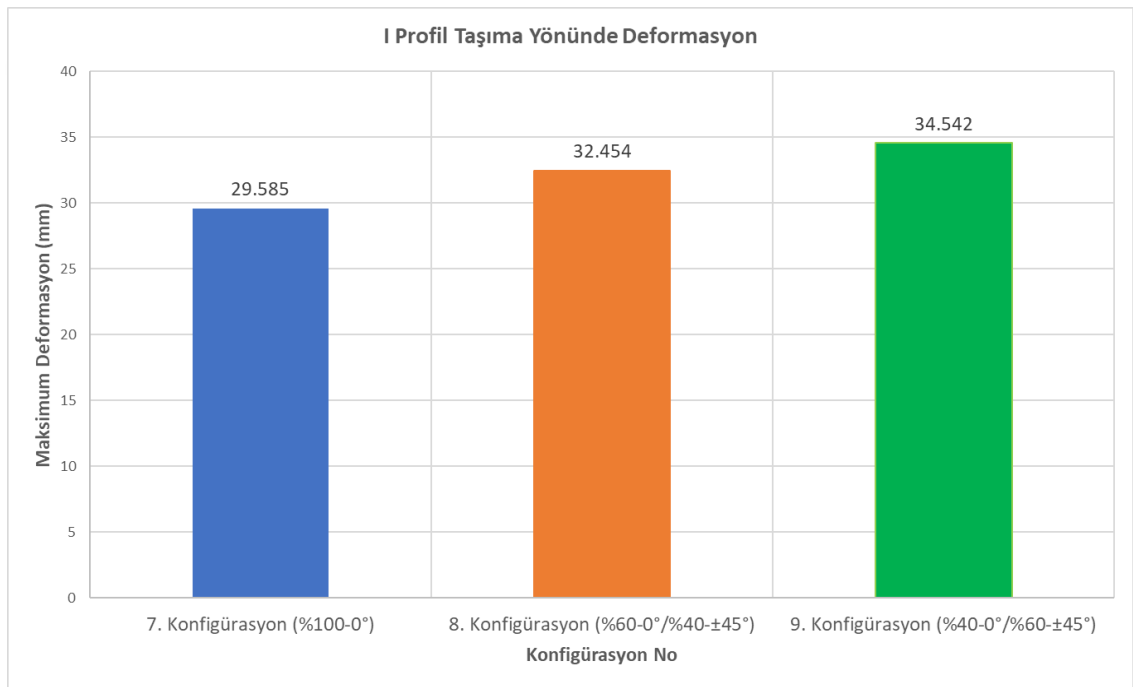
Tablo 7.2 C profil maksimum IRF değerleri

Katman No.	Konfigürasyon		
	4 (%100/0°)	5 (%40/+45°)	6 (%60/+45°)
1	0.42665	0.47627	0.53691
2	0.40155	0.31237	0.35339
3	0.37648	0.38947	0.41452
4	0.35146	0.39375	0.45968
5	0.32651	0.37009	0.32223
6	0.30162	0.34656	0.36519
7	0.284002	0.32315	0.38655
8	0.28378	0.30287	0.29309
9	0.28389	0.22897	0.34984
10	0.28417	0.32667	0.36414

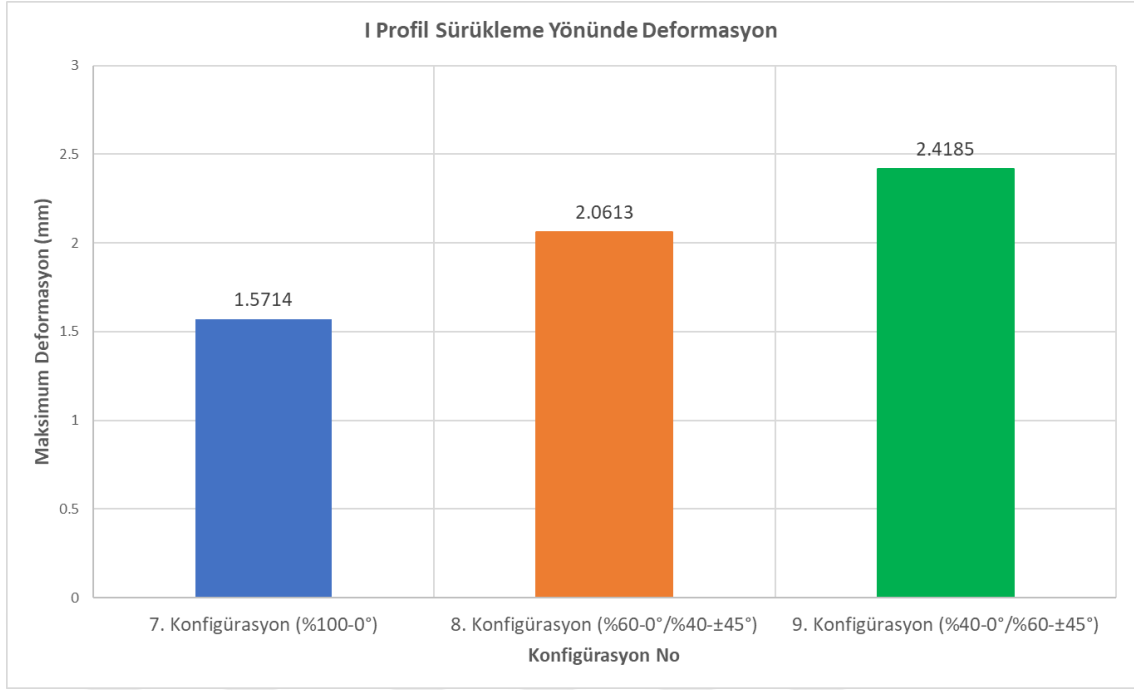
7.3. I Profil Yapısal Analiz Sonuçları

I profil üzerindeki deformasyonlar incelenmiş, kutu ve C profile benzer sonuçlar bulunmuştur. $\pm 45^\circ$ katmanların sayısının artması ile taşıma ve sürükleme yönündeki deformasyonlar artmaktadır. Fakat artış yüzdeleri değişmektedir. Tablo 6.13’te gösterilen %100’ü 0° fiberlerden oluşan 7. Konfigürasyondan %40 oranında $\pm 45^\circ$, %60 oranında 0°

fiber içeren 8. Konfigürasyona geçerken taşıma yönünde deformasyon 29,585 mm'den 32,454 mm'ye yükselerek %9,7 artarken sürüklenme yönünde 1,5714 mm'den 2,0613 mm'ye yükselerek %31,176 artmaktadır. 8. Konfigürasyondan %60 oranında $\pm 45^\circ$, %40 oranında 0° fiber içeren 9. Konfigürasyona geçerken ise taşıma yönünde deformasyon 34,542 mm'ye ulaşarak %6,43 artarken sürüklenme yönünde %17,3 artarak 2,4185 mm'ye ulaşmaktadır. Özellikle sürüklenme yönündeki artışların diğer profillere göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. I profil için $\pm 45^\circ$ katmanların tüm katmanlara oranı ile taşıma ve sürüklenme yönündeki deformasyonların değişim grafiği Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de gösterilmiştir.

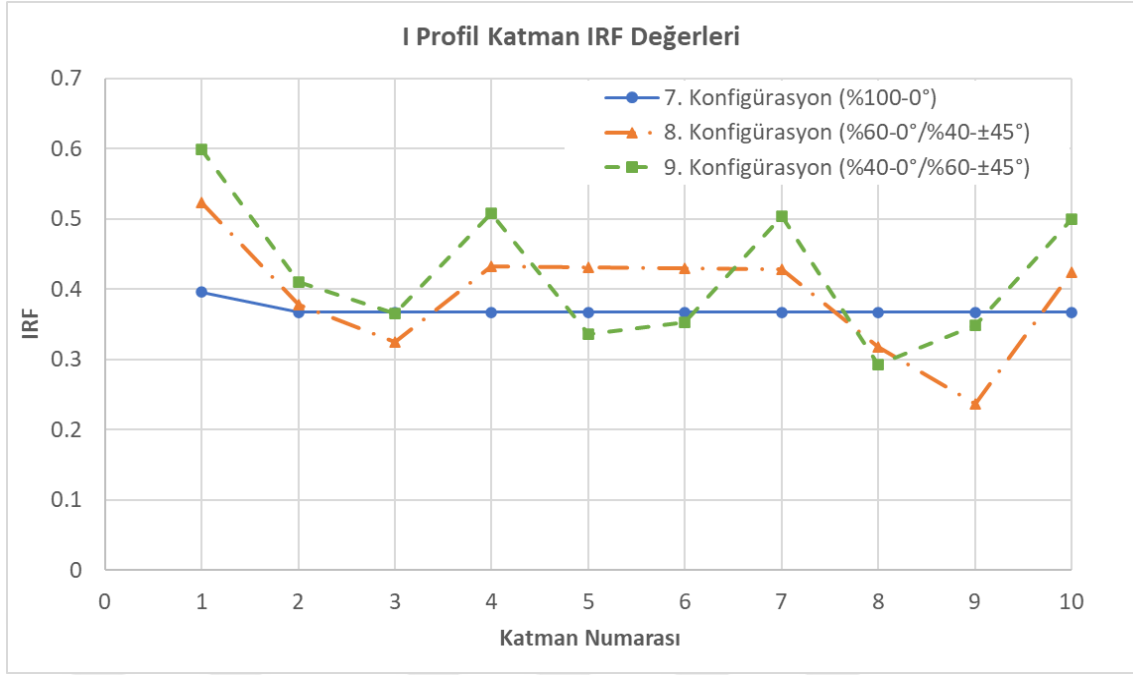


Şekil 7.7 I profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile taşıma yönünde deformasyon değişimi



Şekil 7.8 I profil $\pm 45^\circ$ fiber yüzdesi ile sürüklenme yönünde deformasyon değişimi

I profil özelinde IRF değerleri incelendiğinde, tamamı 0° fiberlerden oluşan 7. konfigürasyonda ilk katman sonrası oldukça düzenli bir dağılım olduğu gözlemlenmiştir. 40% 'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 8. konfigürasyon ve 60% 'ı $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluşan 9. konfigürasyonlarda ise dalgalanmalar görülmektedir. 8. Konfigürasyonda minimum IRF değerleri 3. ve 9. Katmanlarda okunmuştur. 9. Konfigürasyonda profiller arasında ilk kez 5. ve 6. Katmanlardaki $\pm 45^\circ$ fiberler üzerindeki IRF değerleri tamamen 0° olan 7. Konfigürasyonun altında kalmıştır. Karşılaştırma grafiği Şekil 7.9'da verilmektedir.



Şekil 7.9 I profil maksimum IRF değerlerinin değişimi

I profil için katman bazında maksimum IRF değerleri 7,8 ve 9. konfigürasyonlar için Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.3 I profil maksimum IRF değerleri

Katman No.	Konfigürasyon		
	7 (%100/0°)	8 (%40/+45°)	9 (%60/+45°)
1	0.39586	0.52311	0.59924
2	0.36708	0.37781	0.41074
3	0.36704	0.32525	0.36573
4	0.36701	0.43293	0.50862
5	0.367	0.43141	0.33551
6	0.36699	0.42989	0.35315
7	0.36699	0.42837	0.50378
8	0.36701	0.31732	0.29327
9	0.36704	0.23618	0.34902
10	0.36707	0.42383	0.49898

Fiber oryantasyonlarının karşılaştırılması sonucunda tüm profil kesitlerinde $\pm 45^\circ$ fiber kullanımında IRF değerlerinin düştüğü fakat 0° ile serilen katmanlarda da arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, 0° fiberlerin normal gerilmeleri taşıırken $\pm 45^\circ$ fiberlerin kayma gerilmelerini taşımasıdır. $\pm 45^\circ$ fiberlerin kullanımıyla kiriş üzerindeki kayma gerilmelerinin yanı sıra, eğilmenin etkisi ile gelen eksenel normal gerilmelerin bir kısmı

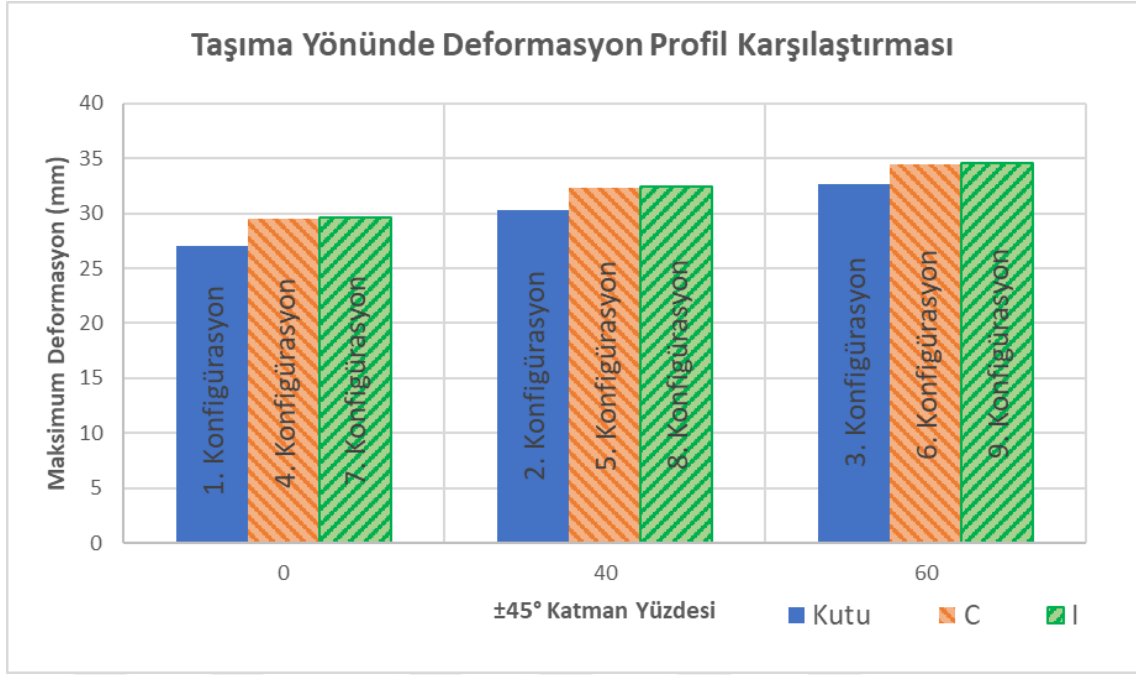
da kompozitlerde gerilme dönüşümünden dolayı açılı fiberlere kayma gerilmesi olarak etki etmektedir. Dolayısıyla açılı katmanlarda kayma gerilmeleri yükselirken normal gerilmelerde düşüş görülmektedir. $\pm 45^\circ$ fiberlerin kayma gerilmelerini taşıma kapasitelerinin daha yüksek olmasından dolayı IRF değerleri bu katmanlarda düşüş göstermektedir. $\pm 45^\circ$ fiberlerin kullanımı durumunda 0° katmanlarda IRF değerlerinin artışı ise açılı fiberlerin normal gerilmeleri taşıma kapasitesinin düşük olmasına bağlı olarak yapının eğilme rijitliğinin azalması sonucunda deformasyonların artması ile ilişkilendirilmiştir.

Statik durumda $\pm 45^\circ$ açılı fiberlerin kullanımında deformasyonların ve 0° fiberlerdeki IRF değerlerinin artması sebebiyle gözle görülür bir avantaj elde edilmemiştir. IRF değerlerinin ve kayma gerilmelerinin maksimum olduğu ve ilk hasarın oluşmasının beklendiği dış katmanlarda $\pm 45^\circ$ fiberlerin kullanımı yapının hasara karşı göstereceği direnci arttırmak açısından mantıklı olabilir. Bunun dışında dinamik olarak değerlendirilen bir sistemde özellikle çırpınma (flutter) davranışı önemli ölçüde burulma rijitliğine bağlı olduğu için $\pm 45^\circ$ ile yönlendirilmiş fiberlerin kullanımı ile burulma rijitliğinin, dolayısıyla da çırpınma hızının artırılması göz önünde bulundurulmalıdır. $\pm 45^\circ$ yönelimli fiberlerin fazla kullanımında yapının eğilmeye karşı göstereceği direnç azaldığı ve deformasyonlar arttığı için açılı olarak kullanılacak katmanların sayısının optimum seviyede belirlenmesi önemlidir.

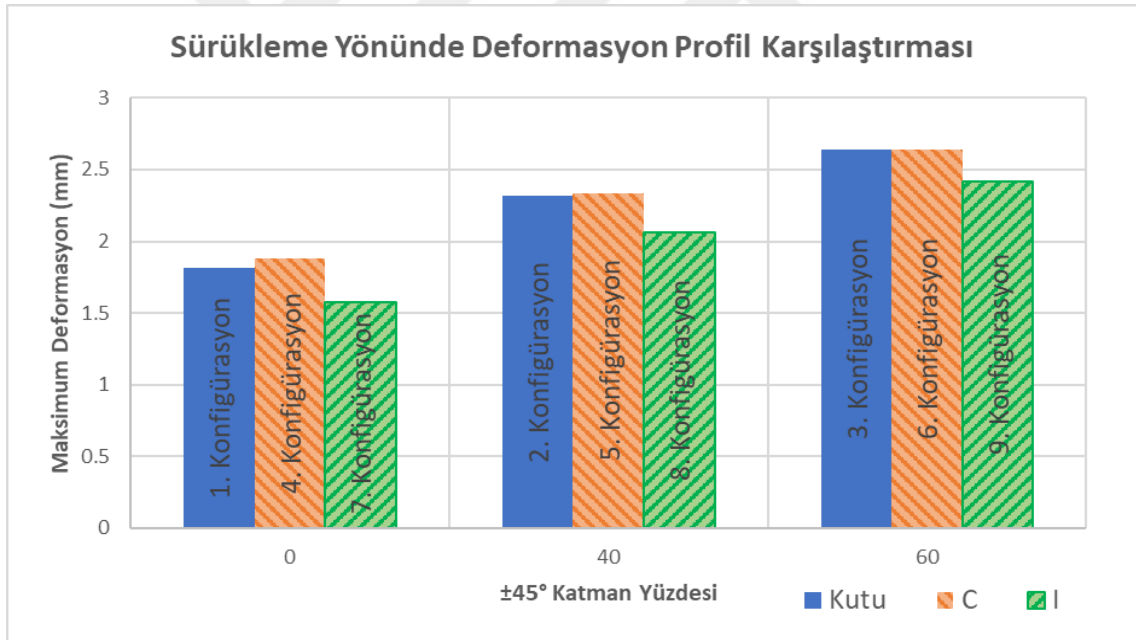
Sonuç olarak statik olarak karşılaştırılan oryantasyonlar arasında eğilme gerilmelerinin baskın olması sebebiyle, Tablo 6.10'da detayları belirtilen ve %100 oranında 0° ile yönlendirilmiş fiberlerden oluşan 1 numaralı oryantasyon uygundur.

7.4. Profillerin Karşılaştırılması

Profiller ilk aşamada taşıma ve sürükleme yönünde yaptıkları deformasyon ve ardından aynı serim açılarındaki maksimum IRF değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Daha sonra üretim kolaylığı ve ağırlıkları karşılaştırılarak nihai optimum kiriş konfigürasyonu belirlenmiştir. Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de I, C ve kutu profillerin taşıma ve sürükleme yönündeki deformasyonları karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.10 Profillerin taşıma yönündeki deformasyonlarının karşılaştırması



Şekil 7.11 Profillerin sürüklenme yönünde deformasyonlarının karşılaştırılması

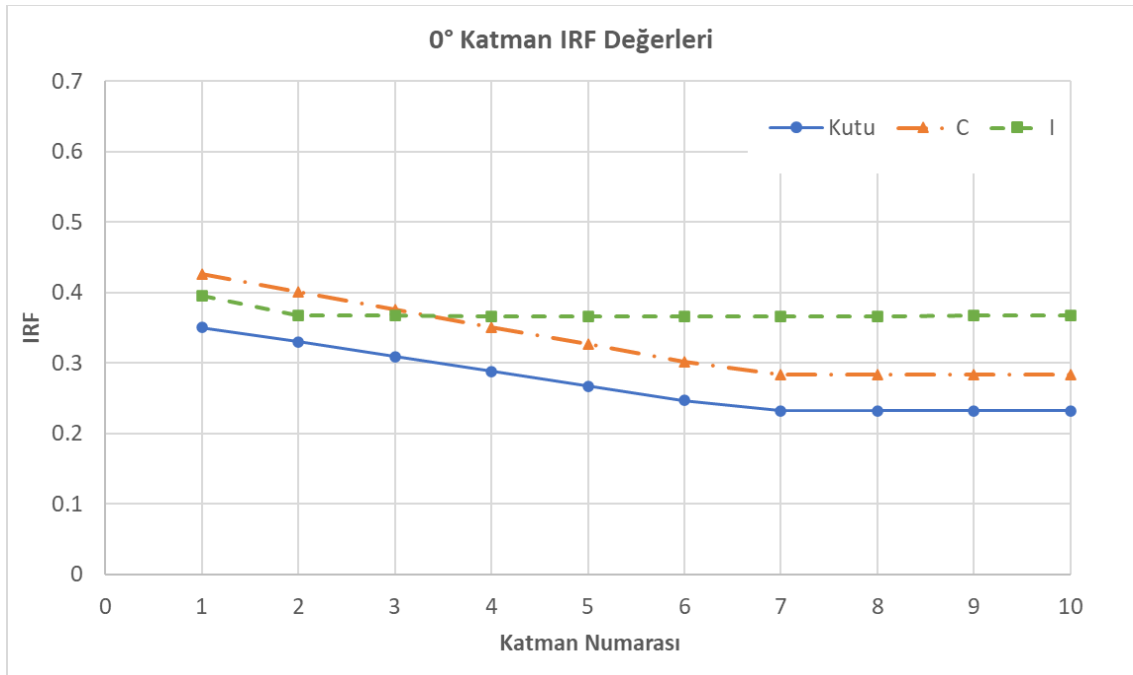
Şekil 7.10'da görüldüğü üzere I ve C profiller arasında taşıma yönündeki deformasyonlar neredeyse aynıdır. Kutu profil diğer iki profile göre daha direngen davranış göstermiştir ve deformasyonlar daha azdır.

Sürüklenme yönündeki deformasyonlar değerlendirildiğinde, Şekil 7.11'deki verilere göre kutu ve C profiller $\pm 45^\circ$ fiberlerin kullanıldığı konfigürasyonlarda birbirine

yakın deformasyonlar gösterirken tamamen 0° fiberlerin kullanıldığı konfigürasyonlarında C profilde az farkla daha fazla deformasyon görülmektedir. Bunun yanında I profilin sürüklenme yönündeki deformasyonunun diğer 2 profile göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

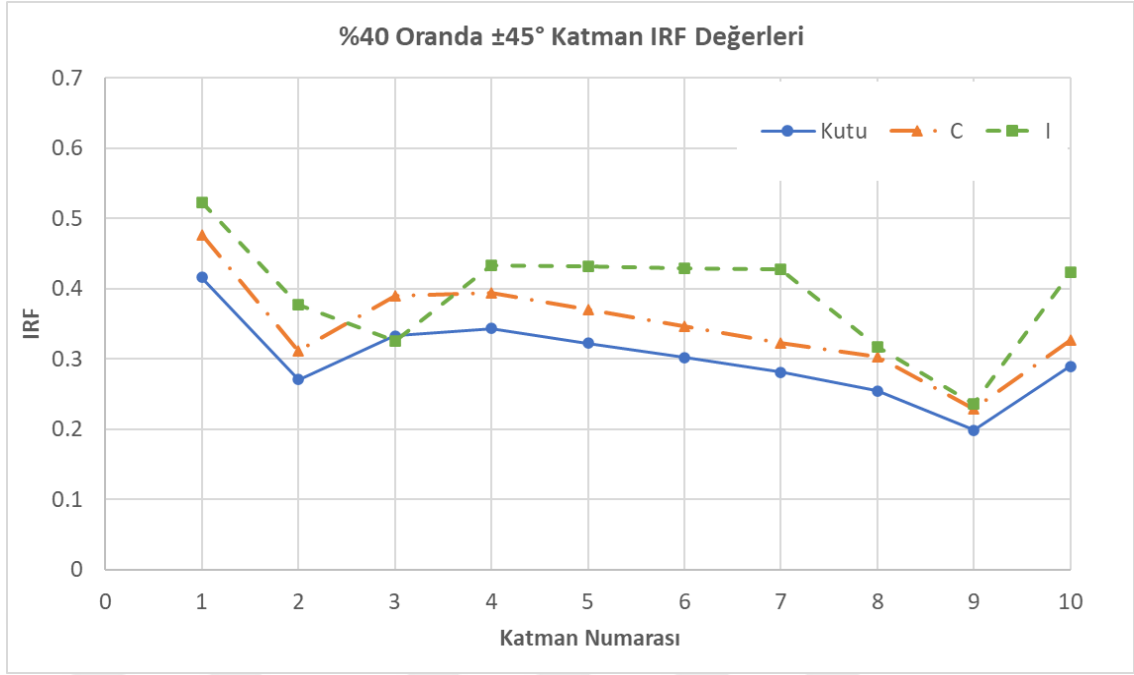
Profillerin maksimum IRF değerleri 3 grupta karşılaştırılmıştır. Bunlar;

- Tüm katmanların 0° olarak kullanıldığı 1,4 ve 7. Konfigürasyonlar,
- Katmanların %40'ının $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluştuğu 2,5 ve 8. Konfigürasyonlar,
- Katmanların %60'ının $\pm 45^\circ$ fiberlerden oluştuğu 3,6 ve 9. Konfigürasyonlar.



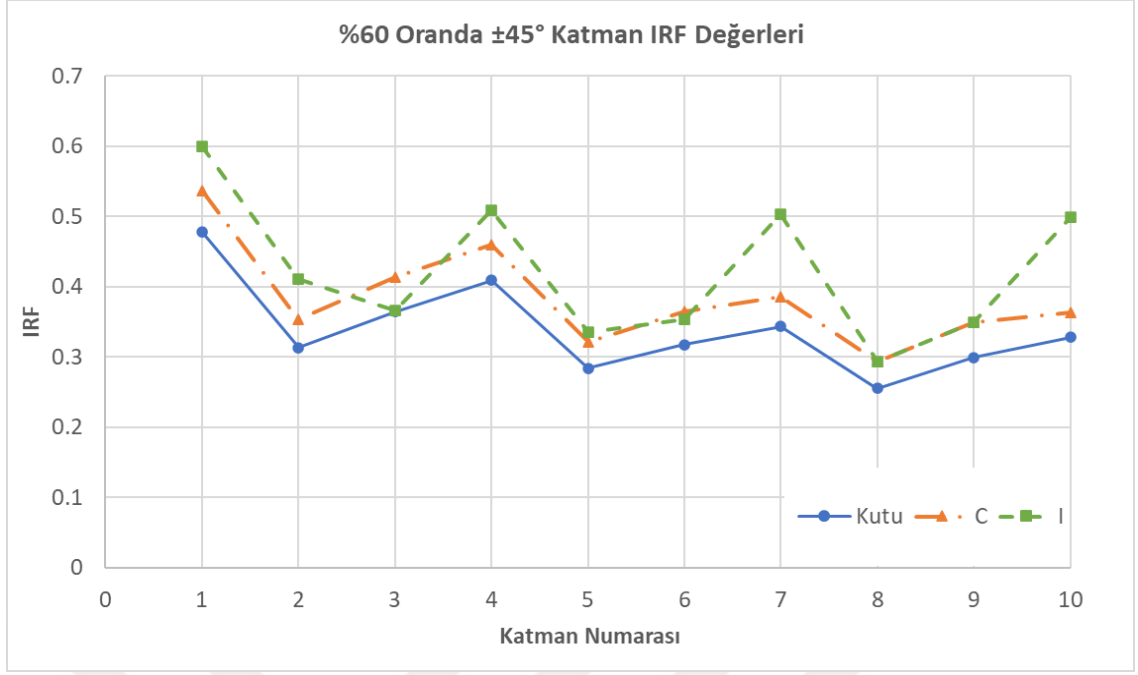
Şekil 7.12 Profillerin 0° serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırması

Tüm profillerin 0° serim açısı ile üretildiği 1,4 ve 7. Konfigürasyonların karşılaştırıldığı Şekil 7.12'deki verilere göre en düşük IRF değerleri kutu profilde görülmektedir. I profil C profile göre katmanlar arasında daha düzenli IRF dağılımına sahip olsa da C profil 3. Katmandan itibaren iç katmanlarda daha düşük IRF değerlerine sahiptir.



Şekil 7.13 Profillerin %40 oranda $\pm 45^\circ$ serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 7.13'e göre $\pm 45^\circ$ fiberlerin katmanların %40'ını oluşturduğu 2,5 ve 7. Konfigürasyonlar karşılaştırıldığında yine en düşük IRF değerlerinin kutu profilde ortaya çıktığı görülmektedir. I ve C profiller karşılaştırıldığında ise sadece 3. Katmanda I profilin IRF değerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Özellikle en dış ve iç katmanlarda I profilin IRF değerleri her 2 profilden de fazladır.



Şekil 7.14 Profillerin %60 oranda $\pm 45^\circ$ serim açısında IRF değerlerinin karşılaştırılması

%60 oranında $\pm 45^\circ$ fiberler kullanılarak üretilen kirişlerin karşılaştırmalarının sonuçları Şekil 7.14'te verilmektedir. Verilere göre, diğer 2 serim açısında olduğu gibi en düşük IRF değerleri ile en emniyetli bölgede kalan profil kutu profil olmuştur. I ve C profilde birbirine yakın dalgalanmalar olsa da özellikle 0° ile serilen 1,4,7 ve 10. katmanlarda I profilin IRF değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Profiller ağırlıkları bakımından karşılaştırıldığında [$Kutu > C \approx I$] şeklinde sıralanmaktadır. Tablo 7.4'te yapılan karşılaştırma doğrultusunda minimum ağırlık, minimum deformasyon ve minimum IRF değerlerini elde etmek amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda karşılaştırılmak üzere deformasyon ve IRF değerlerinin farklı profil kesitlerine sahip kirişlerin ağırlıkları ile çarpımları, deformasyon ve IRF değerlerinin altında parantez içerisinde verilmiştir. Bu çarpımların minimum değerleri baz alınır, en verimli profil kesitinin C profil olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 7.4 Profil kesitlerinin ağırlık-deformasyon ve ağırlık-IRF karşılaştırması

Profil	Ağırlık (kg)	Oryantasyona göre deformasyon (mm) (Def. * Ağırlık) (mm*kg)			Oryantasyona göre maks. IRF (IRF * Ağırlık)		
		1. Ory.	2. Ory.	3. Ory.	1. Ory.	2. Ory.	3. Ory.
Kutu	0,86	27,075 (23,28)	30,32 (26,075)	32,641 (28,07)	0,35089 (0,3)	0,41631 (0,36)	0,47843 (0,41)
C	0,58	29,521 (17,12)	32,341 (18,76)	34,403 (19,95)	0,42665 (0,24)	0,47627 (0,28)	0,53691 (0,31)
I	0,58	29,585 (17,16)	32,454 (18,82)	34,542 (20,03)	0,39586 (0,23)	0,52311 (0,3)	0,59924 (0,35)

Üretim kolaylığı açısından değerlendirildiğinde ise sırasıyla kolaydan zora [C $\approx$ Kutu - I] şeklinde sıralanabilir.

Tüm parametreler değerlendirildiğinde üretim kolaylığı ve hava araçlarında en önemli parametrelerden biri olan özgül dayanım bakımından önde olan, C profil kullanımı uygun görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapısal analiz sonuçları incelenmiş, aerodinamik etkiler altındaki bir hava aracı kanadının ana taşıyıcı kirişi özelinde serim açıları ve kiriş profilleri karşılaştırılmış, aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır.

5.1. Sonuçlar

- Serim oryantasyonlarında $\pm 45^\circ$ fiber kullanımı her kesit profili için kiriş üzerindeki taşıma ve sürükleme yönlerindeki toplam deformasyonu arttırmaktadır.
- Tamamen 0° fiberler içeren oryantasyonlarda katmanlar arasında IRF değerleri oldukça düzenli dağılmaktadır ve dalgalanma görülmemektedir.
- 0° konfigürasyonlarda IRF değerlerinin dış katmanlara yaklaştıkça arttığı gözlemlenmiştir.
- Eksenel normal gerilmelerin açısal gerilme dönüşümü sebebiyle açılı katmanlarda kayma gerilmelerinin artıp normal gerilmelerin azalmasına bağlı olarak, $\pm 45^\circ$ katmanlarda IRF değerlerinde ani düşüşler gözlemlenmiştir.
- $\pm 45^\circ$ katman sayılarının artmasıyla IRF değerlerindeki dalgalanmalar da artmaktadır.
- Oryantasyonlarda $\pm 45^\circ$ fiberlerin 0° fiberler ile birlikte kullanılması durumunda 0° açiya sahip katmanlardaki IRF değerleri artmaktadır.

5.2. Öneriler

- Kesit profilleri, dayanımları ve üretim kolaylığı bakımından karşılaştırıldığında kutu profilin üretim kolaylığı açısından C profile yakın ve en dayanıklı profil olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat ağırlıkları da hesaba katıldığında hava araçlarında ağırlığın oldukça önemli bir parametre olması sebebiyle C profilin kullanılması daha uygundur.
- Statik analizler sonucunda serim açıları karşılaştırıldığında daha düzenli bir IRF dağılımı ve daha düşük deformasyonların görülmesi sebebiyle 0° fiberlerin kullanımı uygundur.
- Kanat yapısı statik olarak değerlendirildiğinde eğilme davranışı ön plana çıktığı için 0° serim açılarının kullanımı uygun görülse de gelecek çalışmalarda açılı katmanların burulma rijitliği ve çırpınma (flutter) davranışı üzerindeki etkileri rastgele titreşim analizleri ile incelenebilir.

- Kayma gerilmelerine bağlı olarak ilk katman hasarı görüldüğü durumlarda dış katmanlarda $\pm 45^\circ$ fiberlerin kullanımı ile ilk katmanlarda oluşan maksimum IRF değerleri minimize edilebilir.
- Oryantasyonlar oluşturulurken $\pm 45^\circ$ açıya sahip katmanların kullanılması durumunda tüm katmanların sayısına oranı dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Fazla kullanımında kirişin deformasyonunun artmasıyla dayanımı düşmektedir.



KAYNAKLAR

- Almeida Jr, J. H. S., Angrizani, C. C., Botelho, E. C., Amico, S. C., 2015, Effect of Fiber Orientation on The Shear Behavior of Glass Fiber/Epoxy Composites, *Materials & Design*, 65, 789-795.
- An, H., Singh, J., Pasini, D., 2017, Structural Efficiency Metrics for Integrated Selection of Layup, Material, and Cross-Section Shape in Laminated Composite Structures, *Composite Structures*, 170, 53-68.
- Annadorai, M. E., Ramakrishna, M., Jyothi, Y., 2024, Effect on Mechanical Properties of CFRP Composites in Different Fiber Orientations. *Interactions*, 245(1), 198.
- Anderson, J. D., Bowden, M. L. 2016, Introduction to flight, 8, *McGraw-Hill Education* New York, NY, USA, 849.
- Aung, P. W., Tatarnikov, O., Aung, N. L., 2020, Structural Optimization of a Light Aircraft Composite Wing, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709(4), 044094.
- Choo, V. K., 1990, Fundamentals of Composite Materials, *Knowen Academic Press Inc.*, Dover – Delaware – U.S.A, 2
- Ferreira, R. T., Ashcroft, I. A., 2020, Optimal Orientation of Fibre Composites for Strength Based on Hashin's Criteria Optimality Conditions, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61(5), 2155-2176.
- Glascoff III, W. G., 1969, Theory of Aircraft Flight. Aerospace Education II., ED068293, *Air Force Junior Rotc Air University*, Maxwell Air Force Base, Alabama, 26-50.
- Guo, S., Cheng, W., Cui, D., 2006, Aeroelastic Tailoring of Composite Wing Structures by Laminate Layup Optimization, *AIAA Journal*, 44(12), 3146-3150.

- Guo, S., Li, D., Liu, Y., 2012, Multi-Objective Optimization of a Composite Wing Subject to Strength and Aeroelastic Constraints, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(9), 1095-1106.
- Guo, S. J., Bannerjee, J. R., Cheung, C. W., 2003, The Effect of Laminate Lay-Up on The Flutter Speed of Composite Wings, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: journal of aerospace engineering*, 217(3), 115-122.
- Hanna, C., Iryna, I., Mykhailo, T., 2023, Use of Composite Materials in Civil Aviation, *New Integrations of Modern Education in Universities*, 12, 310-312
- Hashin, Z., 1980, Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *J. Appl. Mech.*, 47(2), 329–334
- Hashin, Z., Rotem, A., 1973, A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials. *Journal of Composite Materials*, 7(4), 448-464.
- Heslehurst, R.B., 2014, Defects And Damage in Composite Materials And Structures, 19, *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA, 79-84
- Hill, R., 1965, Theory of Mechanical Properties of Fibre-Strengthened Materials - III. Self-Consistent Model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13(4), 189-198.
- Hoffman, O, 1967, The Brittle Strength of Orthotropic Materials, *Journal of Composite Materials*, 1(2), 200-206.
- Jones, R.M., 1999, Mechanics of Composite Materials, 3, *Taylor & Francis*, New York, 106-114.
- Kaw, K. 2006, Mechanics of Composite Materials, *Taylor & Francis Group*, Boca Raton – London – New York, 2

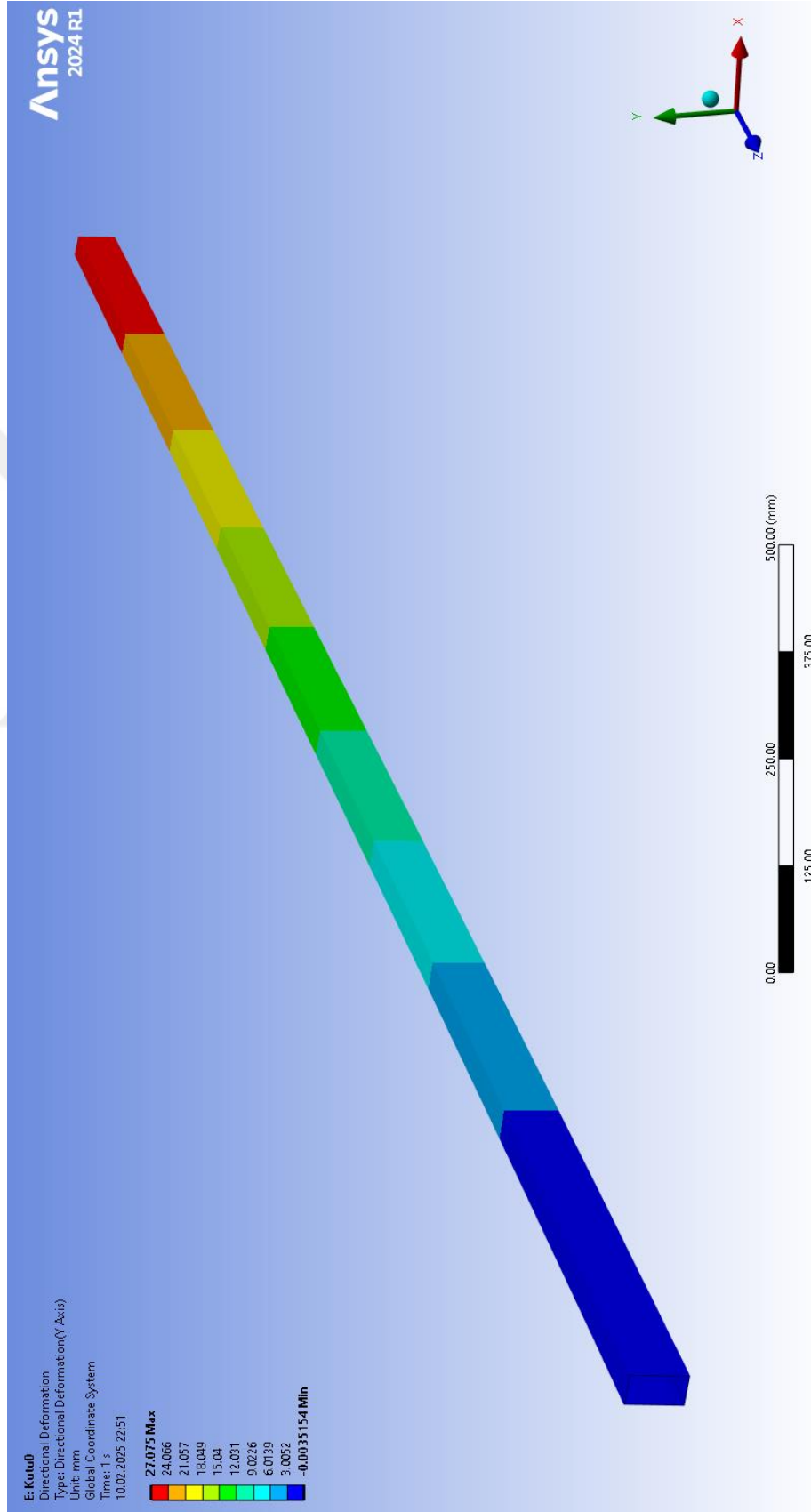
- Liu, K. S., Tsai, S. W., 1998, A Progressive Quadratic Failure Criterion for a Laminate, *Composites Science and Technology*, 58(7), 1023-1032.
- Loughlan, J., Ata, M., 1997 The Behaviour of Open and Closed Section Carbon Fibre Composite Beams Subjected to Constrained Torsion, *Composite Structures*, 38(1-4), 631-647.
- Mallick, P. K., 2007, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design, 3, *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA 19-89
- Moazed, R., Khozeimeh, M. A., Fotouhi, R., 2021, Simplified Approach for Parameter Selection and Analysis of Carbon and Glass Fiber Reinforced Composite Beams, *Journal of Composites Science*, 5(8), 220.
- Mohamed, Y. S., Abdelbary, A., 2023, Theoretical and Experimental Study on The Influence of Fiber Orientation on the Tensile Properties of Unidirectional Carbon Fiber/Epoxy Composite, *Alexandria Engineering Journal*, 67, 693-705.
- Nali, P., Carrera, E., 2012, A Numerical Assessment on Two-Dimensional Failure Criteria for Composite Layered Structures, *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 280-289.
- Naresh, K., Shankar, K., Velmurugan, R., 2017, Effect of Fiber Orientation on Carbon/Epoxy and Glass/Epoxy Composites Subjected to Shear and Bending, *Solid State Phenomena*, 267, 103-108.
- Neubauer, M., Gunther, G., 2001, Aircraft Loads, *Aging Aircraft Fleets: Structural and Other Subsystem Aspects*, 9-1.
- Raja, D. B. P., Ramanan, G., Patil, I. G. V., Suganthi, P., 2022, Static Structural Analysis and Testing of Aircraft Wing Spar Using Composite Material, *Materials Today: Proceedings*, 64, 416-424.

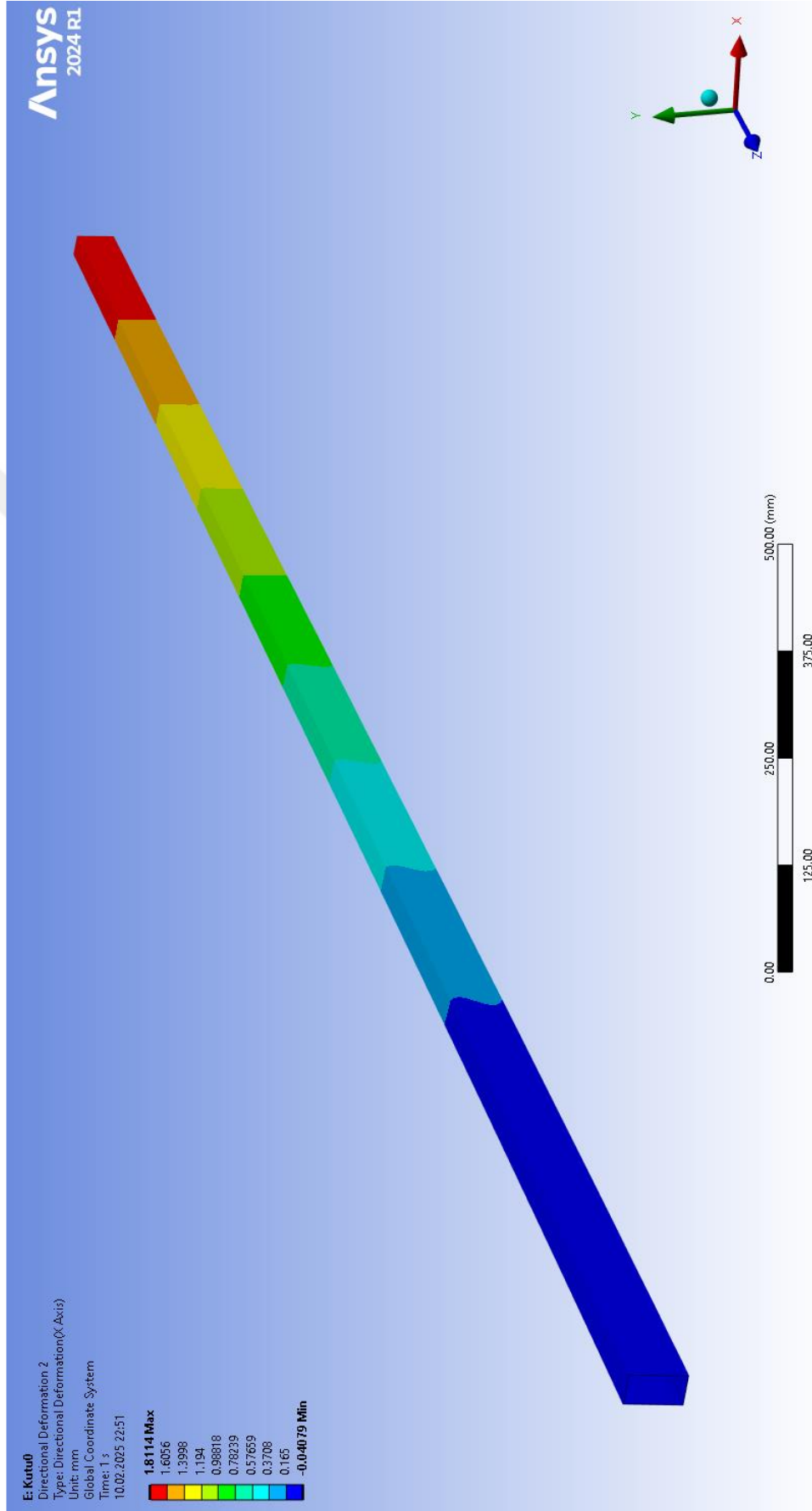
- Sause, M.G.R., 2016, In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites, 1, *Springer*, Switzerland, 5-17
- Seshaiah, T., Reddy, V. K. 2018, Effect of Fiber Orientation on The Mechanical Behavior of E-Glass Fibre Reinforced Epoxy Composite Materials, *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Devel.(IJMPERD)*, 379-396.
- Shevtsov, S., Zhilyaev, I., Snezhina, N., Jiing-Kae, W. U., 2018, Optimization of Lay-Up Stacking for a Loaded-Carrying Slender Composite Beam, *Optimum Composite Structures*. 35-51.
- Solov'yev, P., Gomzin, A., Pervushin, Y., Musin, F., Galyshev, S., 2017, Structure Determination and Composite Wing Spar Stress-Strain State Estimation, *MATEC Web of Conferences*, 129, 02040.
- Subhedar, K. M., Chauhan, G. S., Singh, B. P., Dhakate, S. R., 2021, Effect of Fibre Orientation on Mechanical Properties of Carbon Fibre Composites, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 27(6), 1100-1103.
- Sun CT, Quinn BJ, Oplinger DW, 1996, Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates, Tech. Rep. DOT/FAA/AR-95/109, *Office of Aviation Research*, Washington (DC), 5
- Sun, C. T., Adnan, A., 2021, Mechanics of Aircraft Structures, 3, *John Wiley & Sons*, Hoboken, 12-16.
- Tsai, S. W., 1968, Strength Theories of Filamentary Structure Fundamental Aspects of Fiber Reinforced Plastic Composites, *Wiley – Interscience*, New York.
- Tsai, S. W., Wu, E. M., 1971, A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, *Journal of Composite Materials*, 5(1), 58-80.
- Vasiliev, V. V., Morozov, E. V., 2013, Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements, *Elsevier*, Amsterdam – Boston, 9

- Wang, Q., 2022, Structural Design of Composite Wing Spars, Yüksek Lisans Tezi, *National Aviation University*, Kyiv, 44-63.
- Widyawasta, W., Wikarta, A., 2024, Static Load Analysis of Various Wing Spar Profiles: a Comparative Study Between Mathematical and Finite Element Methods, *JMES The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8(1), 1-7.
- Wright, J. R., Cooper, J. E. 2008, Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads, 18, *John Wiley & Sons*, Chichester, 81-82; 356-359.
- Xavier, D.D., Kumar, R.S., Sabapathy, S., 2018, Design and Structural Analysis of Transport Aircraft Wing, *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 5(3), 1073-1078
- Zhitomirskii, G.I., 2005, Konstruktsiia Samoletov [The Design of the Aircraft], *Mashinostroenie Publ.*, Moscow, 406.
- Zhu, M., Chen, D., & Hu, Q., 2019, Failure Mechanisms and Reinforcing Modes of Ply Splice Fiber Reinforced Composite Laminates Under Tensile Load, *Materials*, 12(18), 2912.

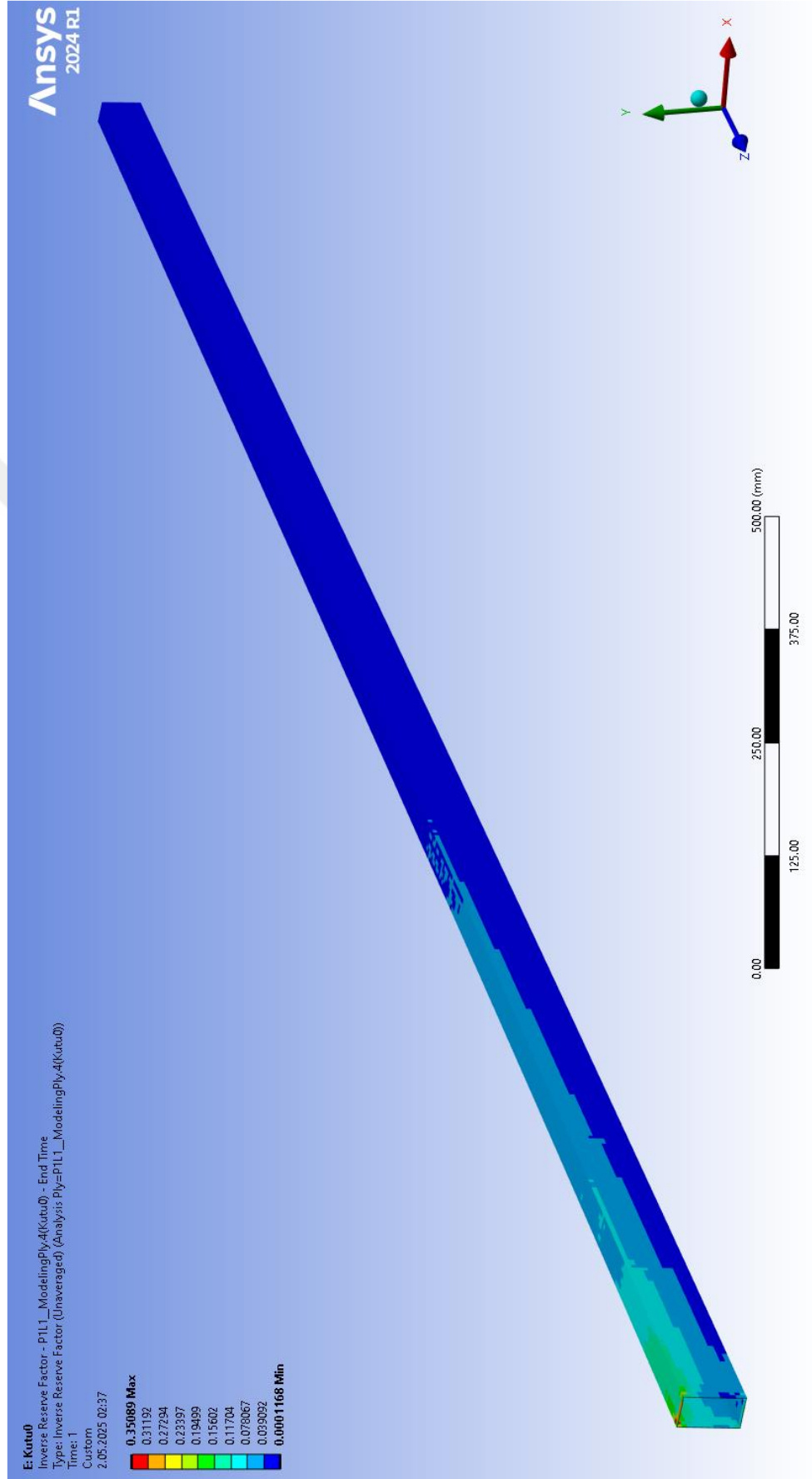
EKLER

EK-1 1. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon

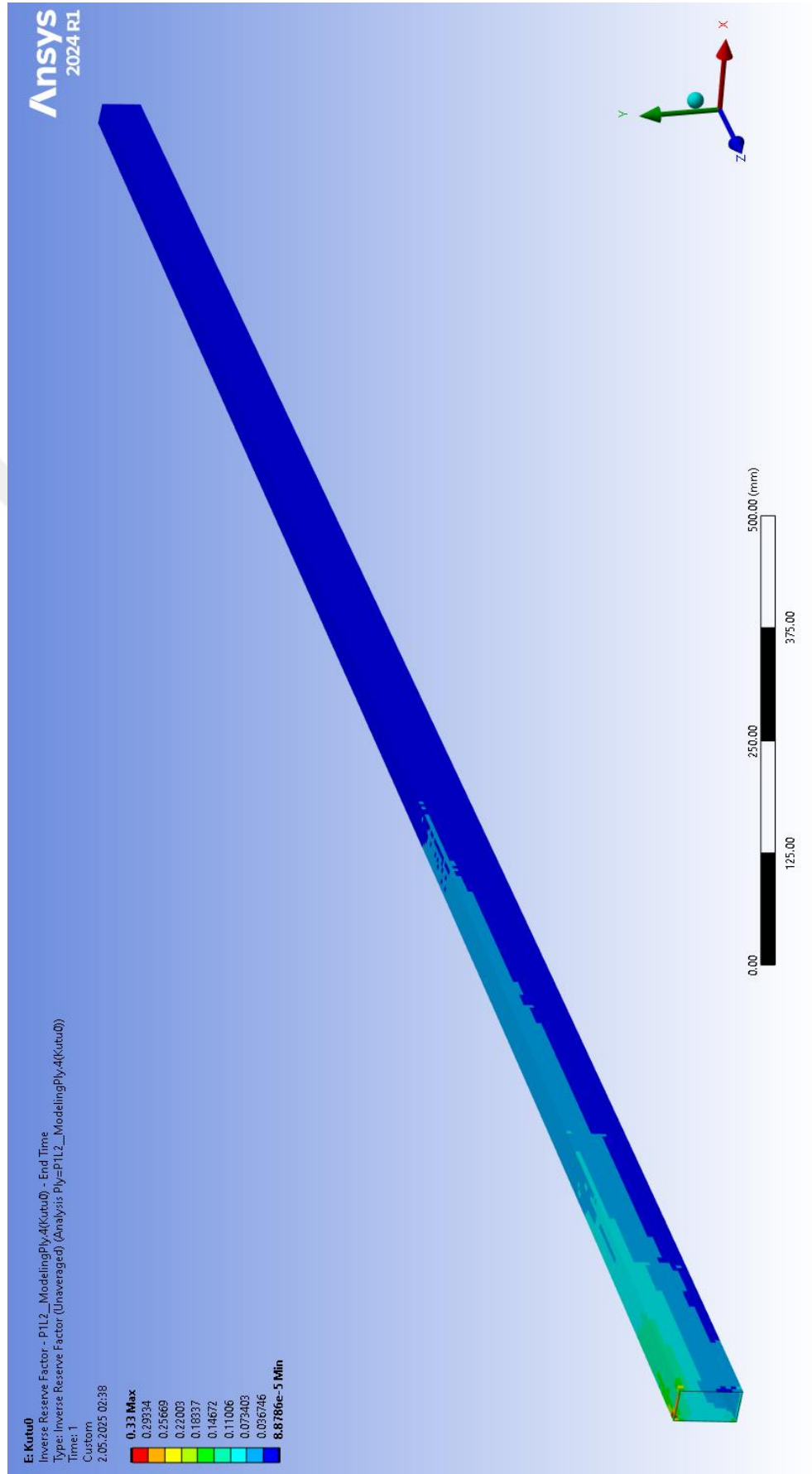


EK-2 1. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon

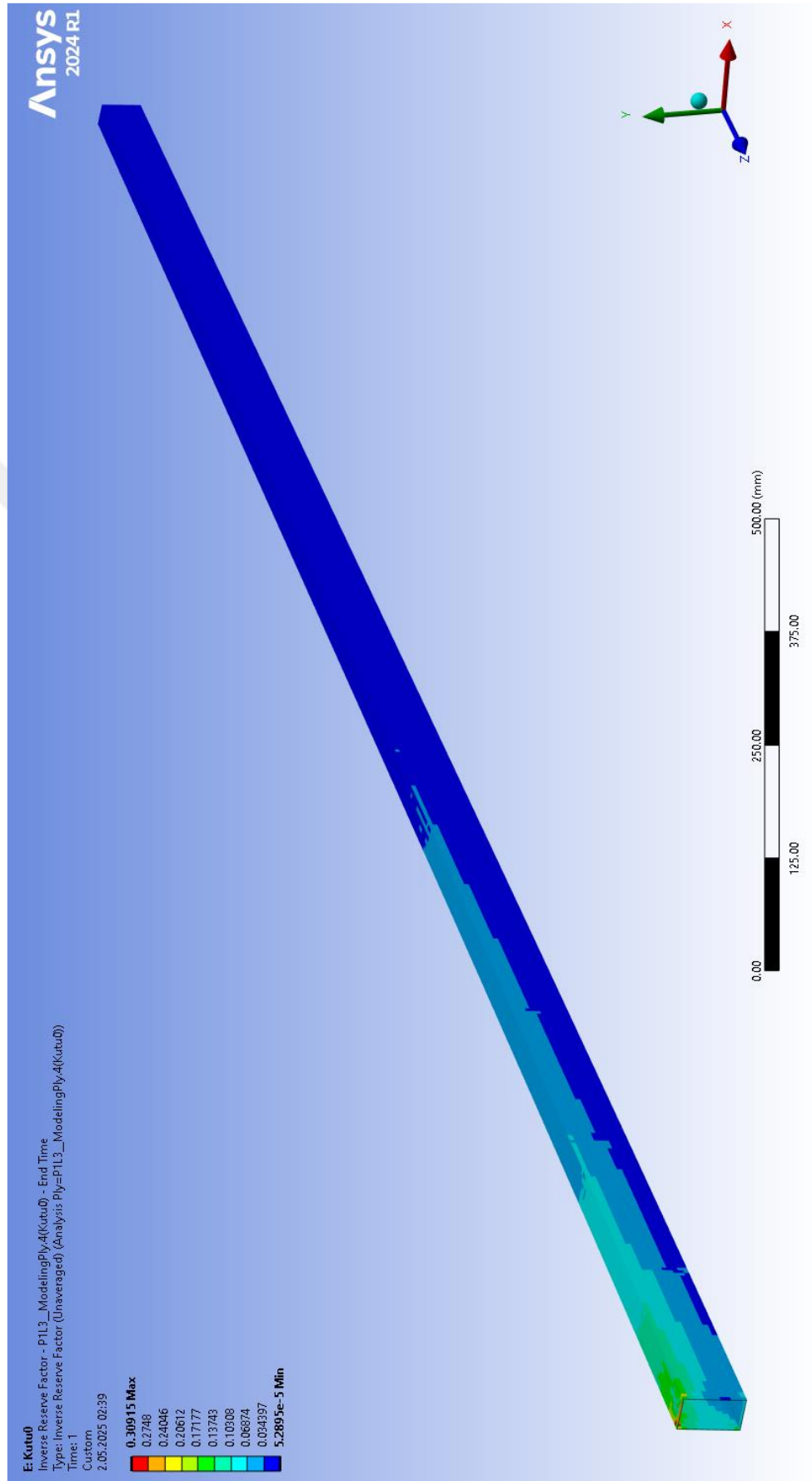
EK-3 1. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



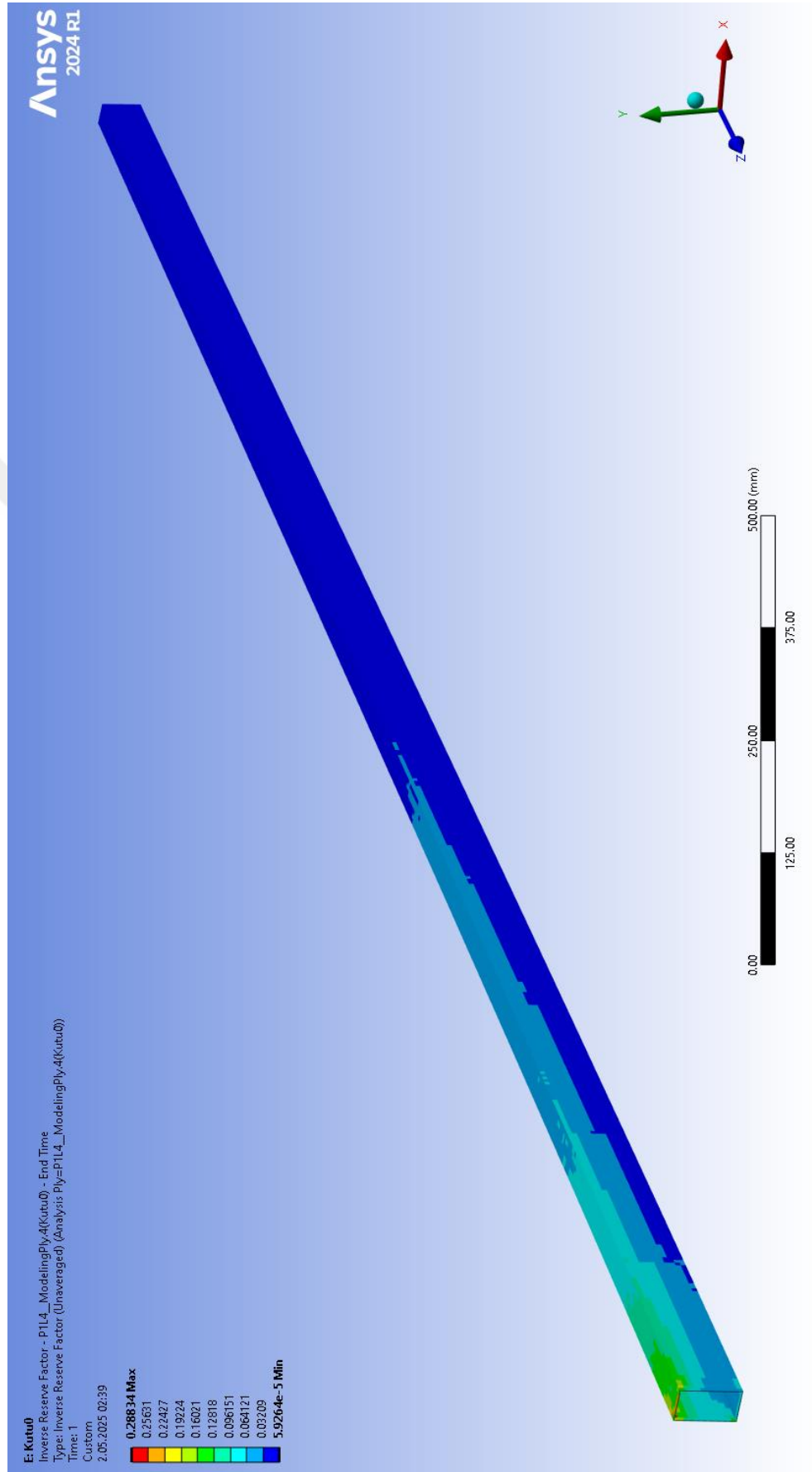
EK-4 1. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



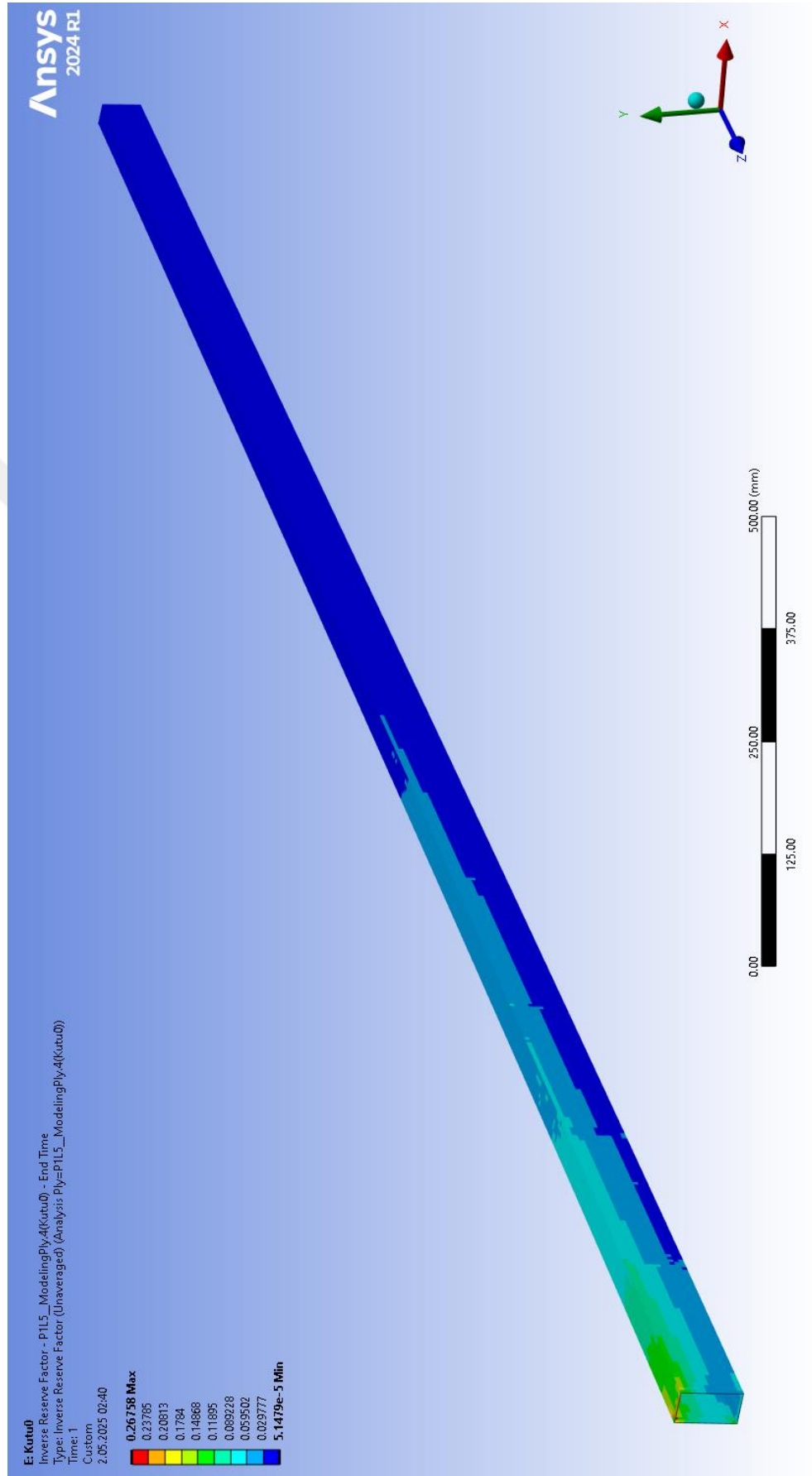
EK-5 1. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



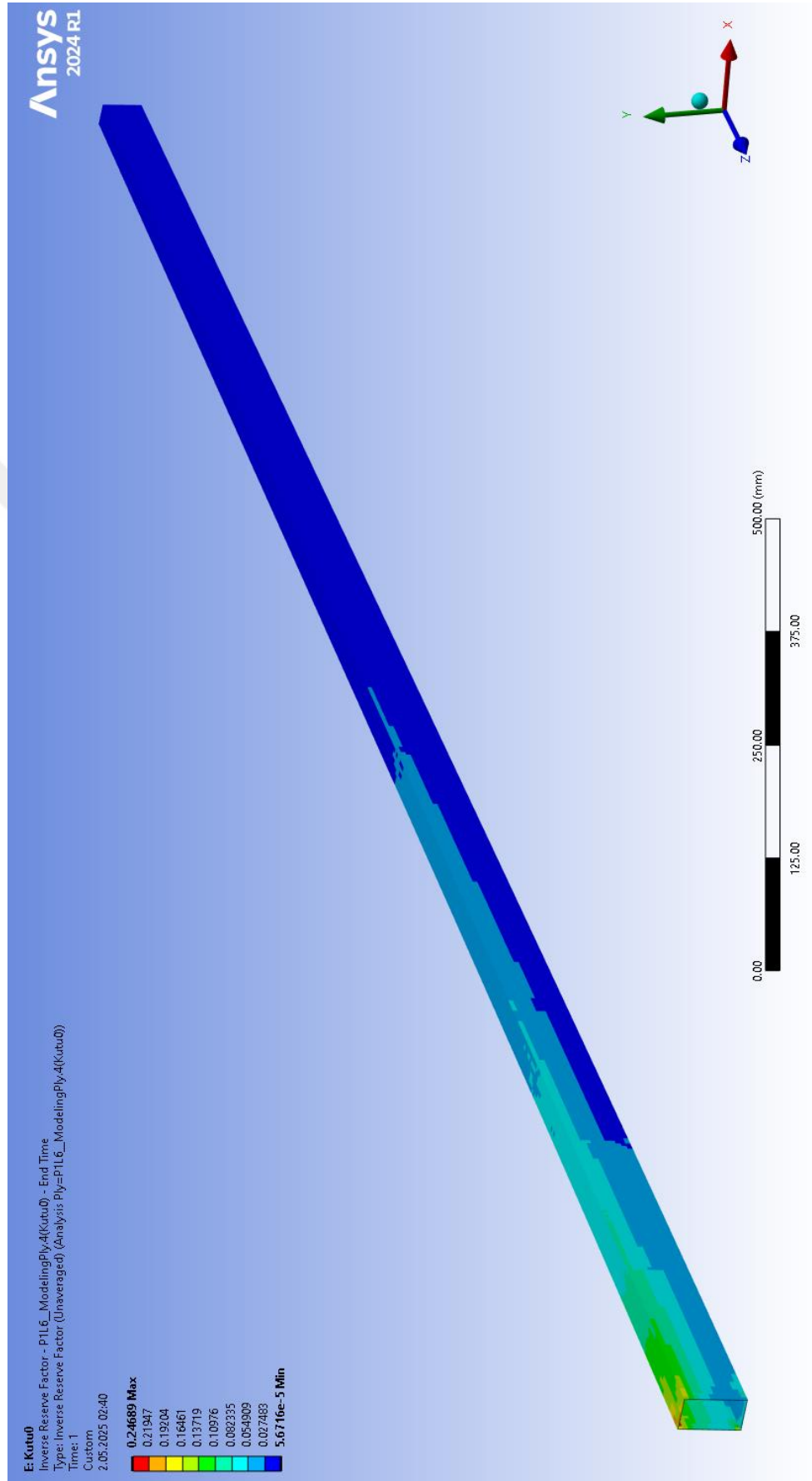
EK-6 1. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



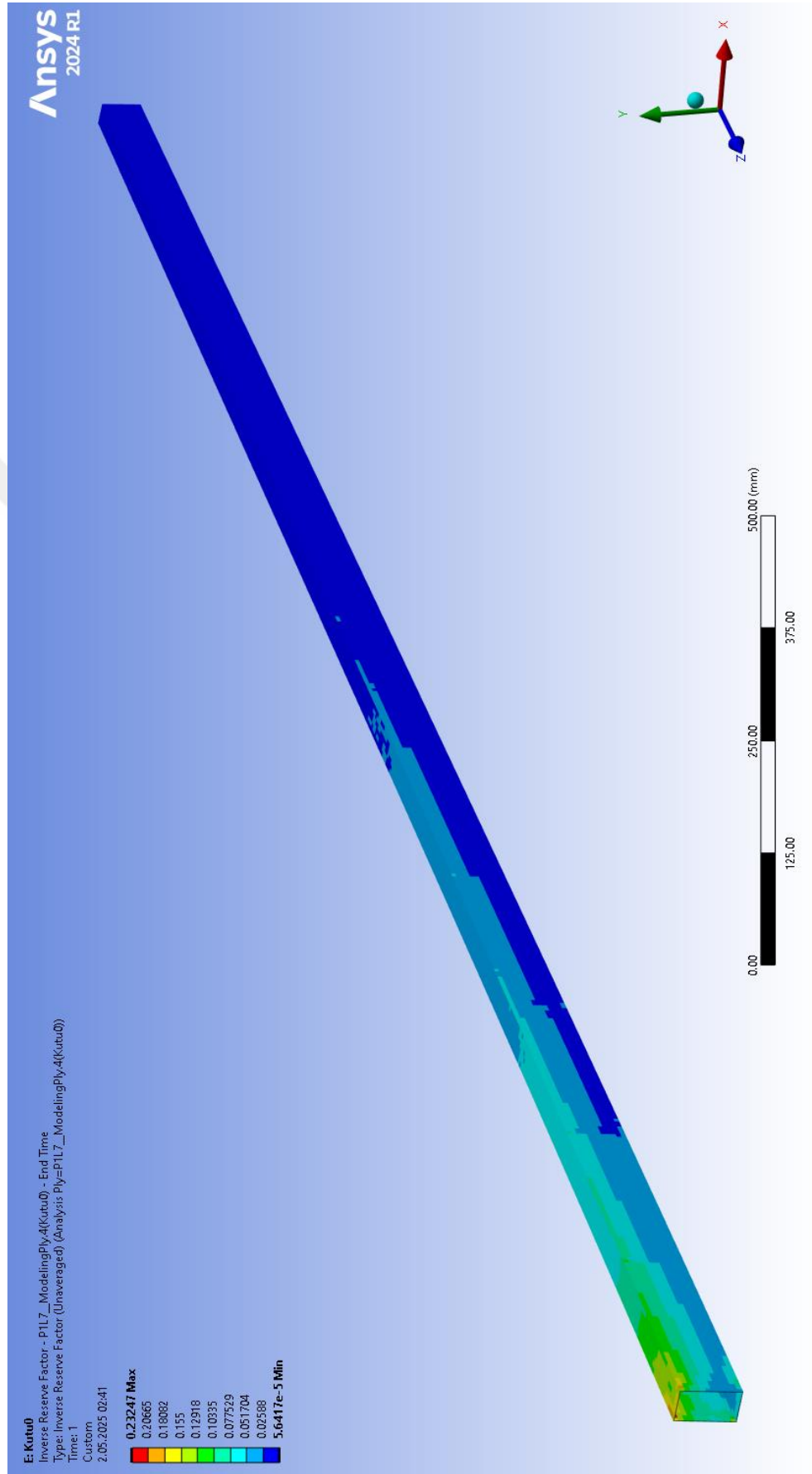
EK-7 1. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



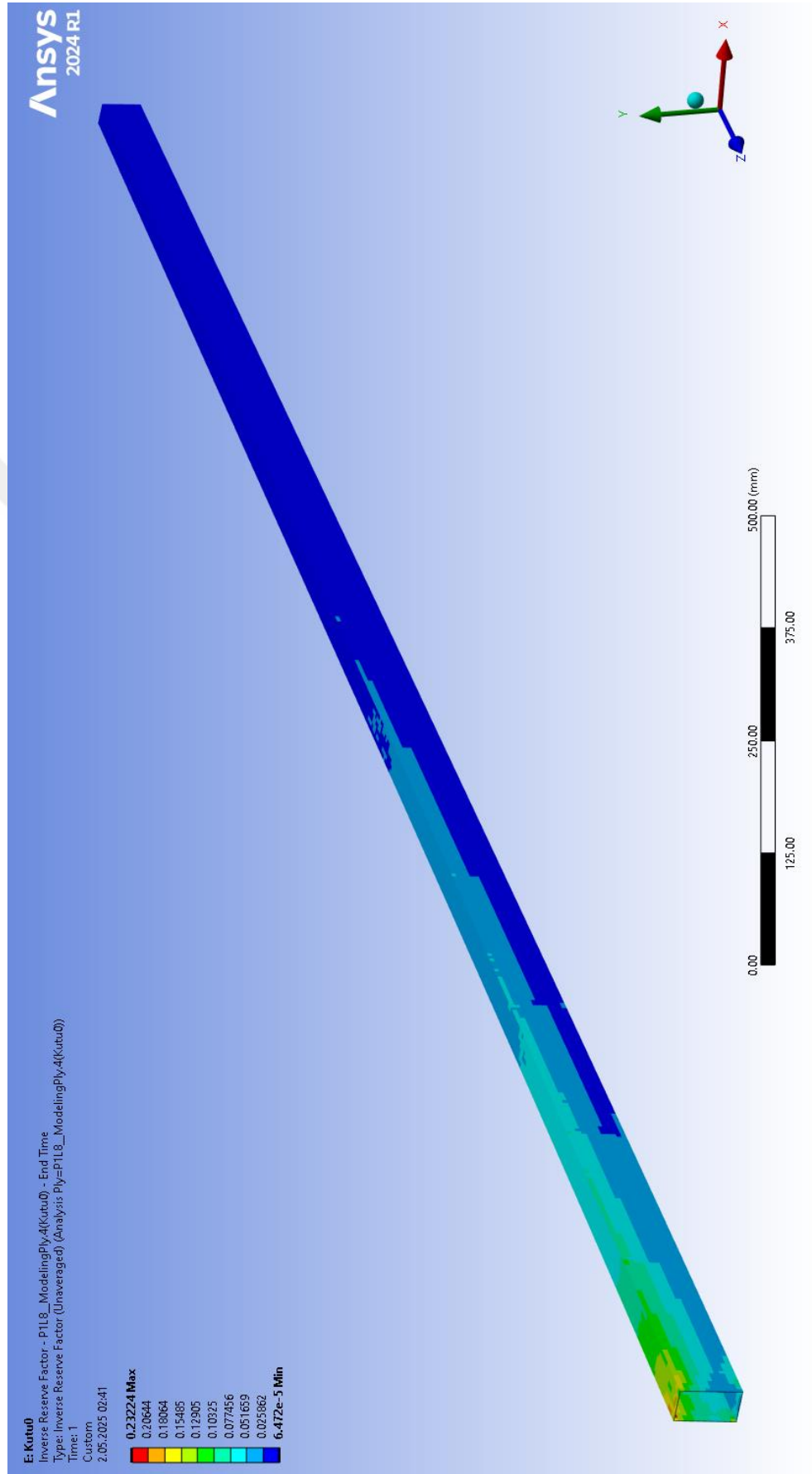
EK-8 1. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



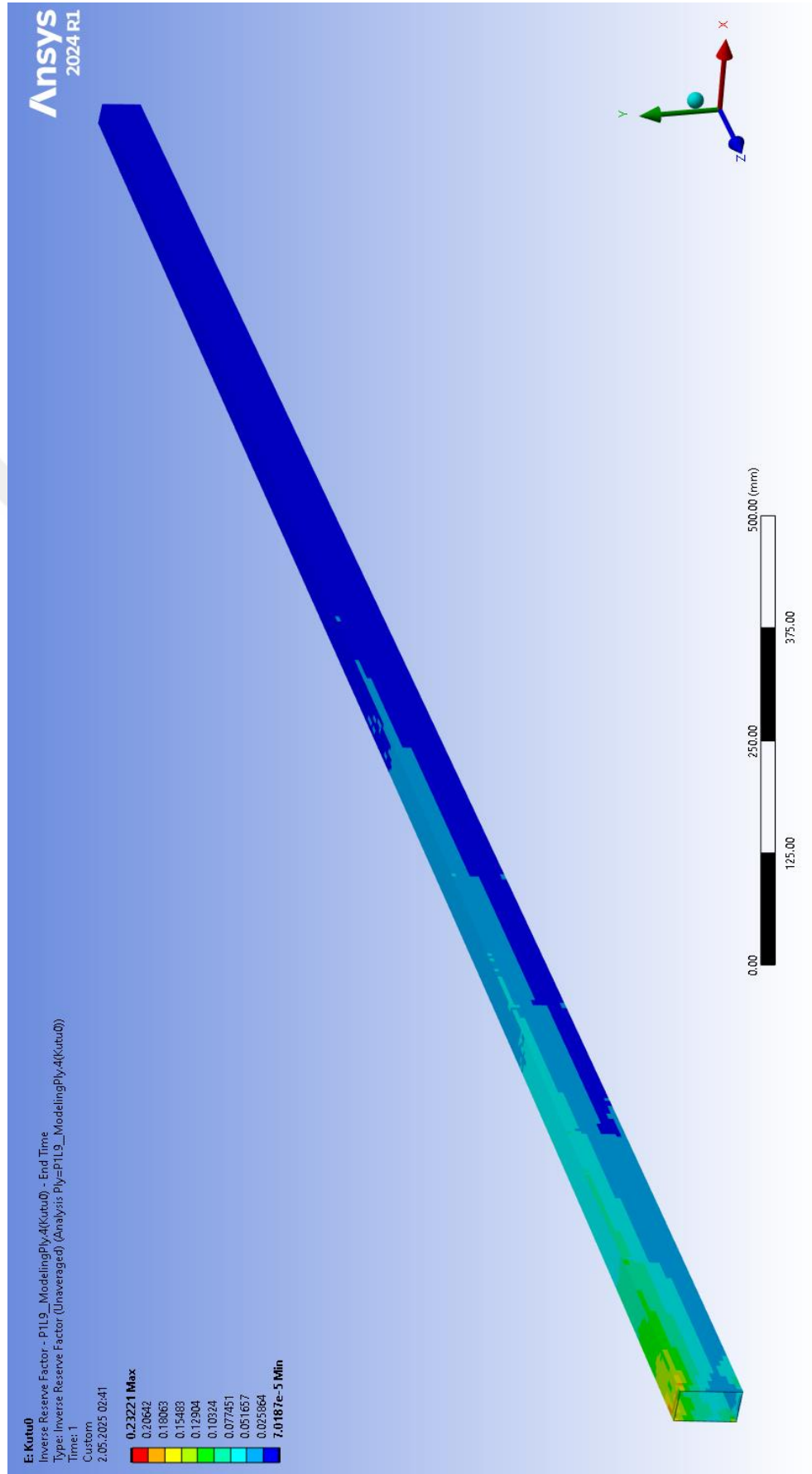
EK-9 1. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



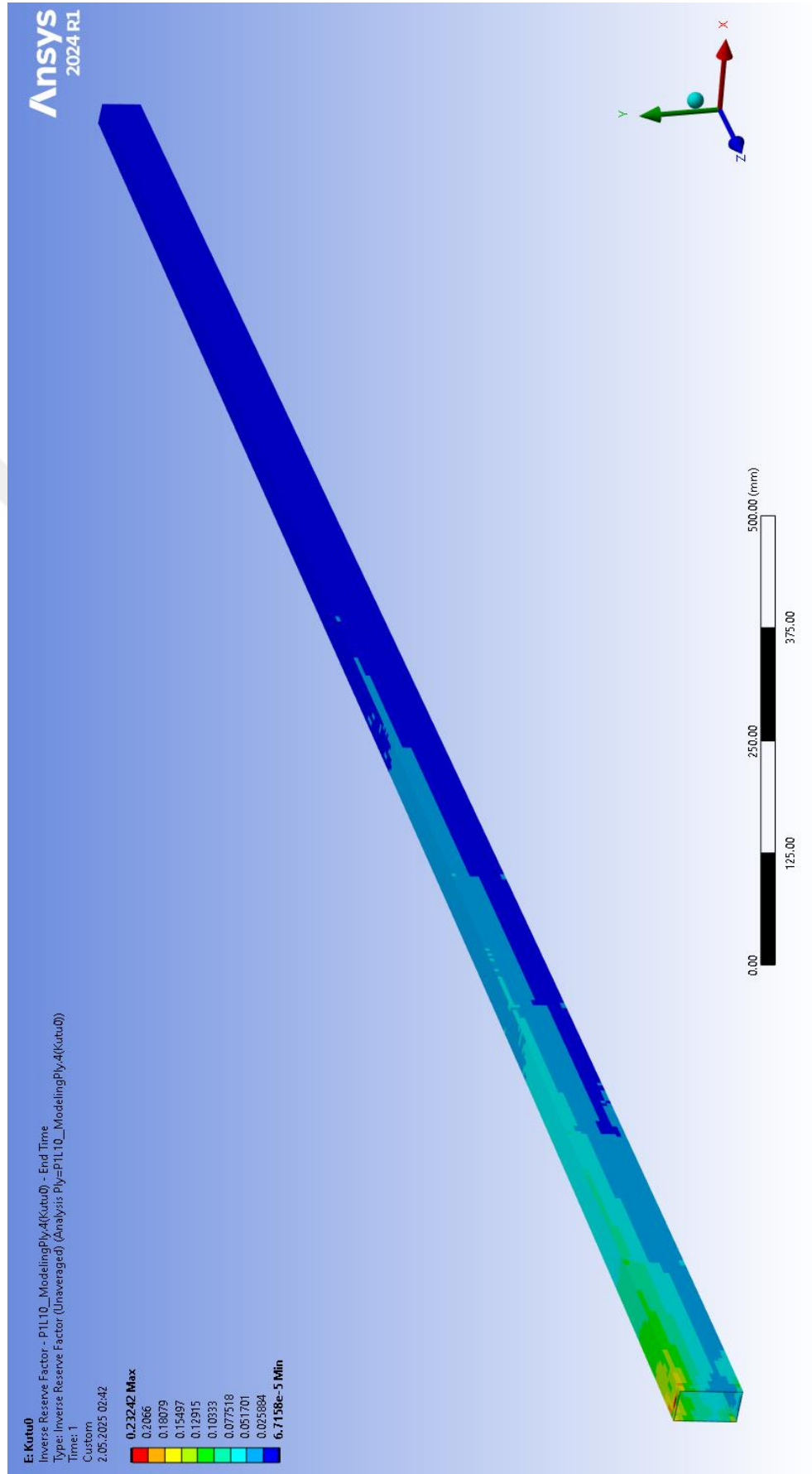
EK-10 1. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



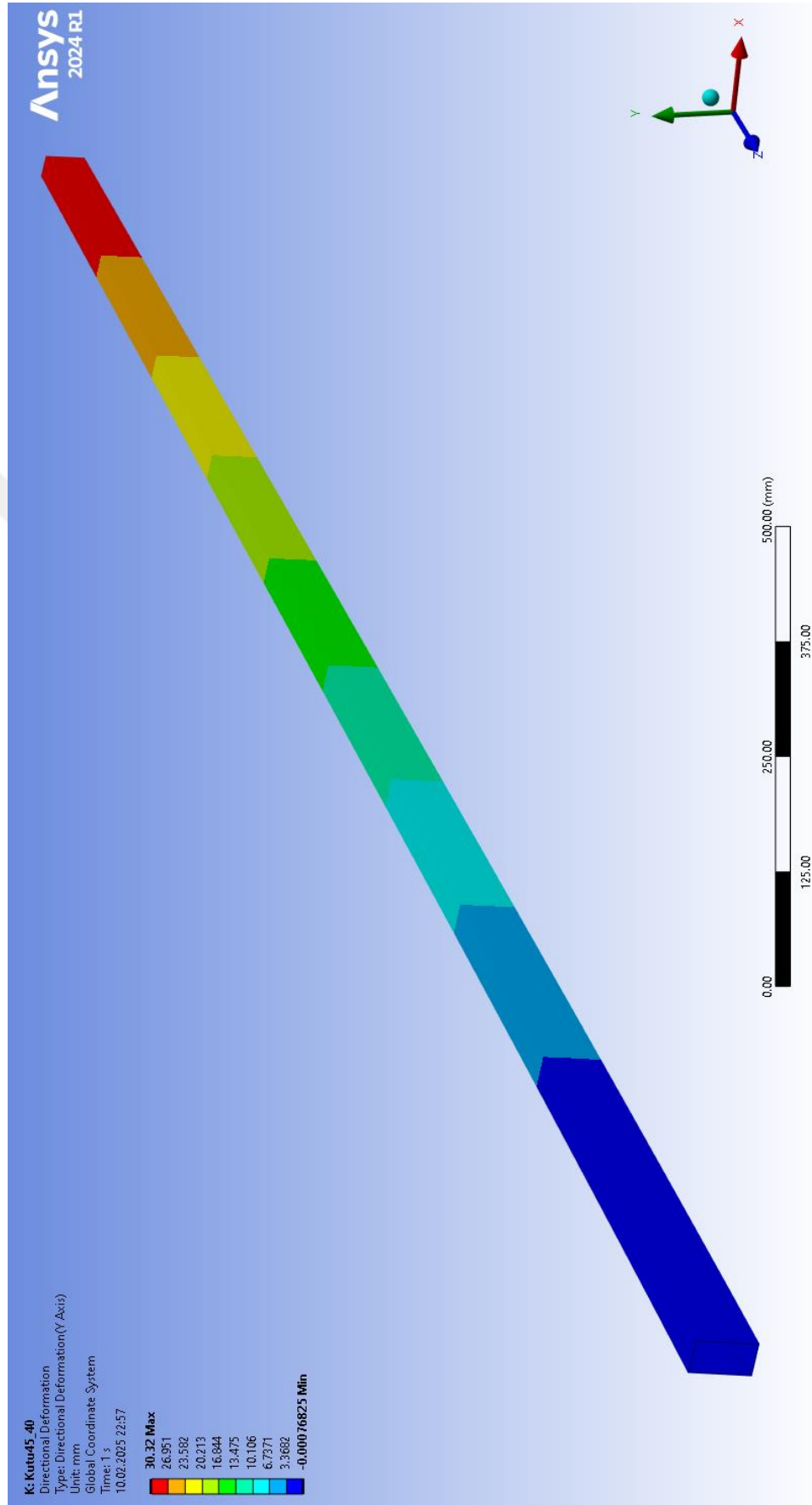
EK-11 1. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



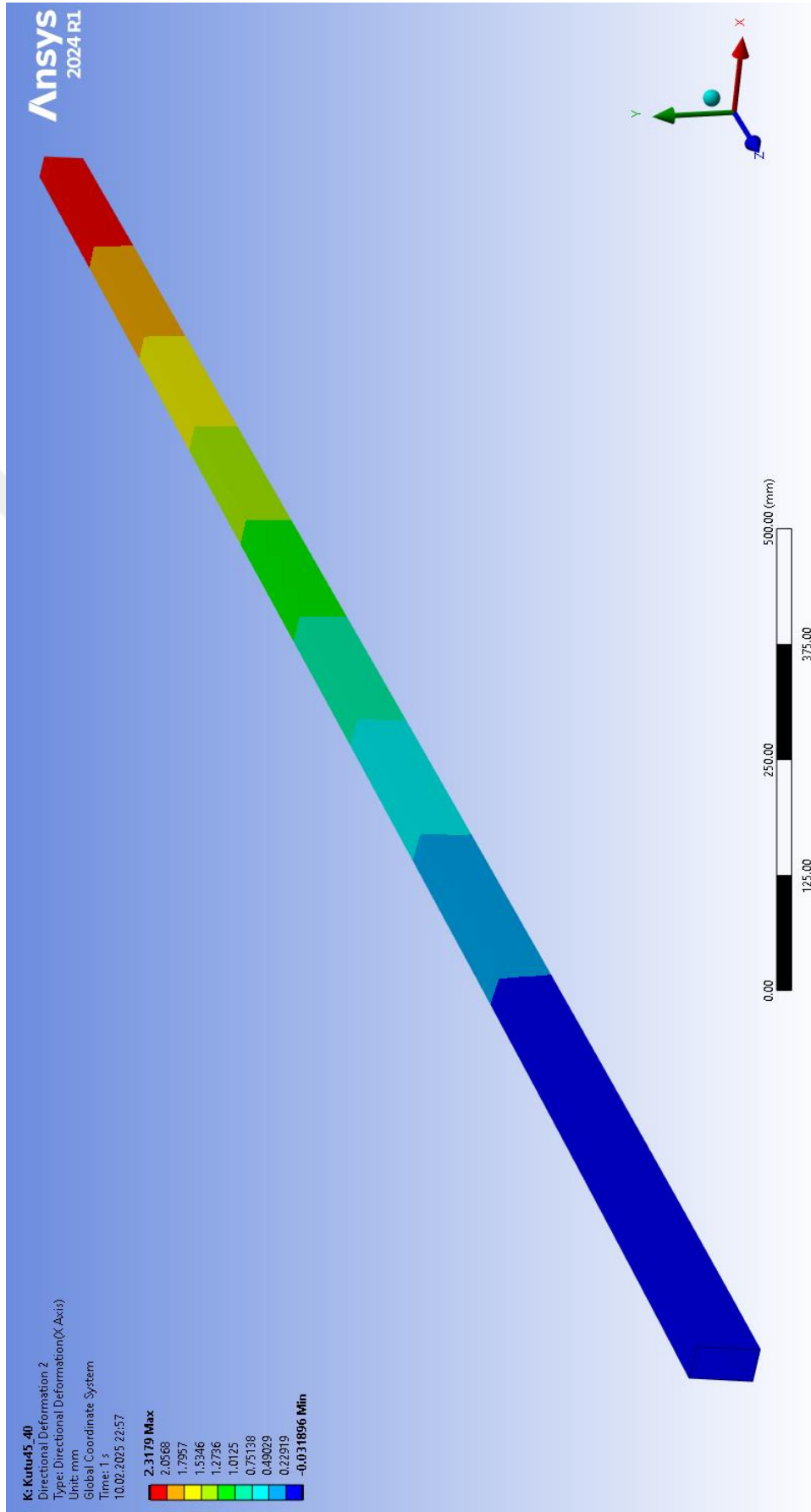
EK-12 1. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



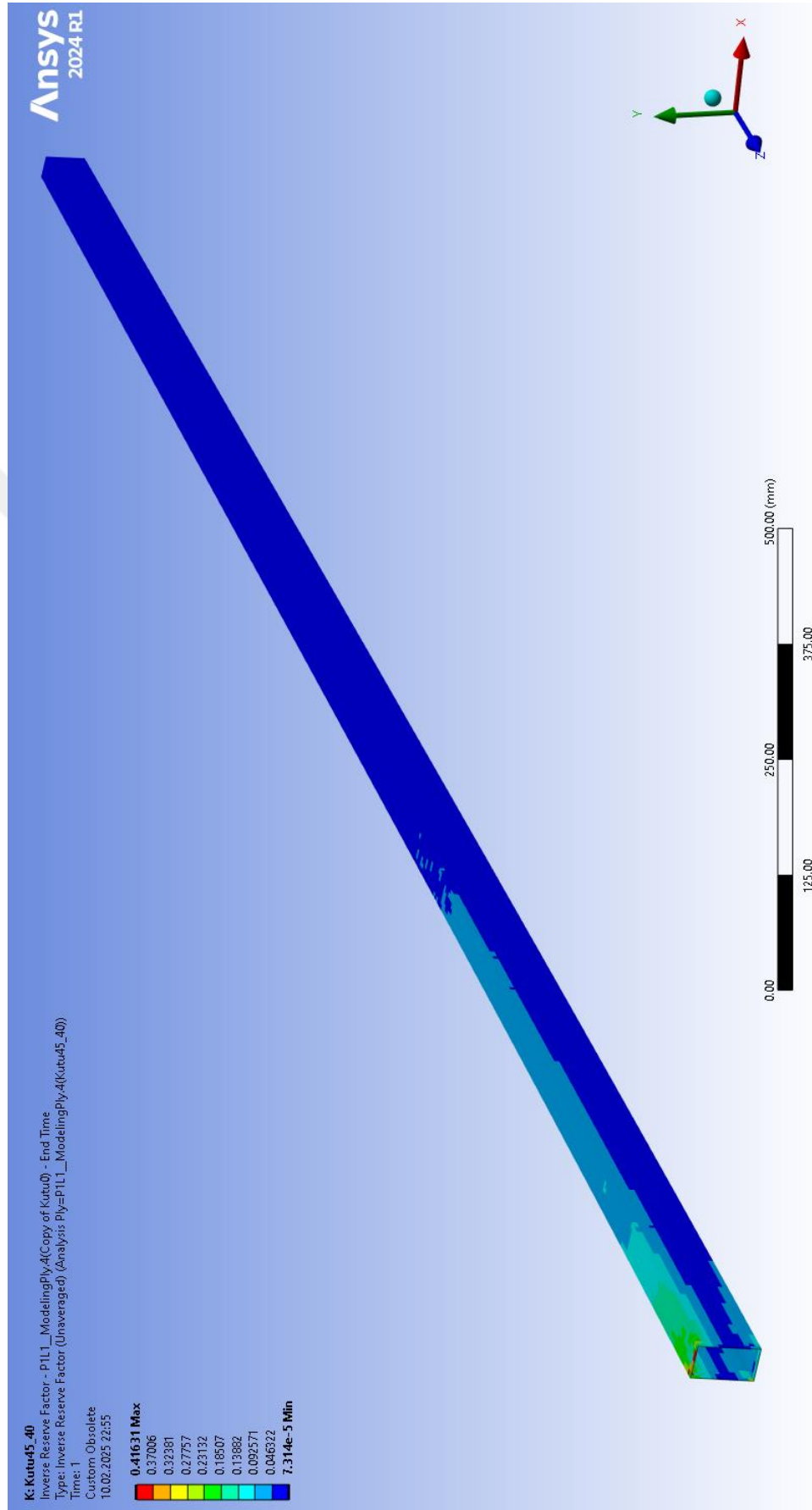
EK-13 2. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



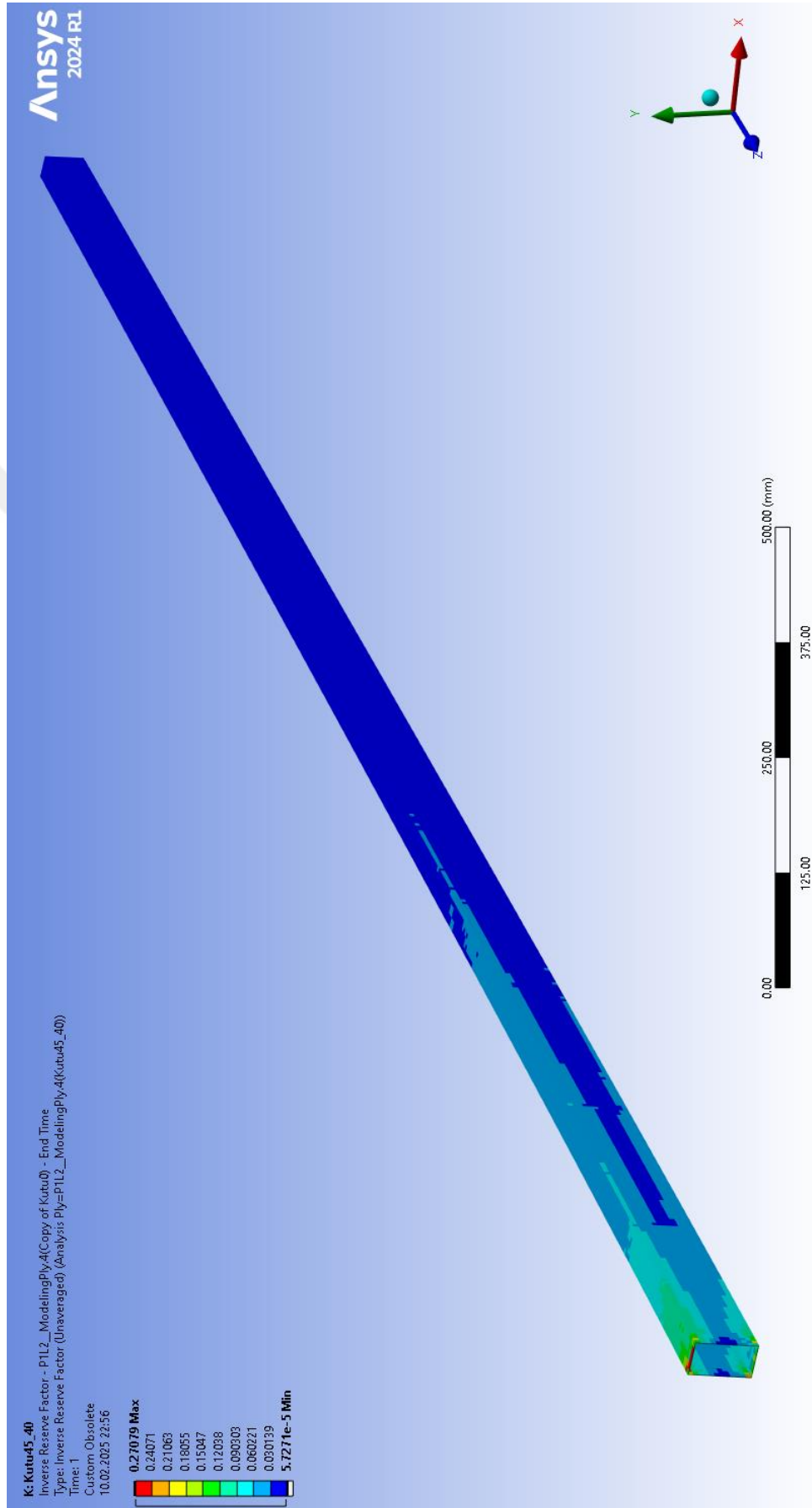
EK-14 2. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



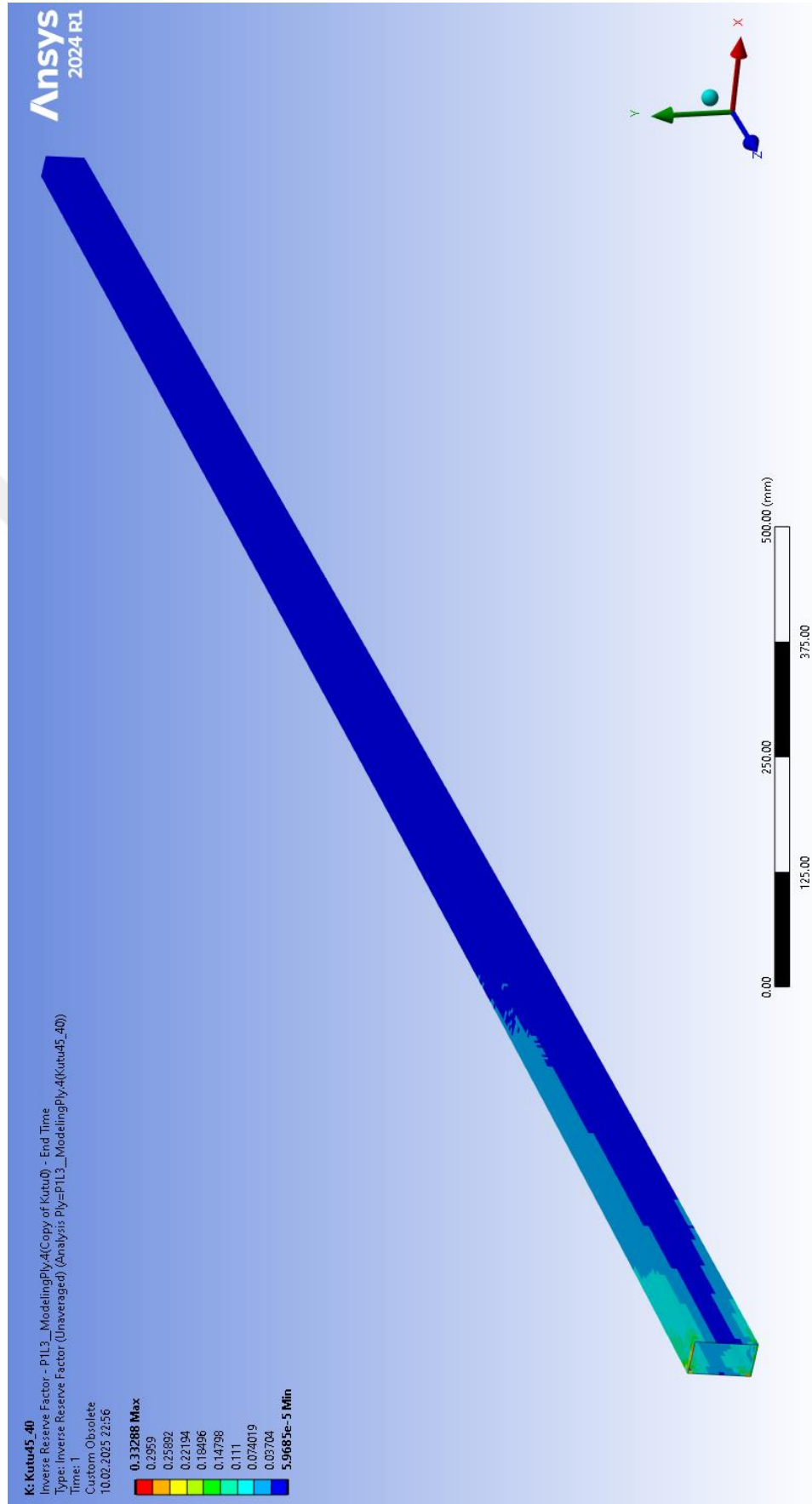
EK-15 2. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



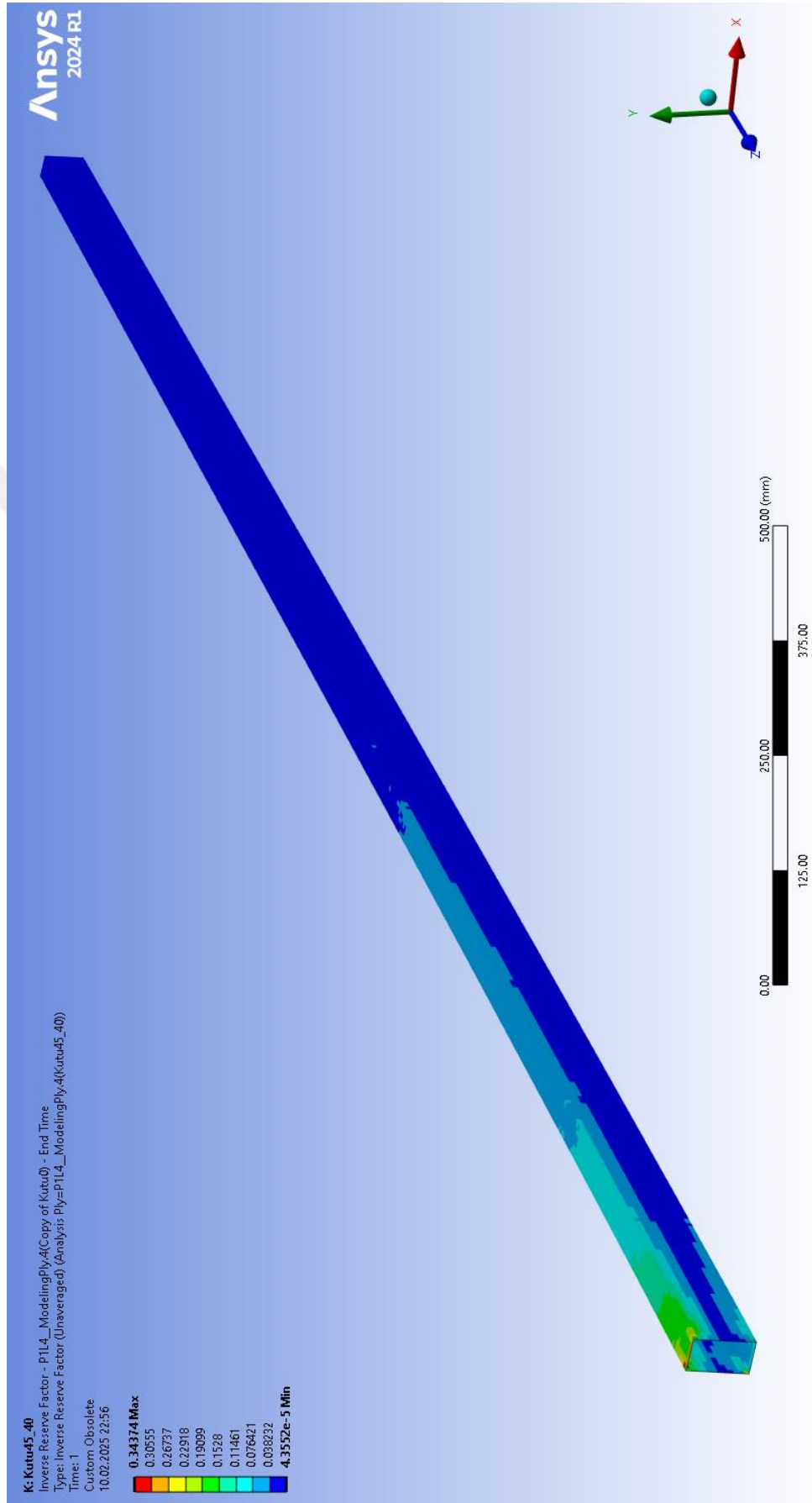
EK-16 2. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



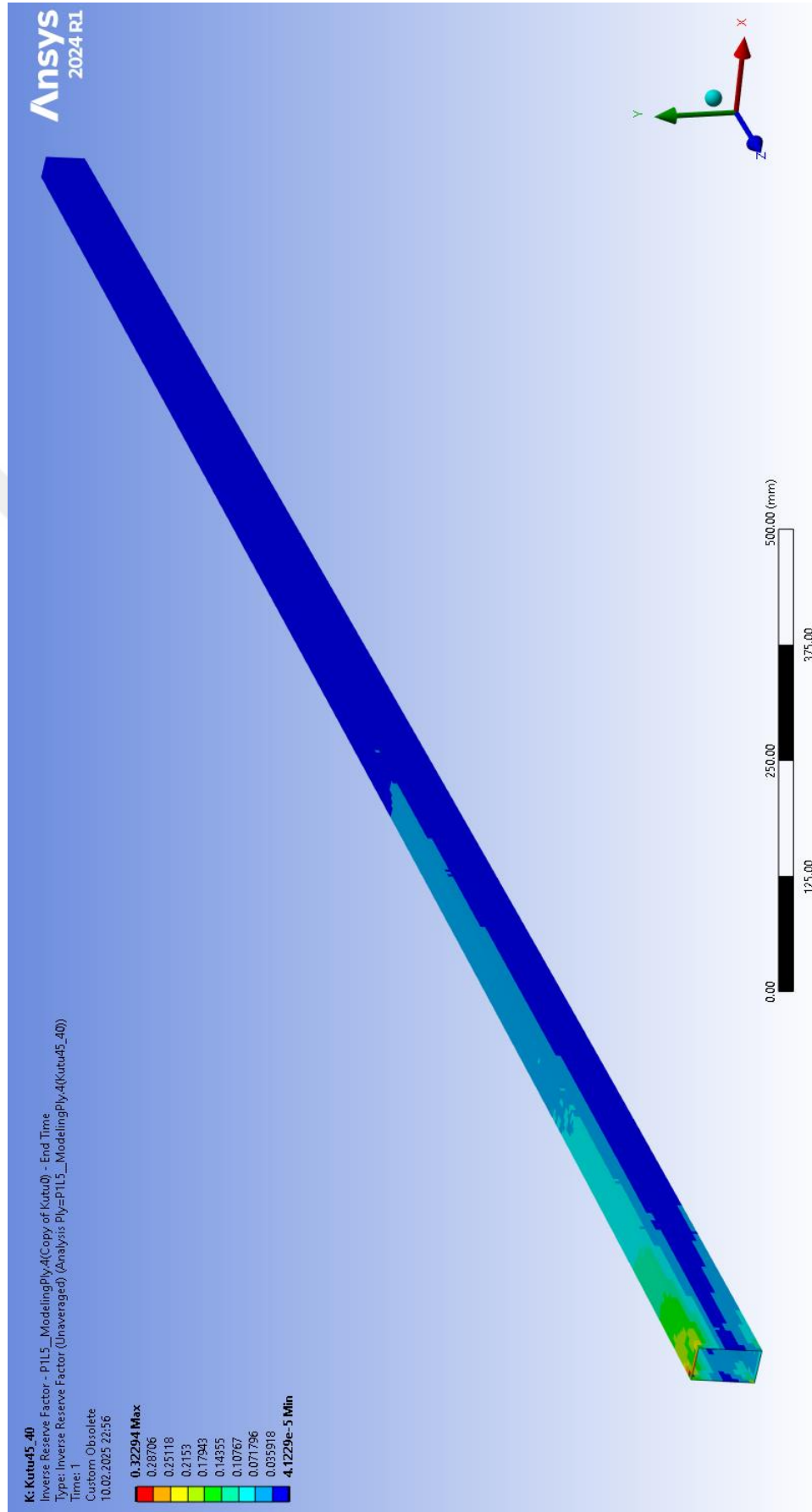
EK-17 2. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



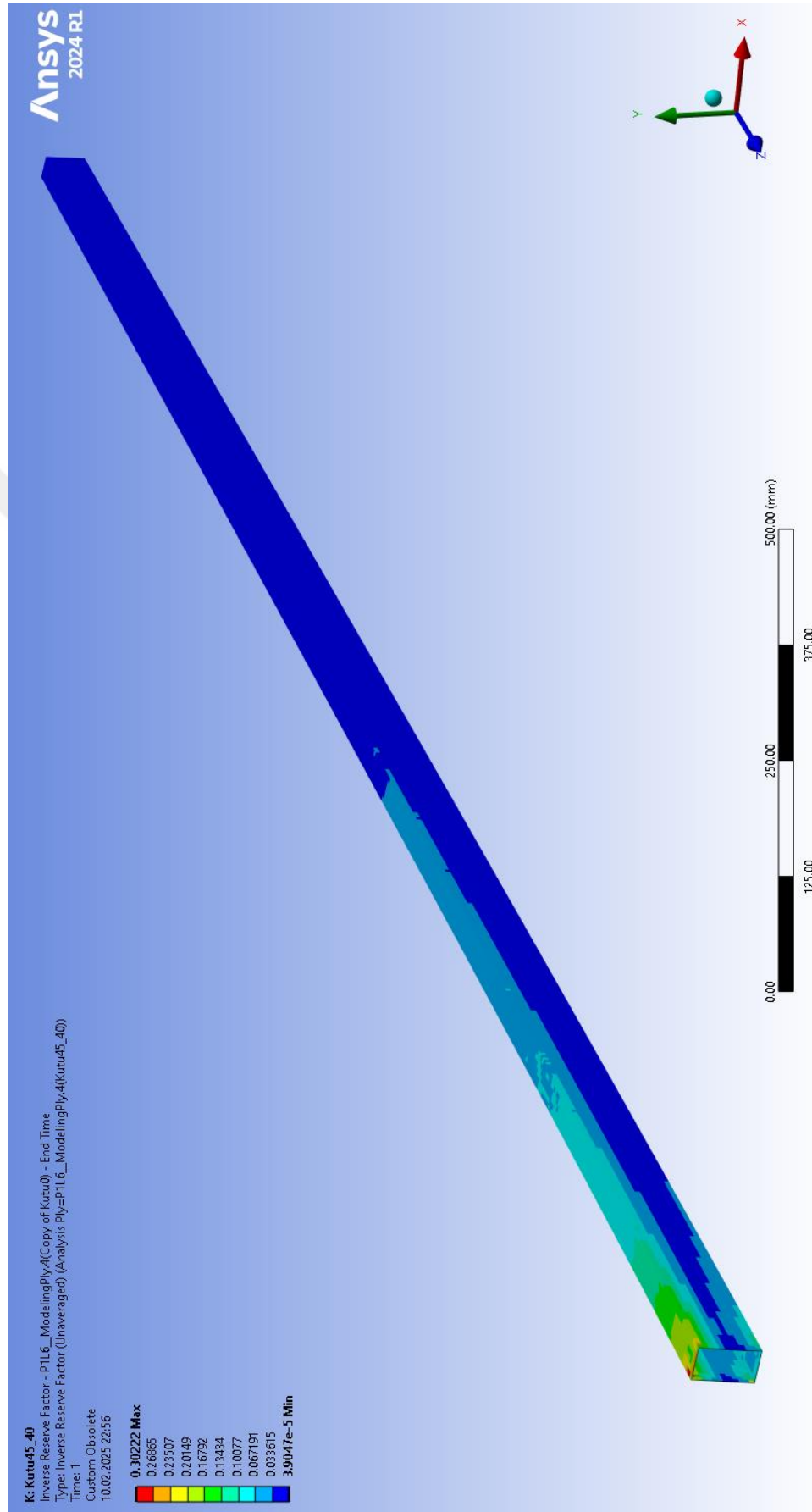
EK-18 2. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



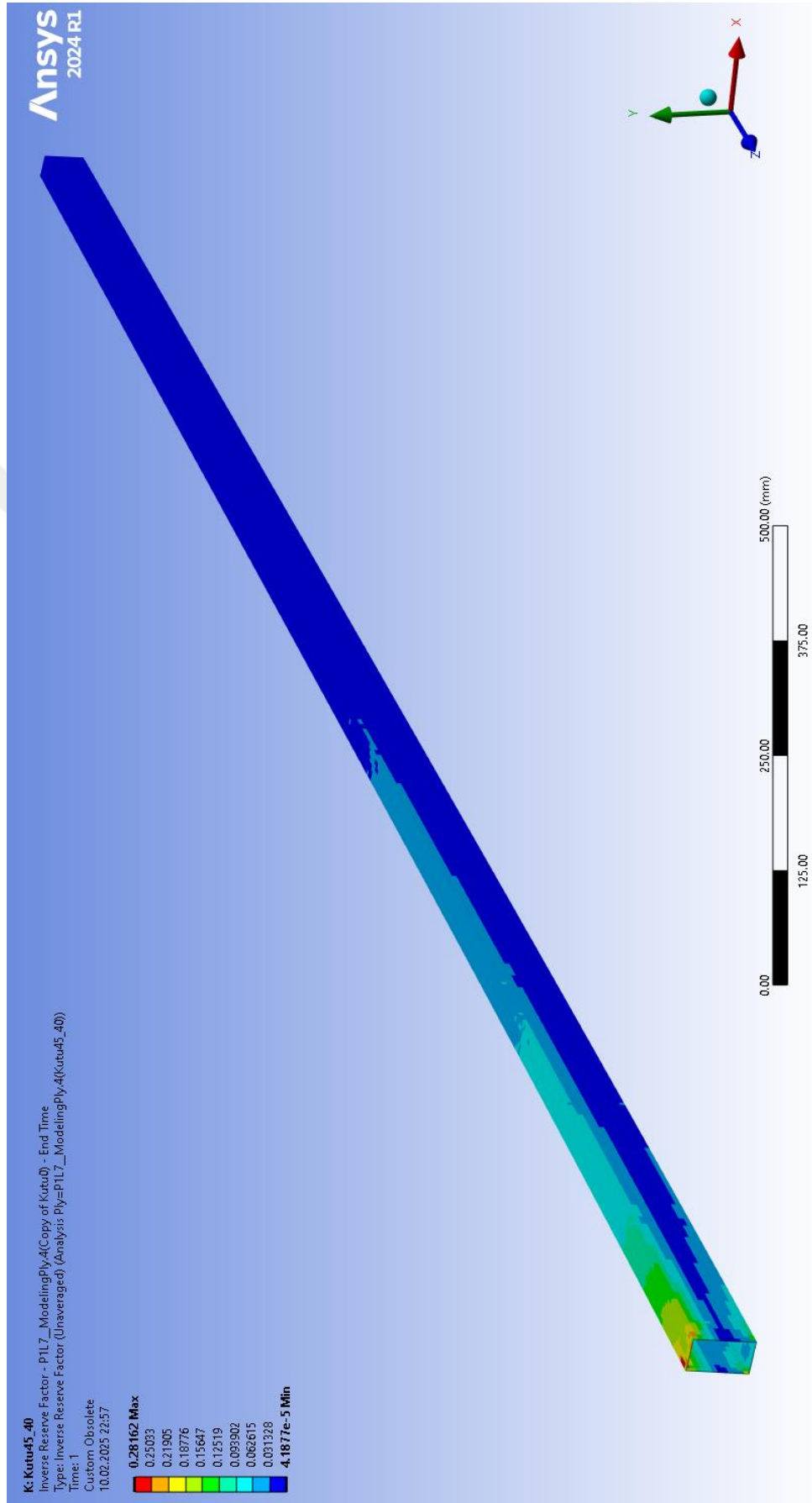
EK-19 2. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



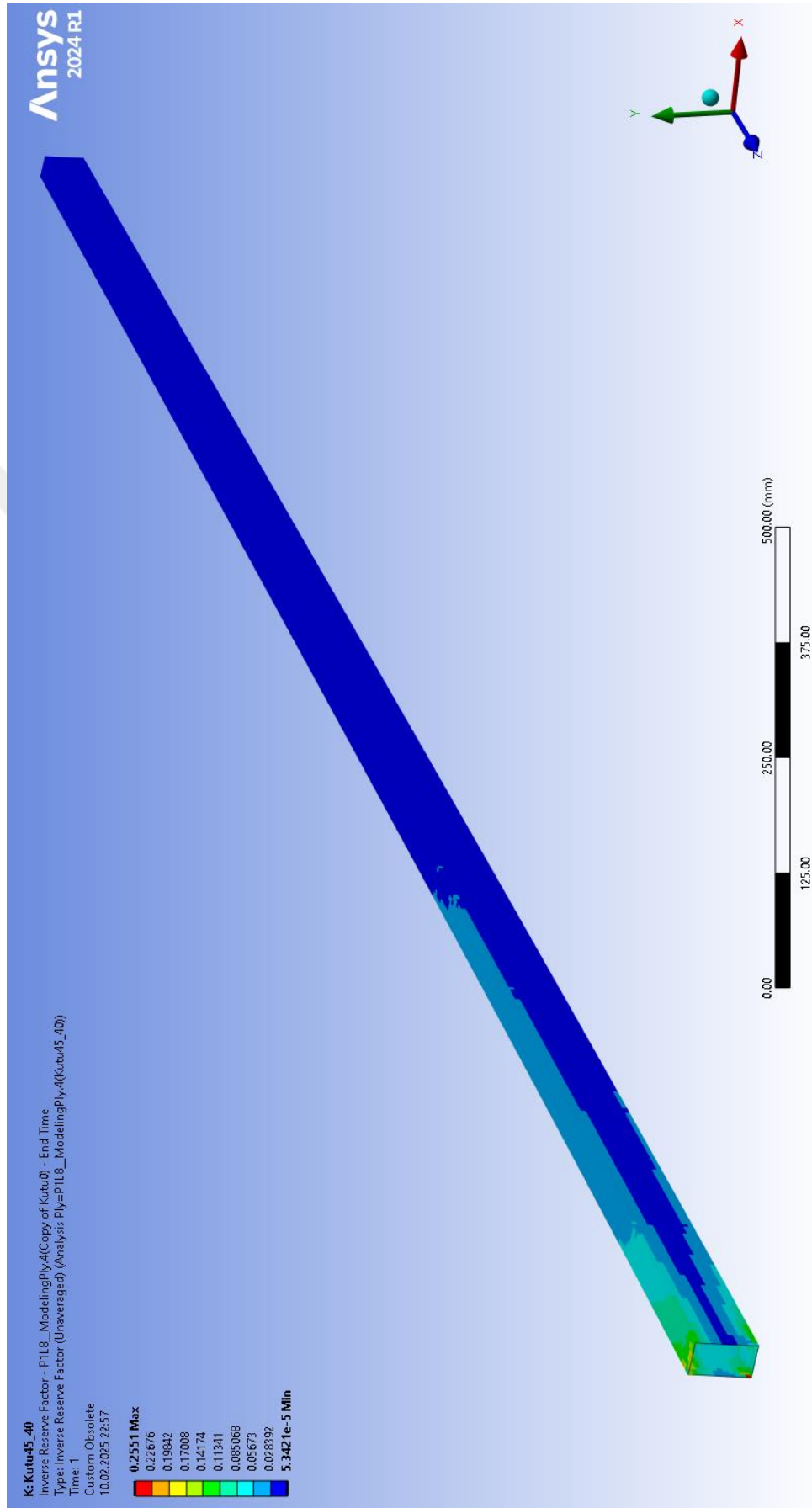
EK-20 2. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



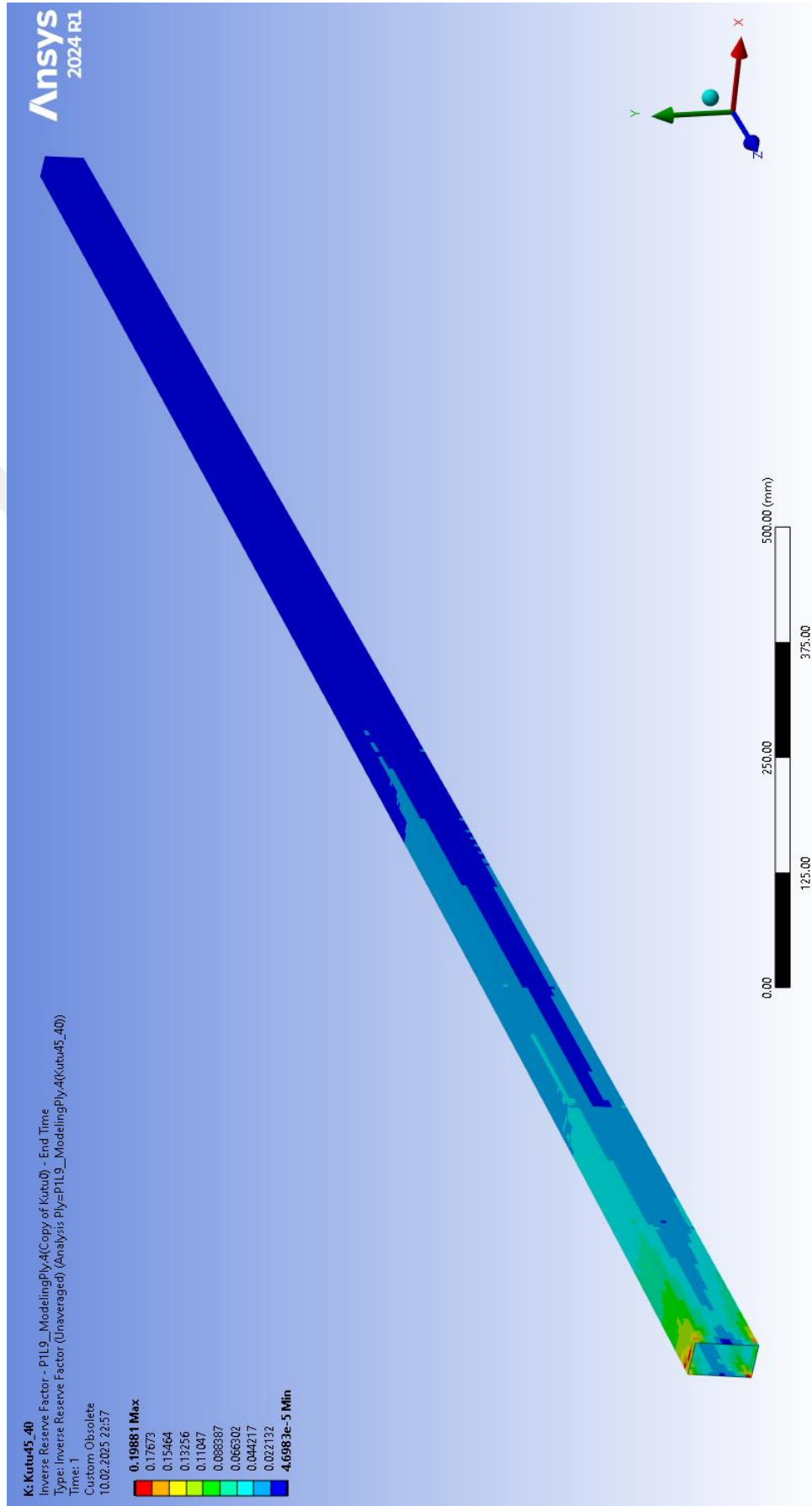
EK-21 2. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



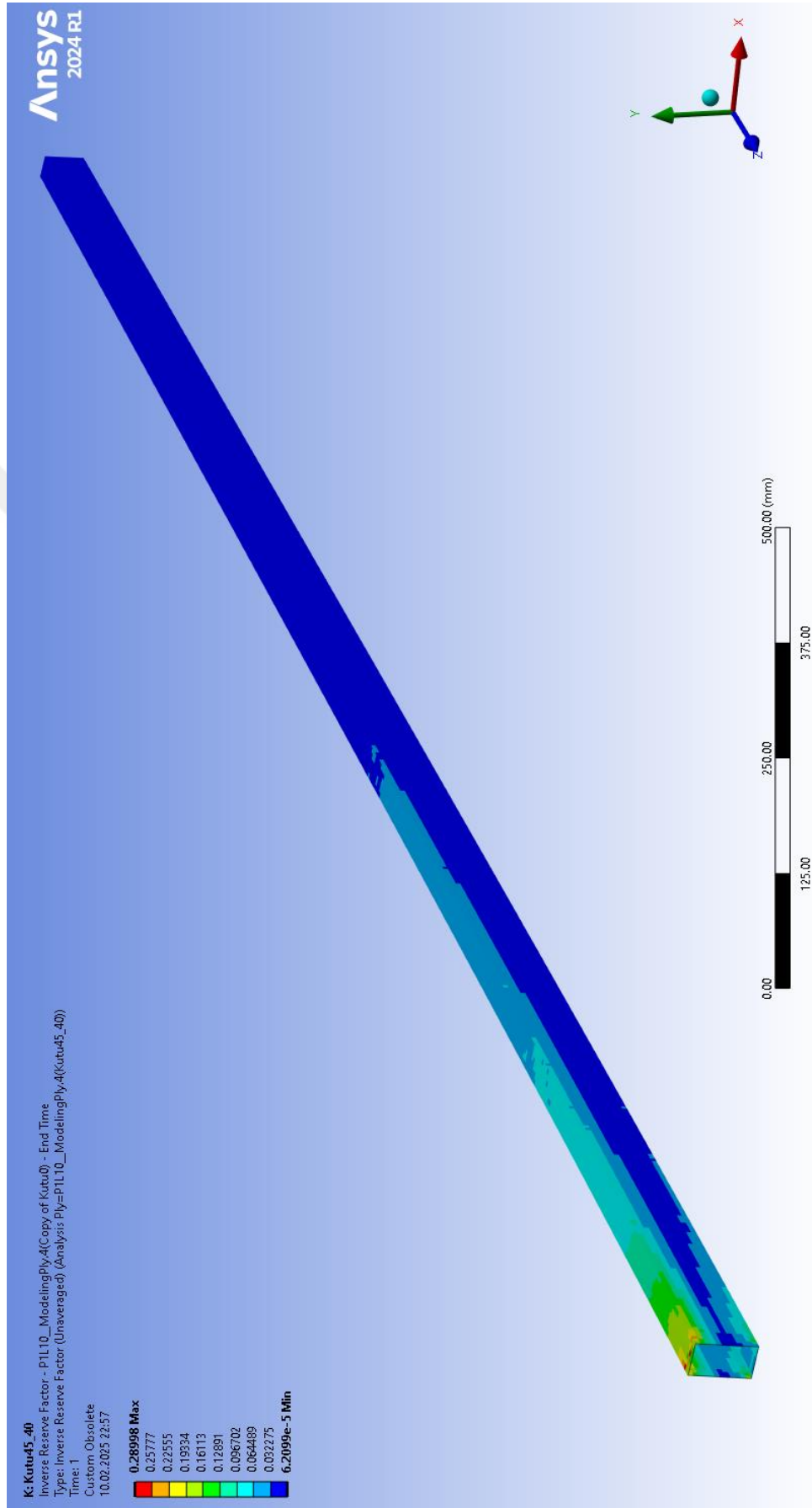
EK-22 2. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



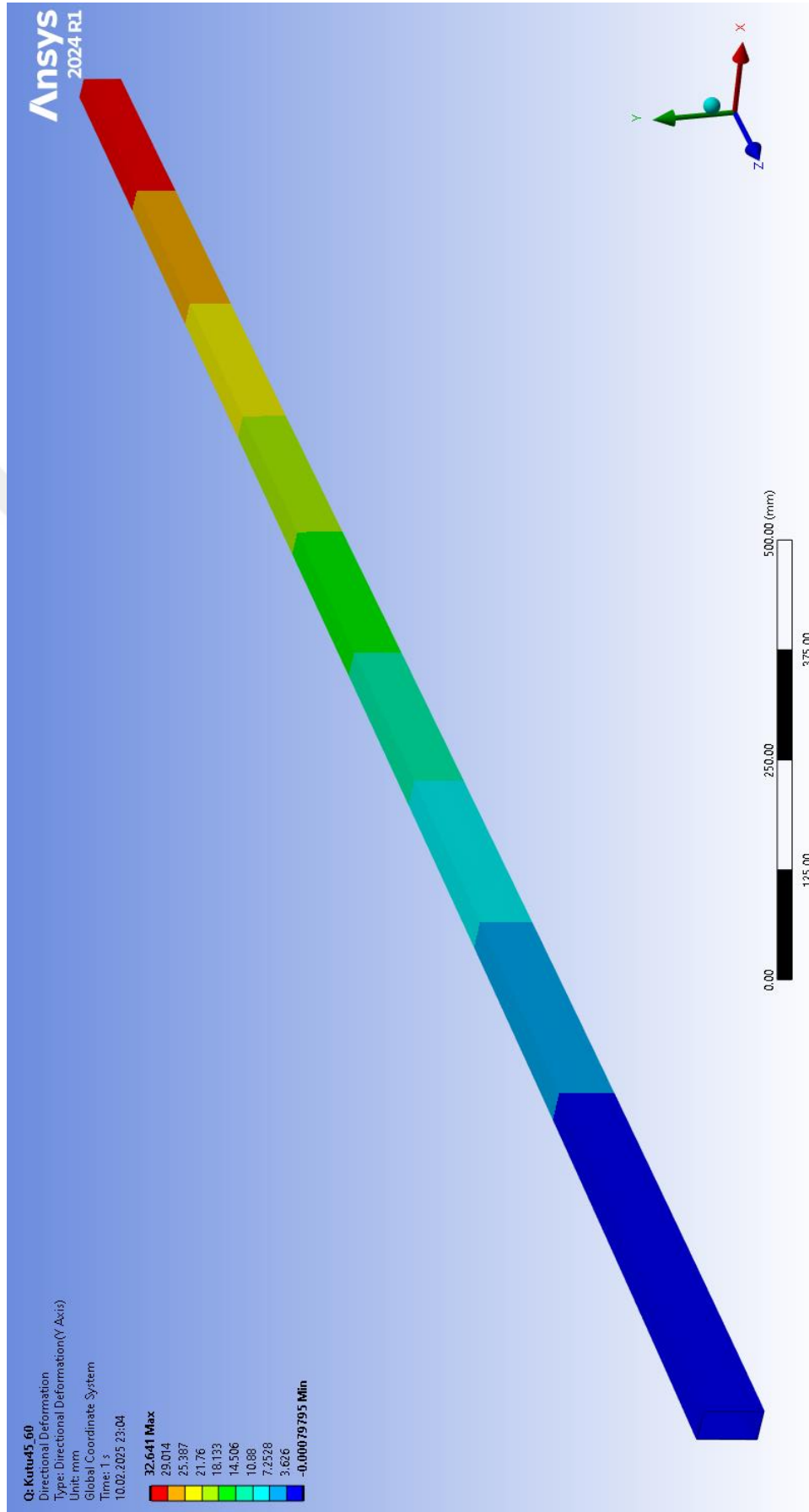
EK-23 2. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



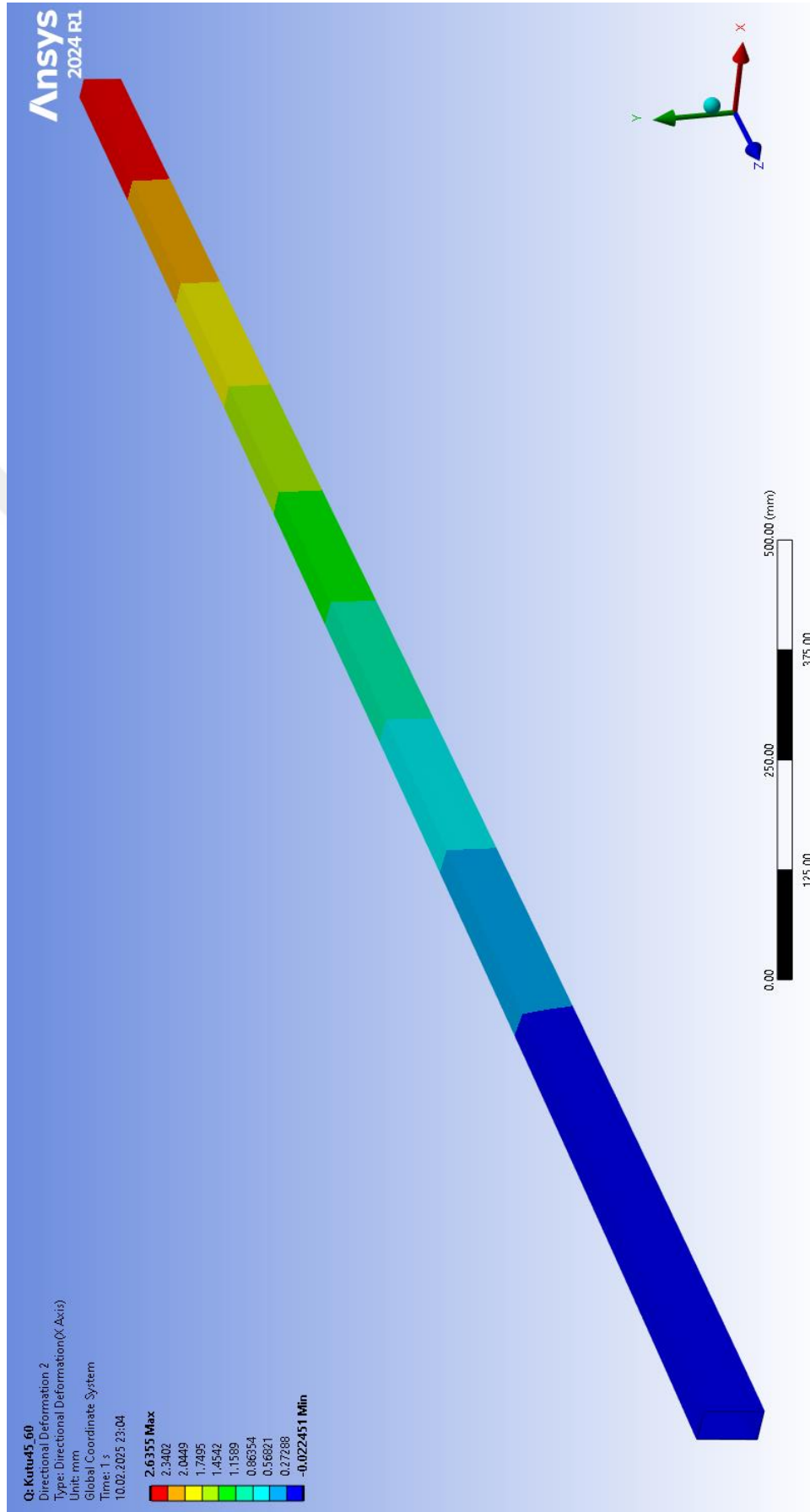
EK-24 2. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



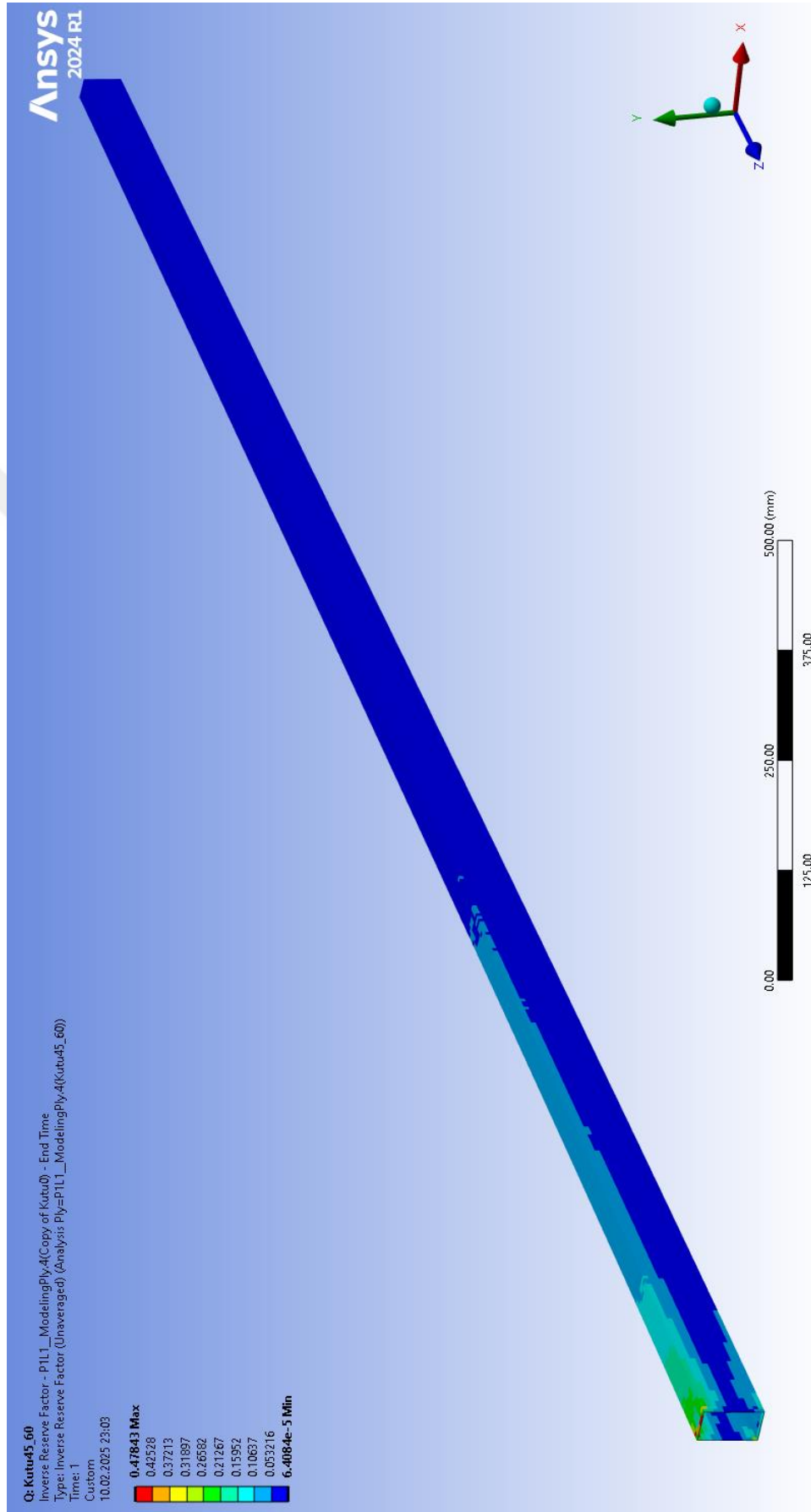
EK-25 3. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



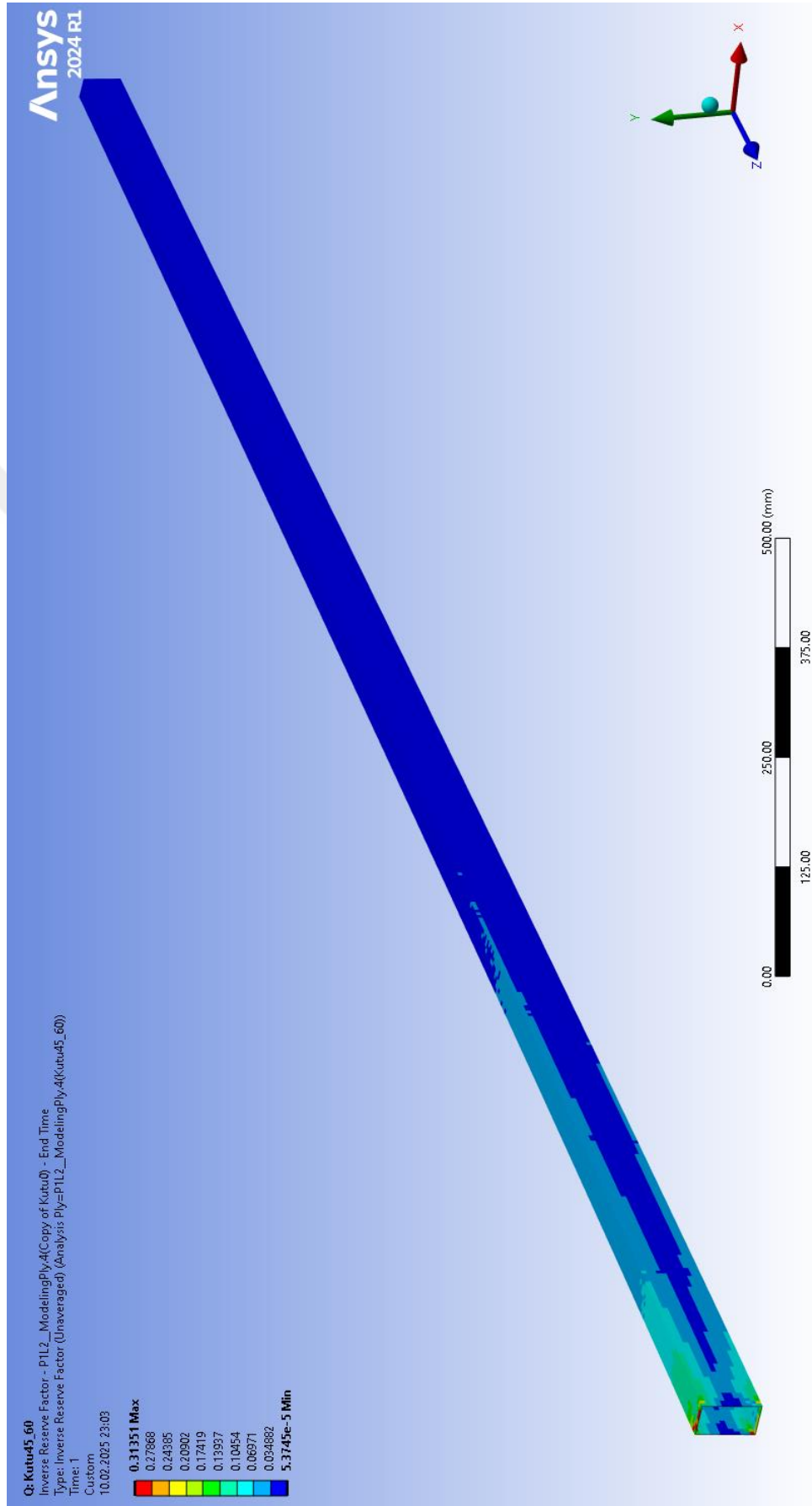
EK-26 3. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



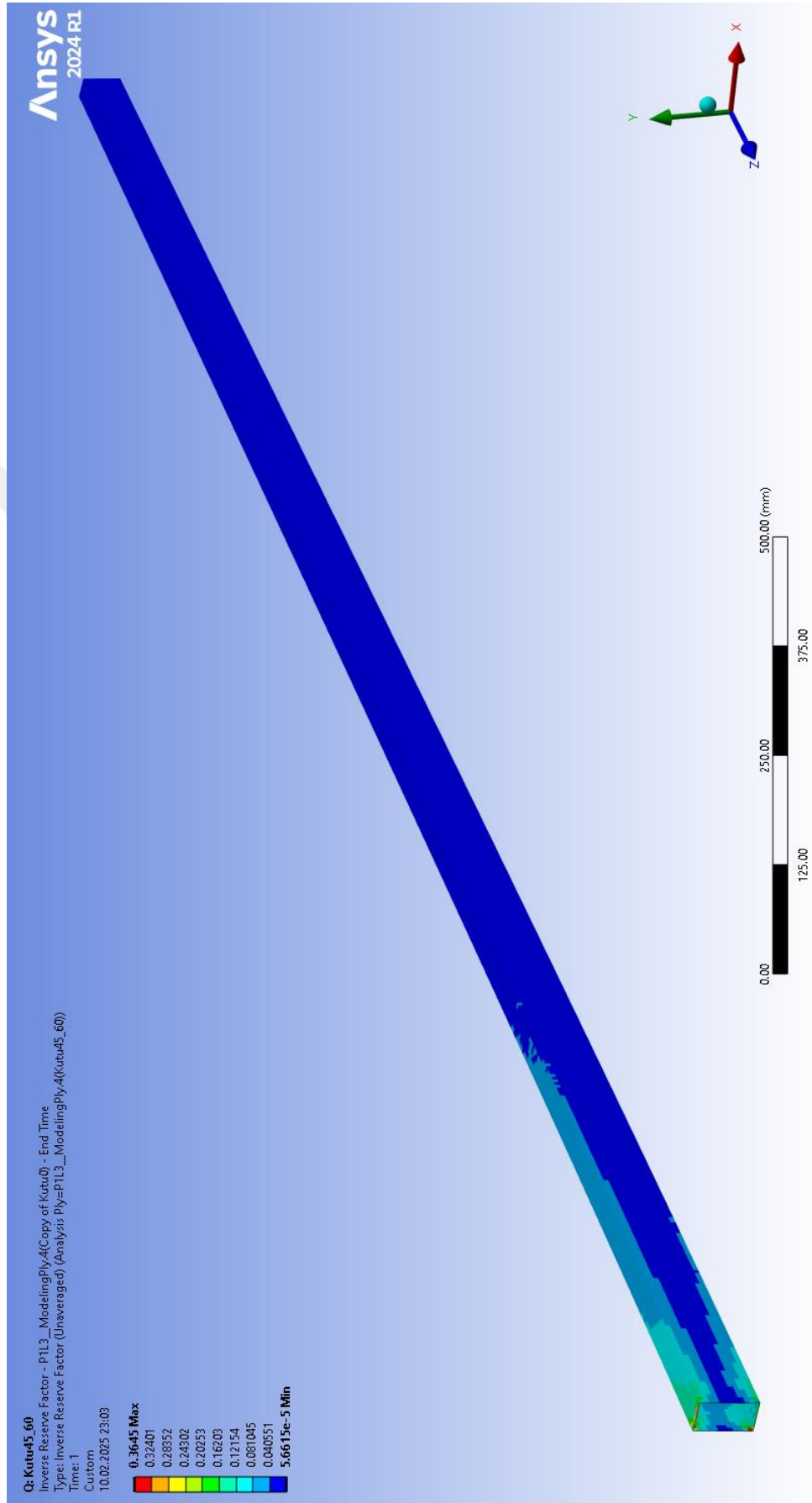
EK-27 3. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



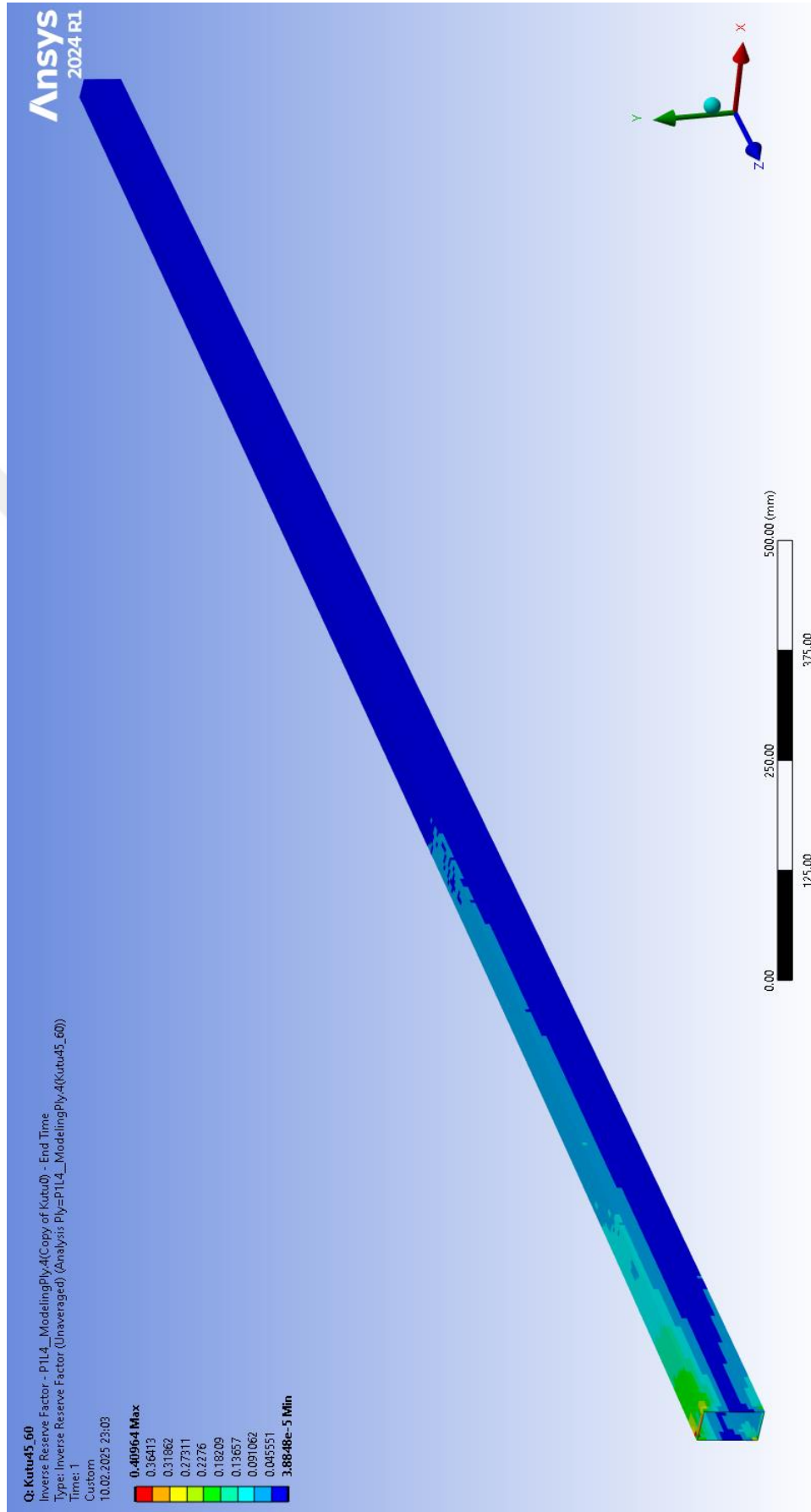
EK-28 3. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



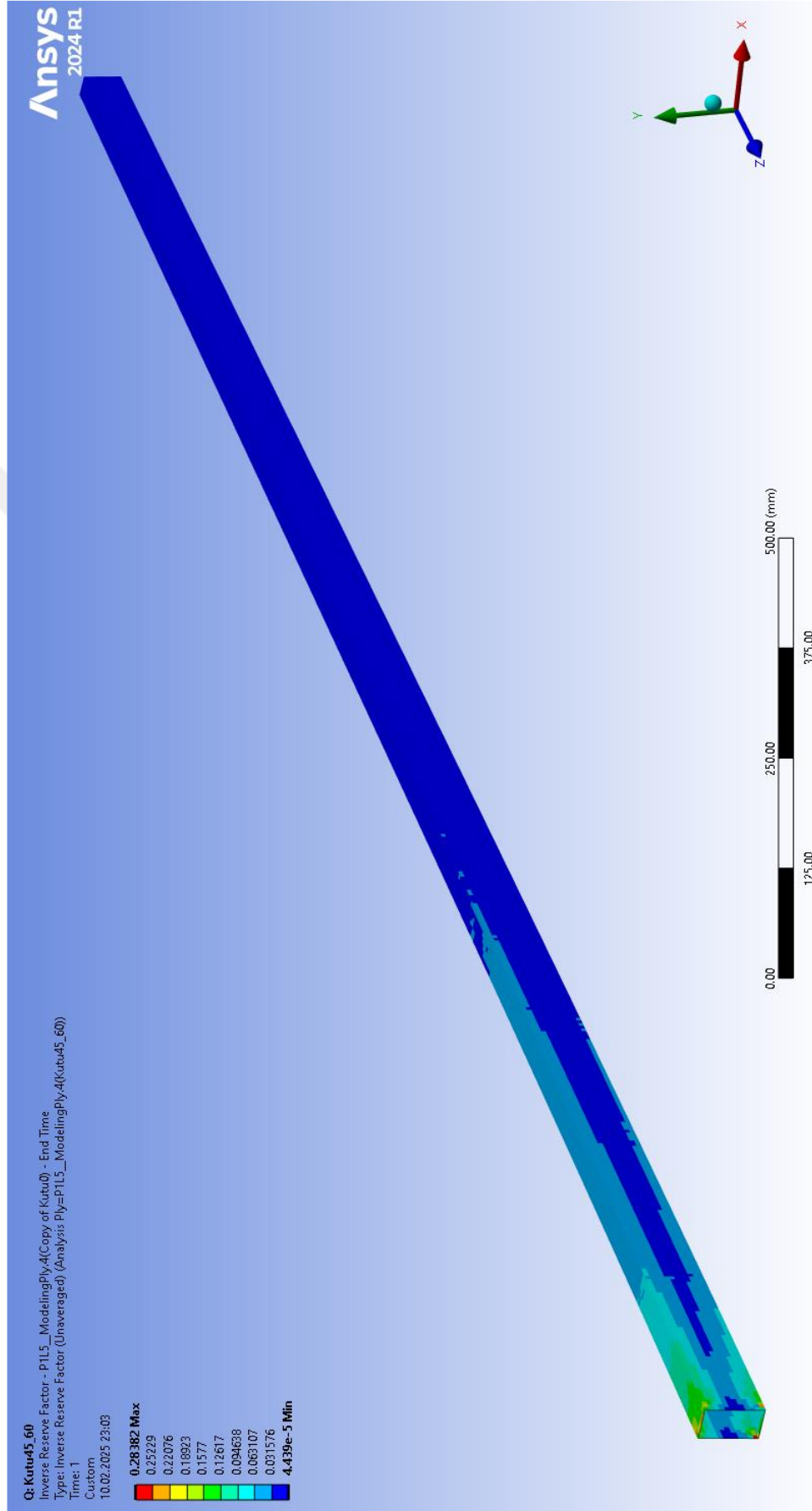
EK-29 3. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



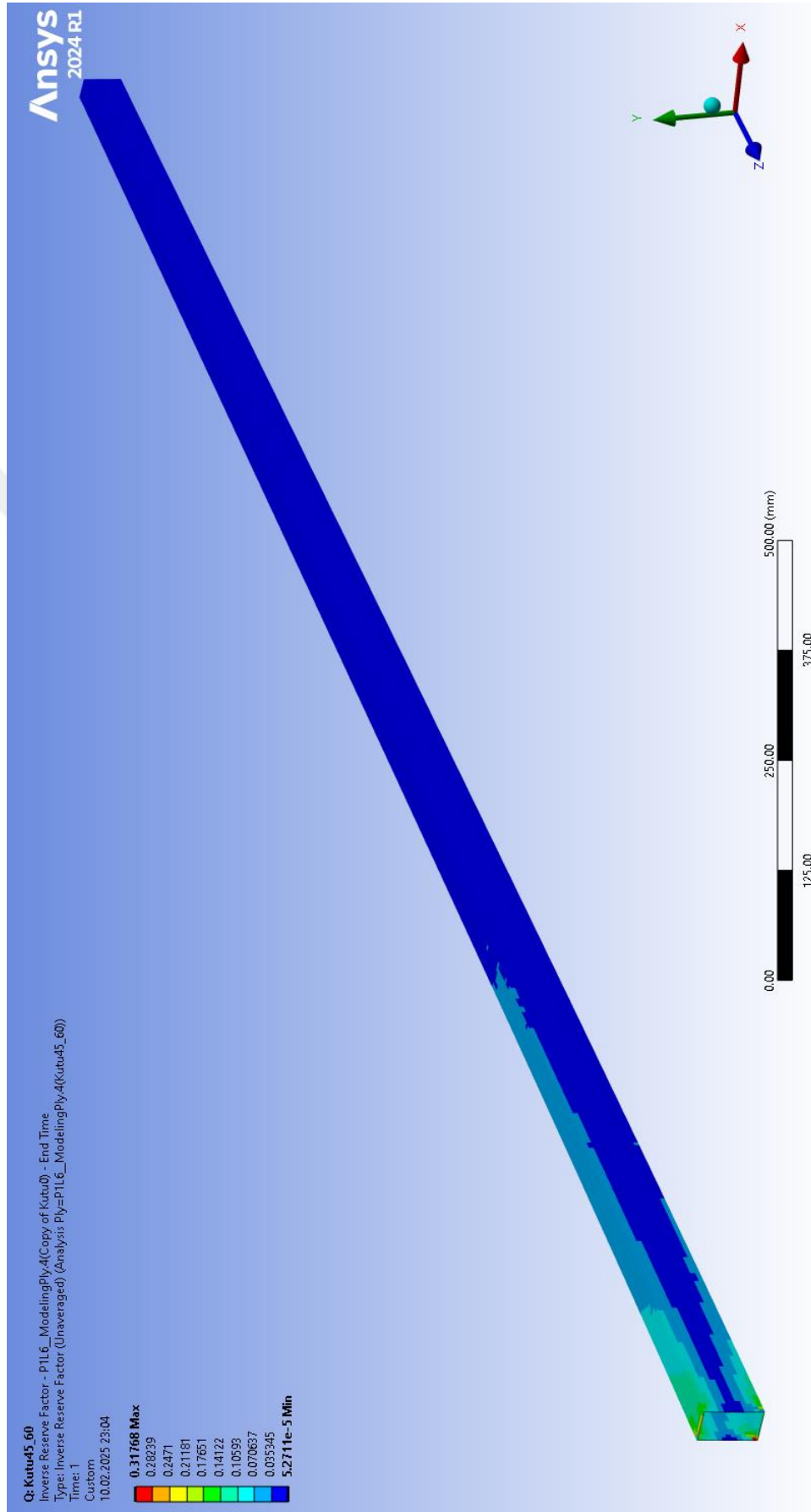
EK-30 3. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



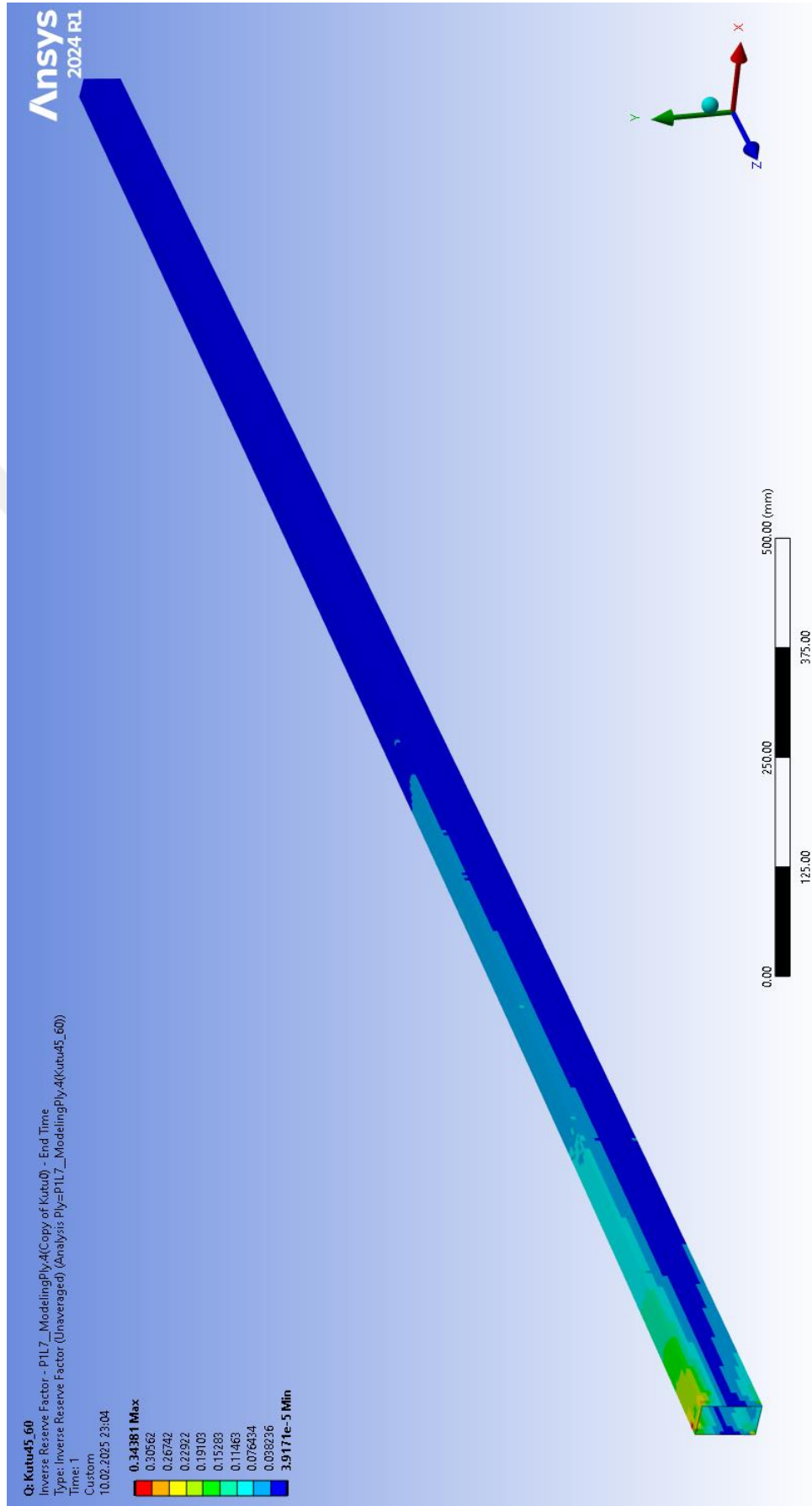
EK-31 3. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



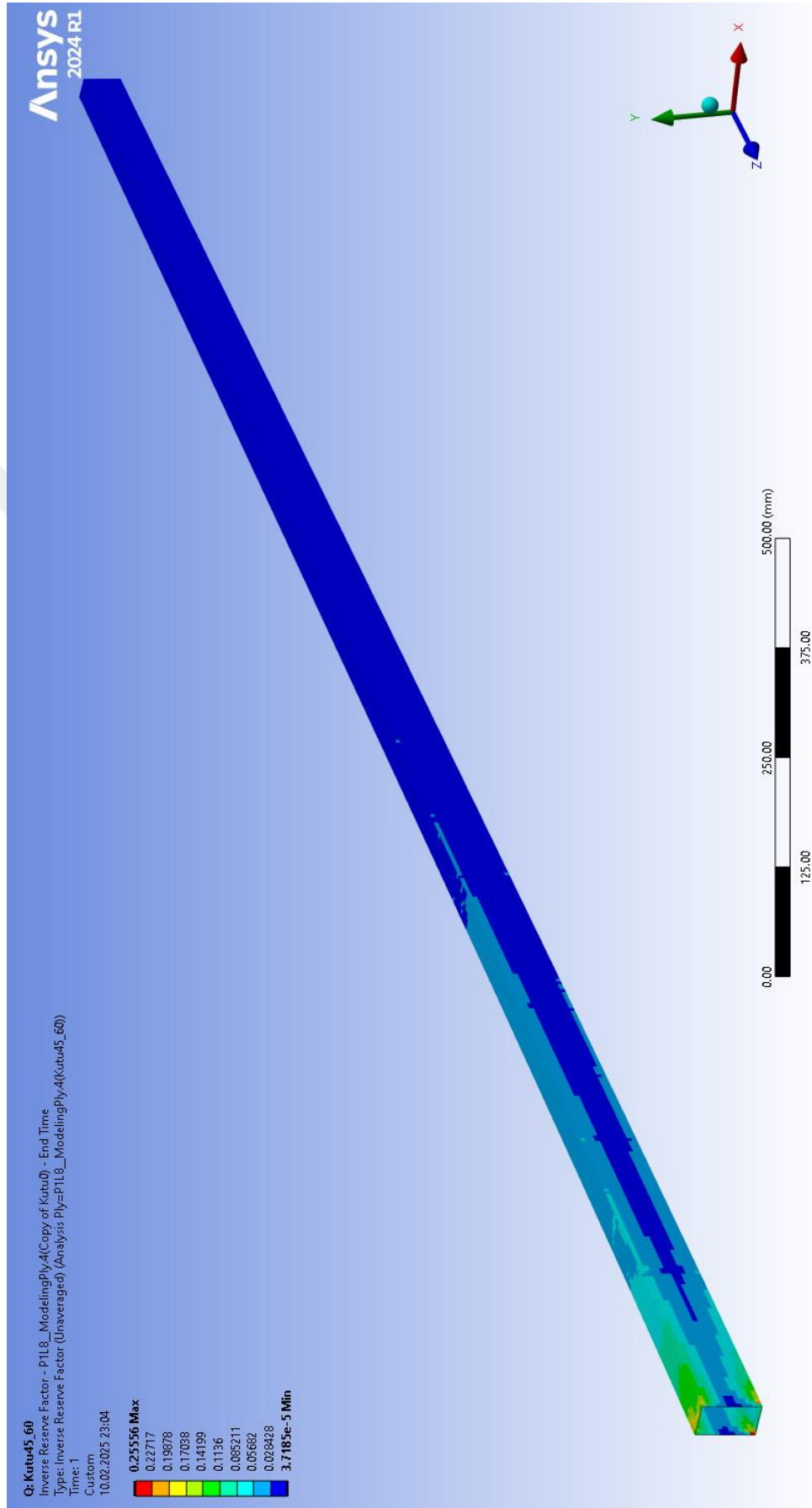
EK-32 3. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



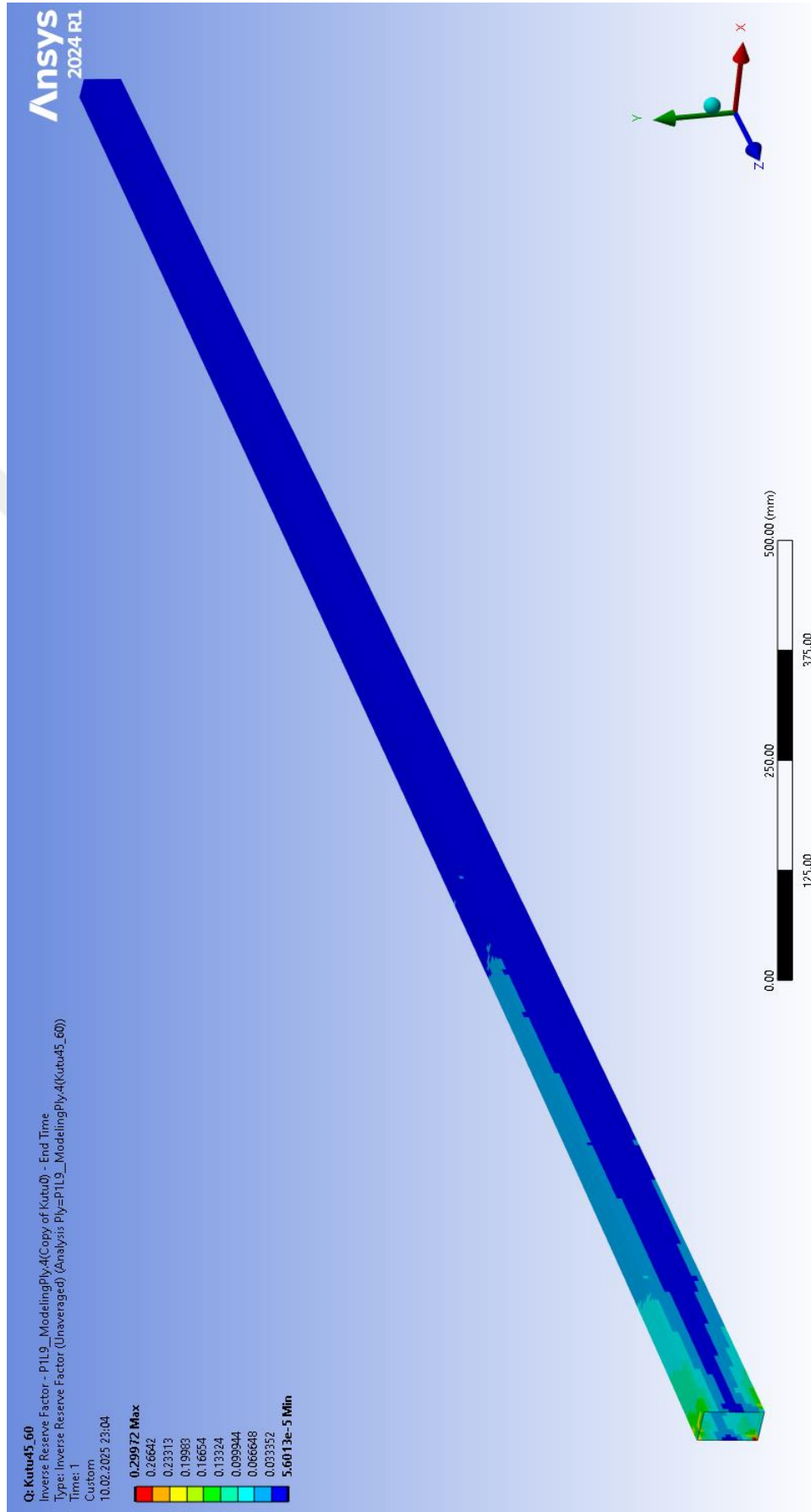
EK-33 3. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



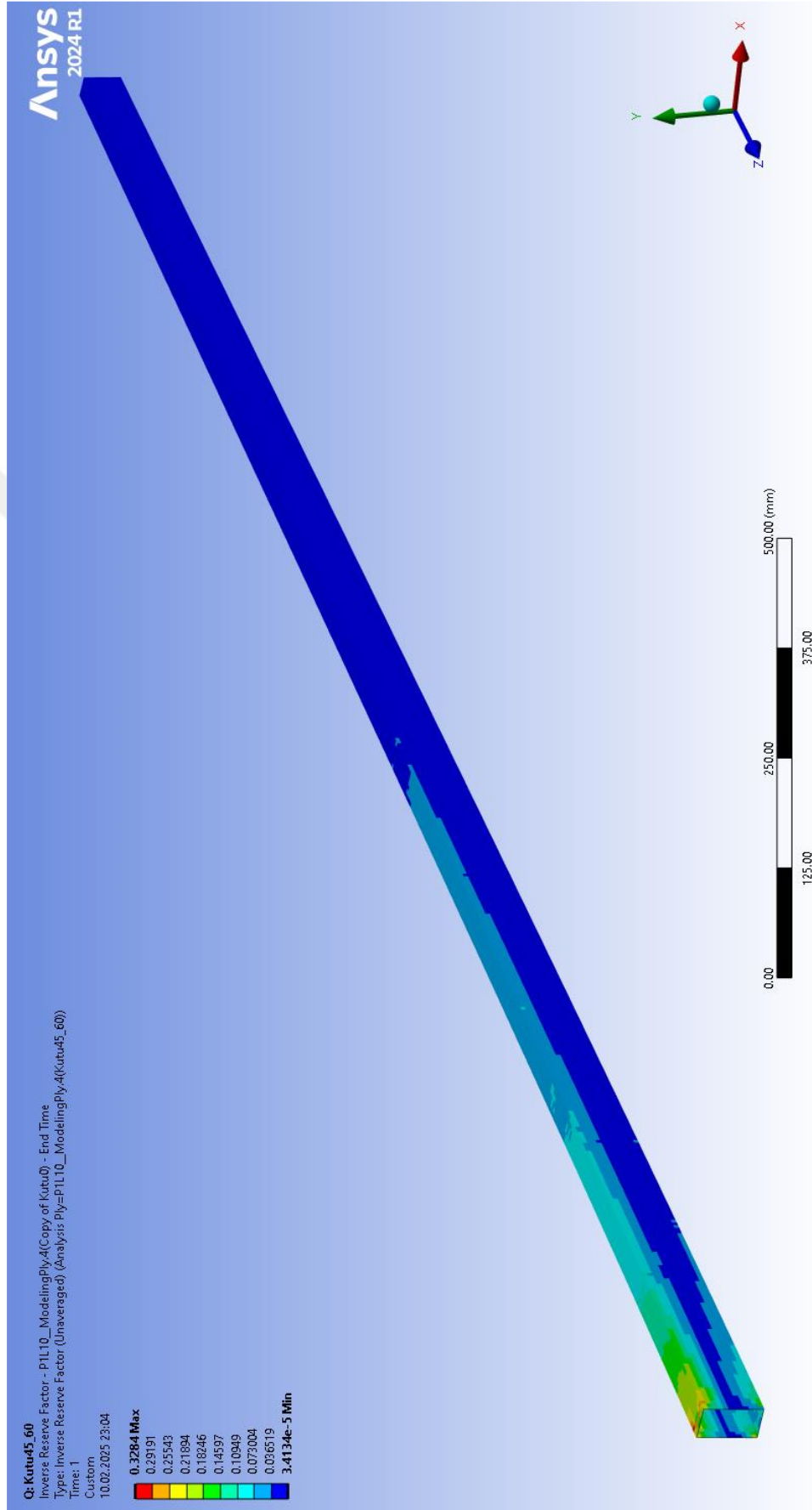
EK-34 3. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



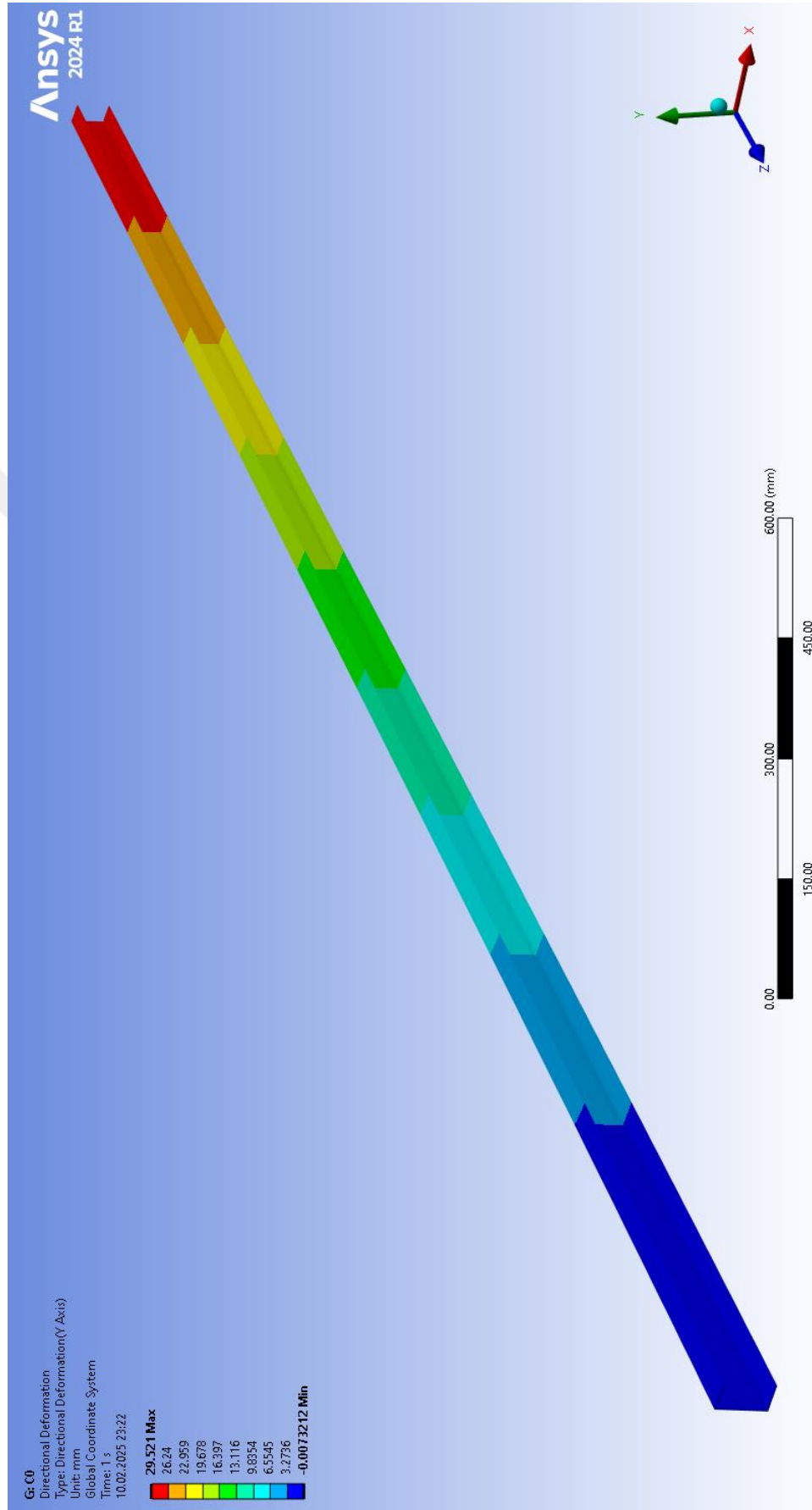
EK-35 3. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



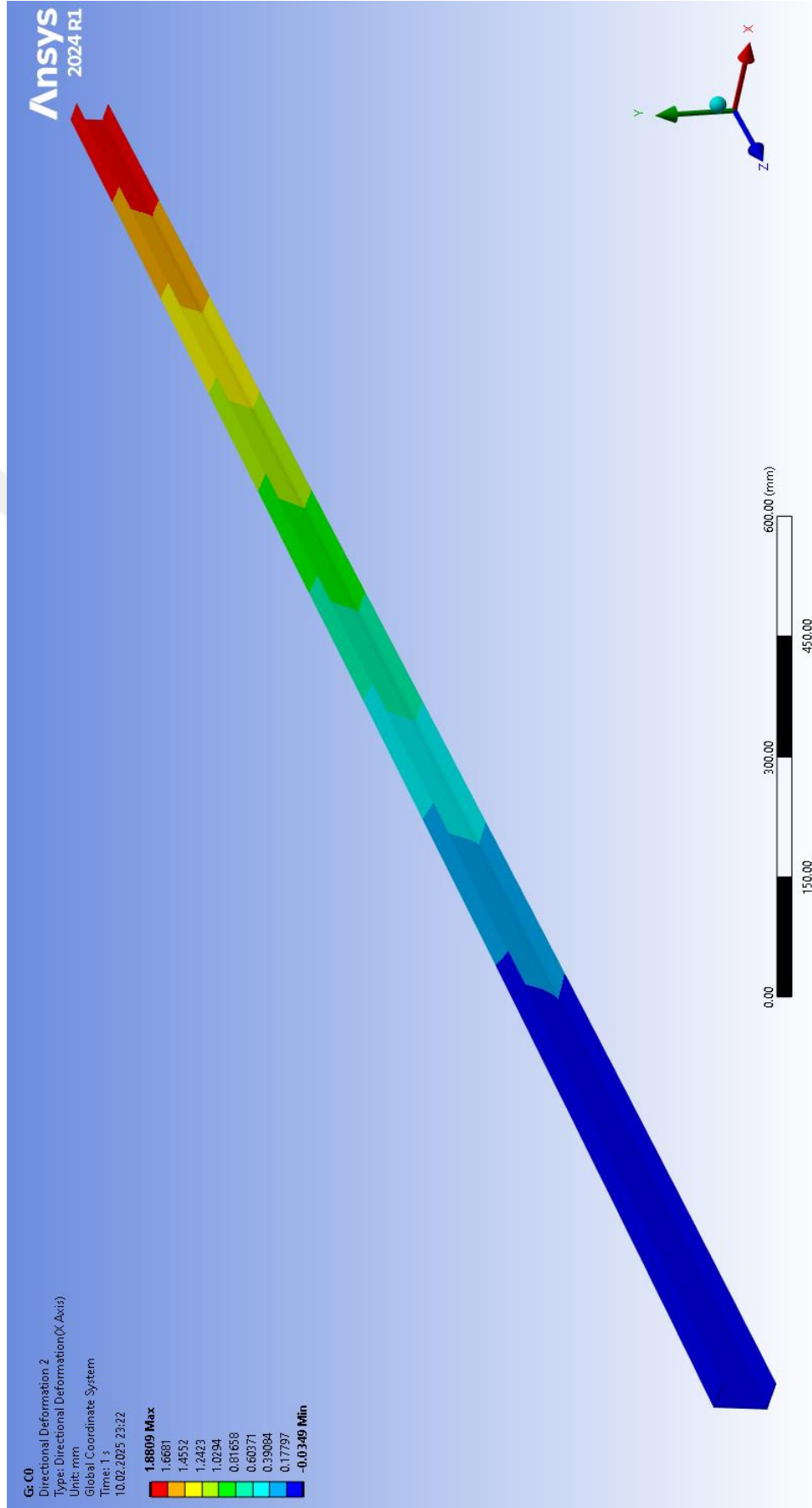
EK-36 3. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



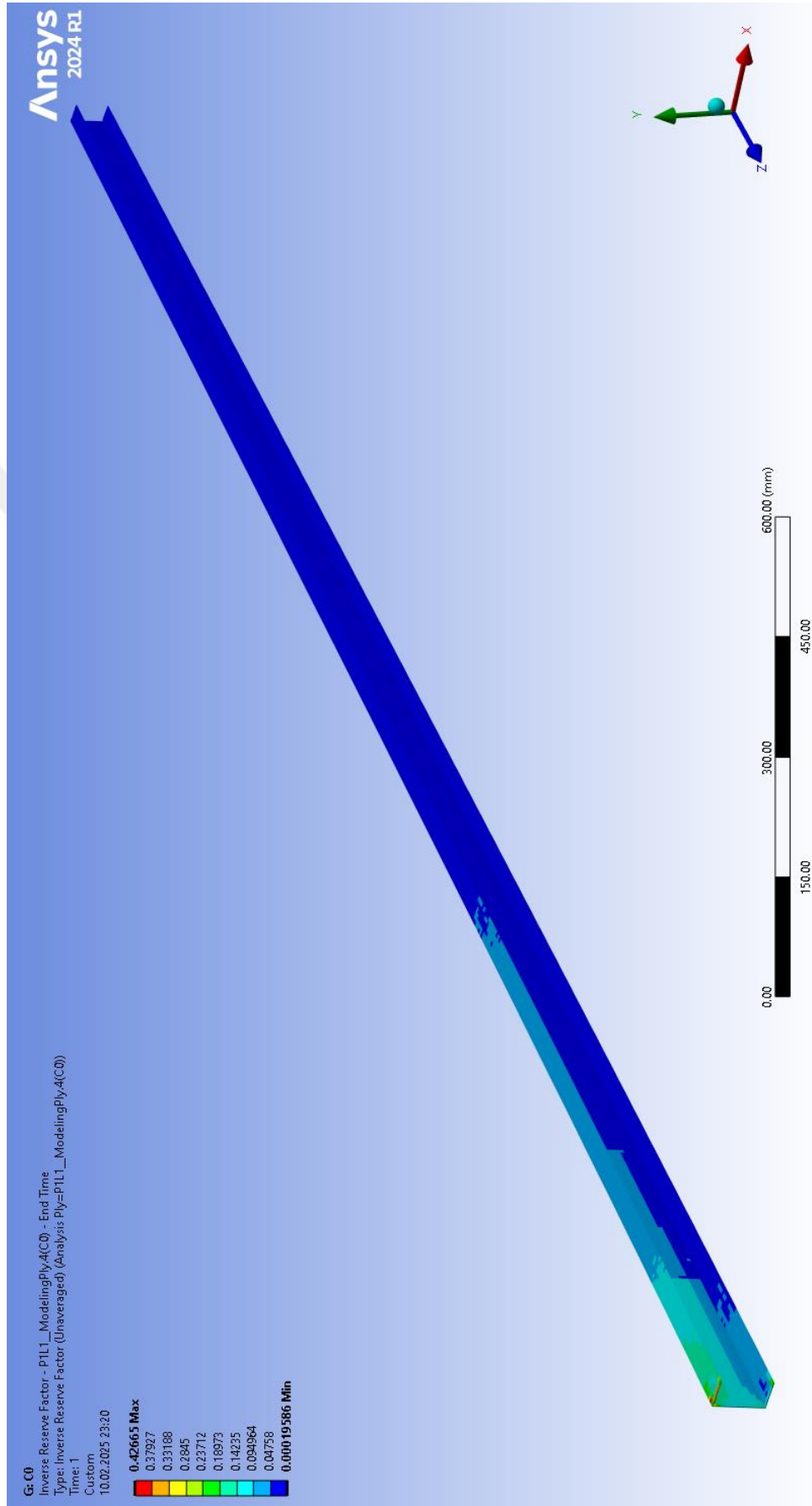
EK-37 4. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



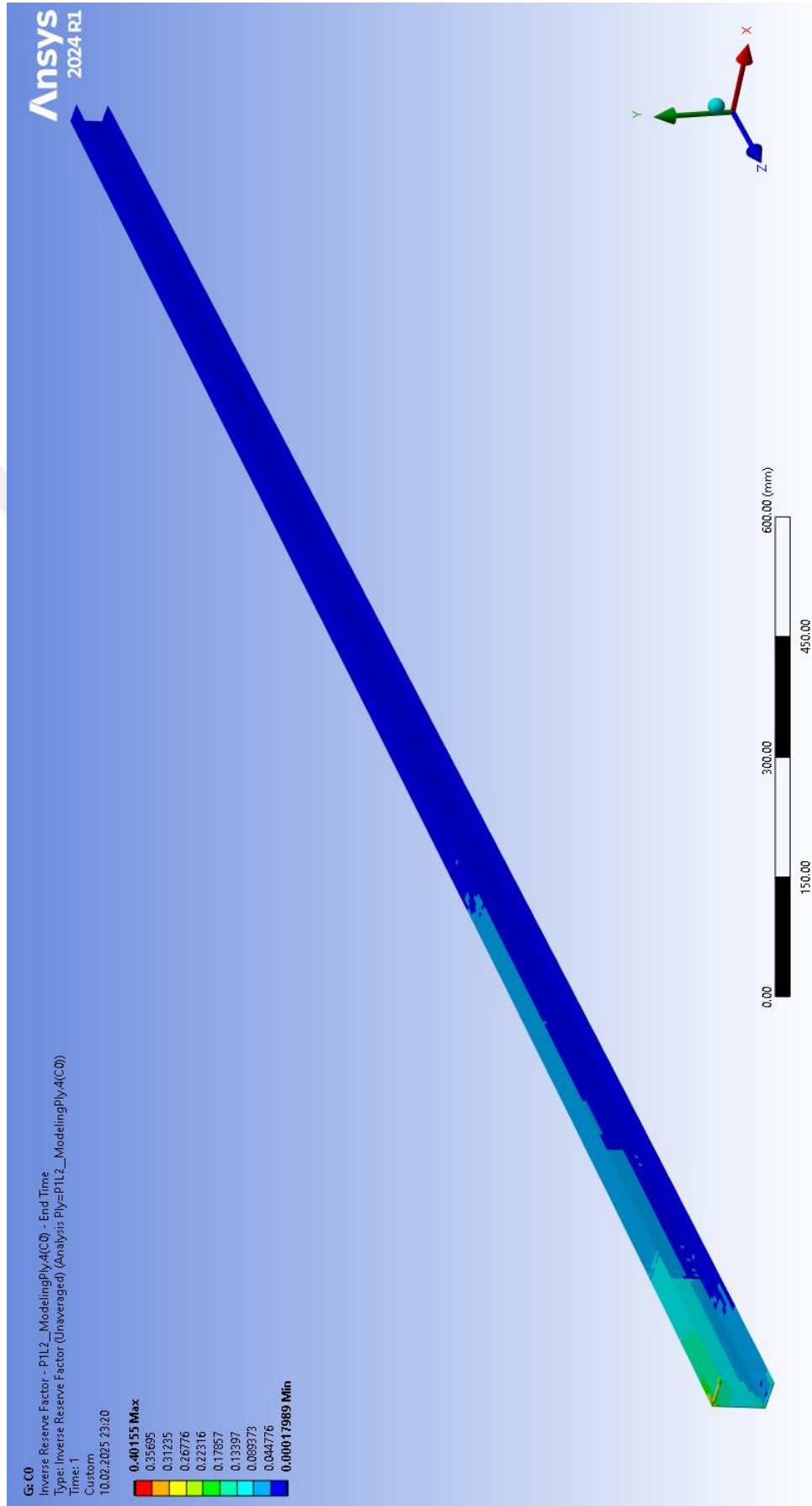
EK-38 4. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



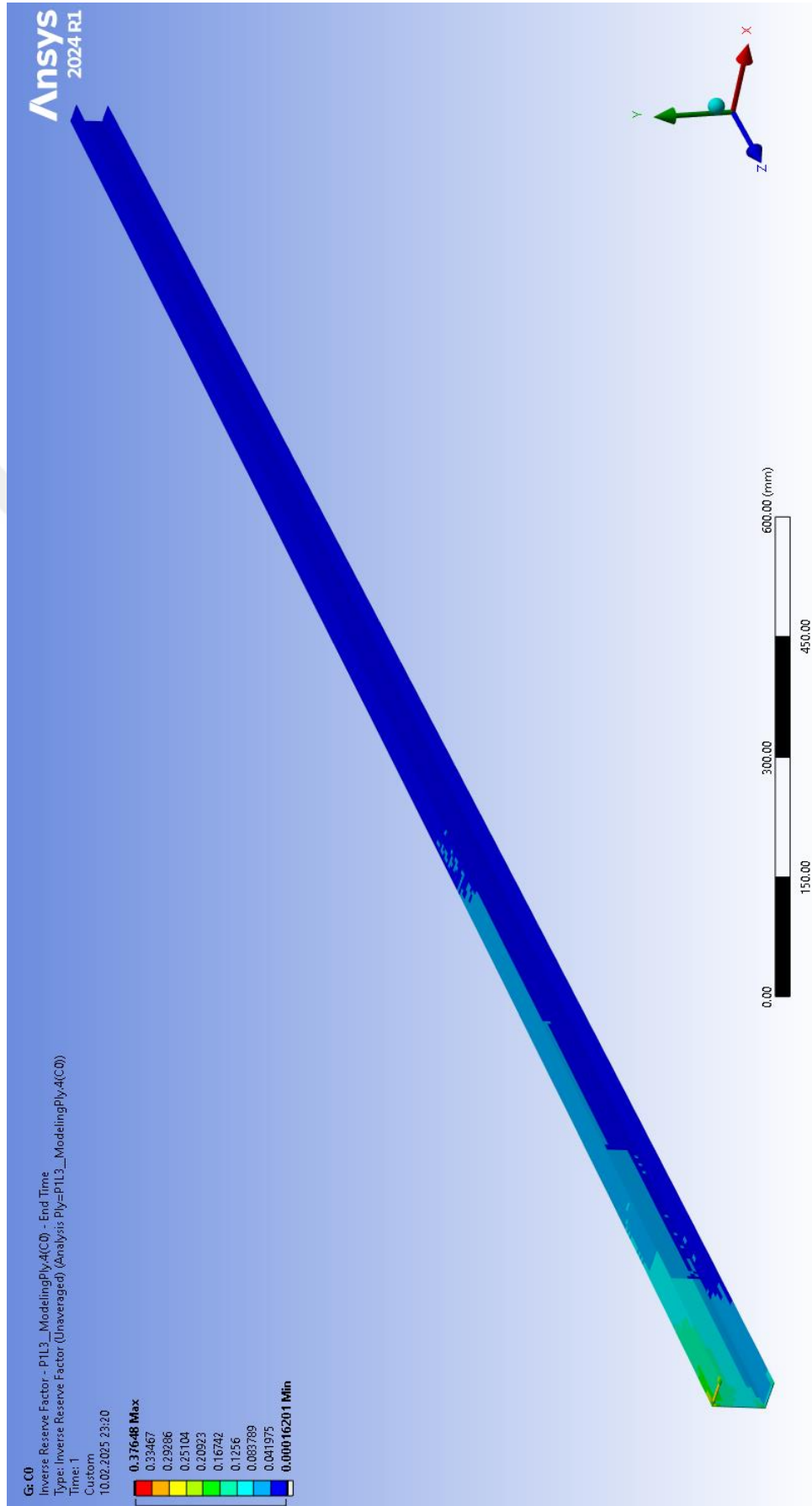
EK-39 4. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



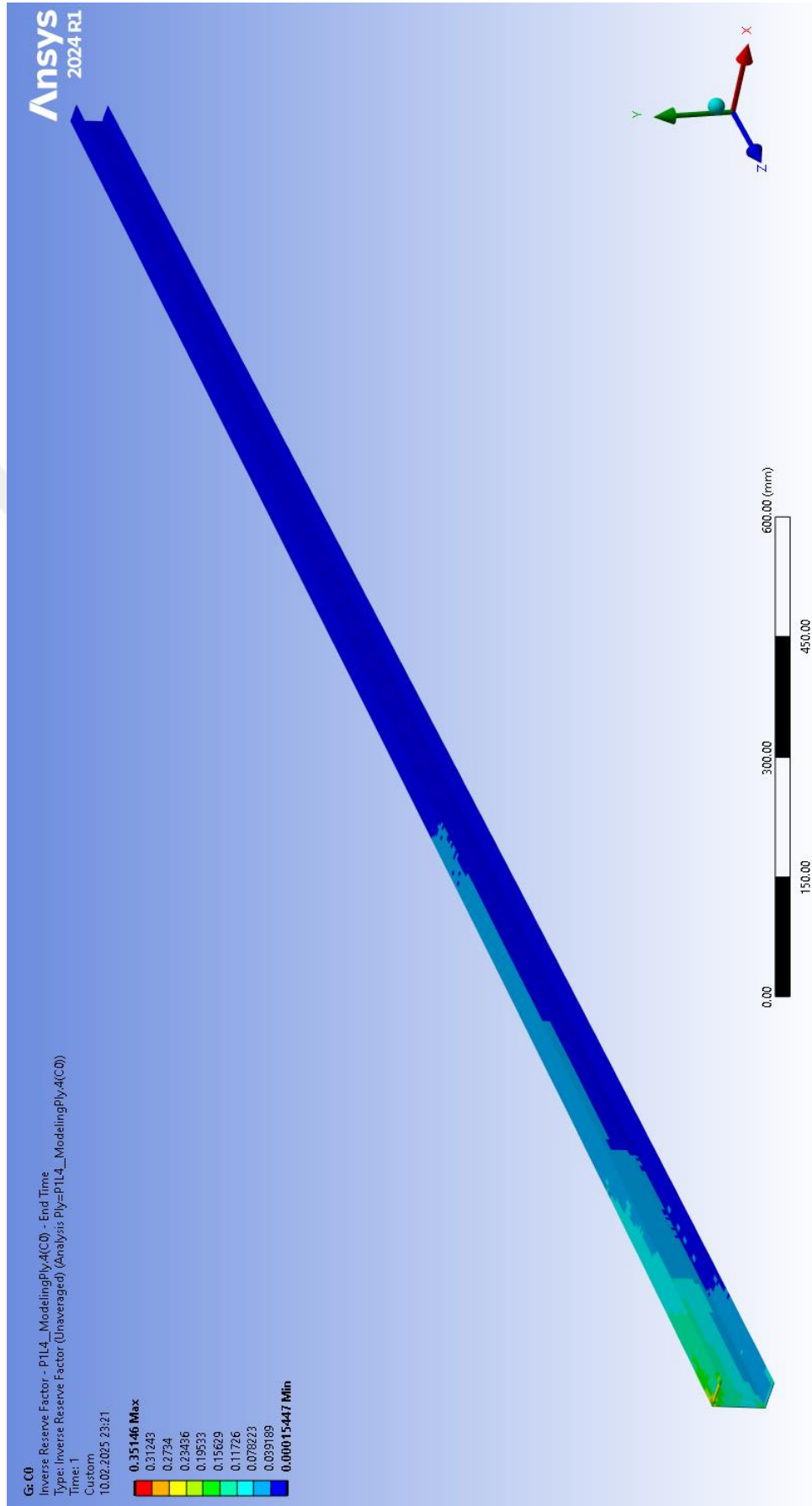
EK-40 4. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



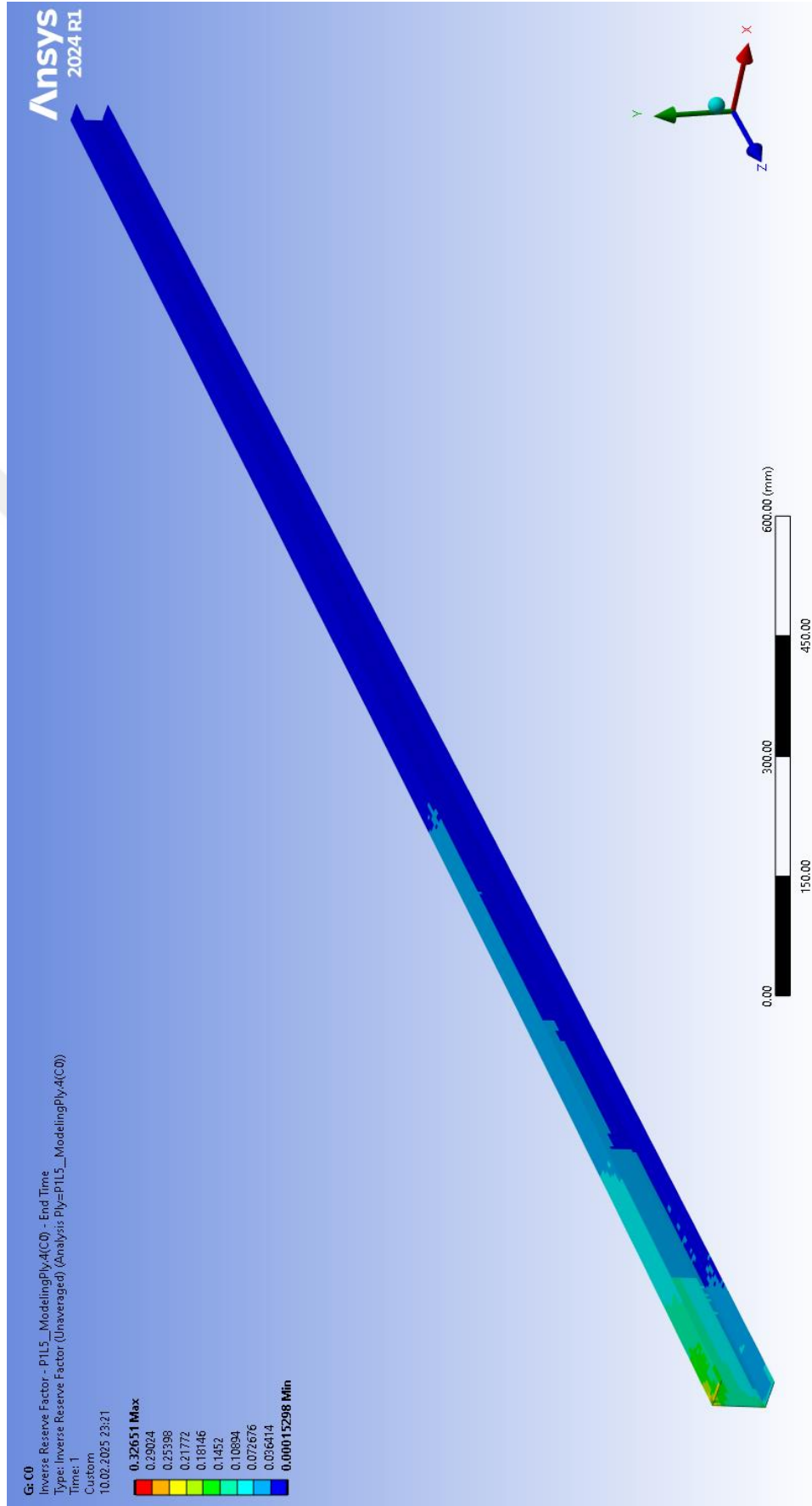
EK-41 4. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



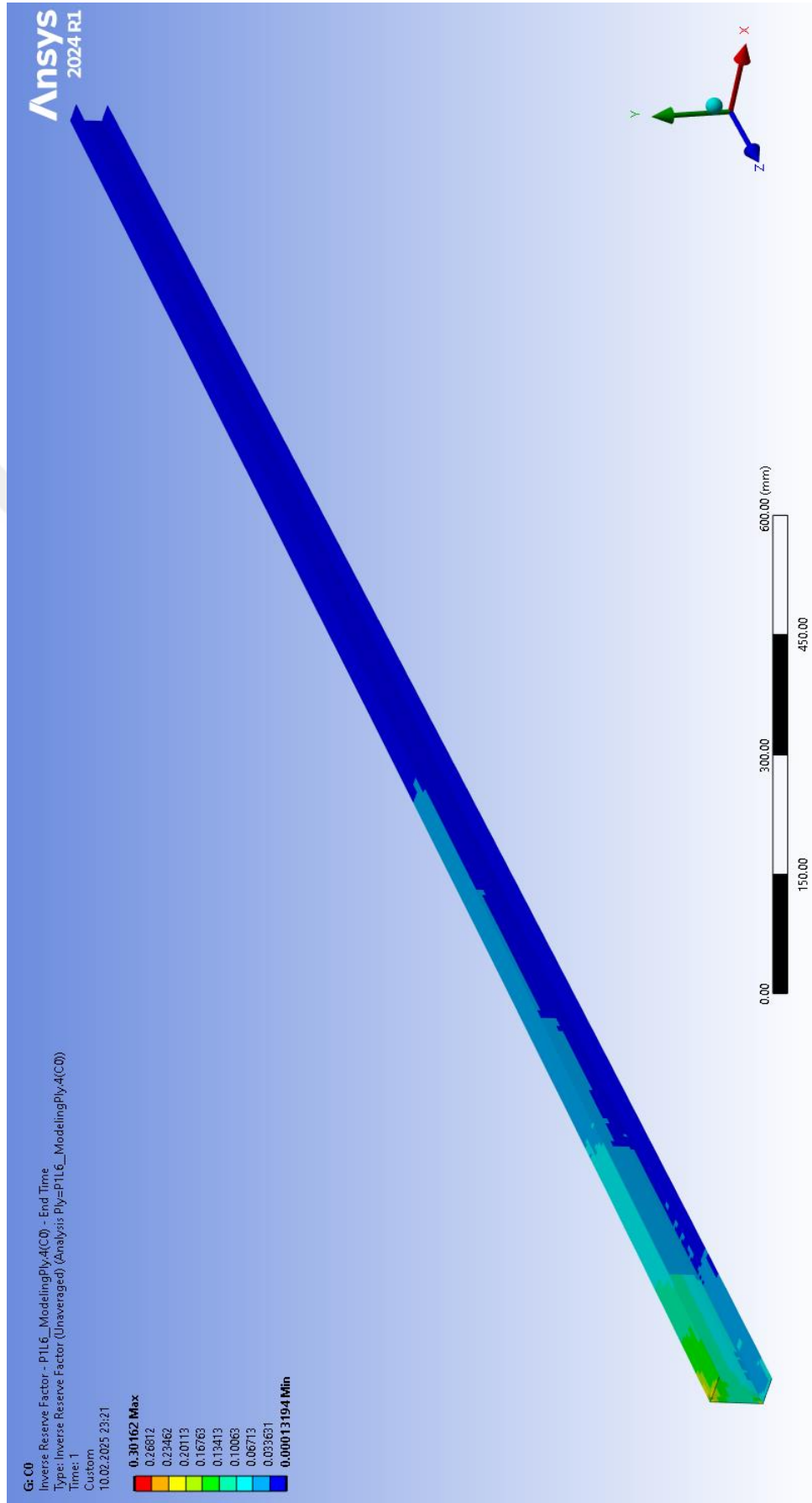
EK-42 4. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



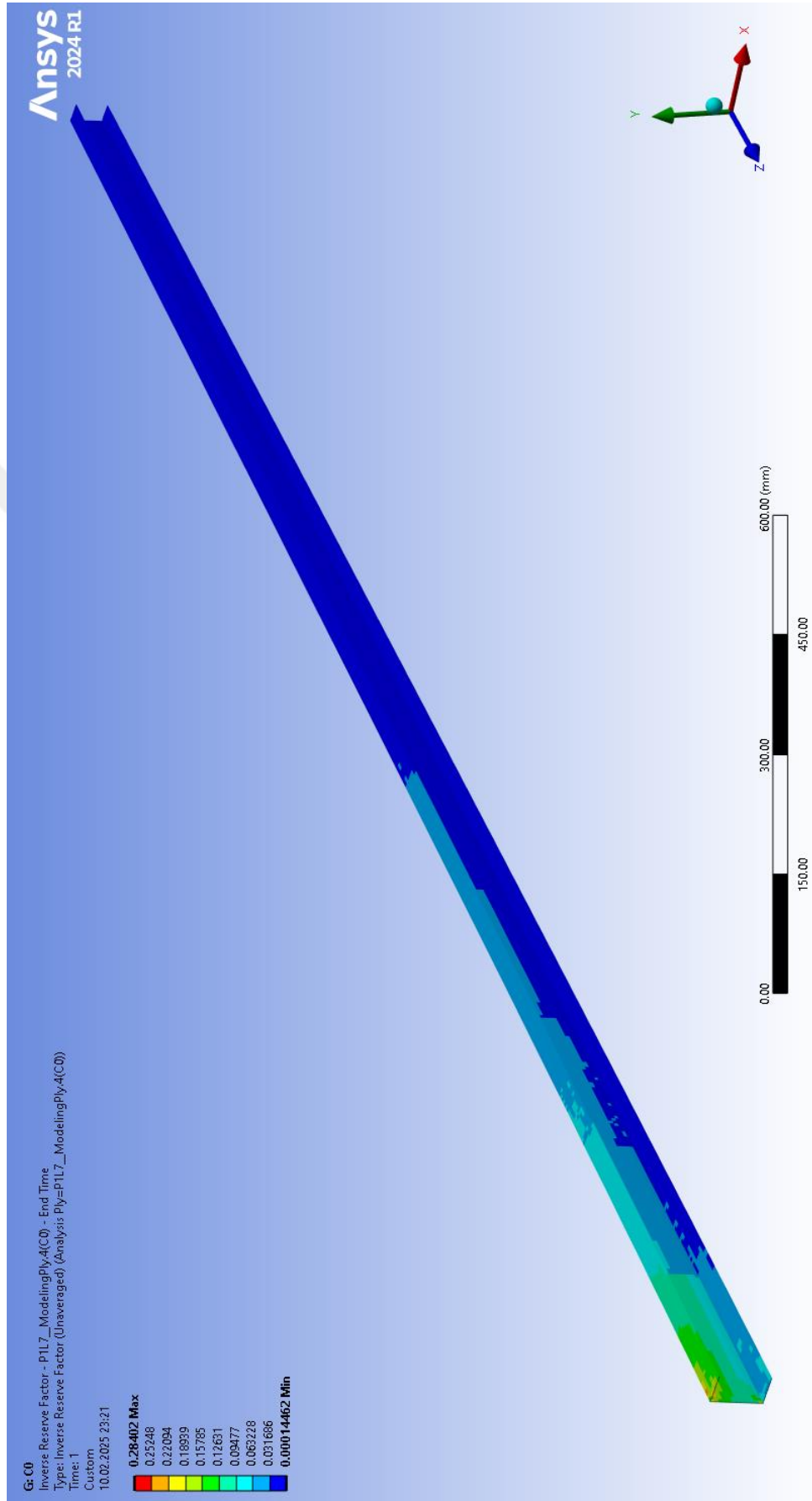
EK-43 4. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



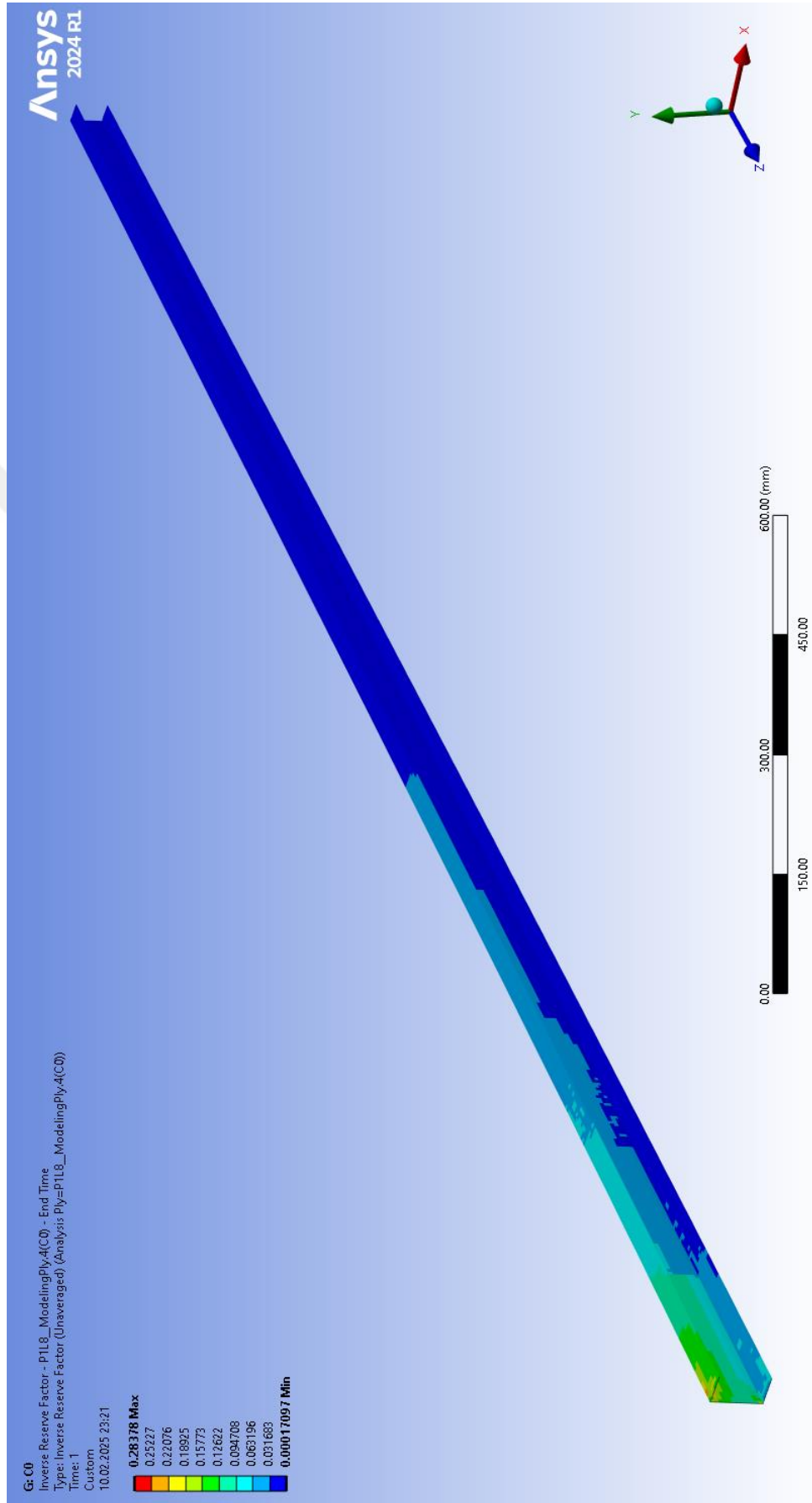
EK-44 4. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



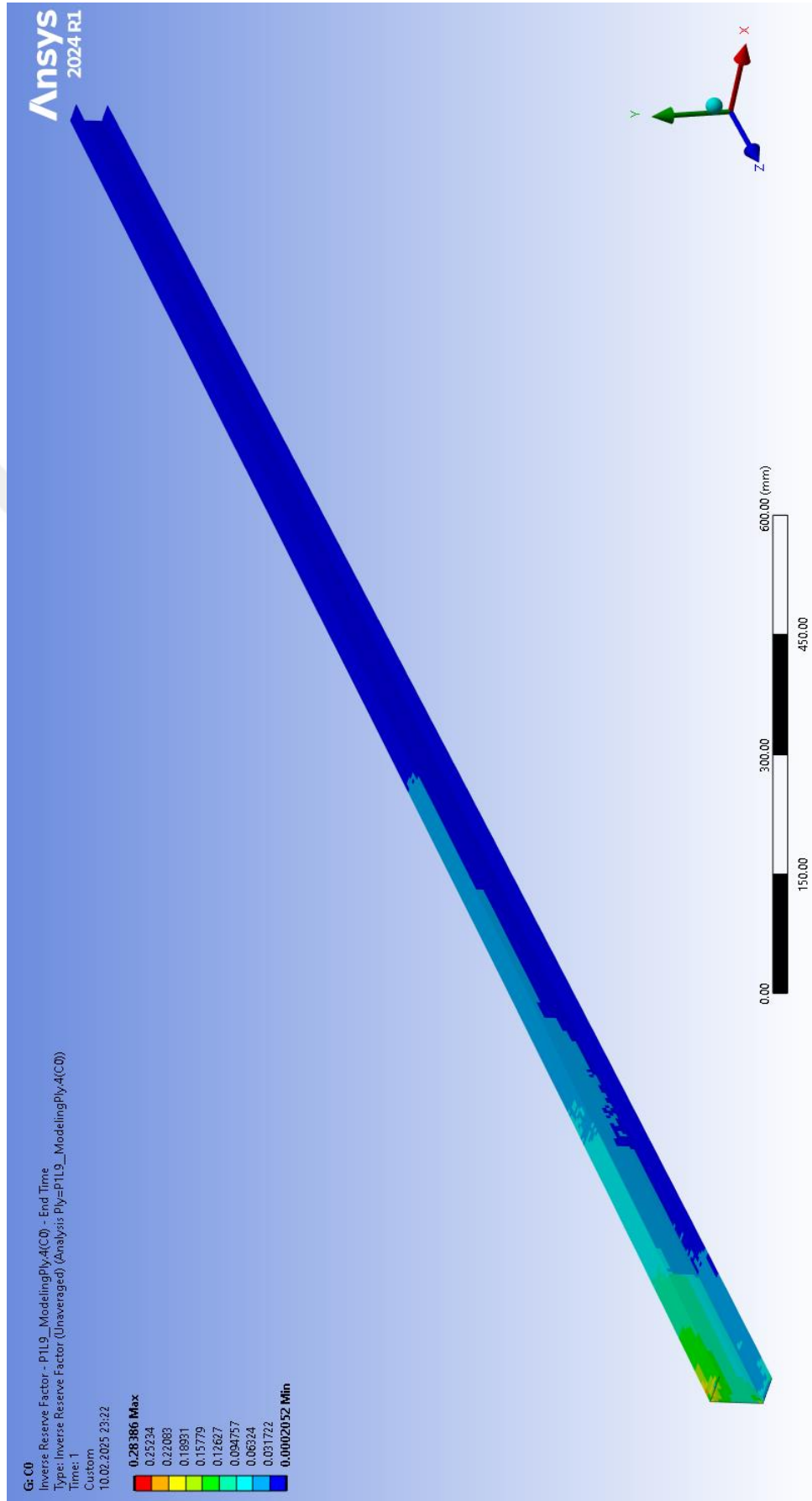
EK-45 4. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



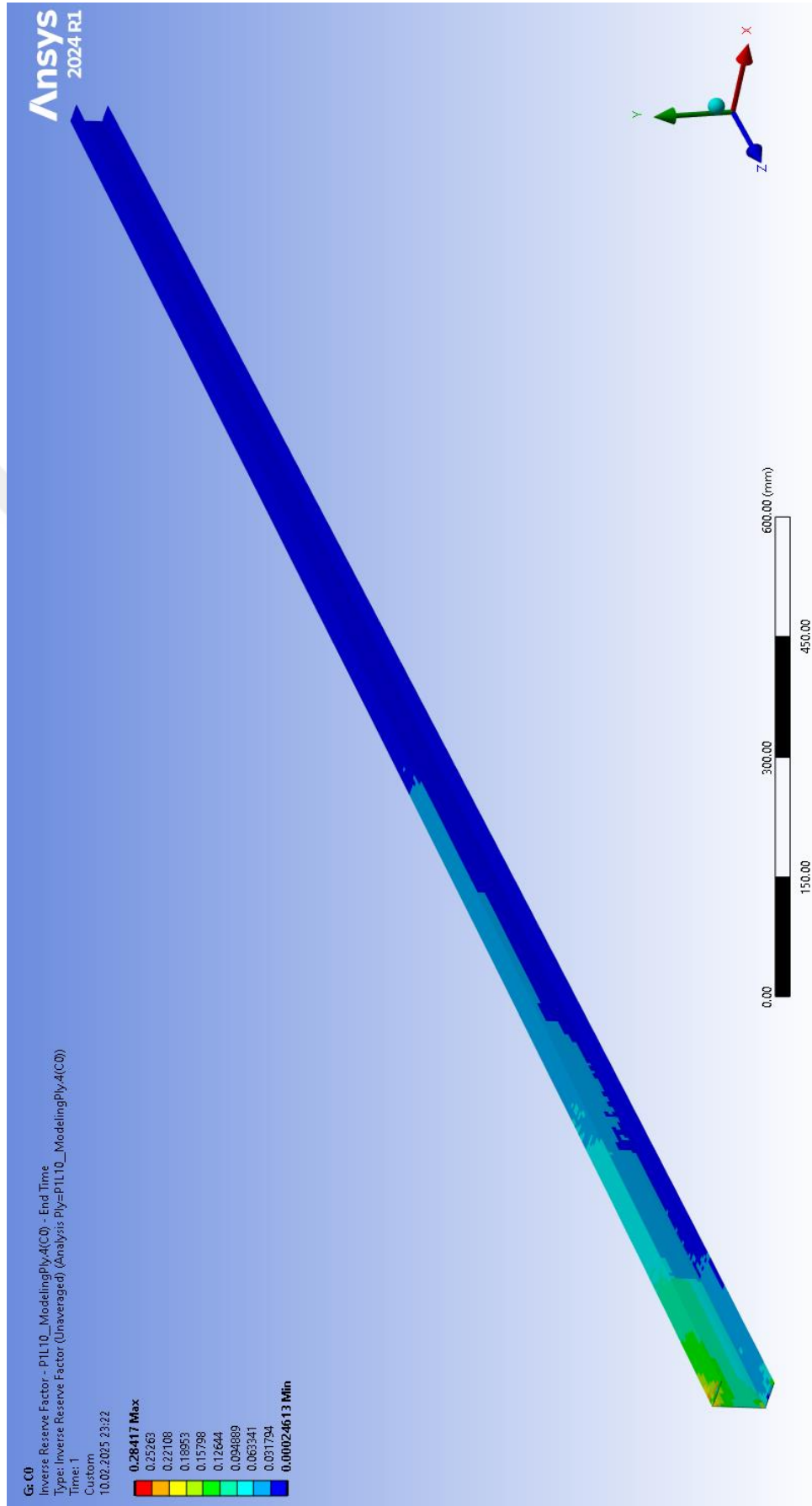
EK-46 4. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



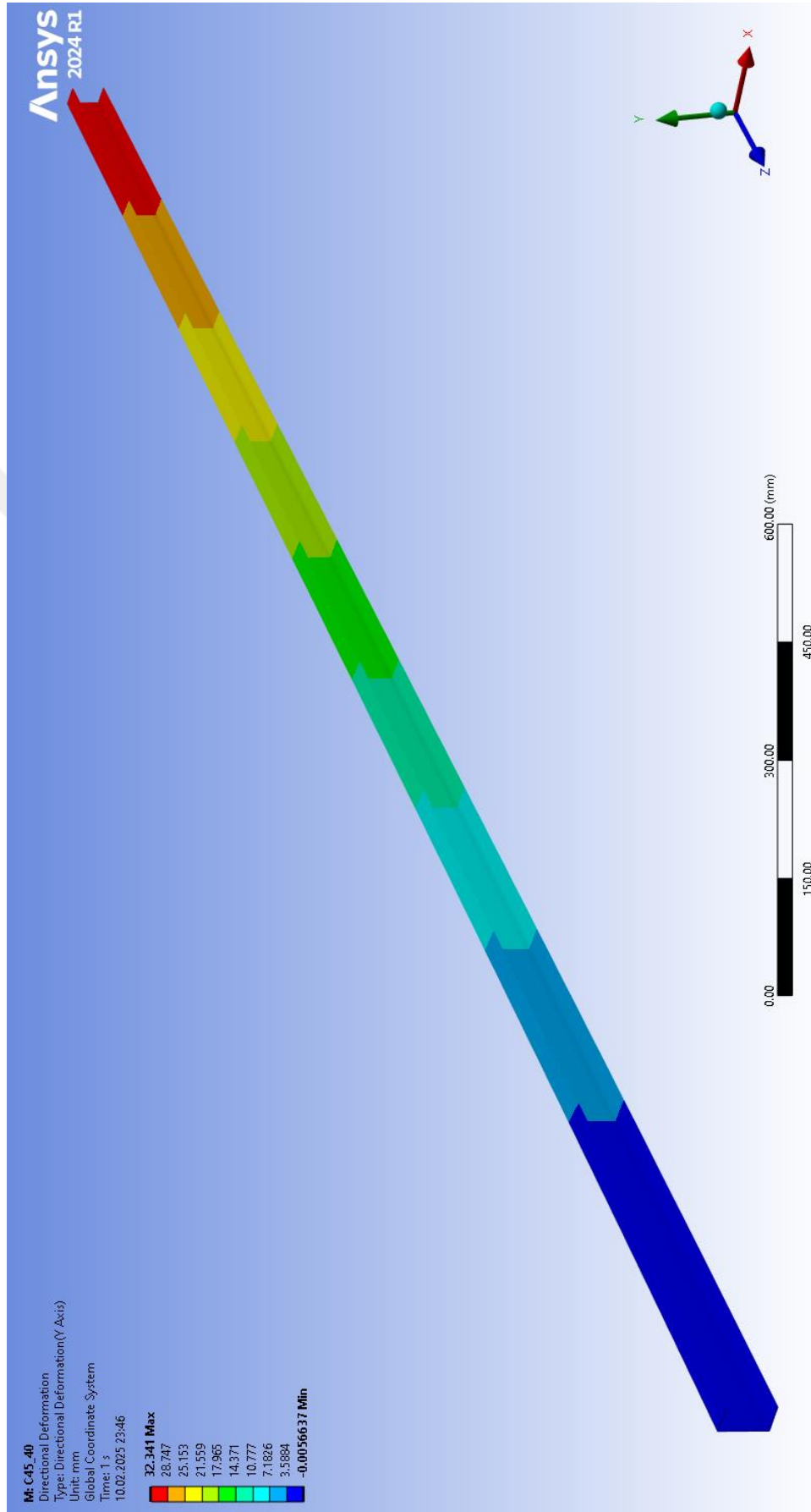
EK-47 4. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



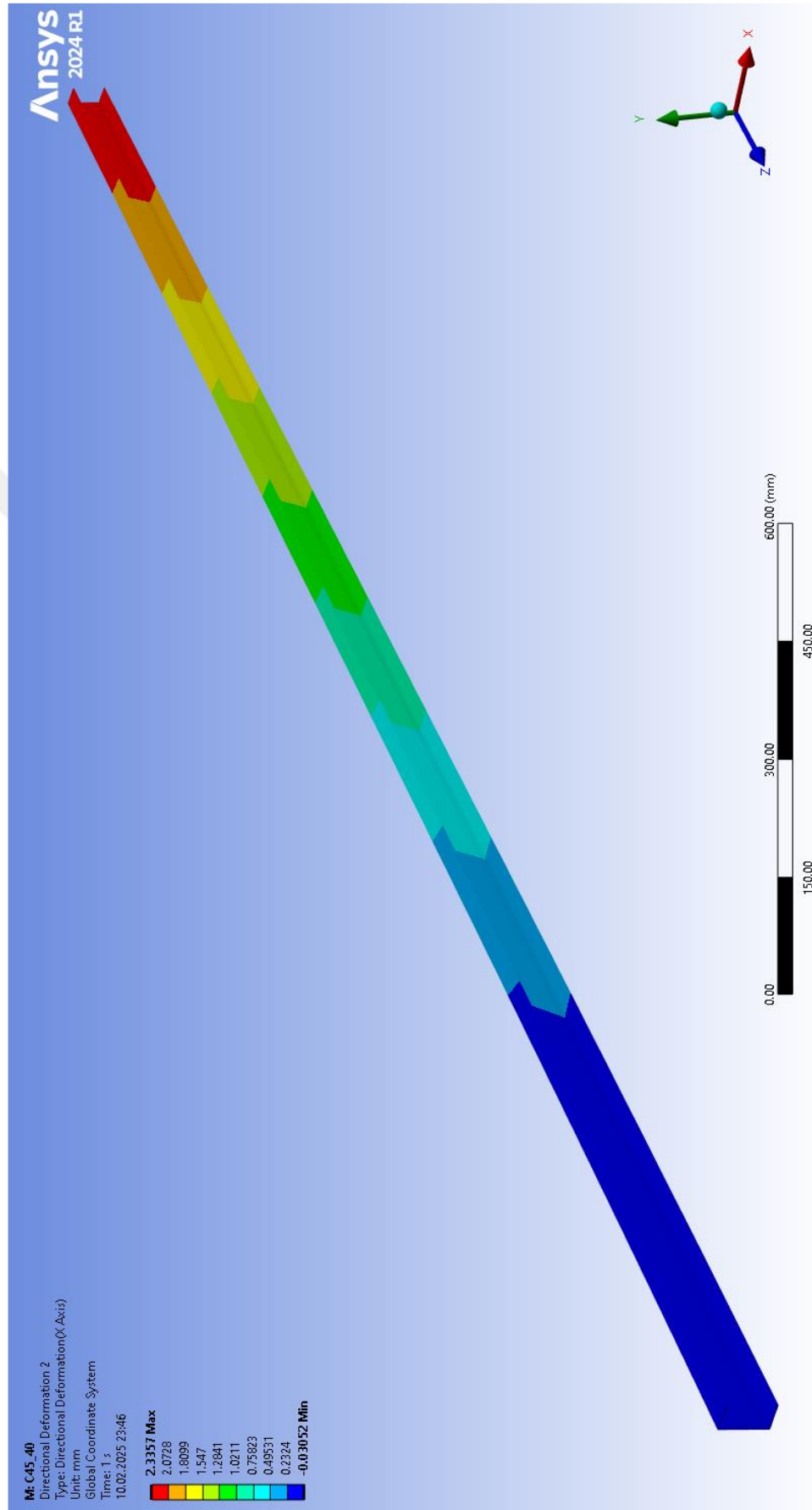
EK-48 4. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



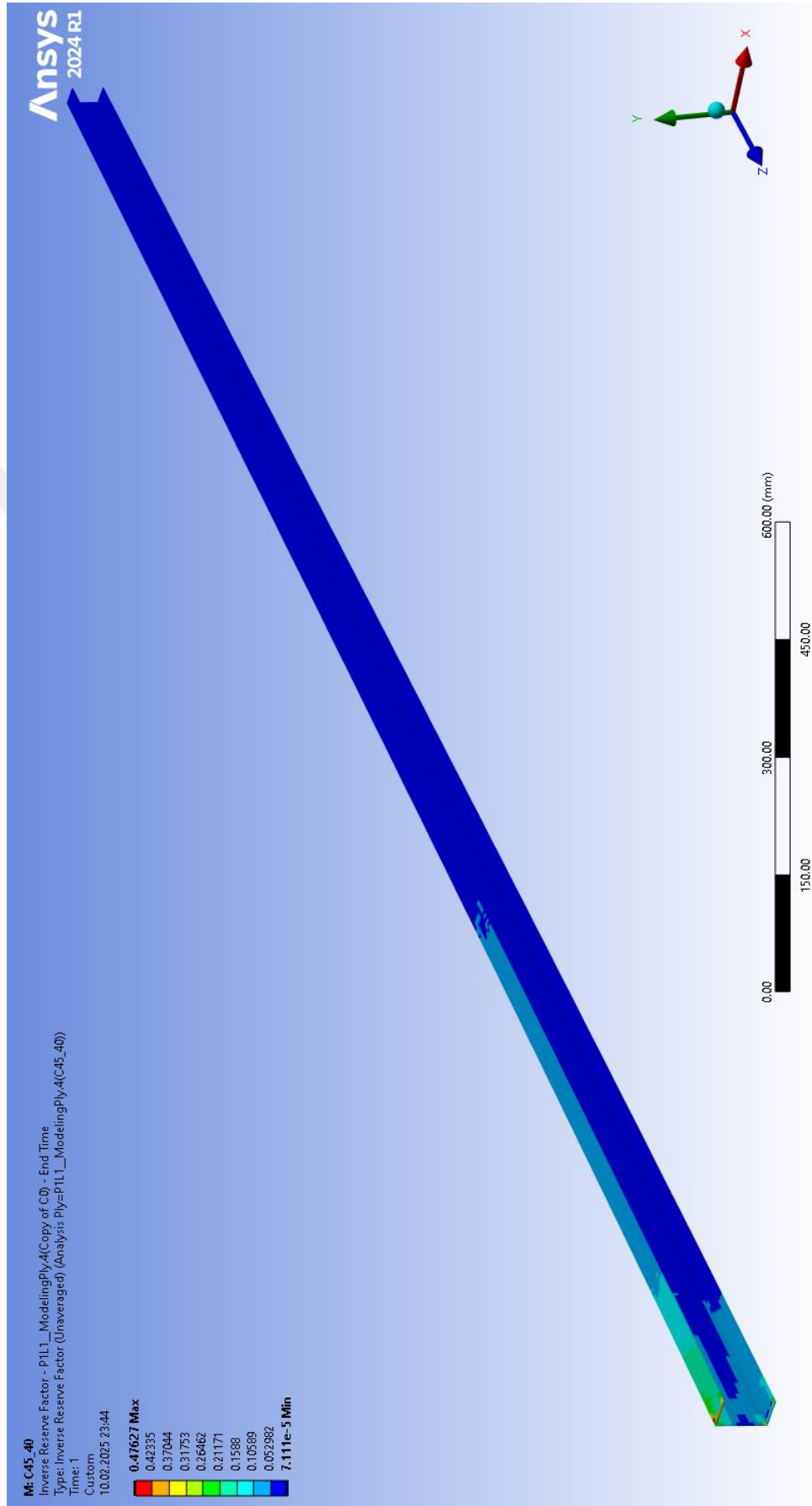
EK-49 5. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



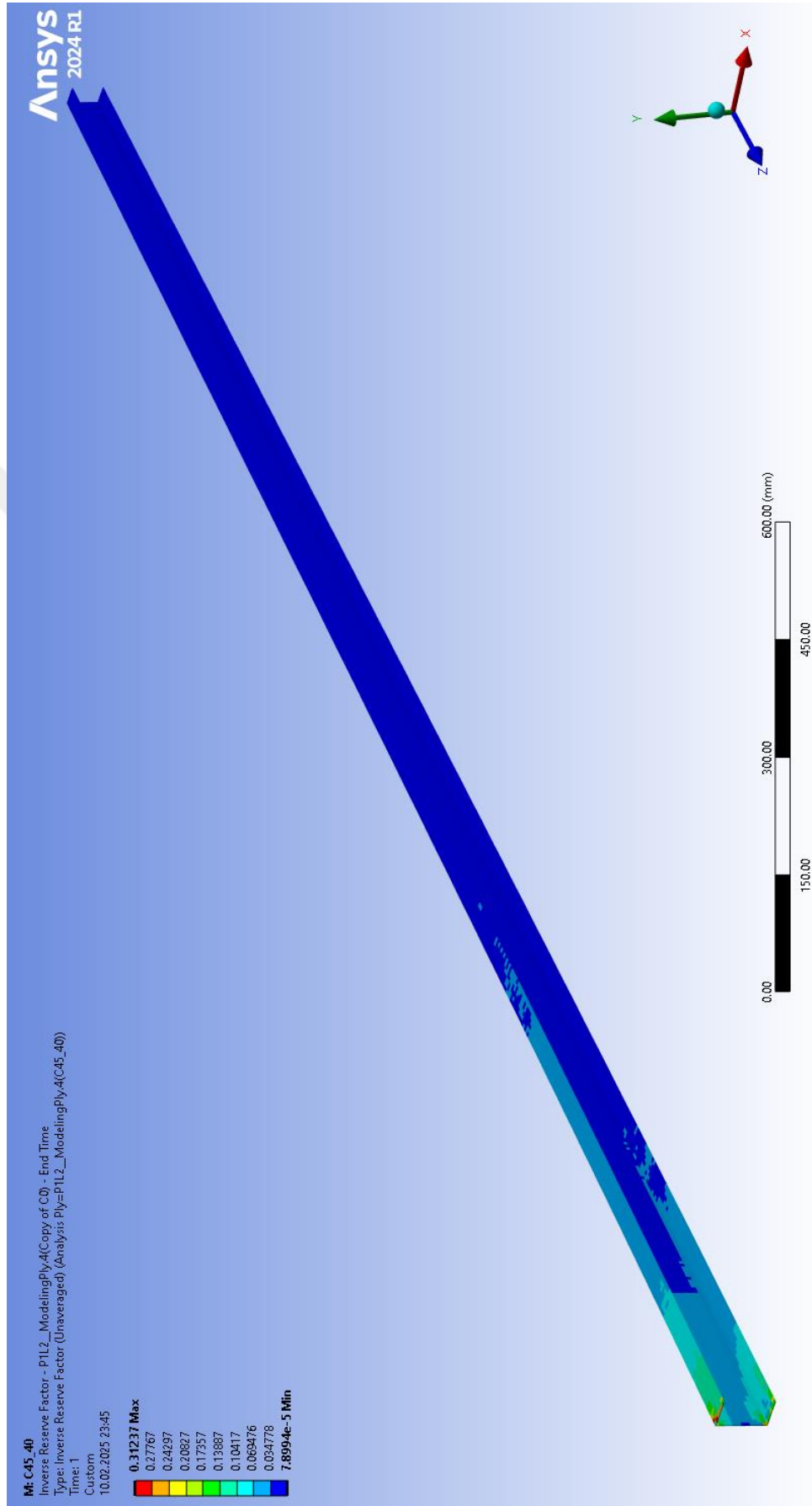
EK-50 5. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



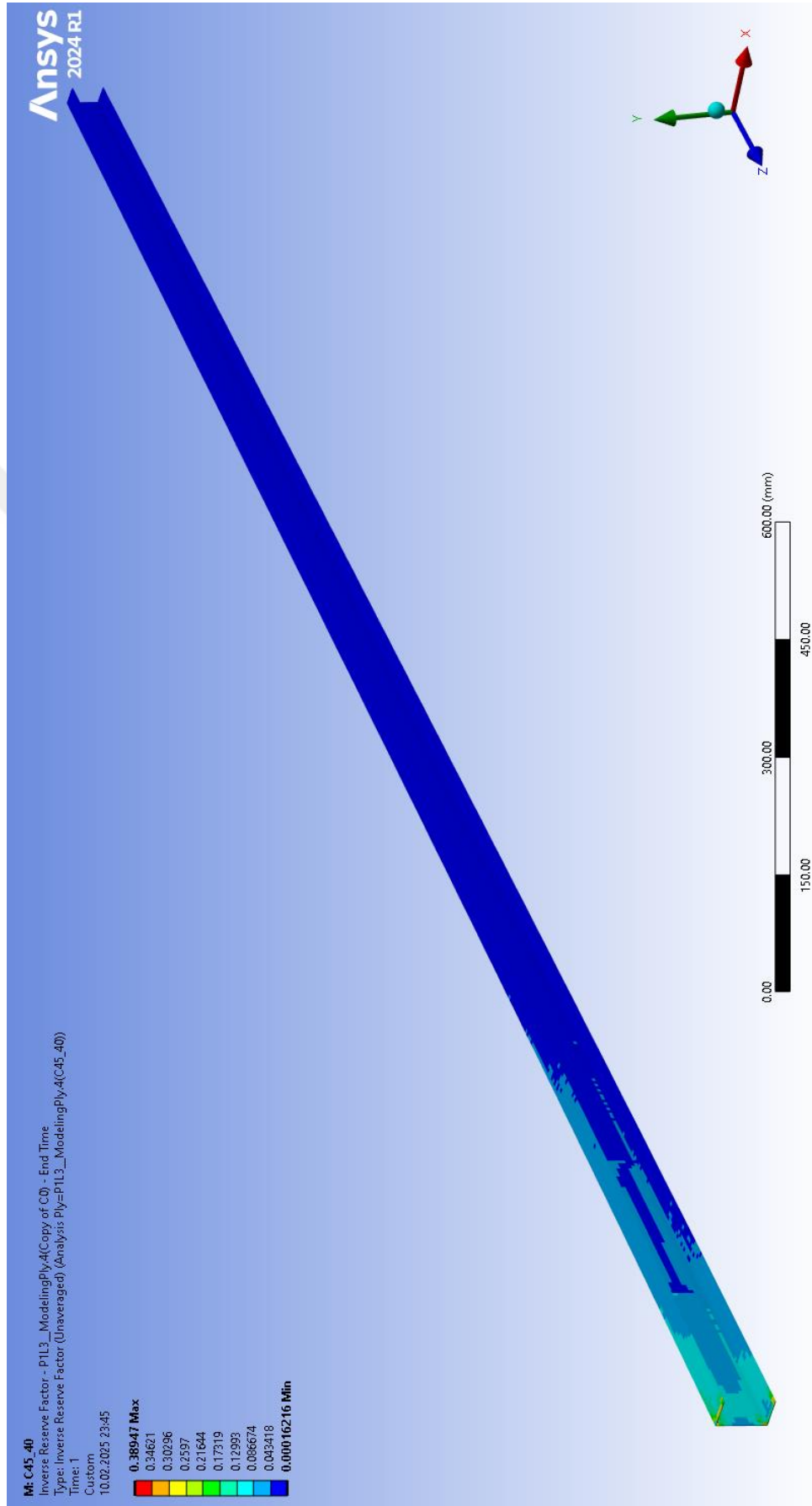
EK-51 5. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



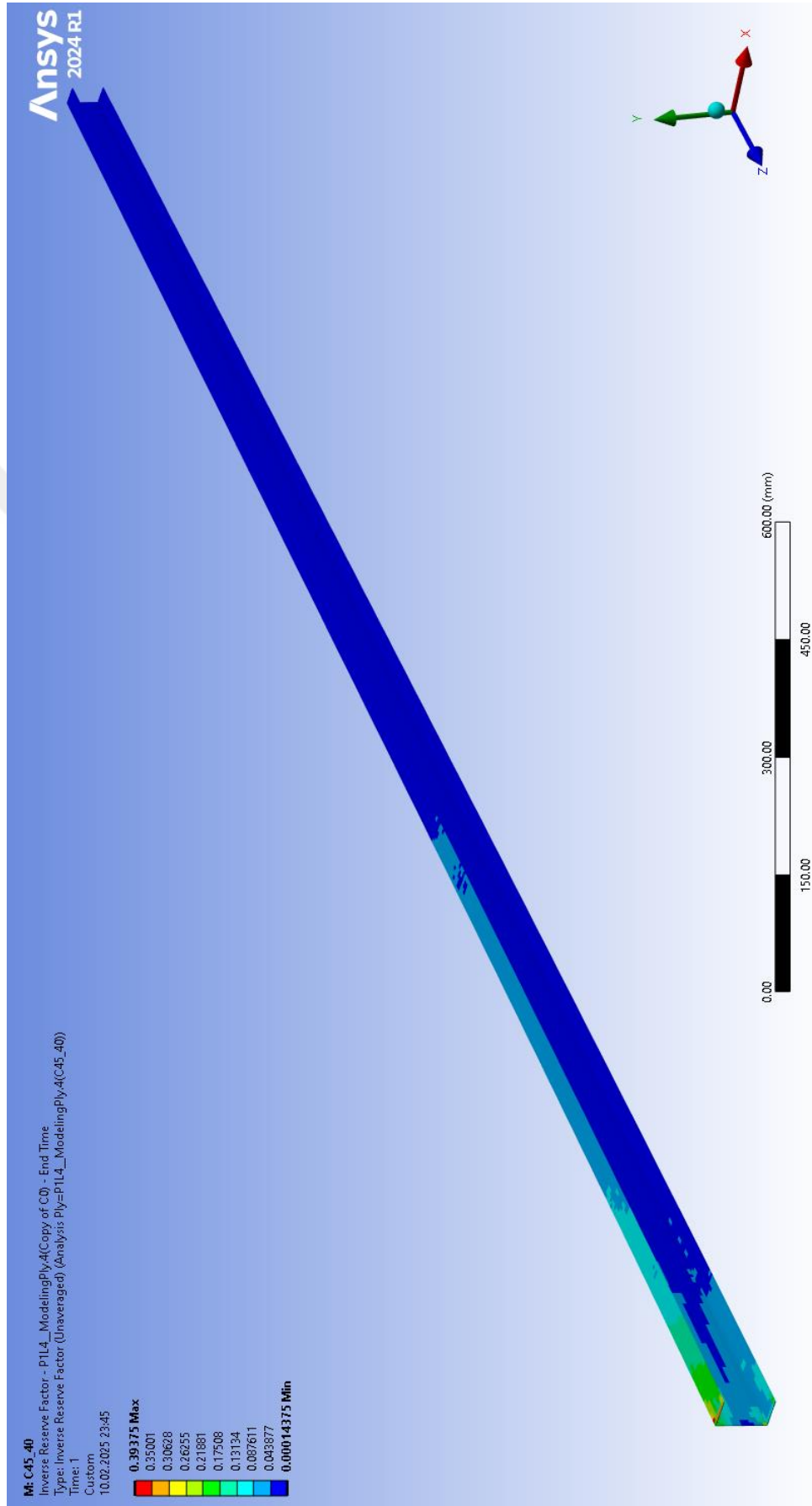
EK-52 5. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



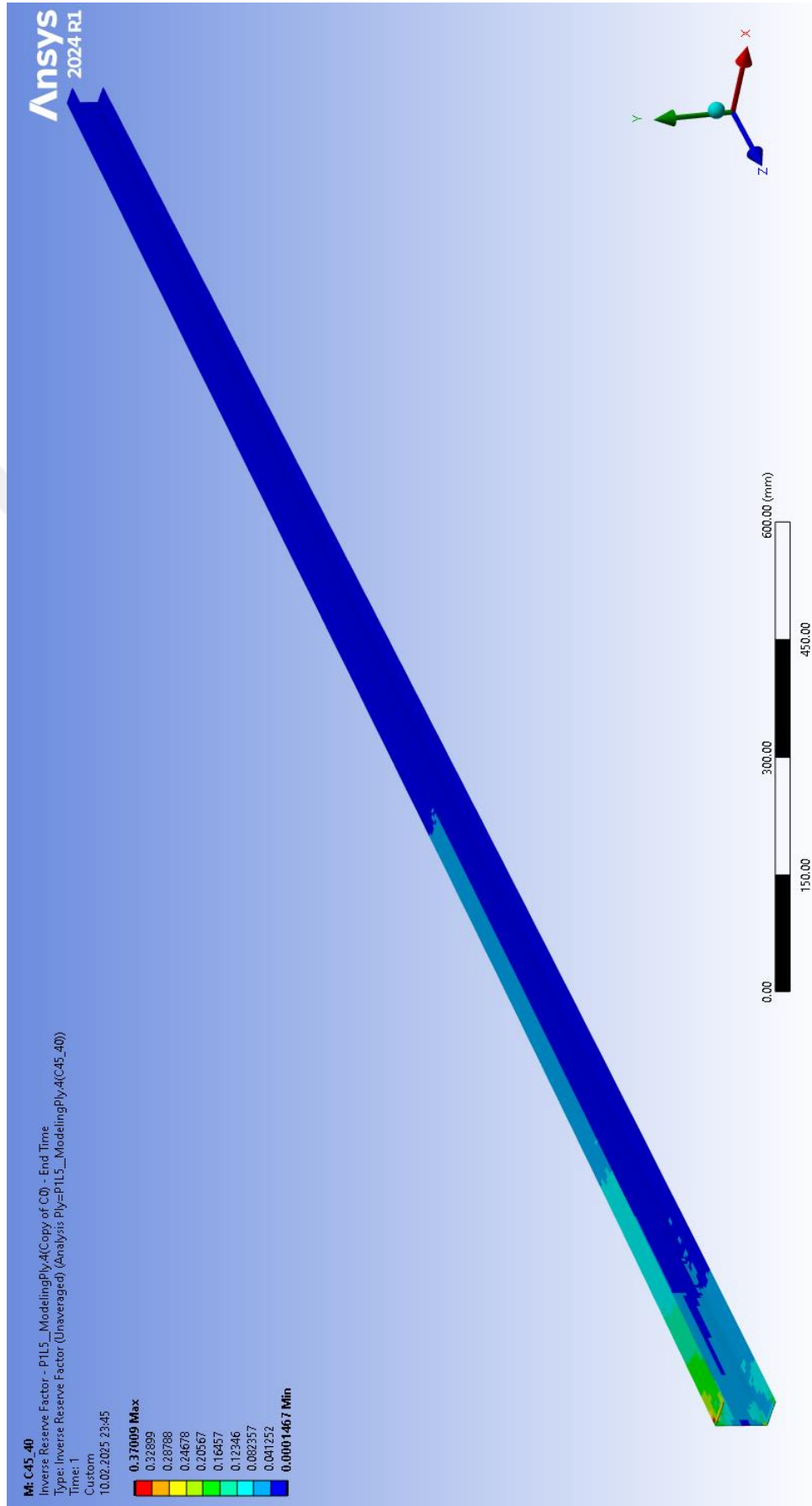
EK-53 5. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



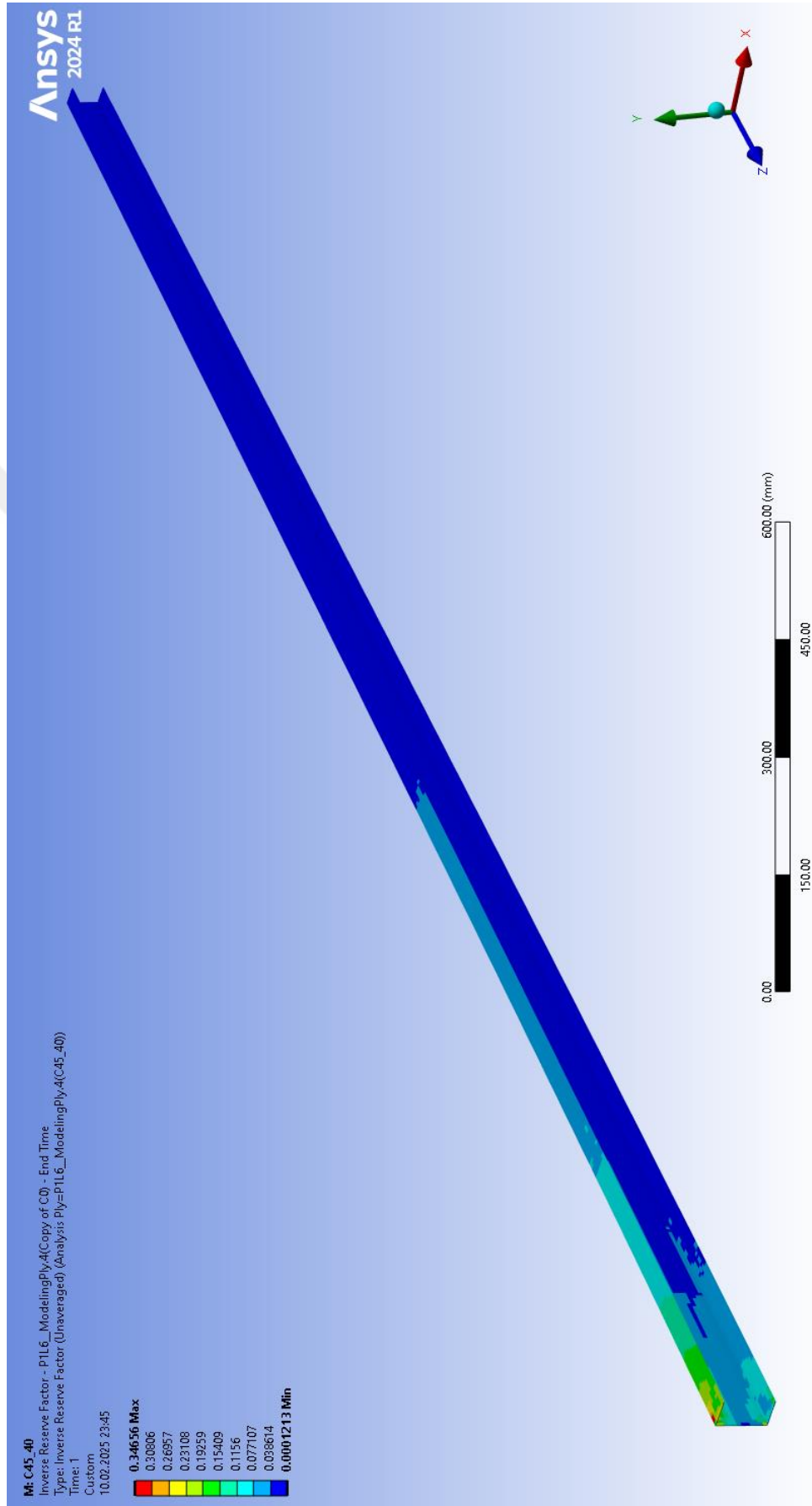
EK-54 5. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



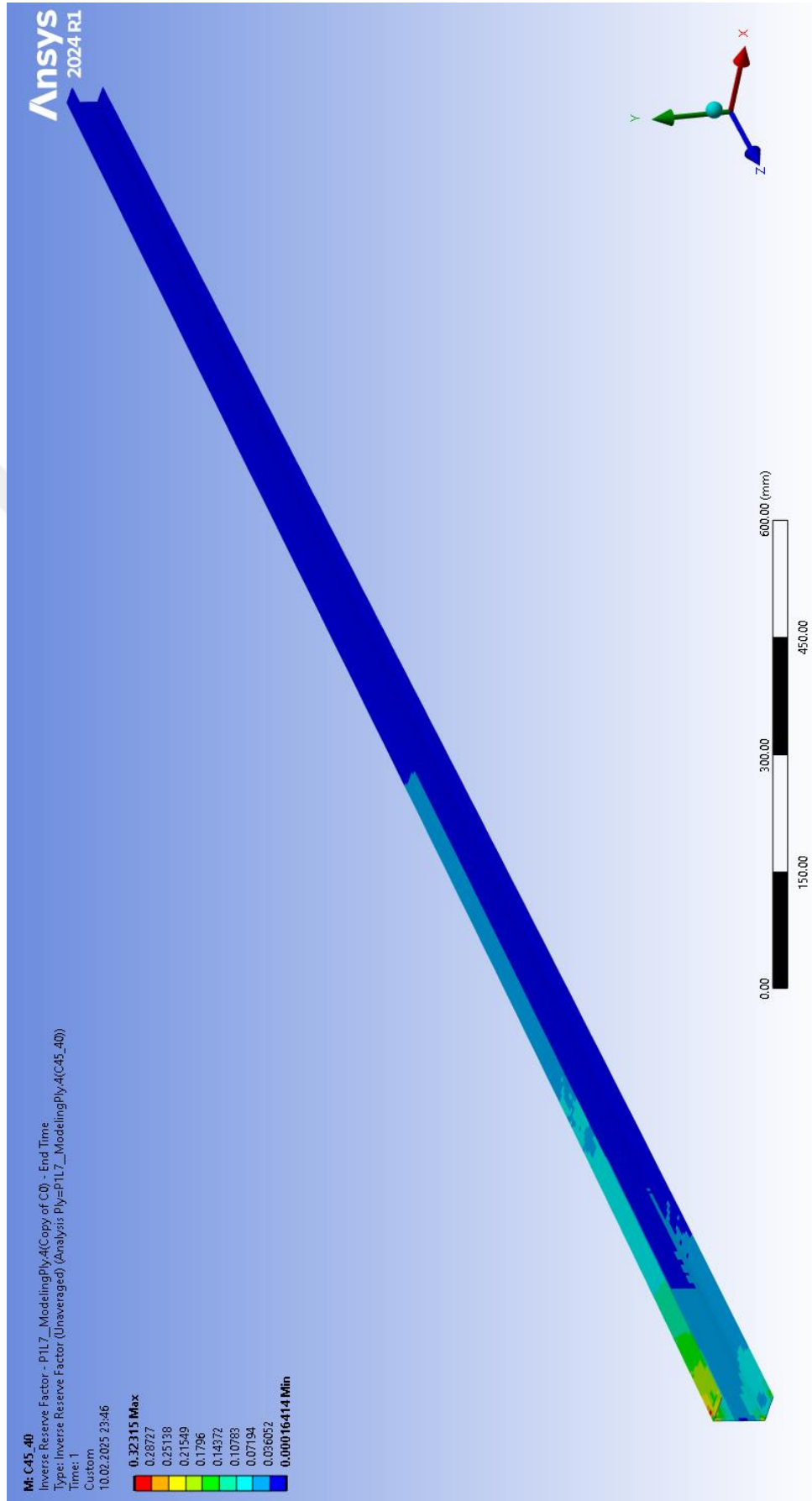
EK-55 5. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



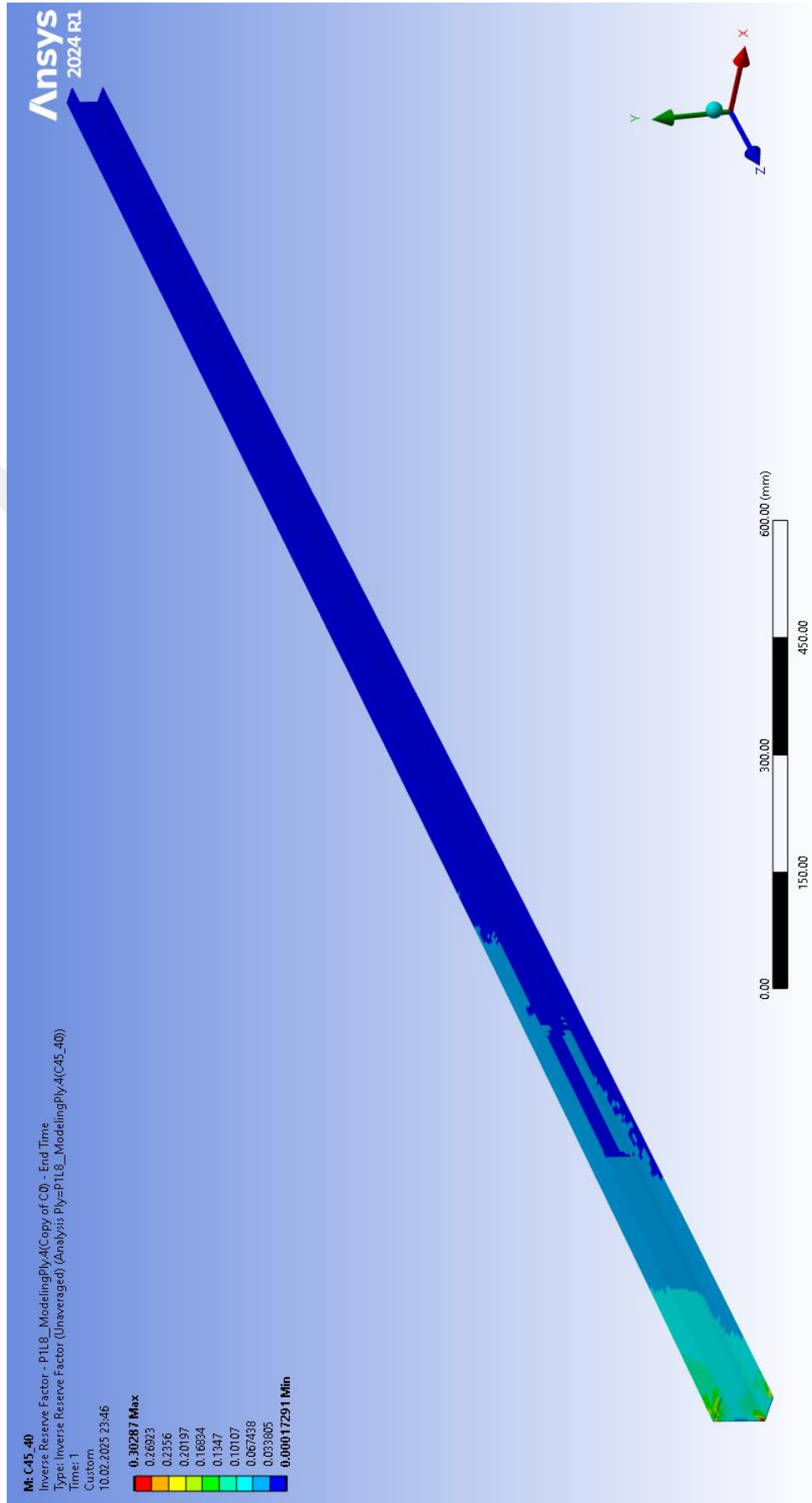
EK-56 5. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



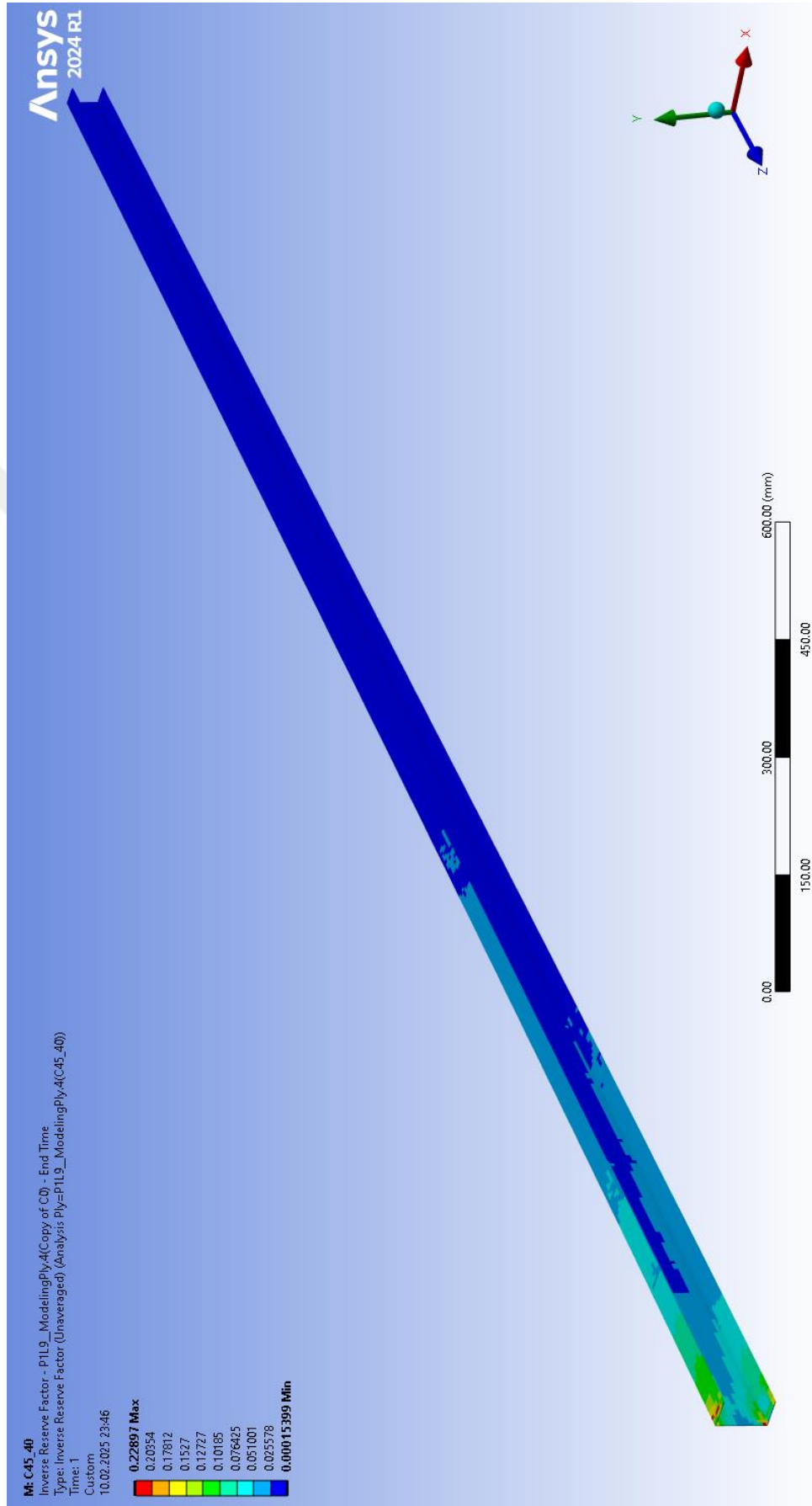
EK-57 5. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



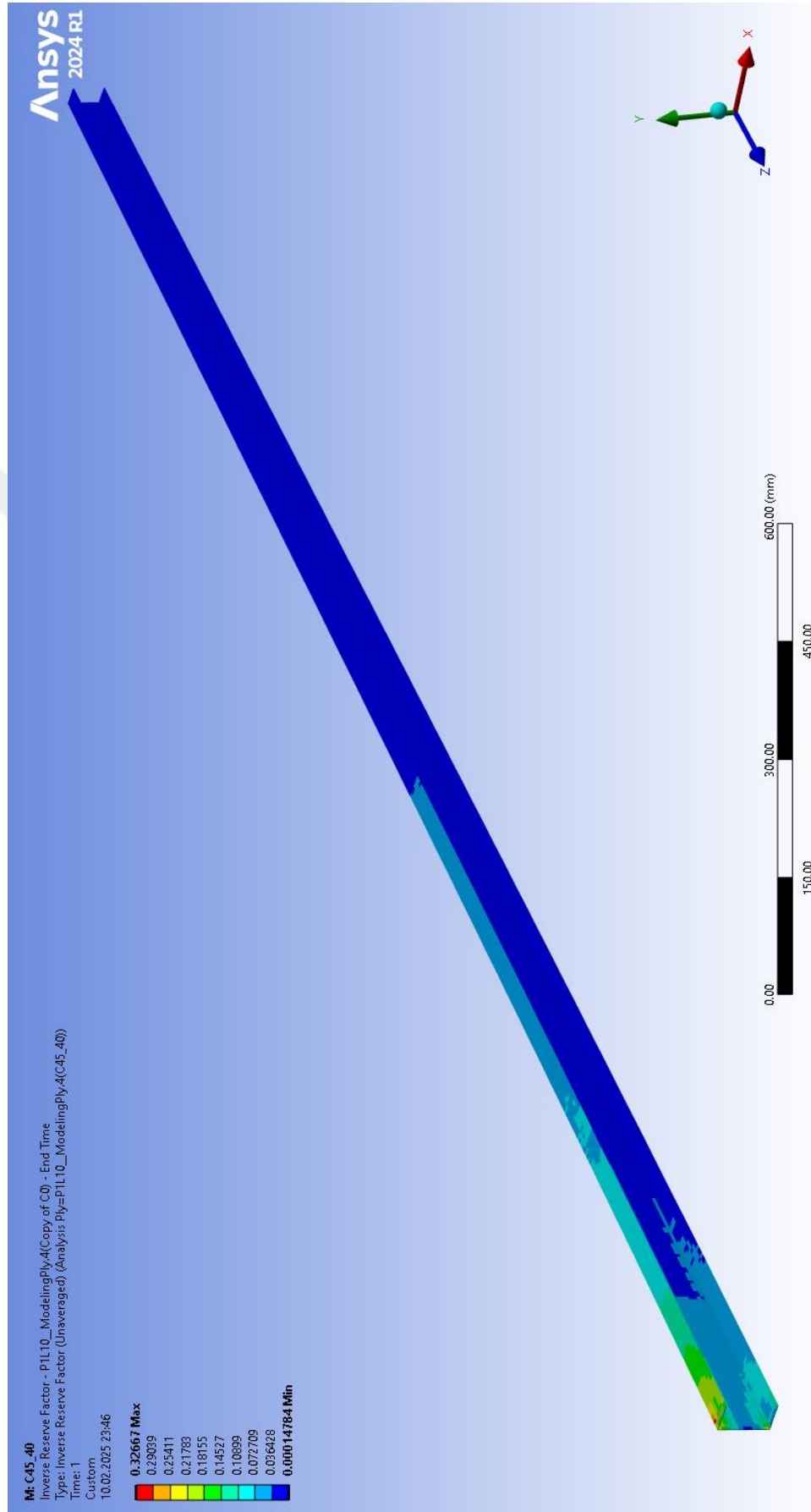
EK-58 5. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



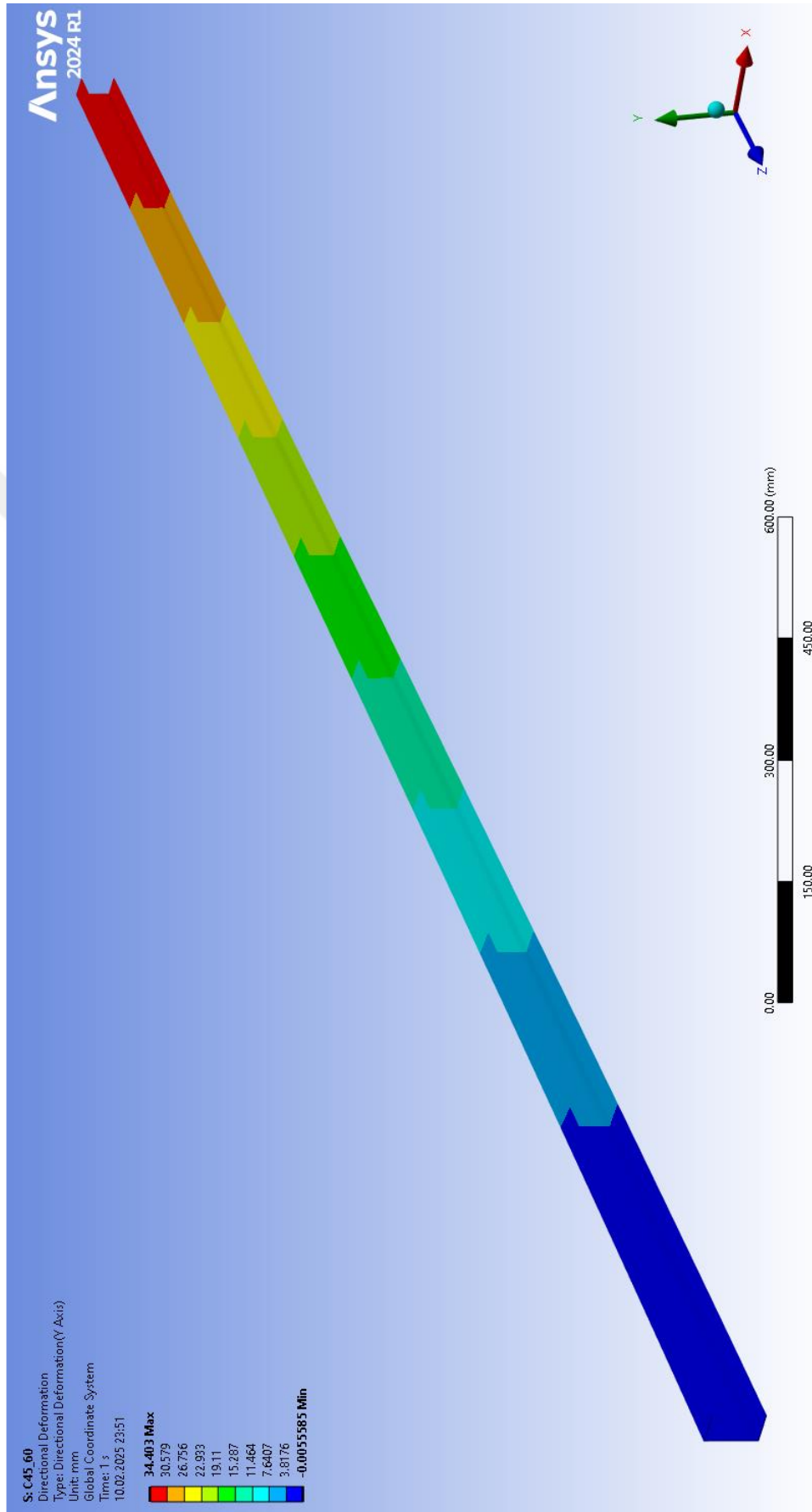
EK-59 5. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



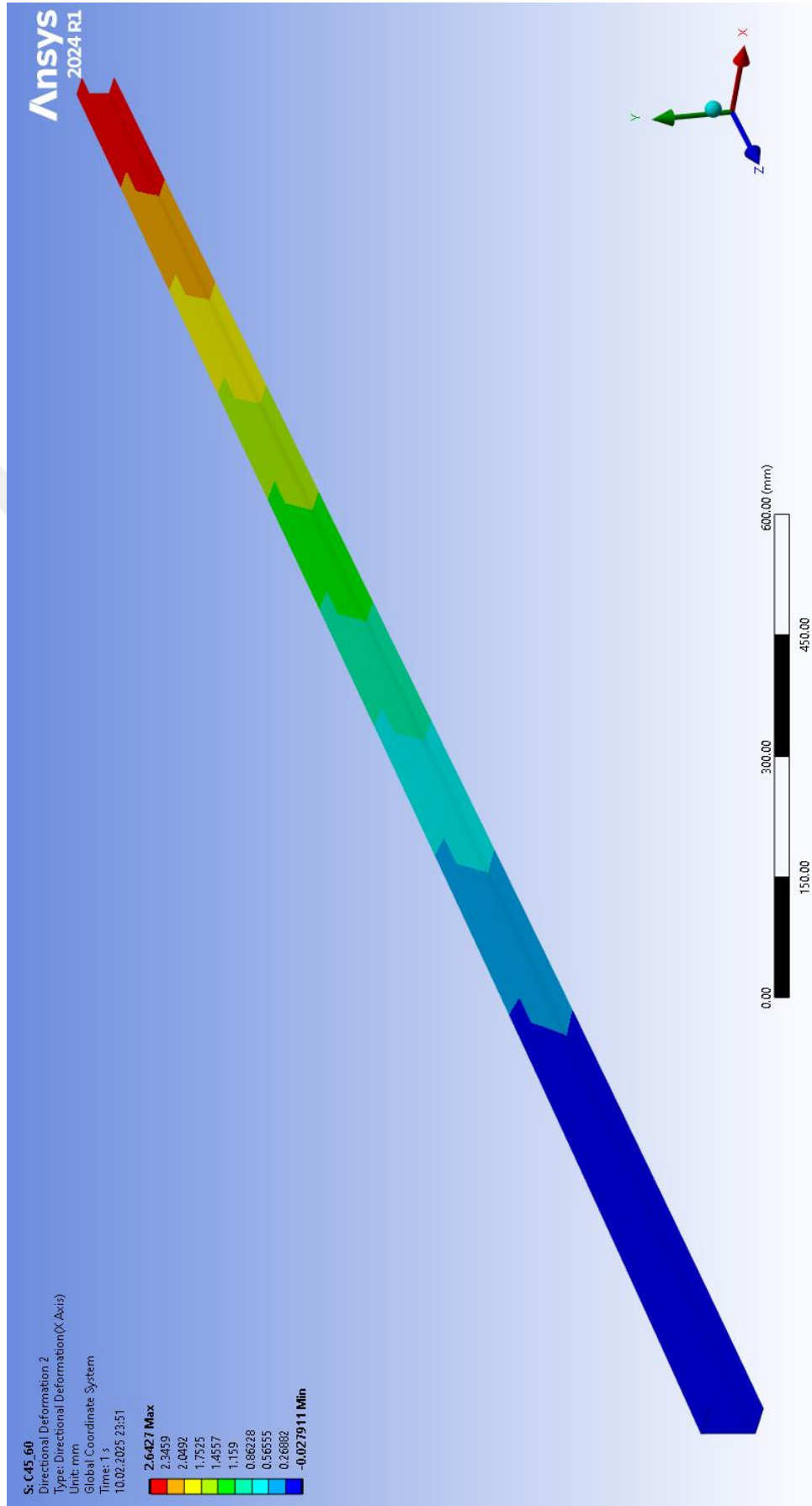
EK-60 5. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



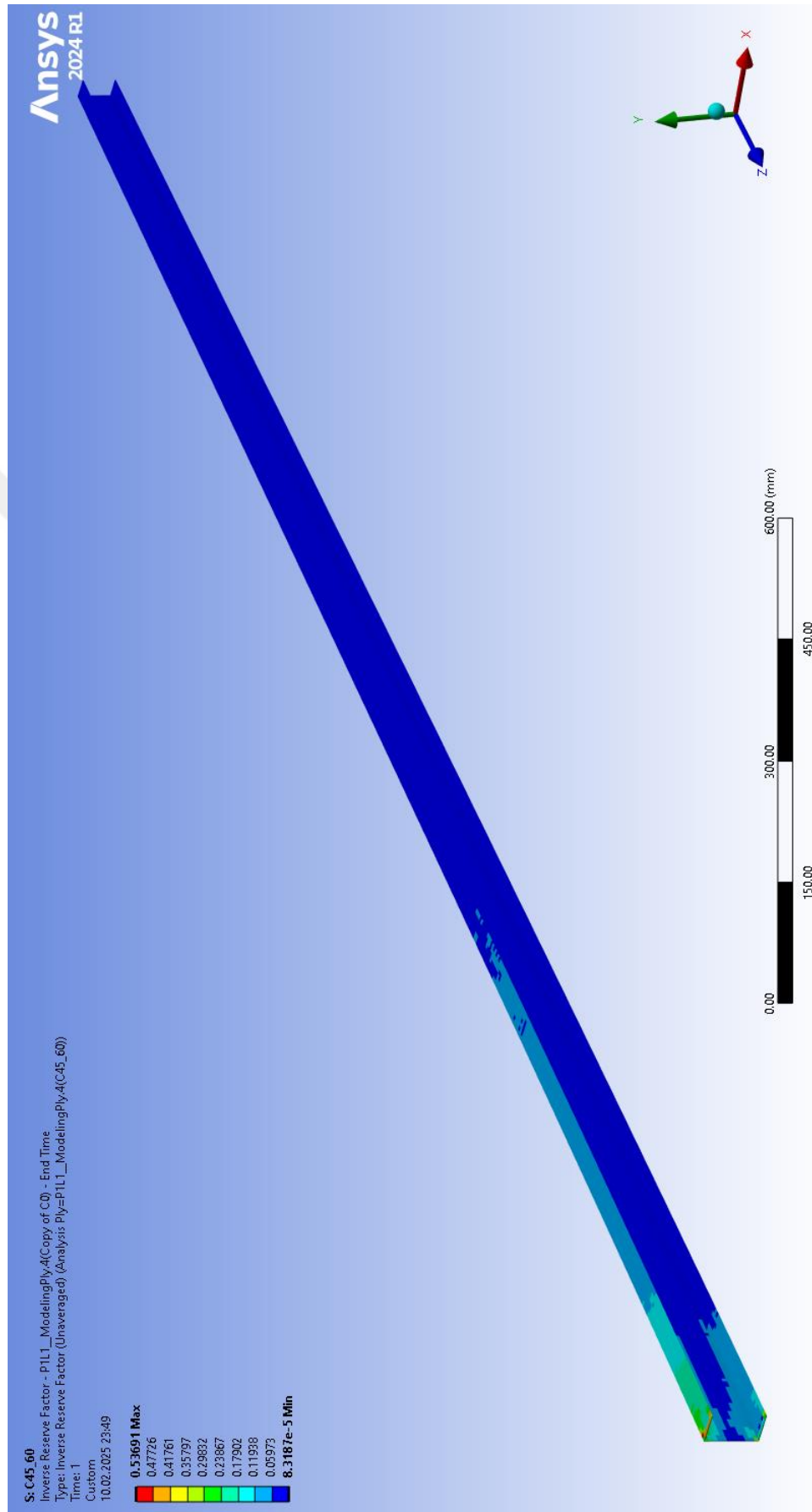
EK-61 6. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



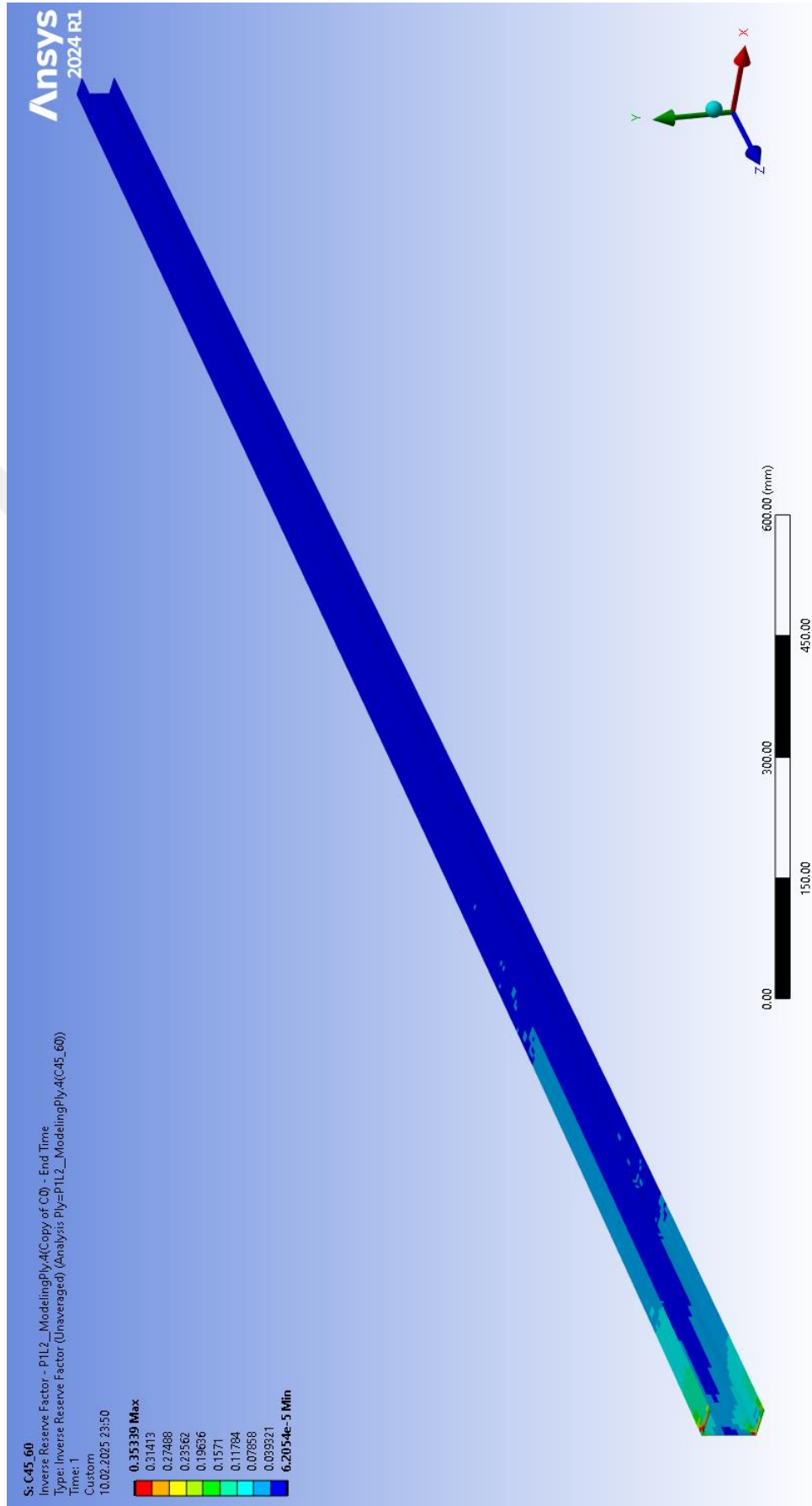
EK-62 6. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



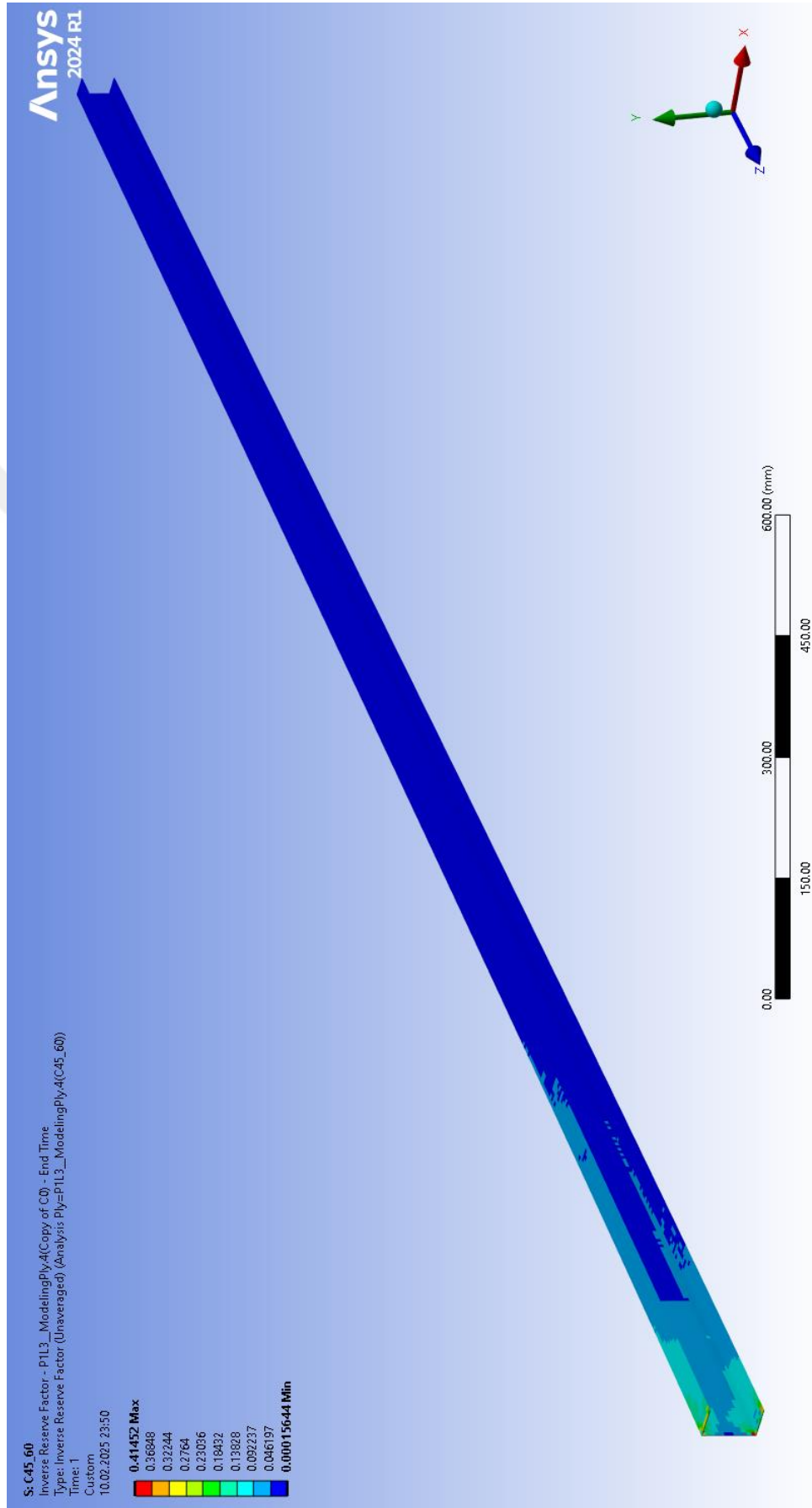
EK-63 6. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



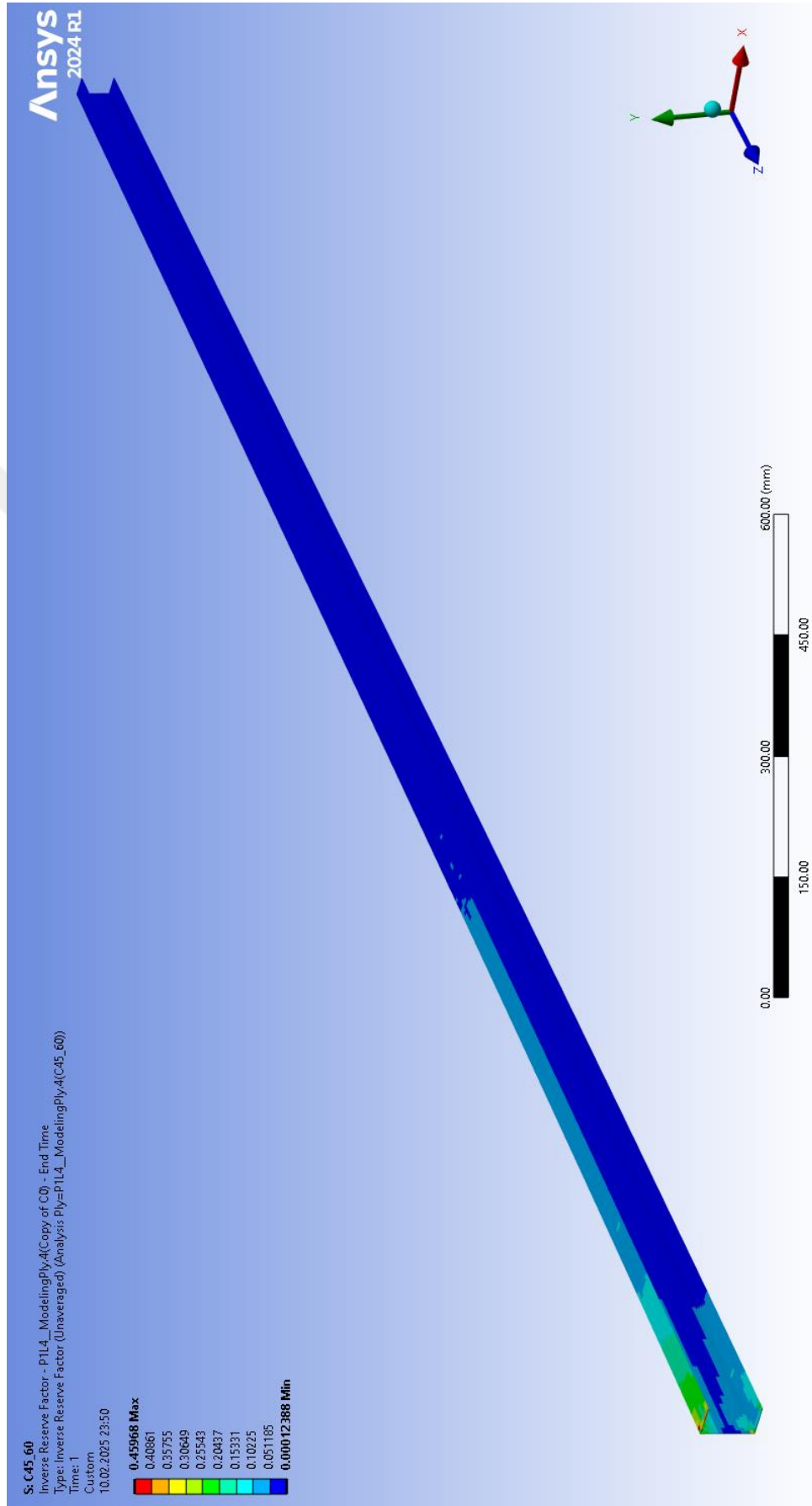
EK-64 6. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



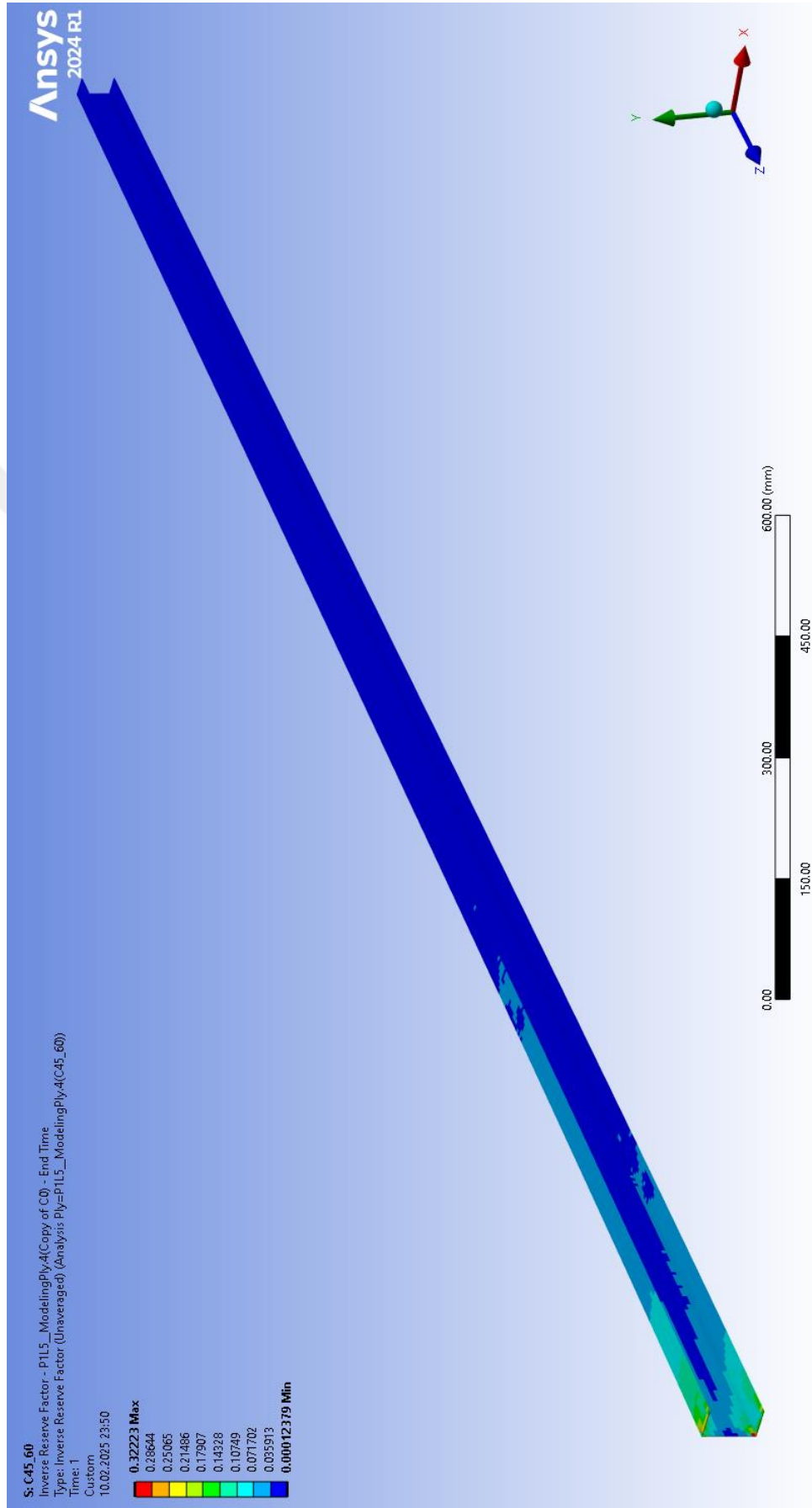
EK-65 6. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



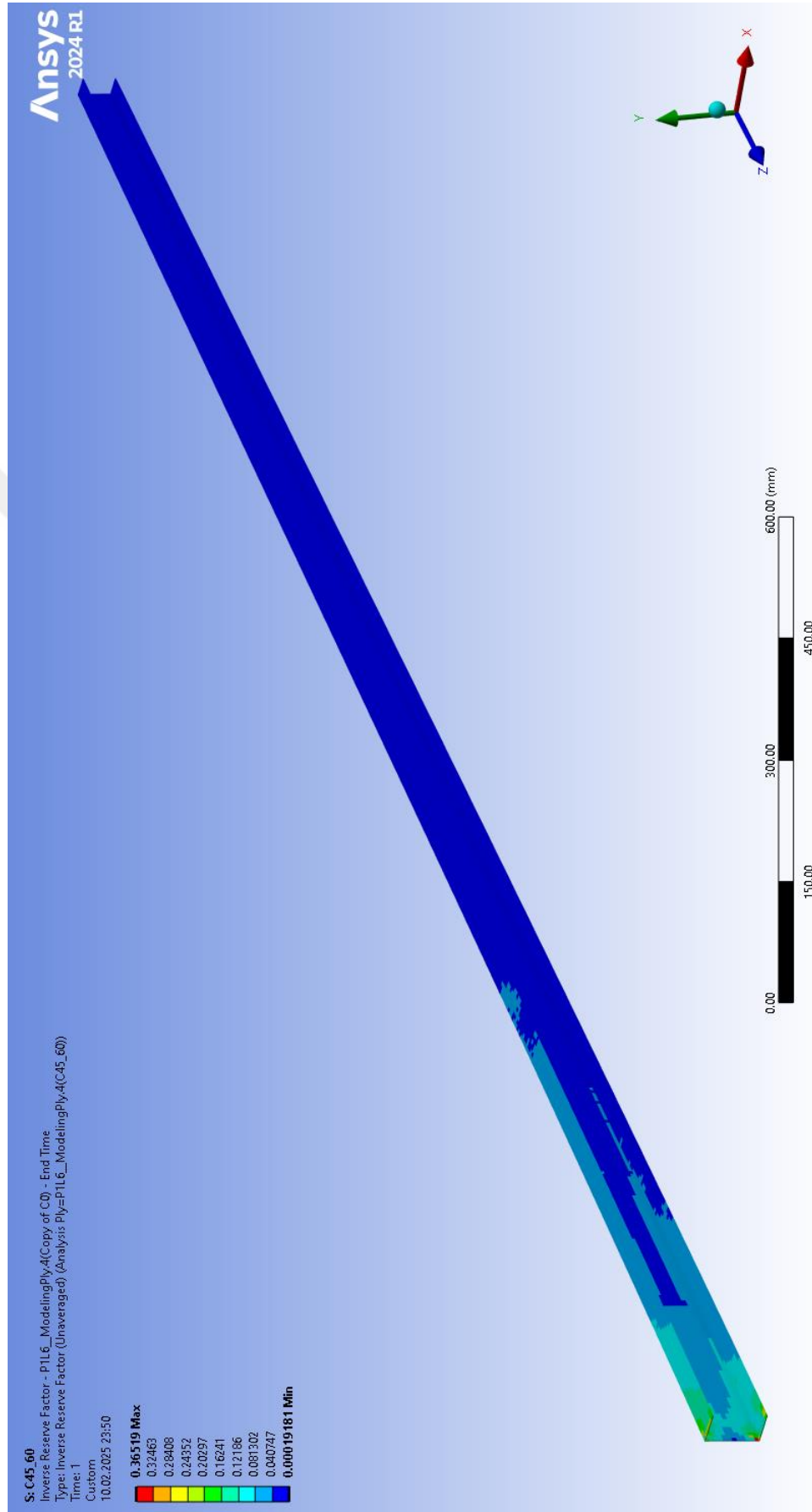
EK-66 6. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



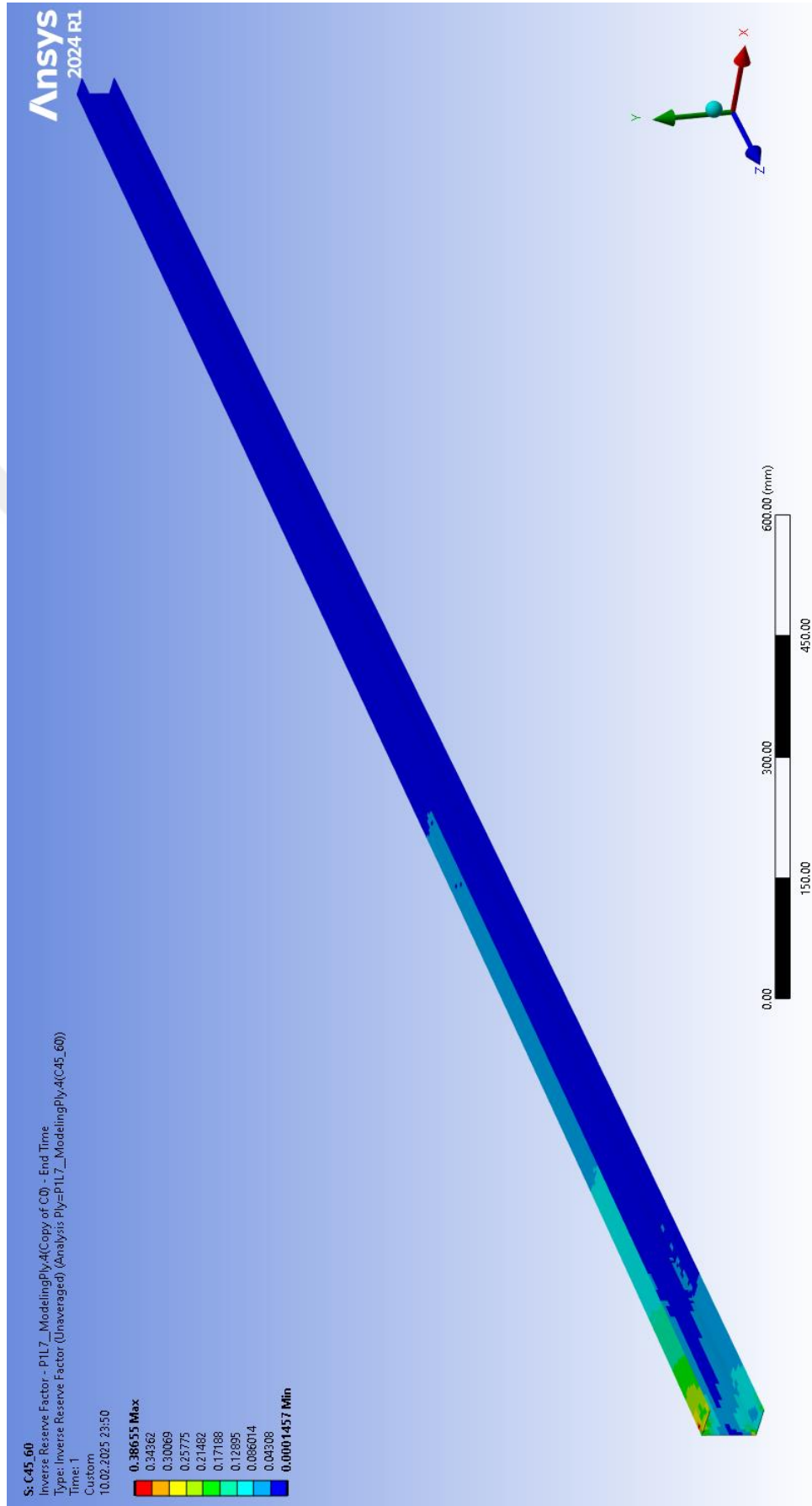
EK-67 6. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



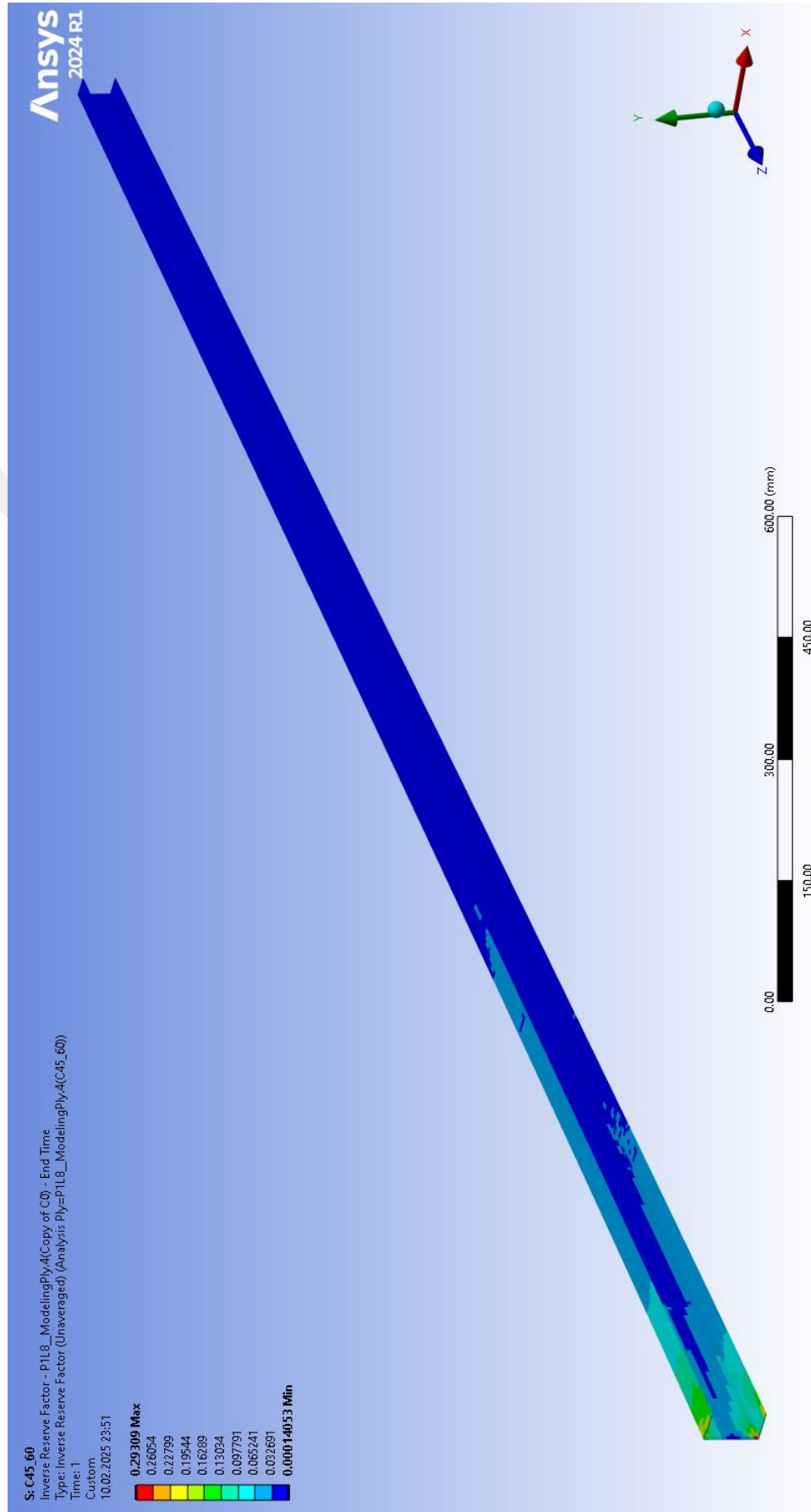
EK-68 6. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



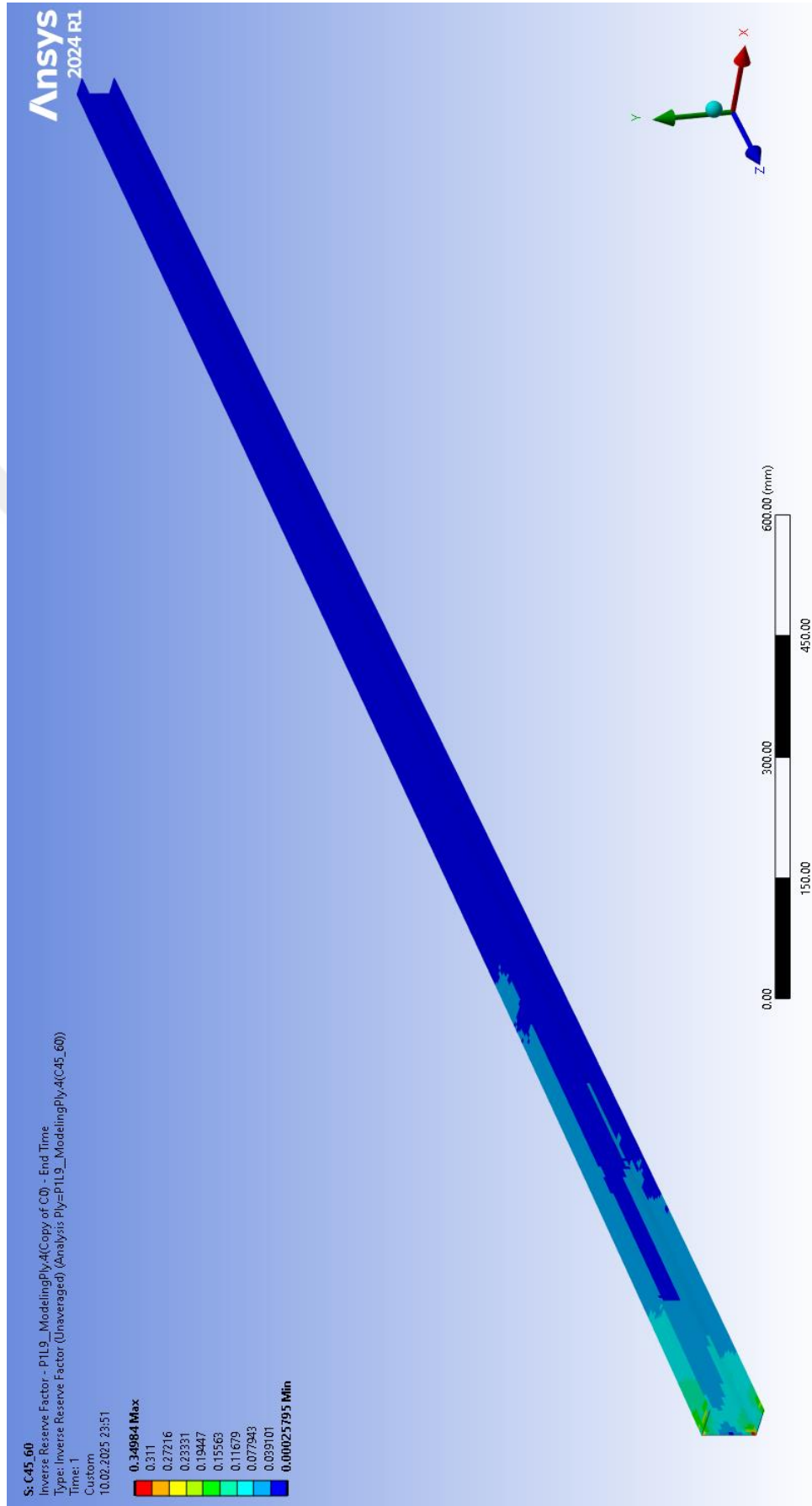
EK-69 6. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



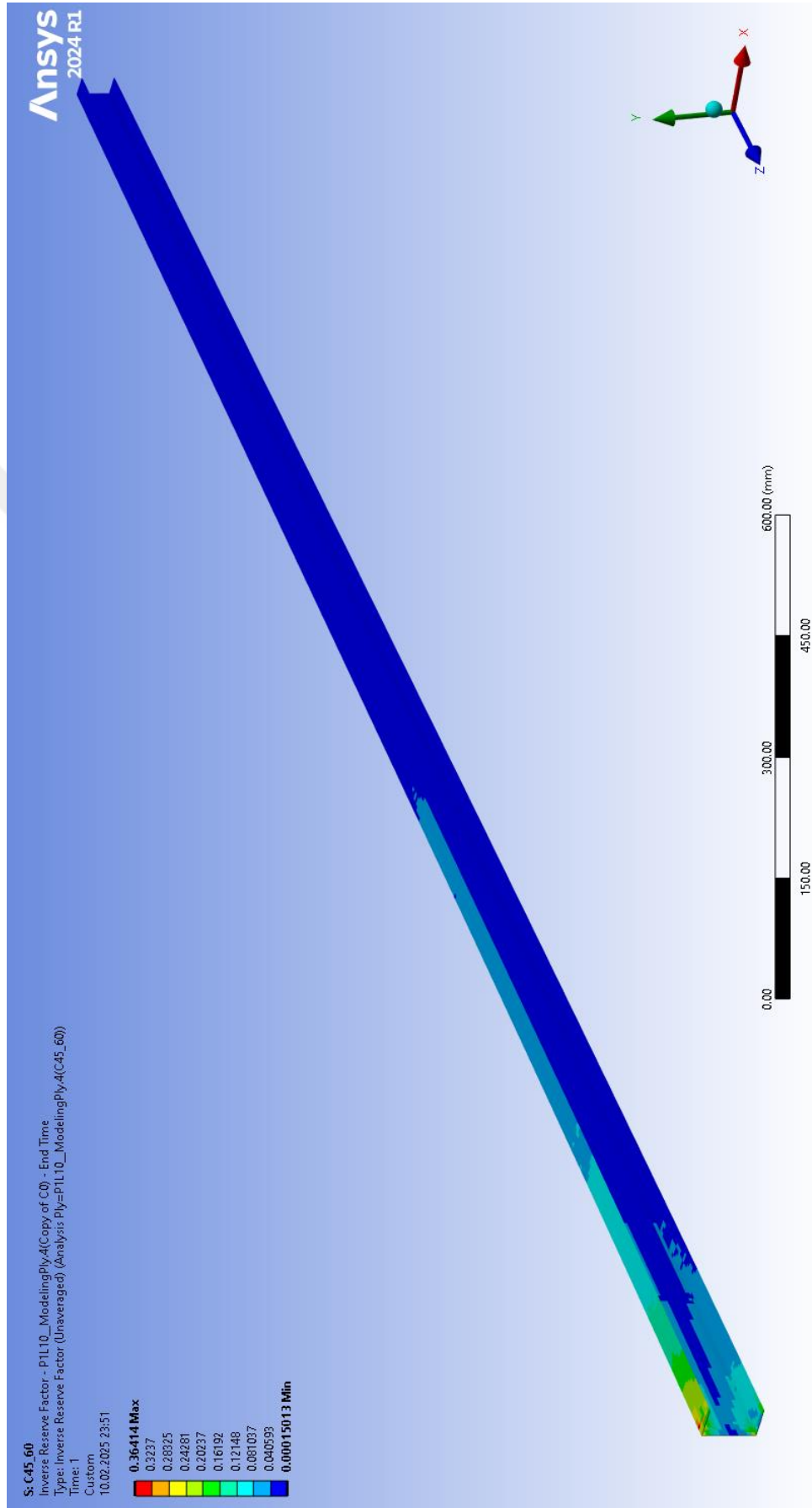
EK-70 6. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



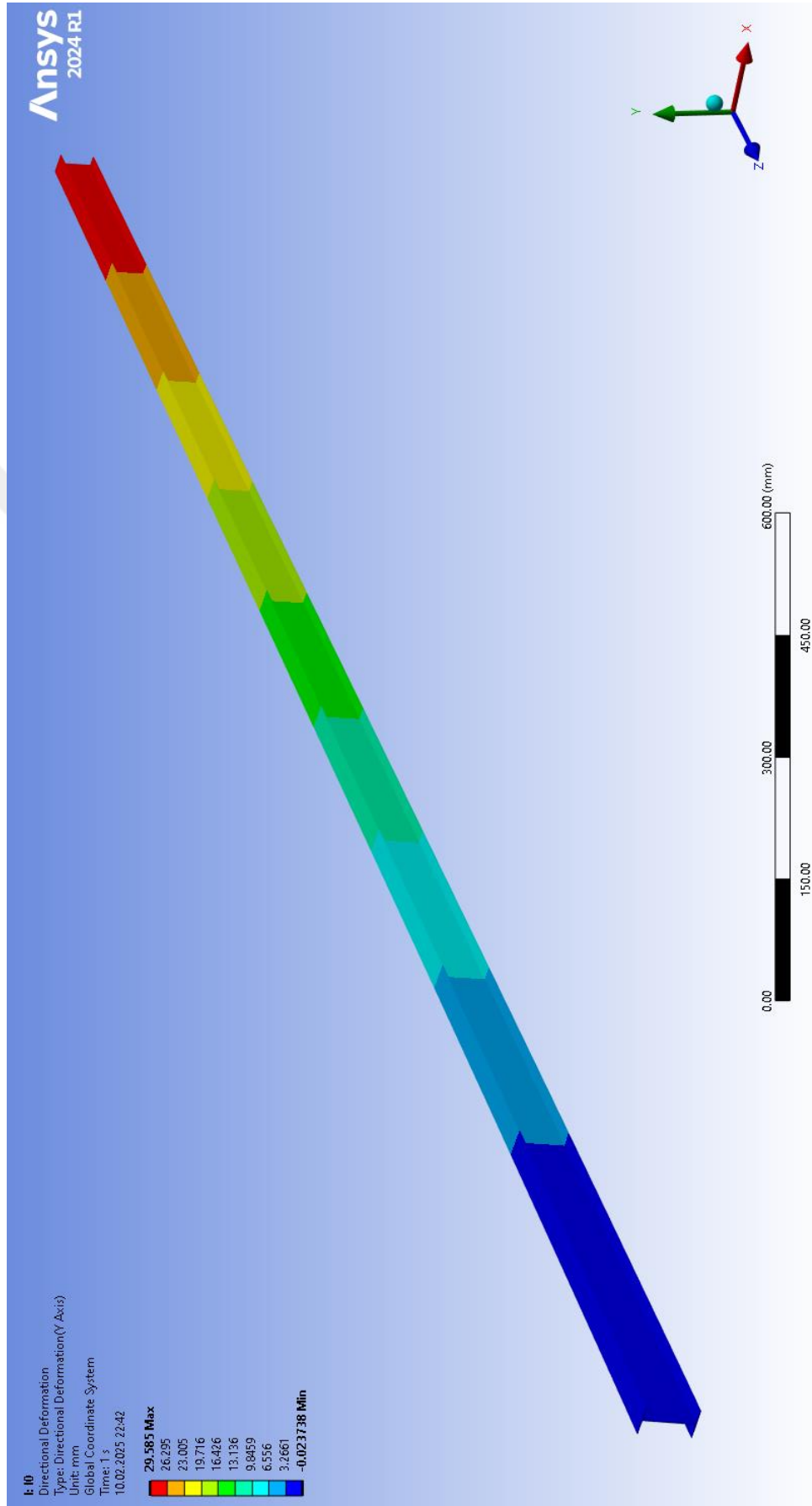
EK-71 6. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



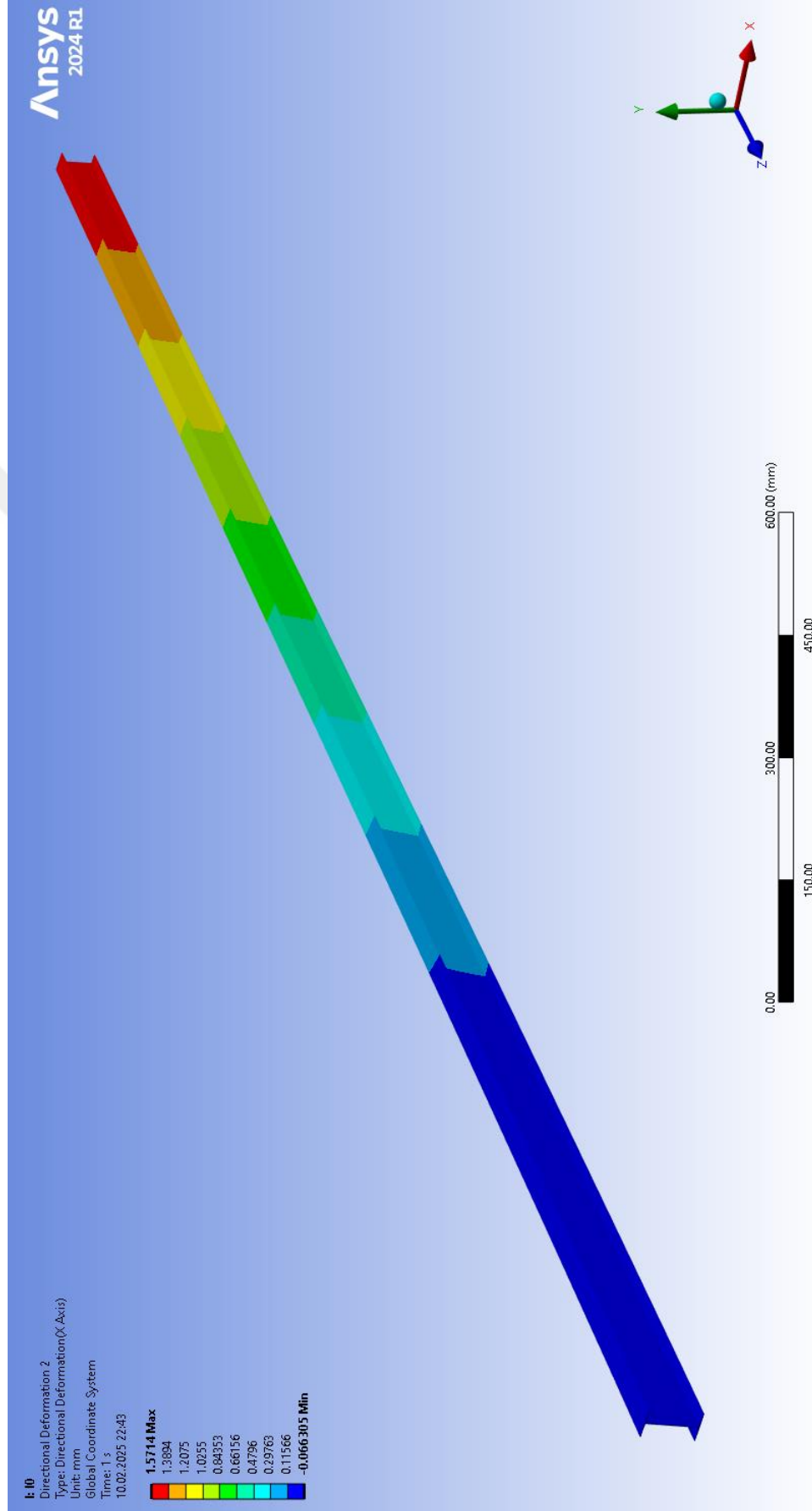
EK-72 6. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



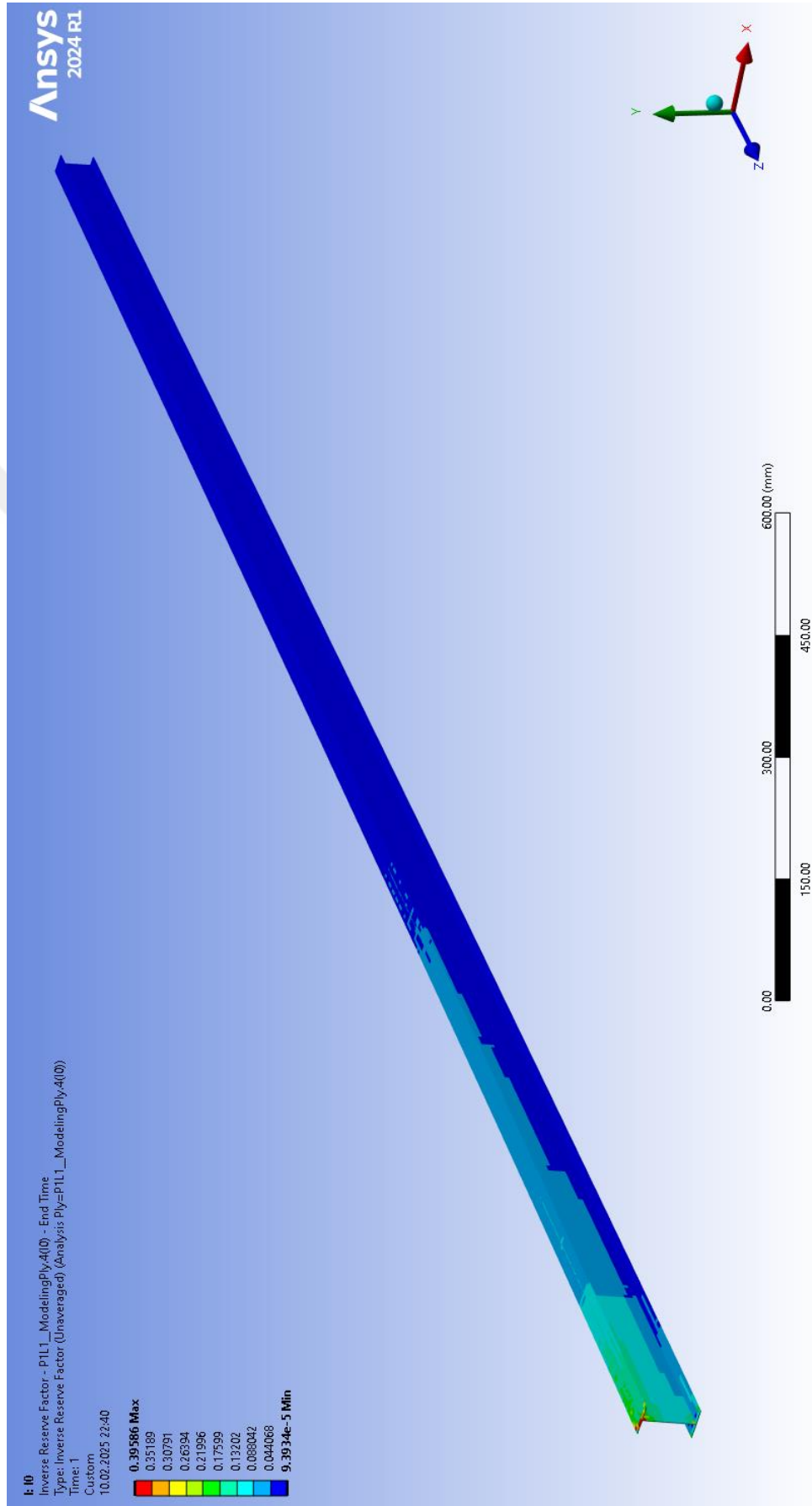
EK-73 7. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



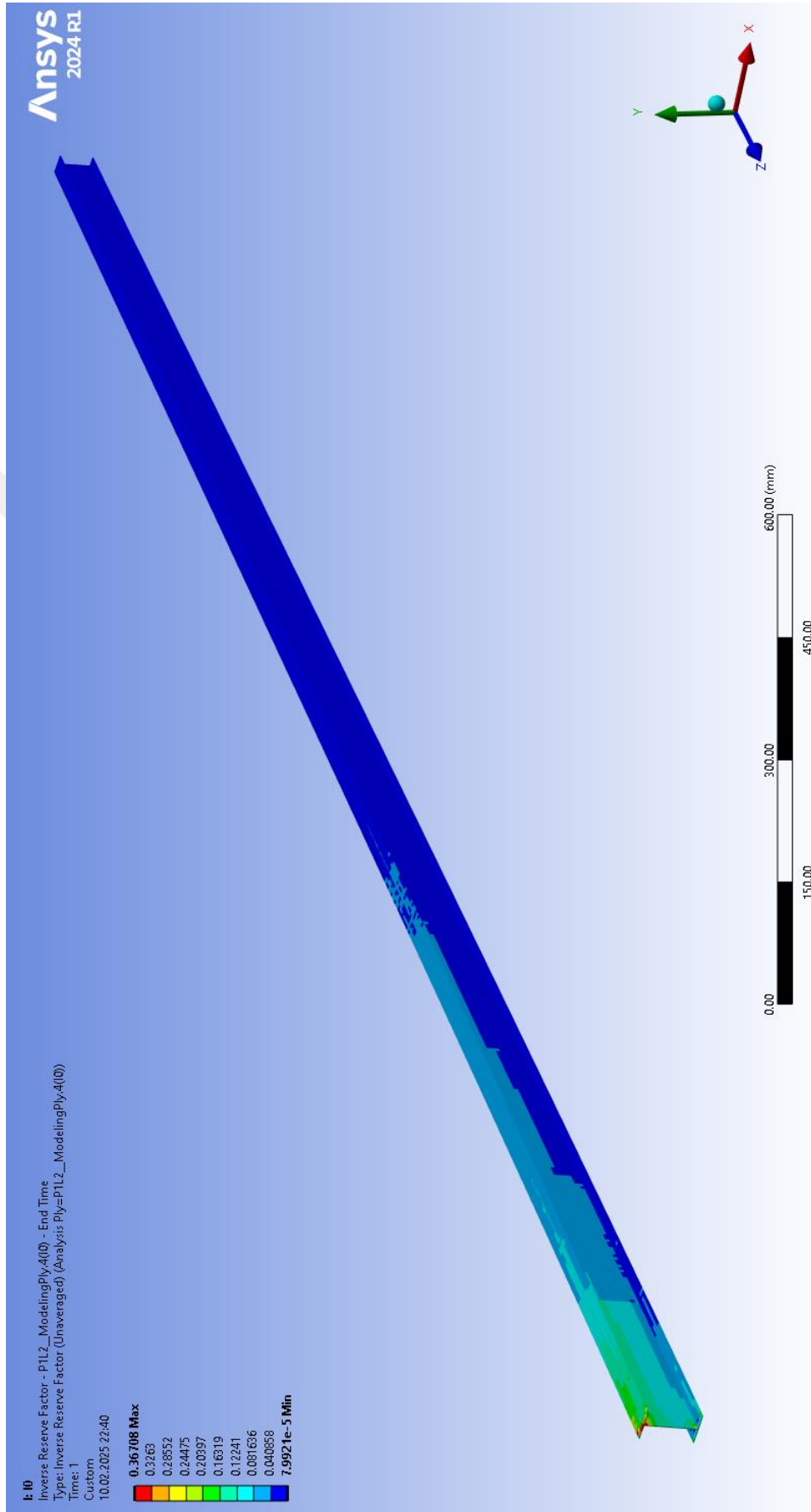
EK-74 7. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



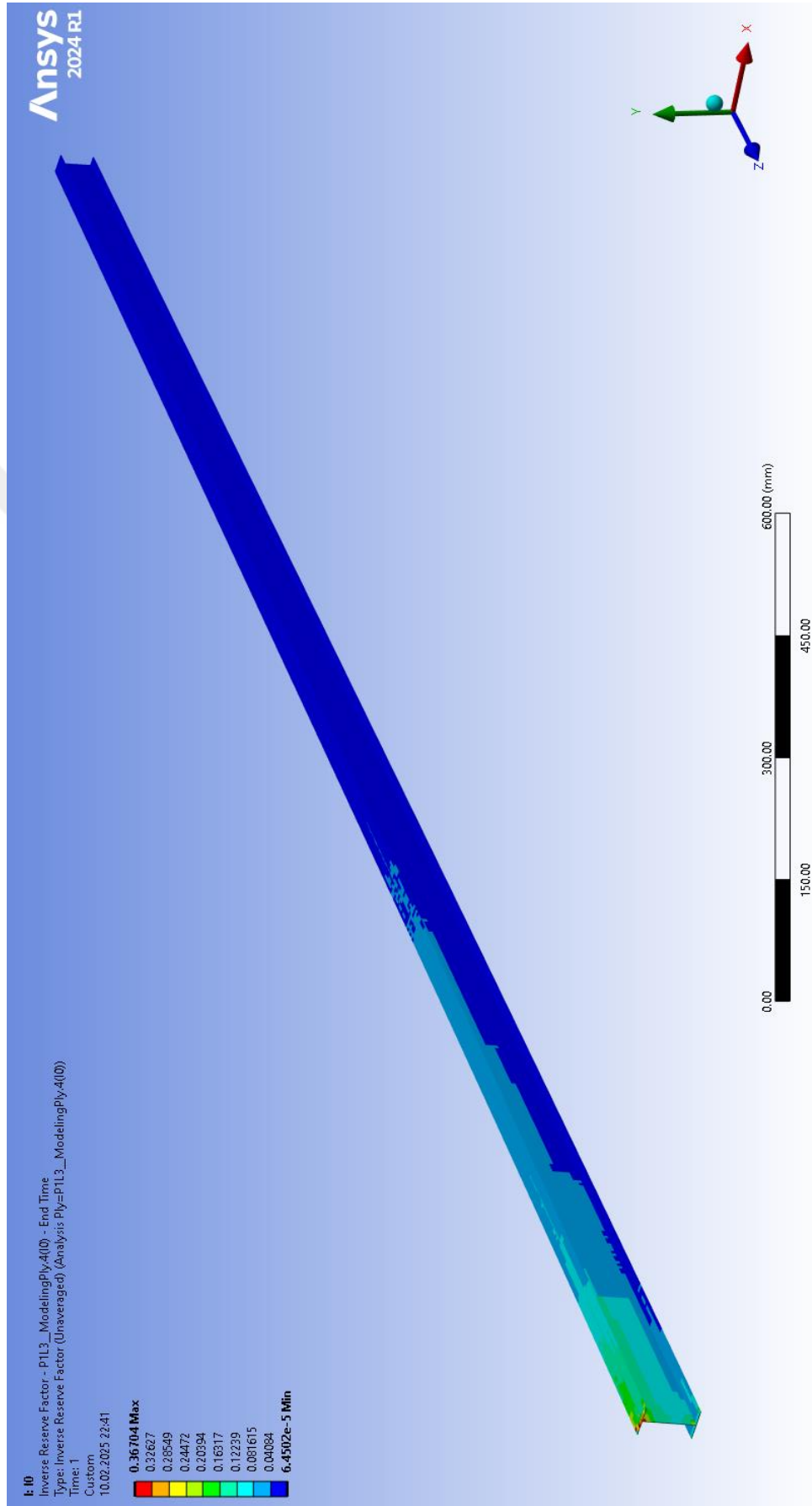
EK-75 7. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



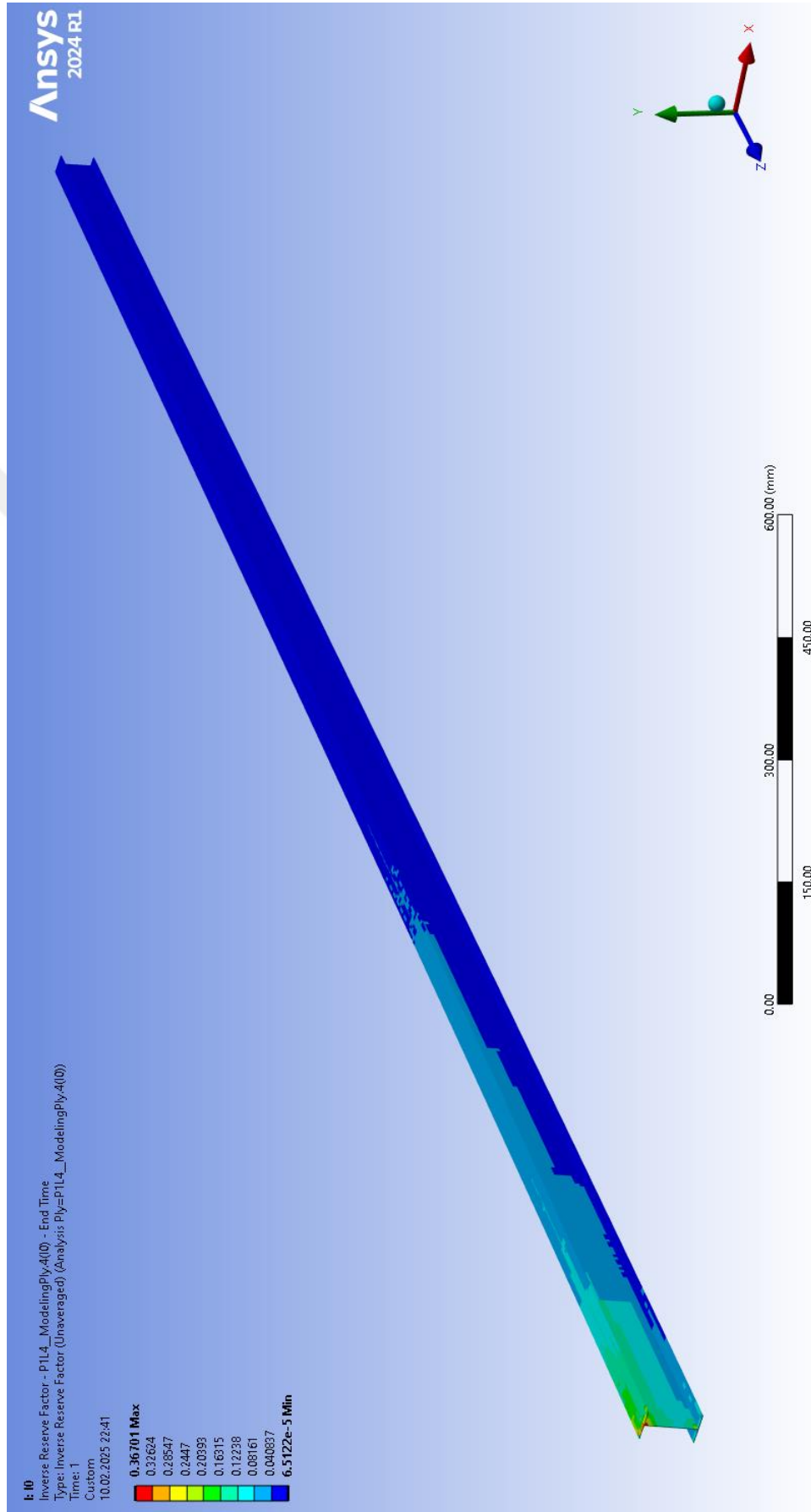
EK-76 7. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



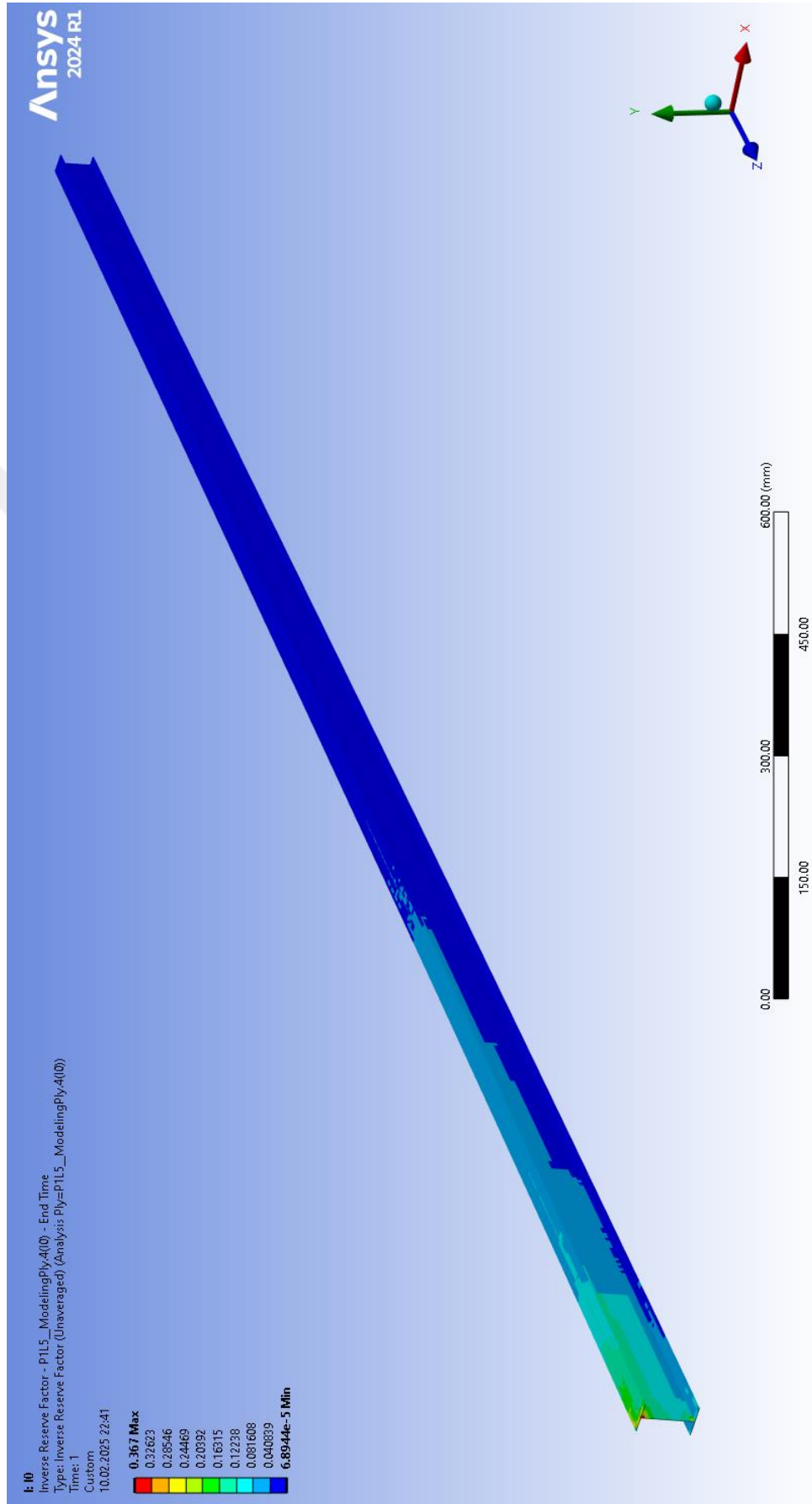
EK-77 7. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



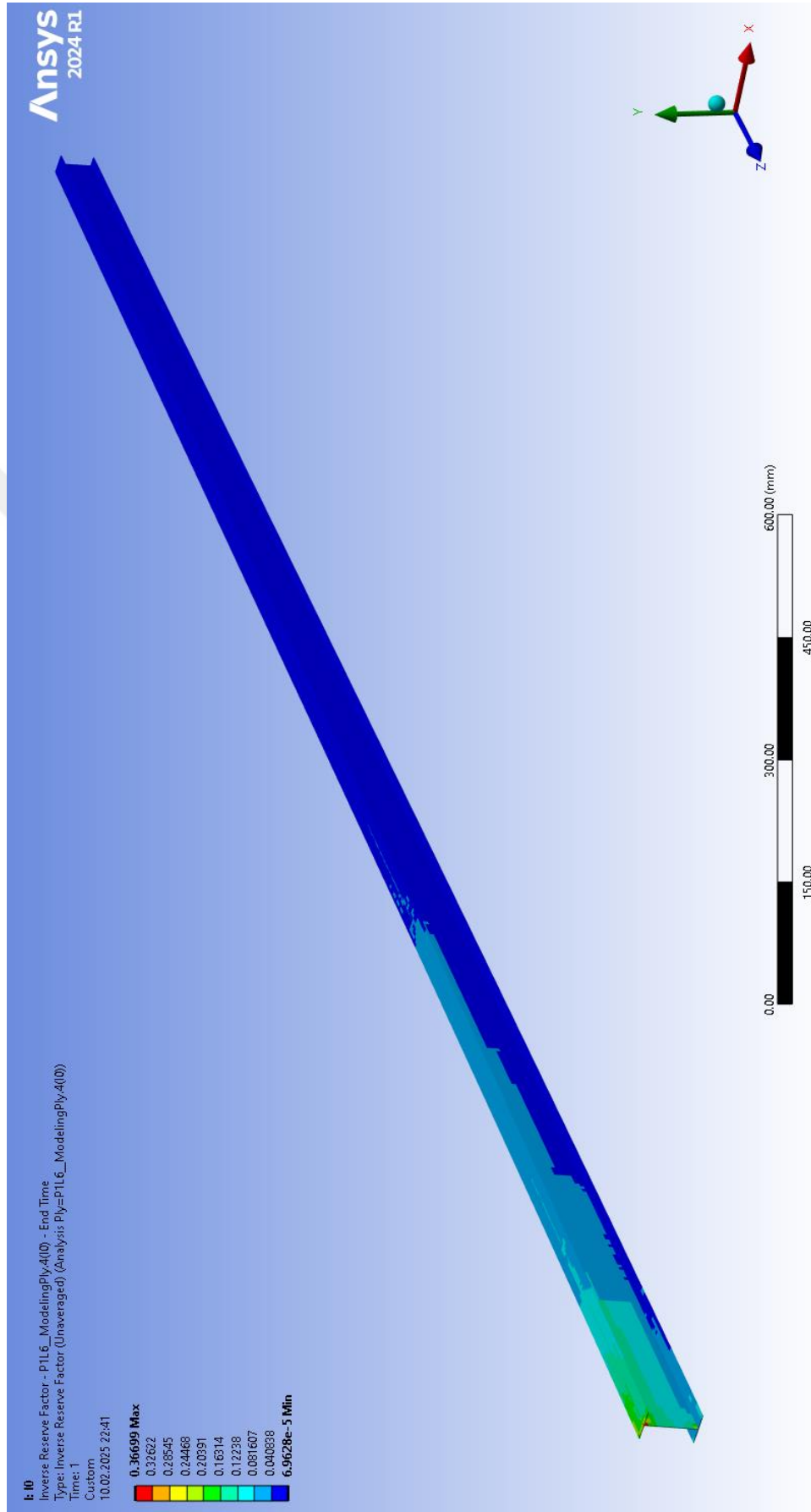
EK-78 7. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



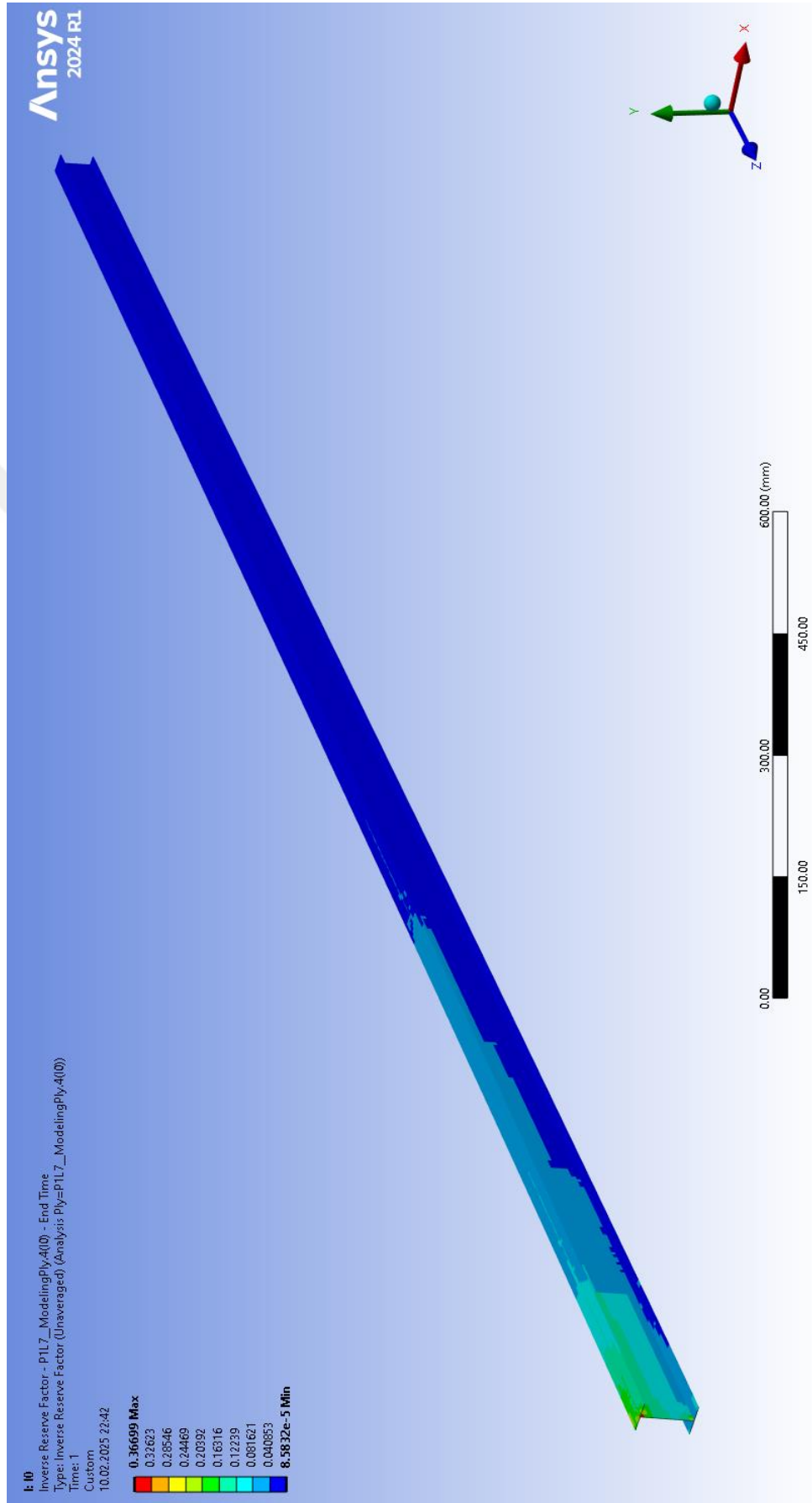
EK-79 7. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



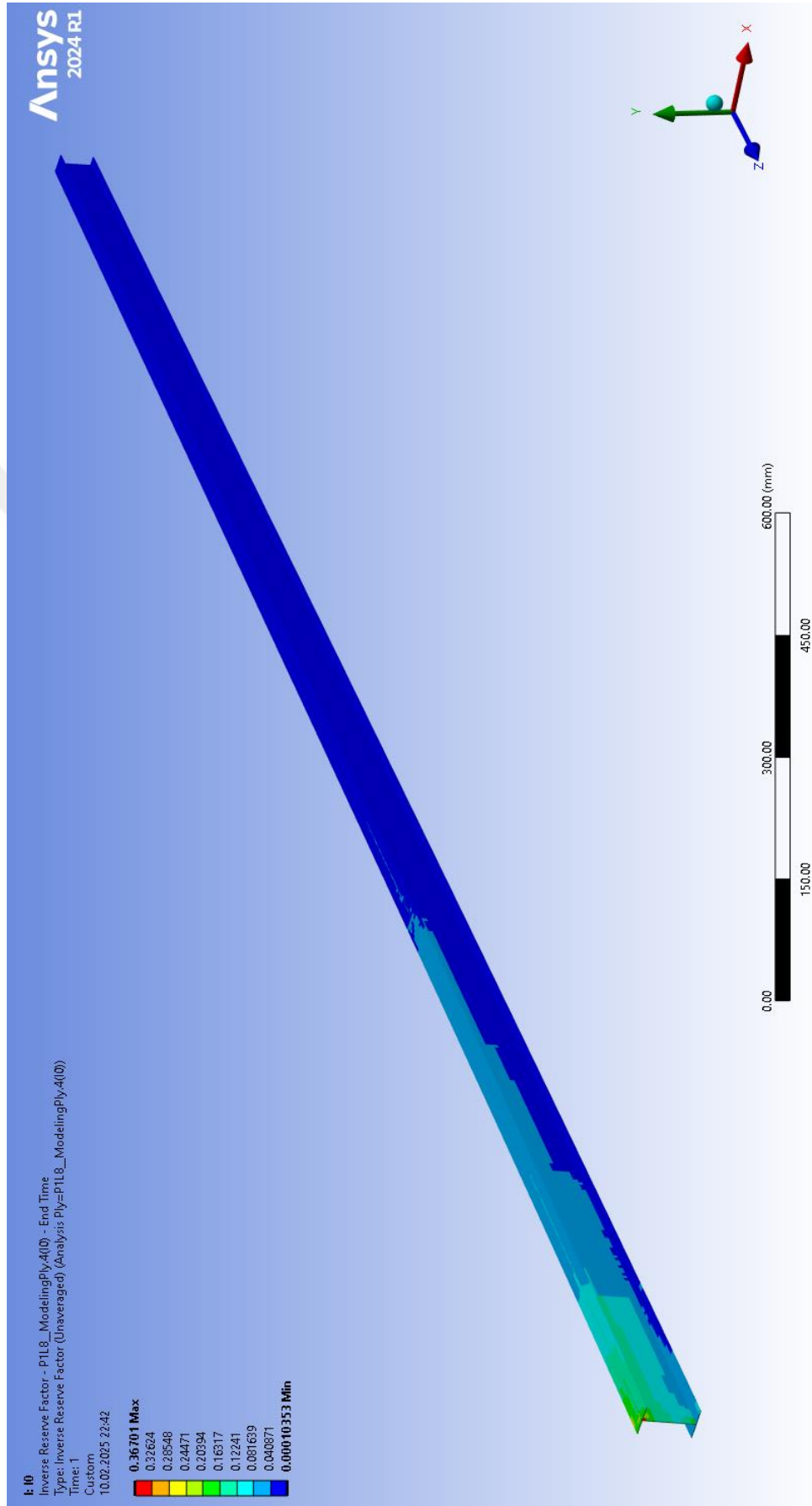
EK-80 7. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



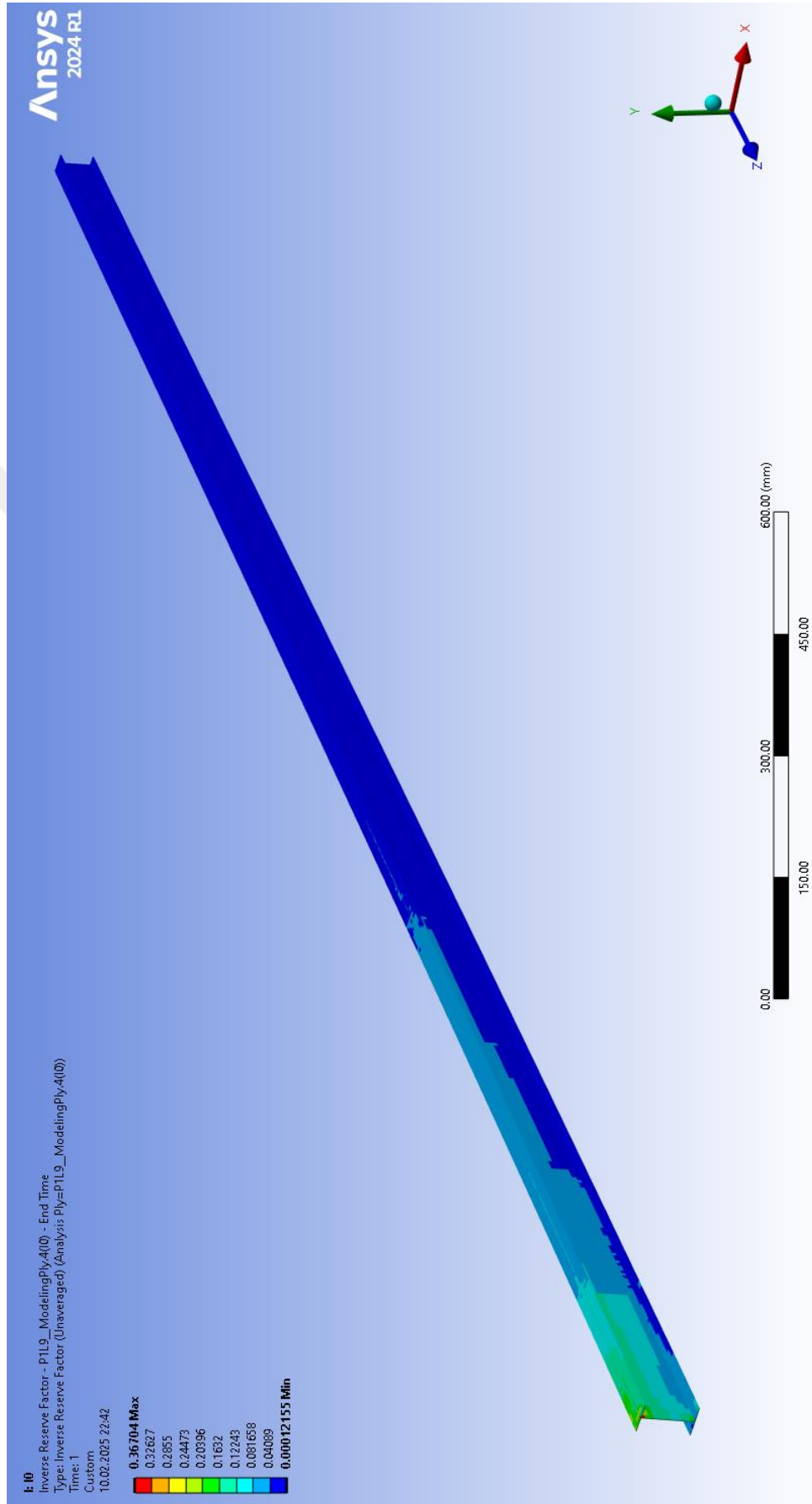
EK-81 7. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



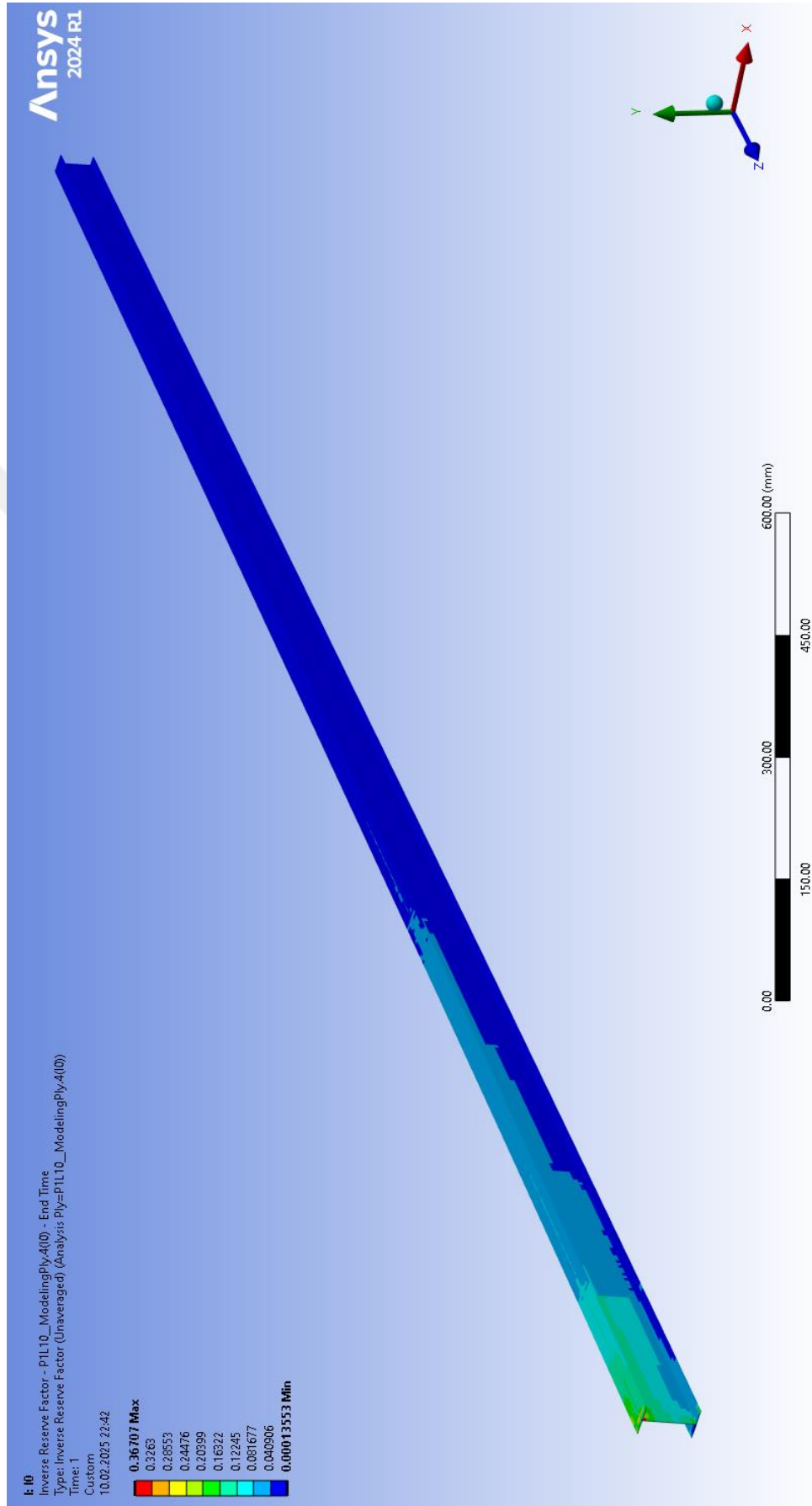
EK-82 7. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



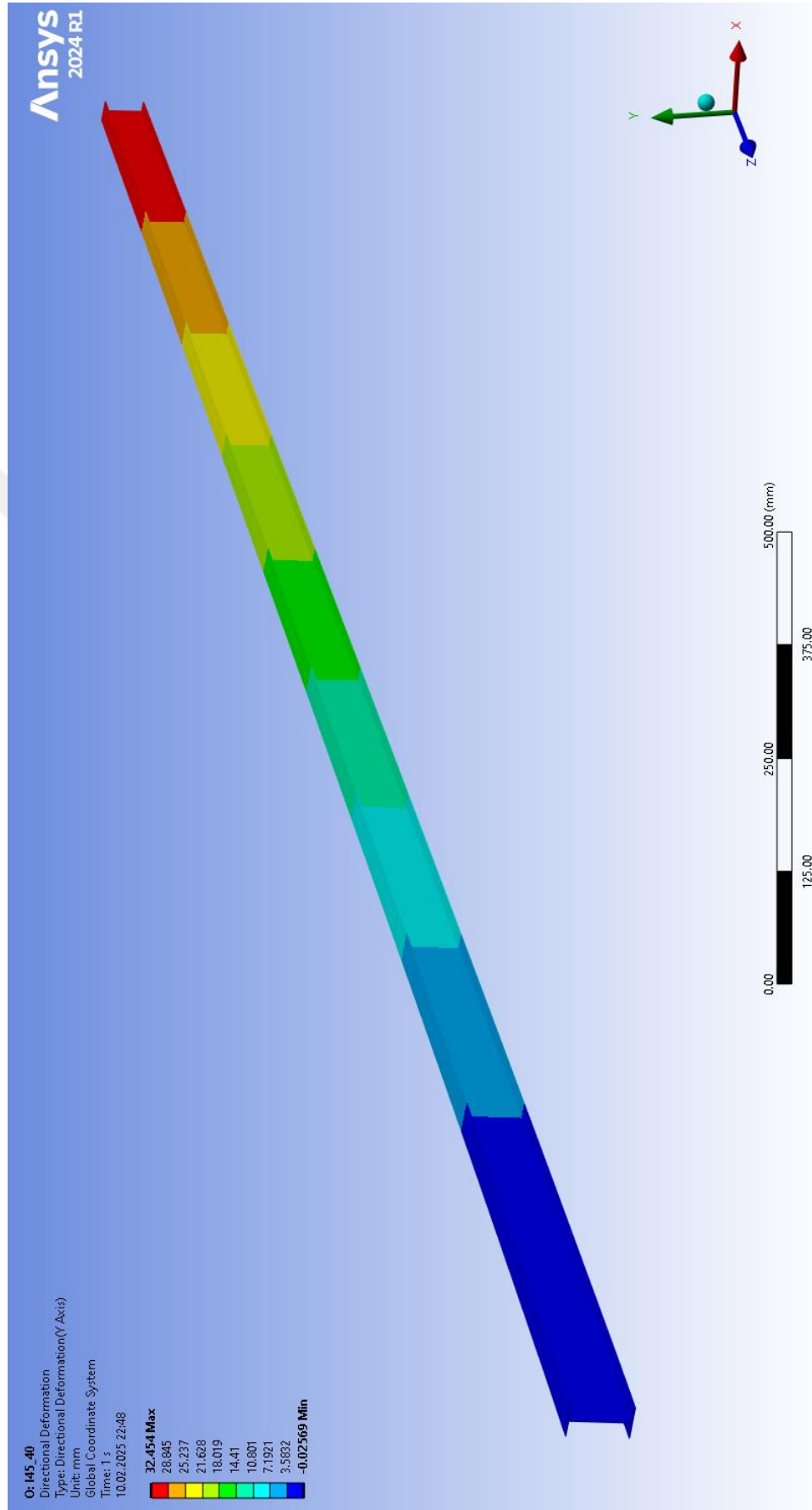
EK-83 7. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



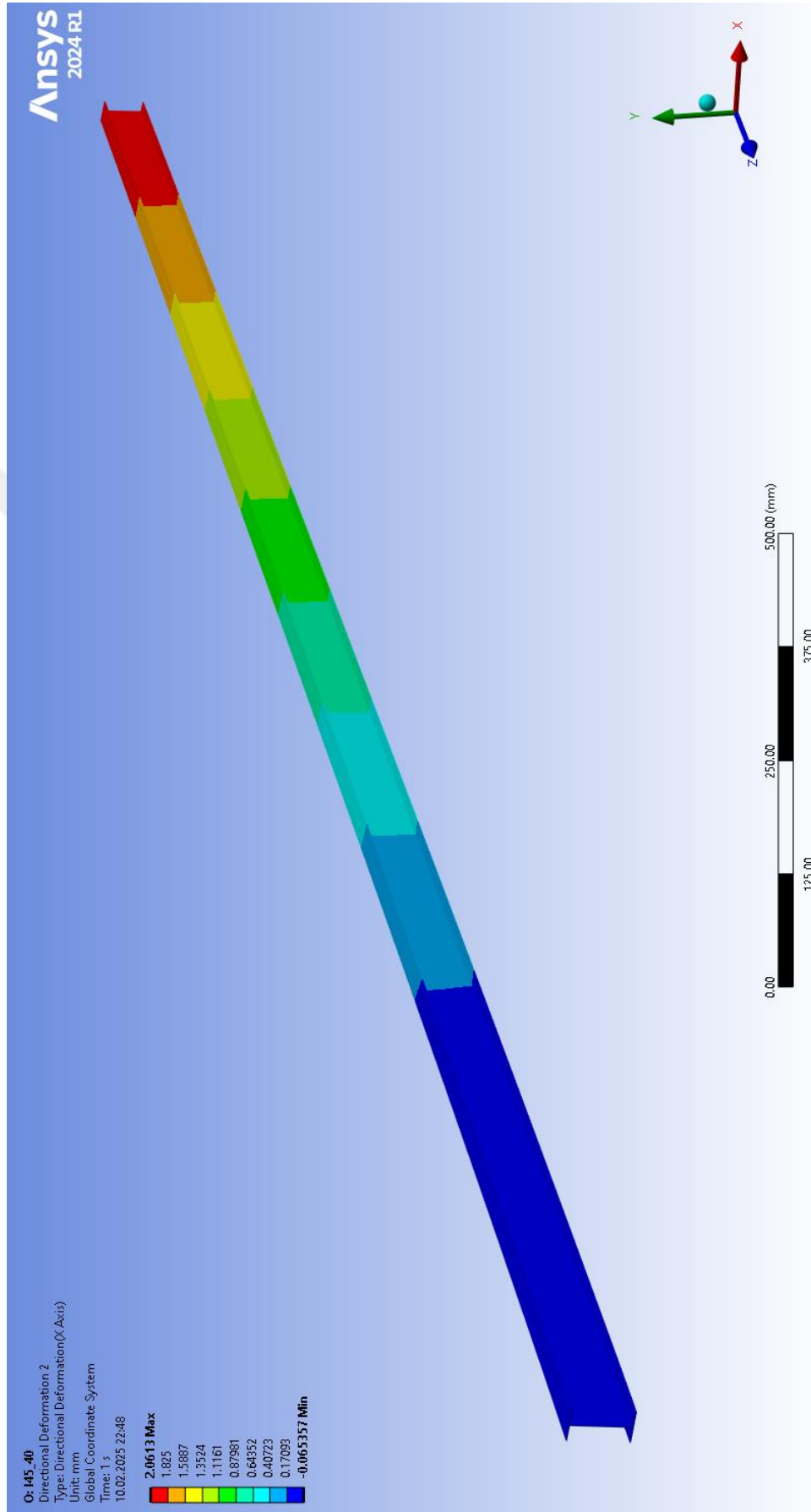
EK-84 7. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



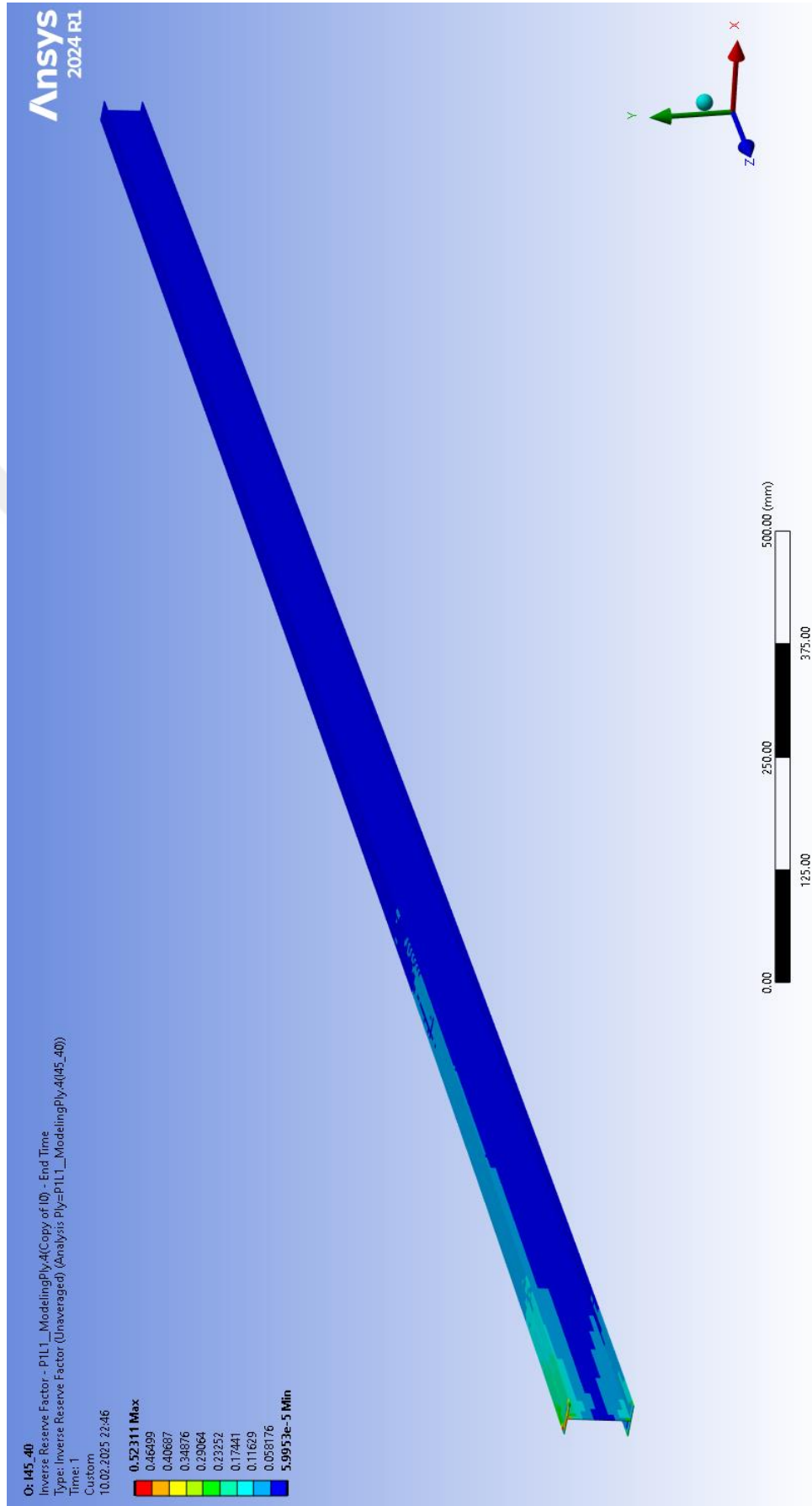
EK-85 8. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



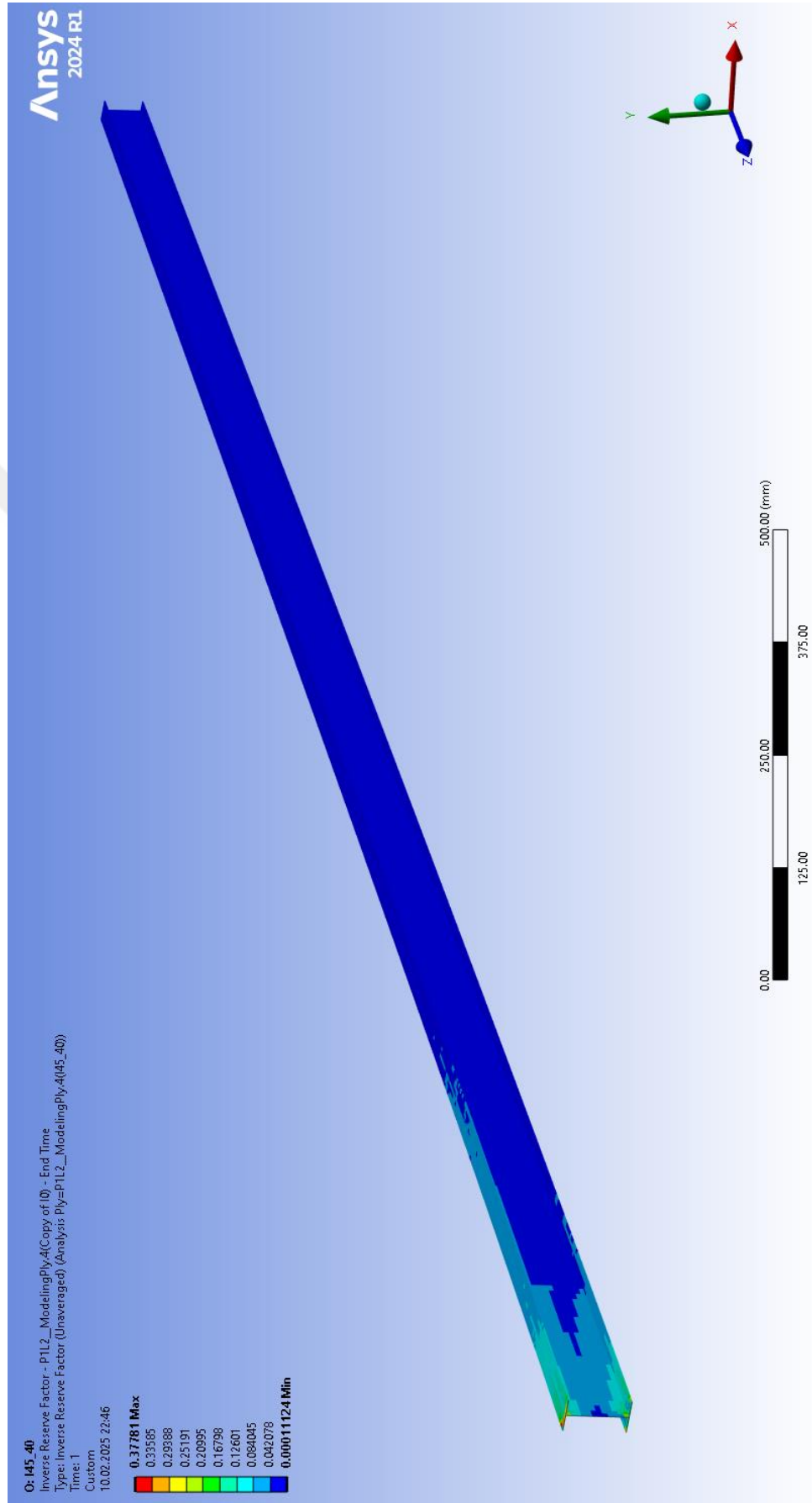
EK-86 8. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



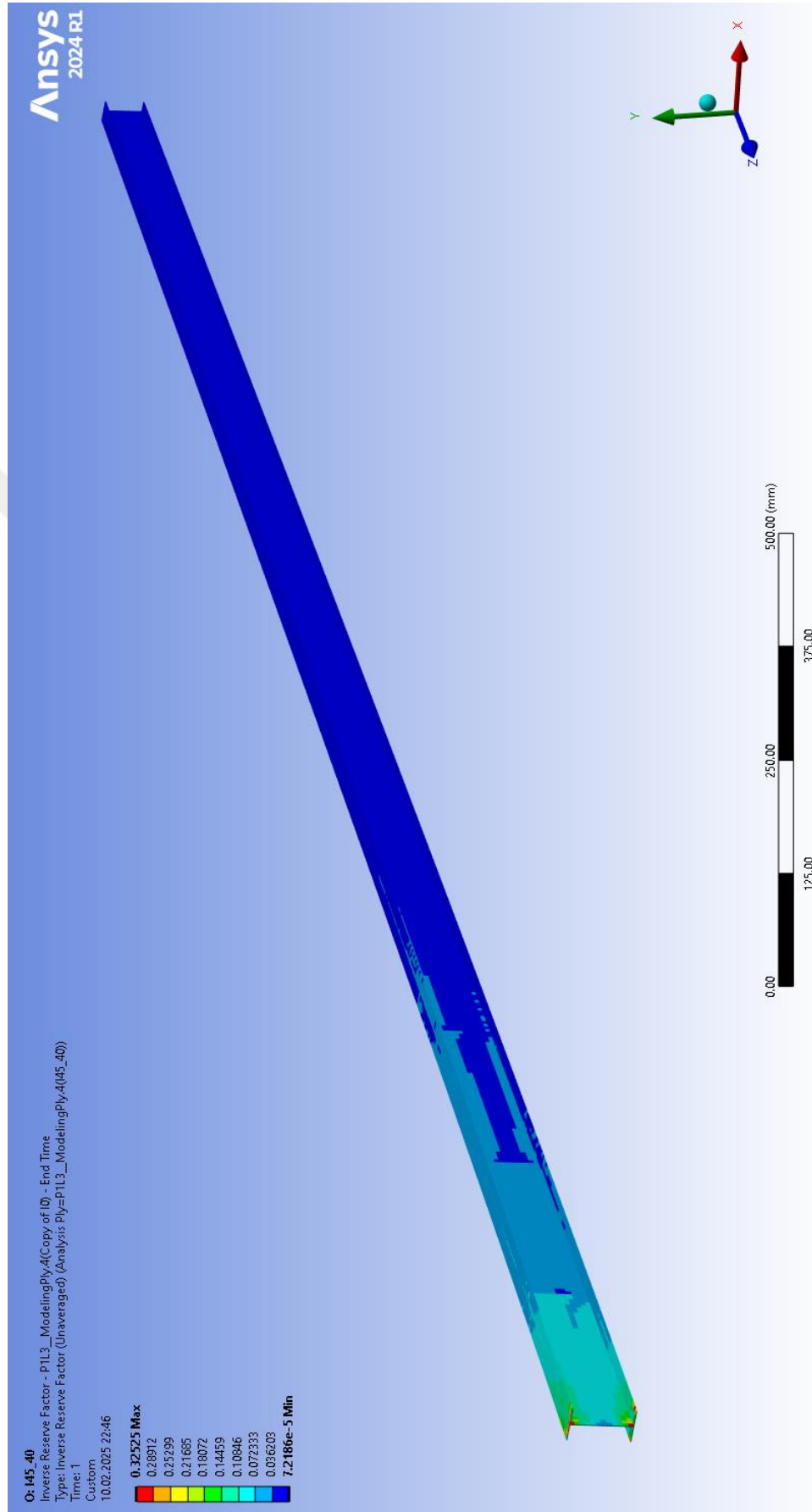
EK-87 8. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



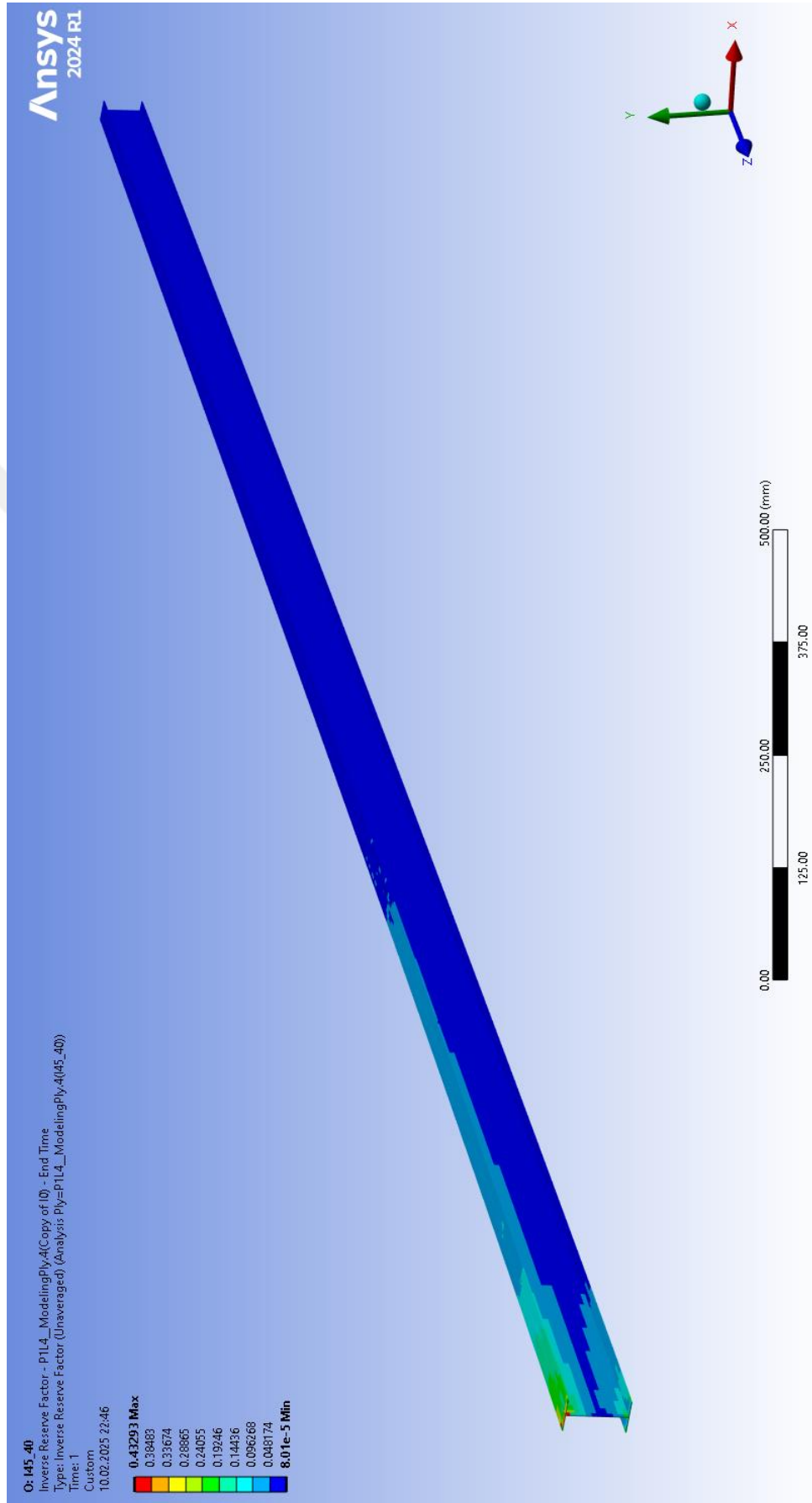
EK-88 8. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



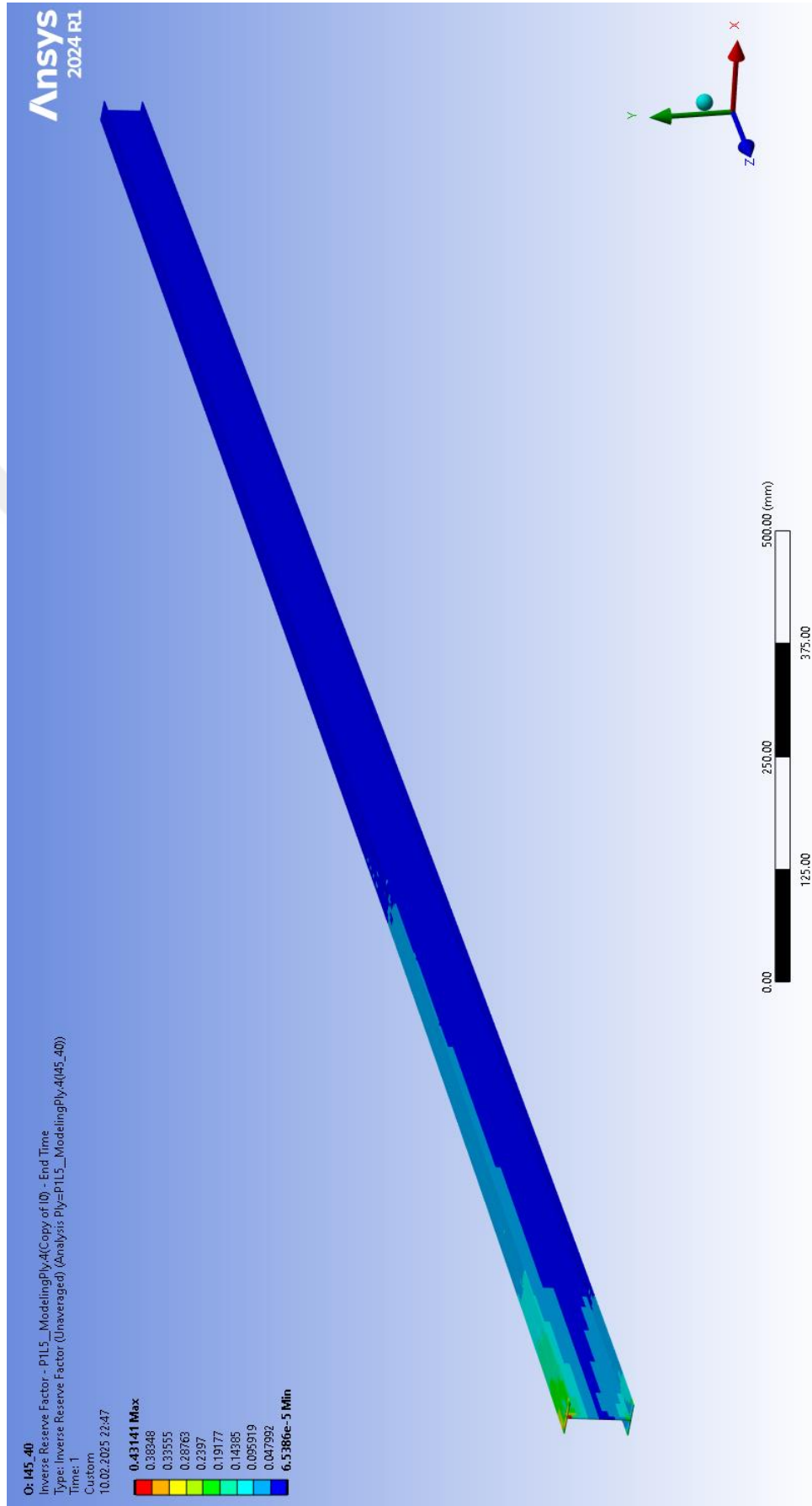
EK-89 8. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



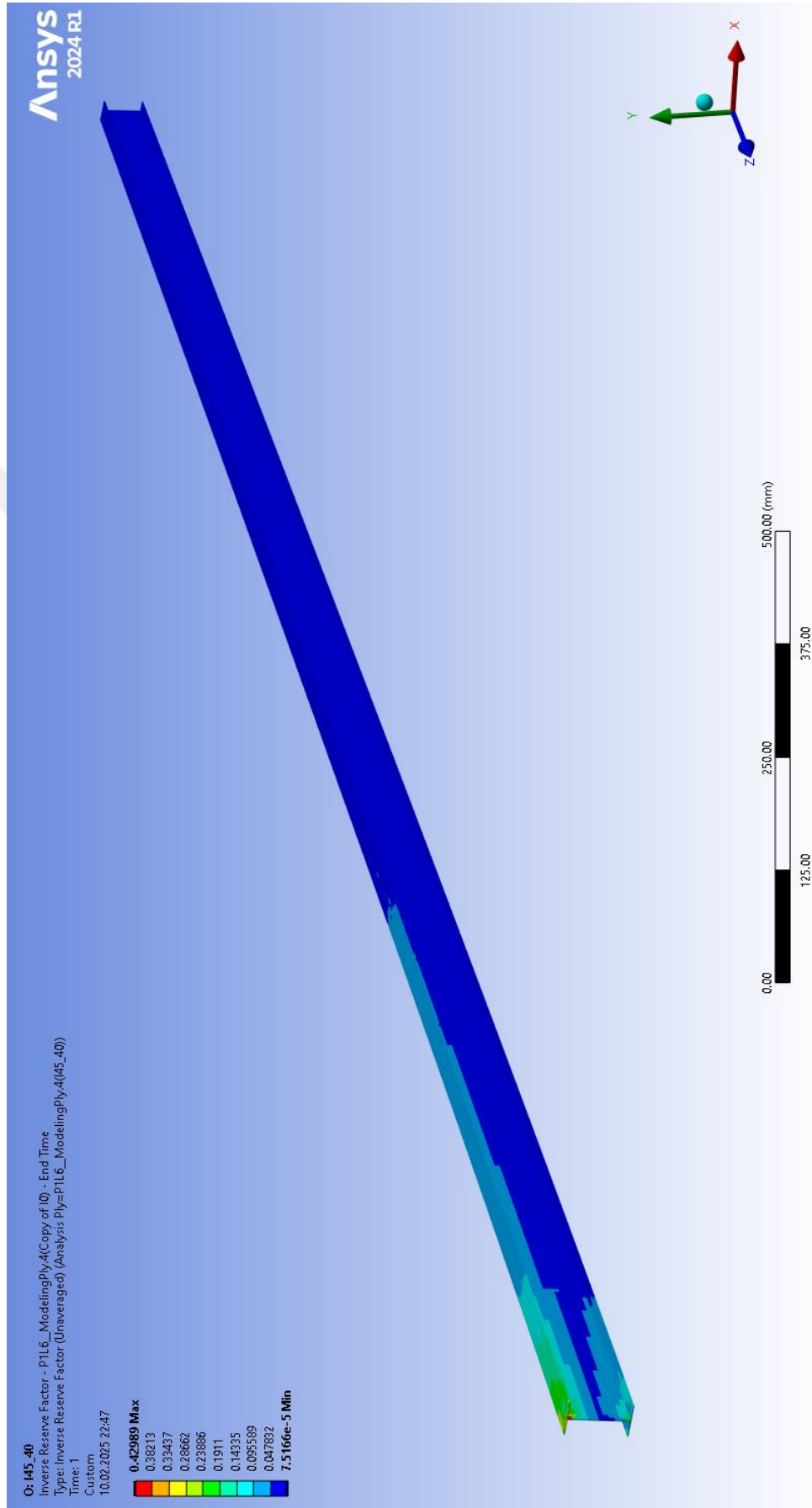
EK-90 8. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



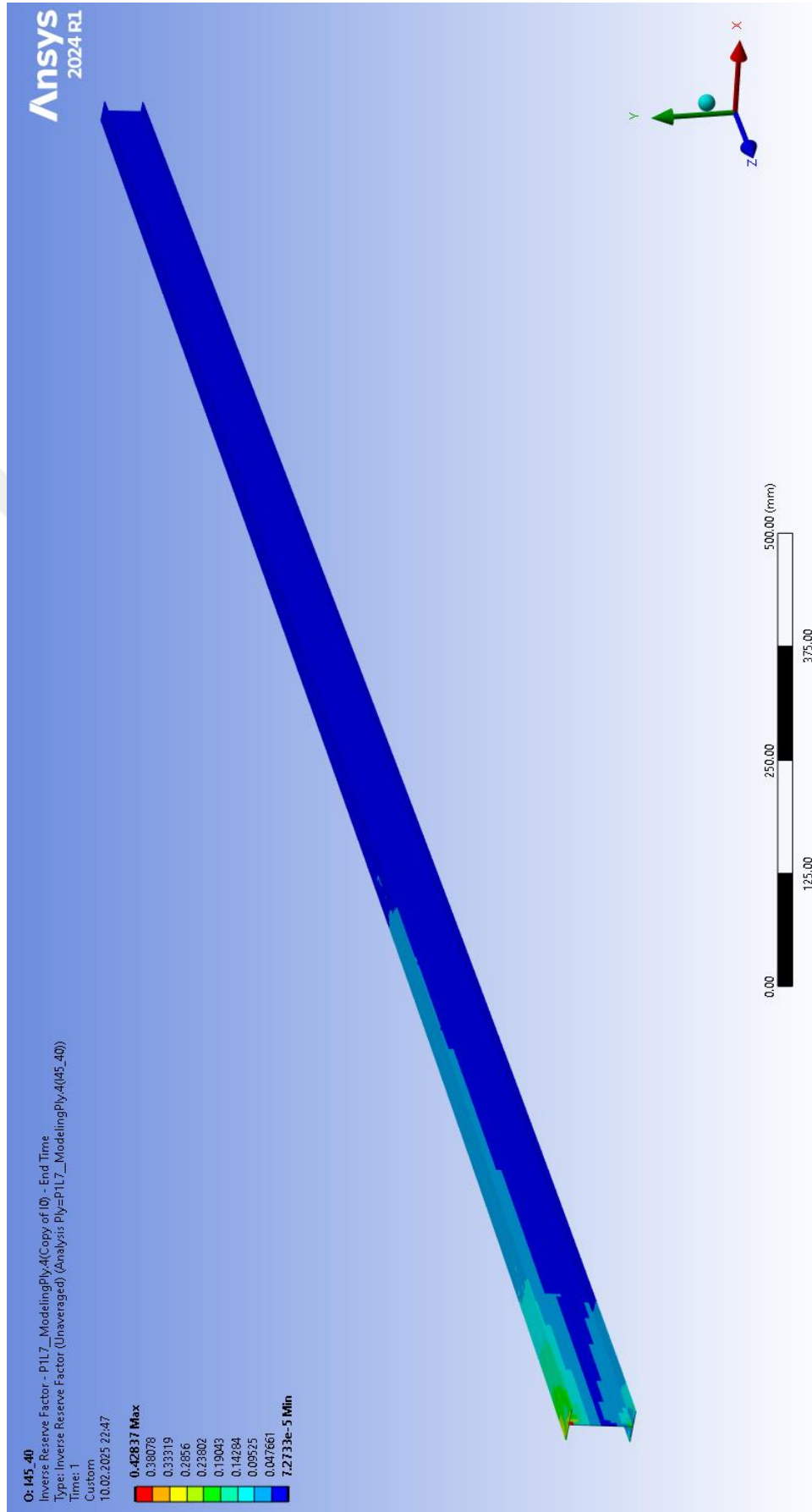
EK-91 8. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



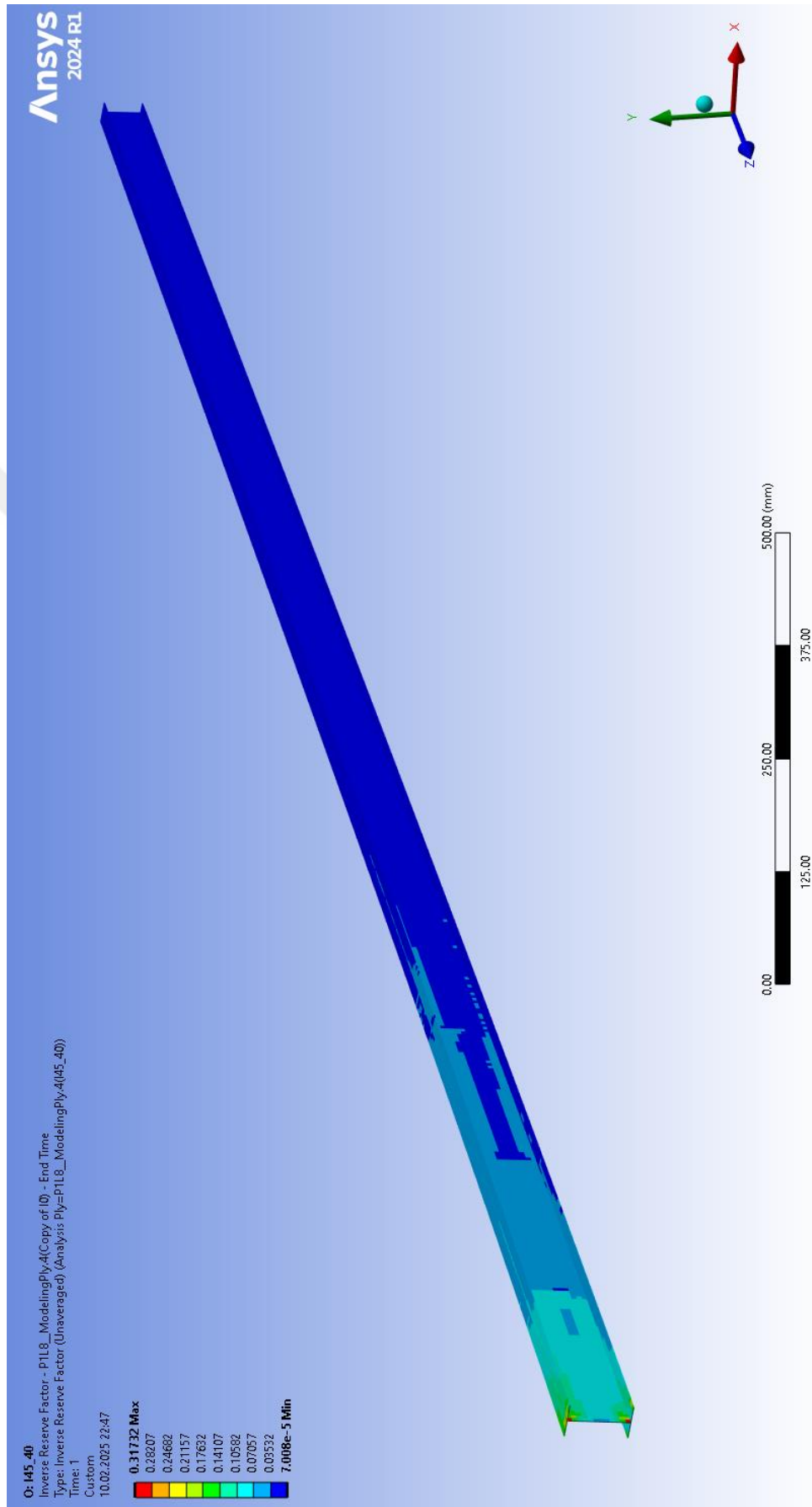
EK-92 8. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



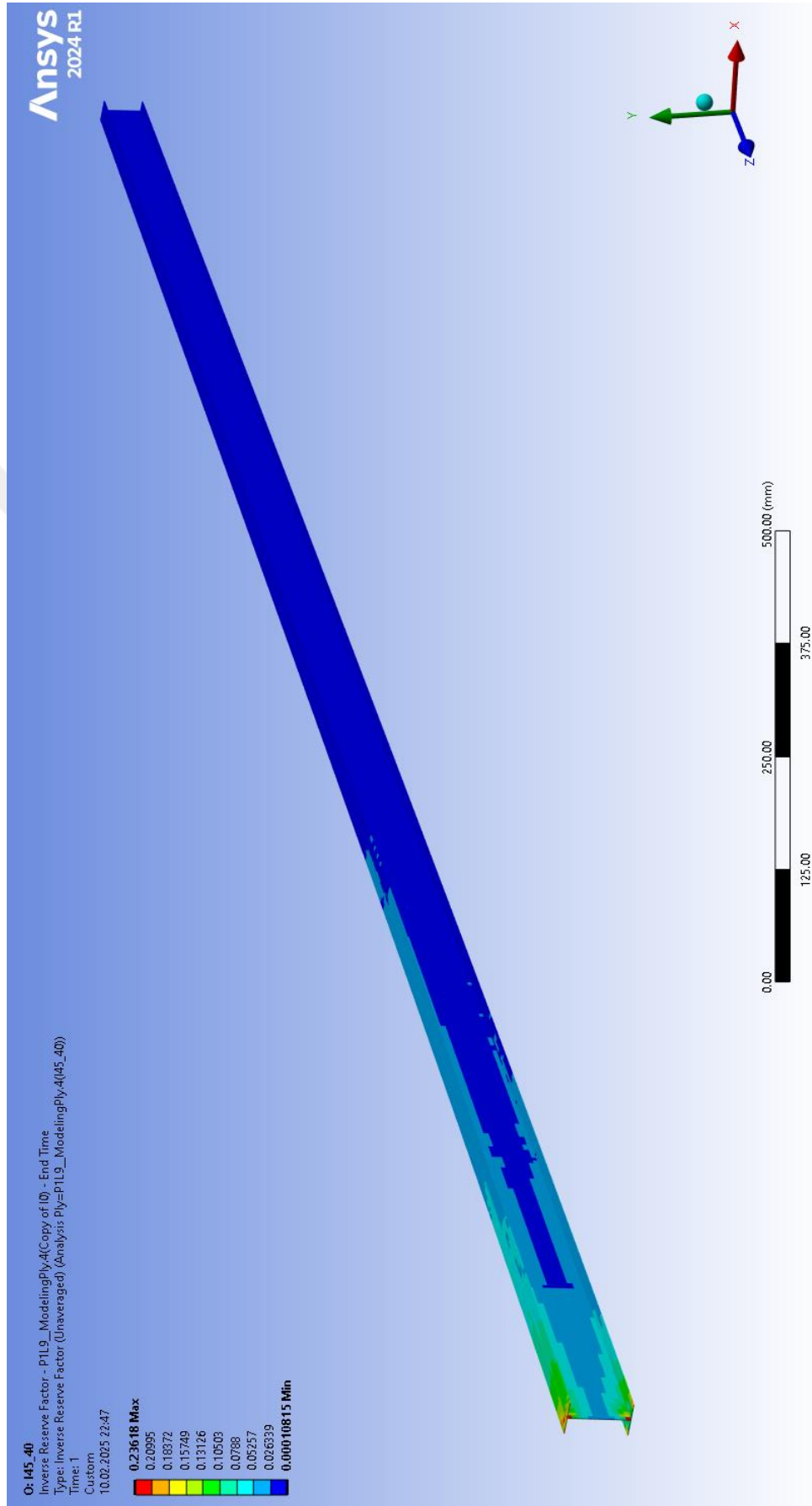
EK-93 8. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



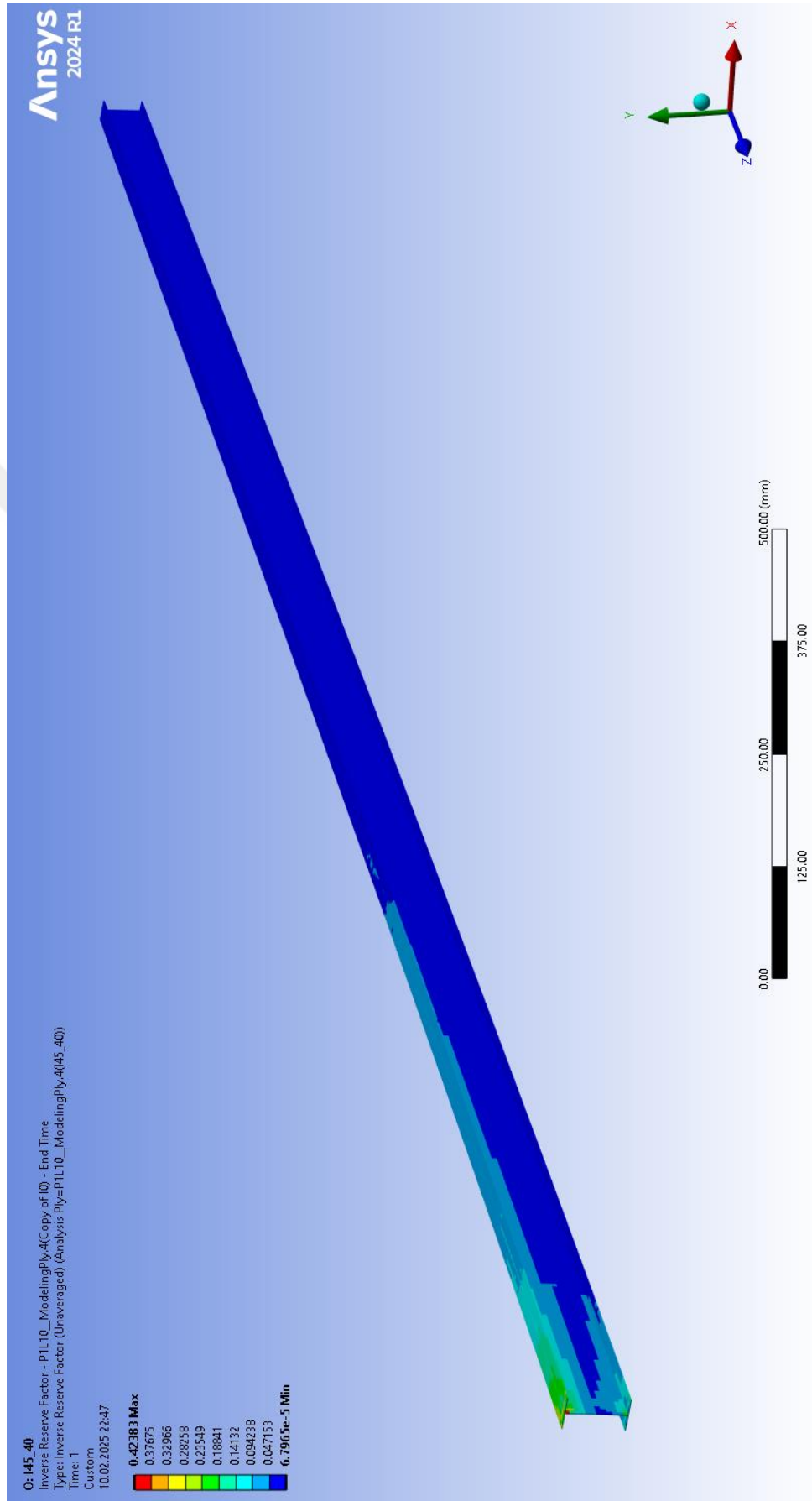
EK-94 8. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



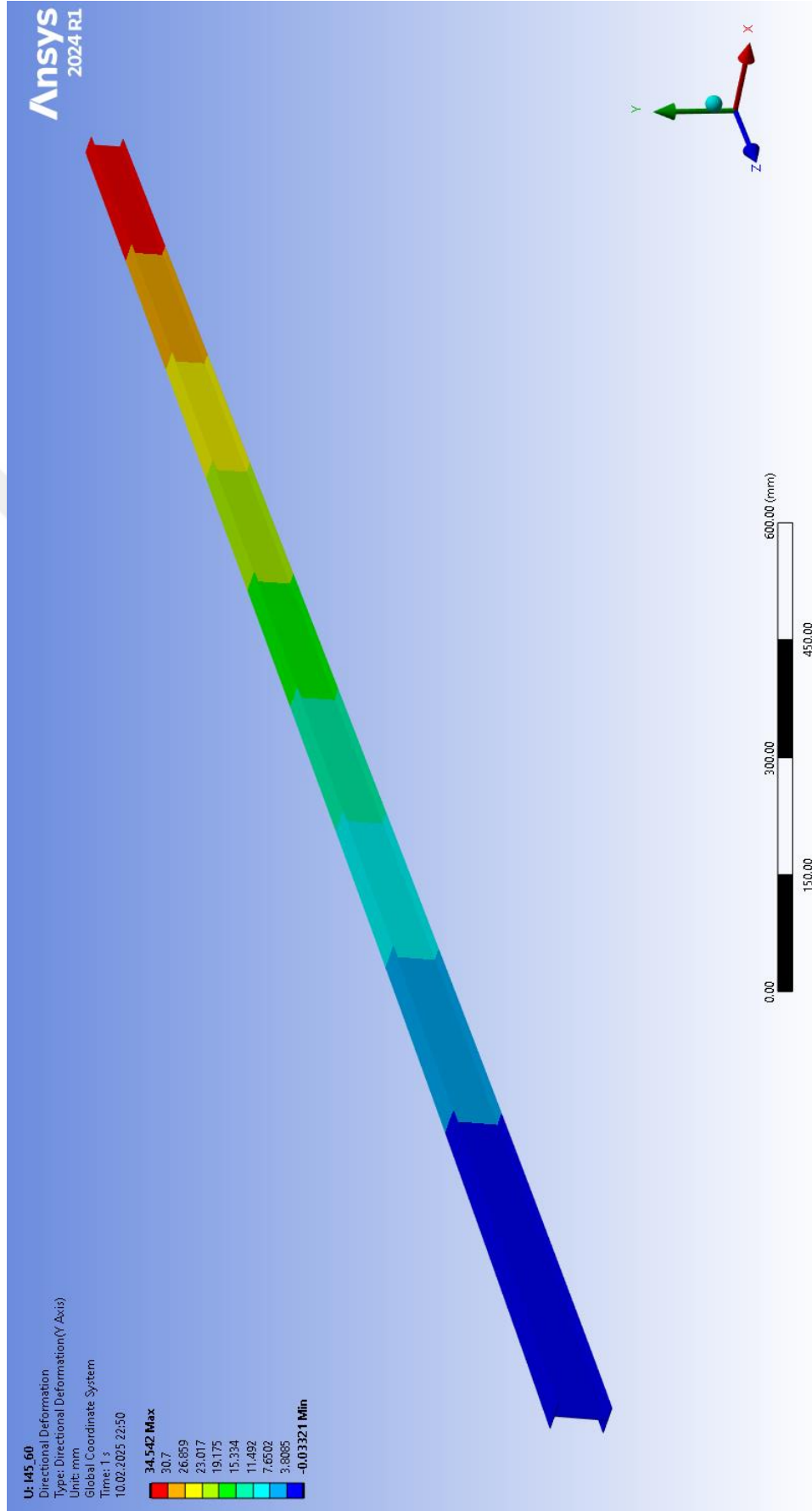
EK-95 8. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



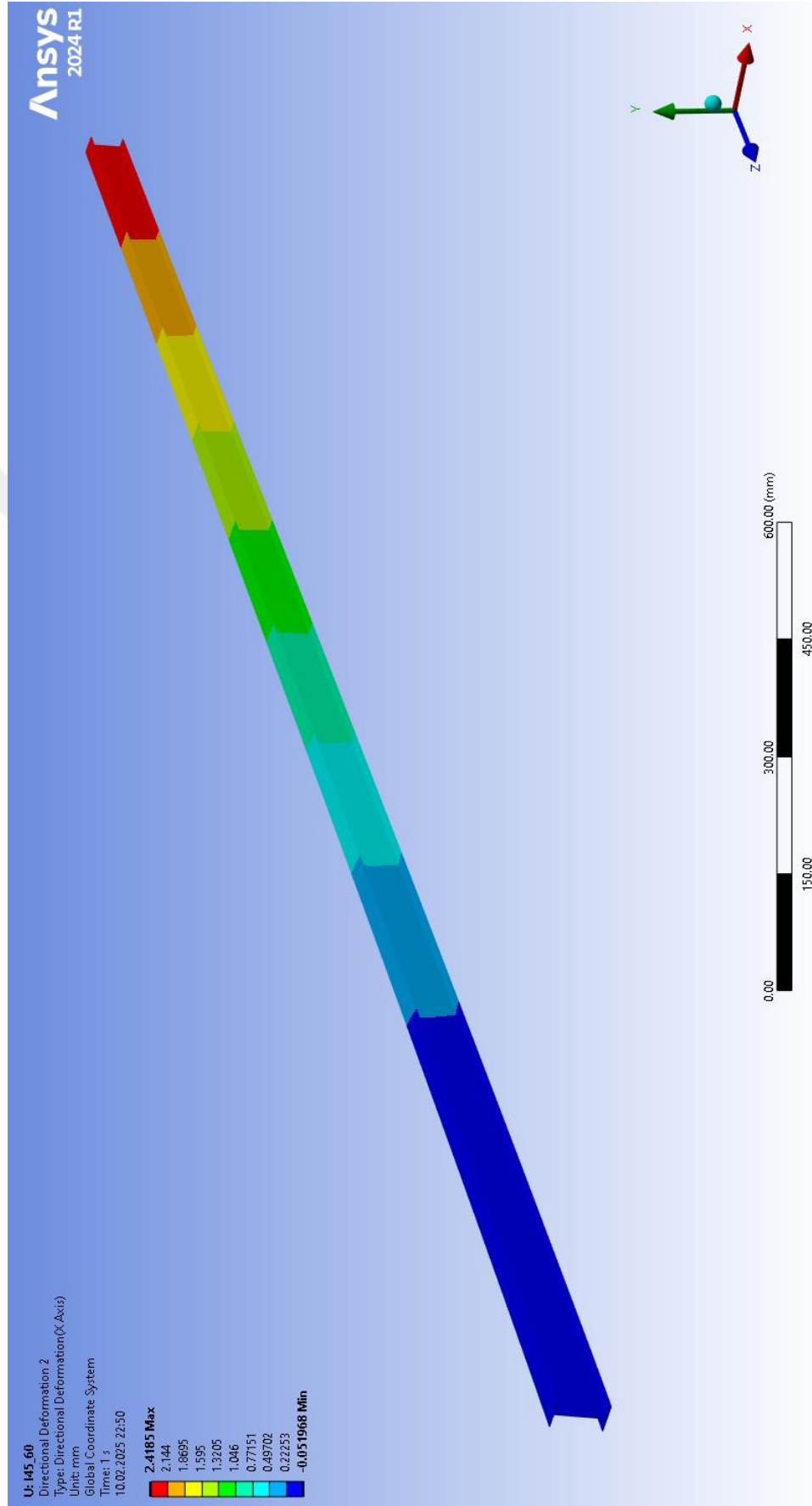
EK-96 8. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri



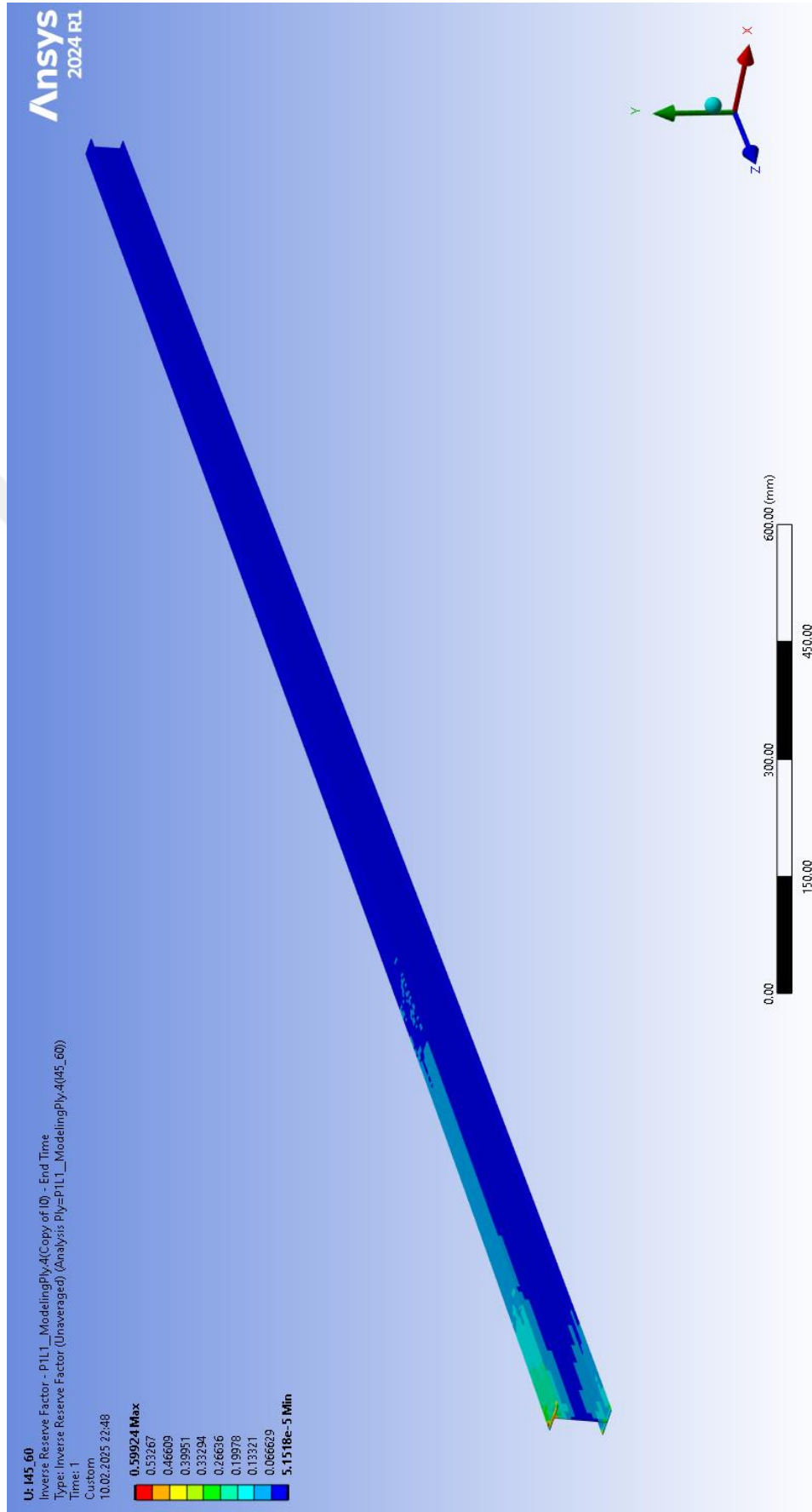
EK-97 9. Konfigürasyon taşıma yönünde deformasyon



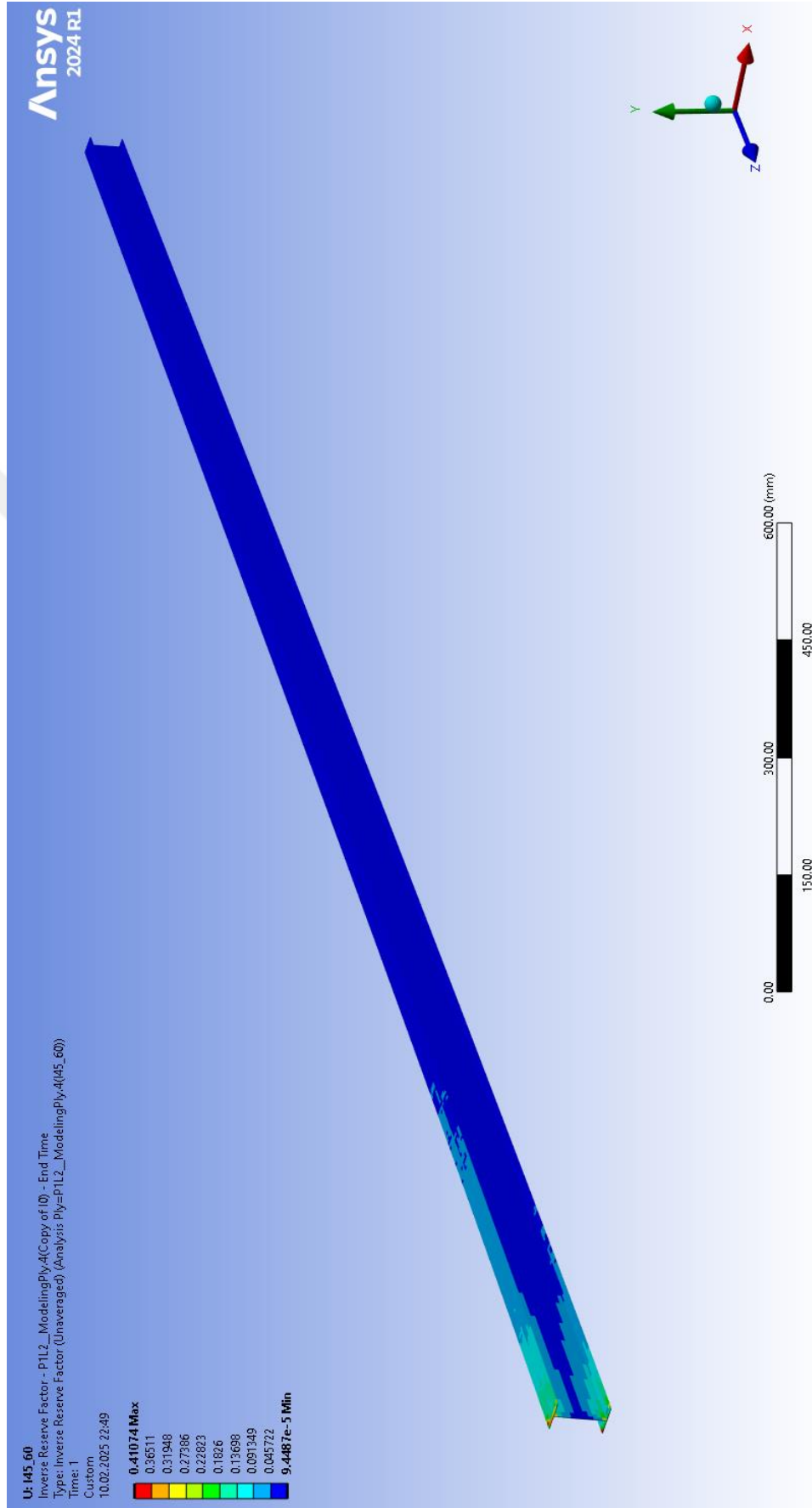
EK-98 9. Konfigürasyon sürüklenme yönünde deformasyon



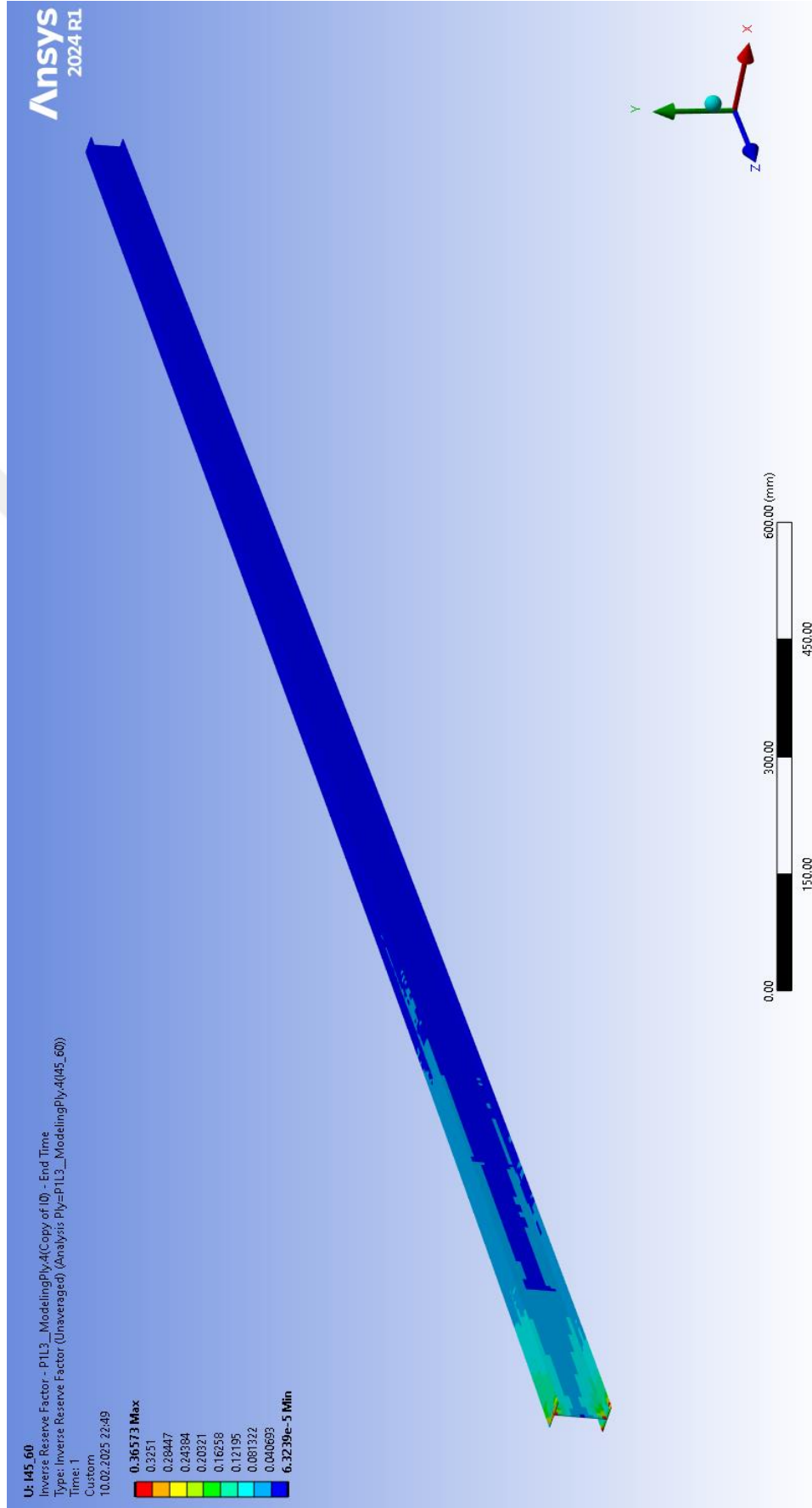
EK-99 9. Konfigürasyon 1. Katman IRF değerleri



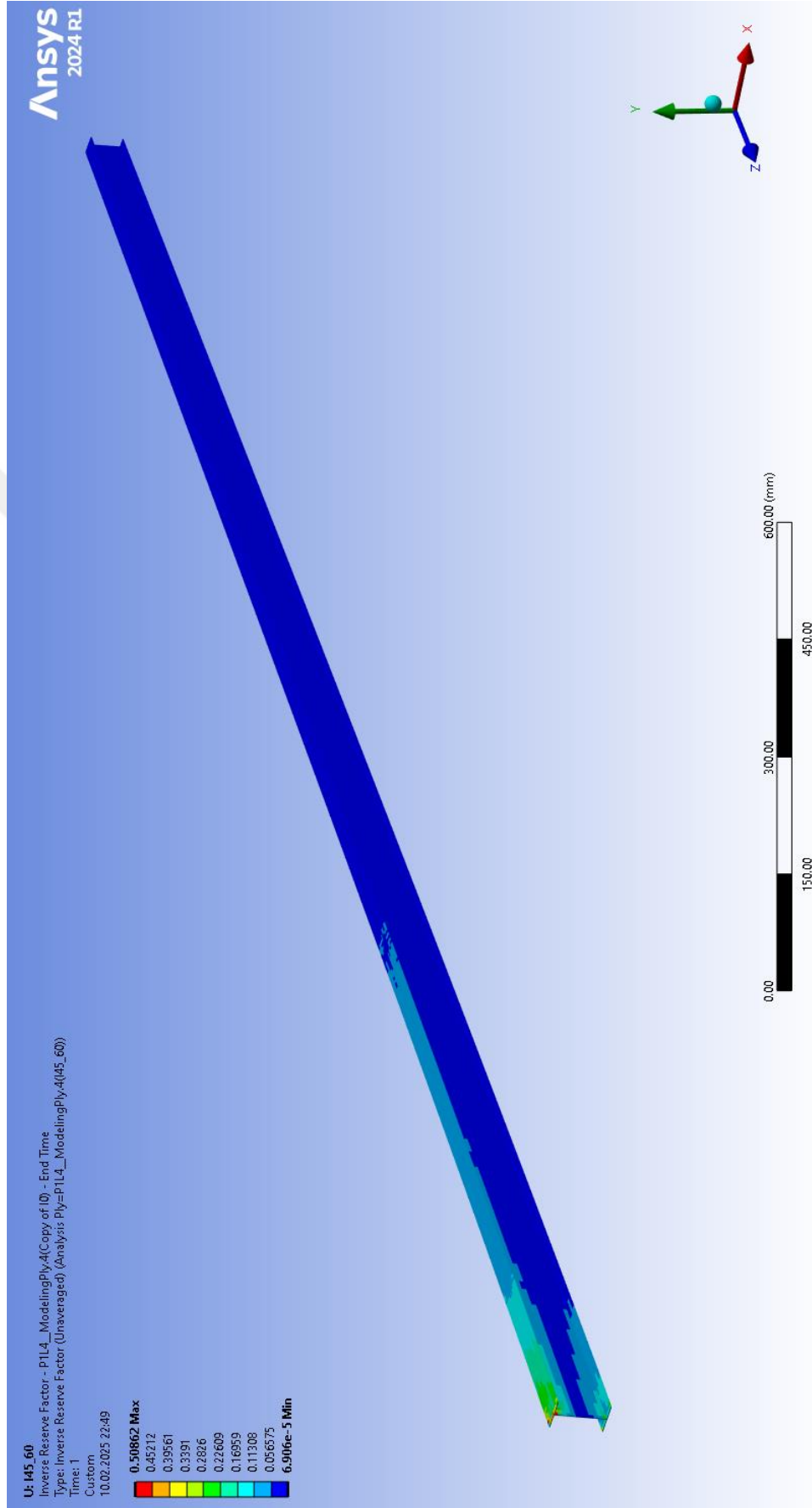
EK-100 9. Konfigürasyon 2. Katman IRF değerleri



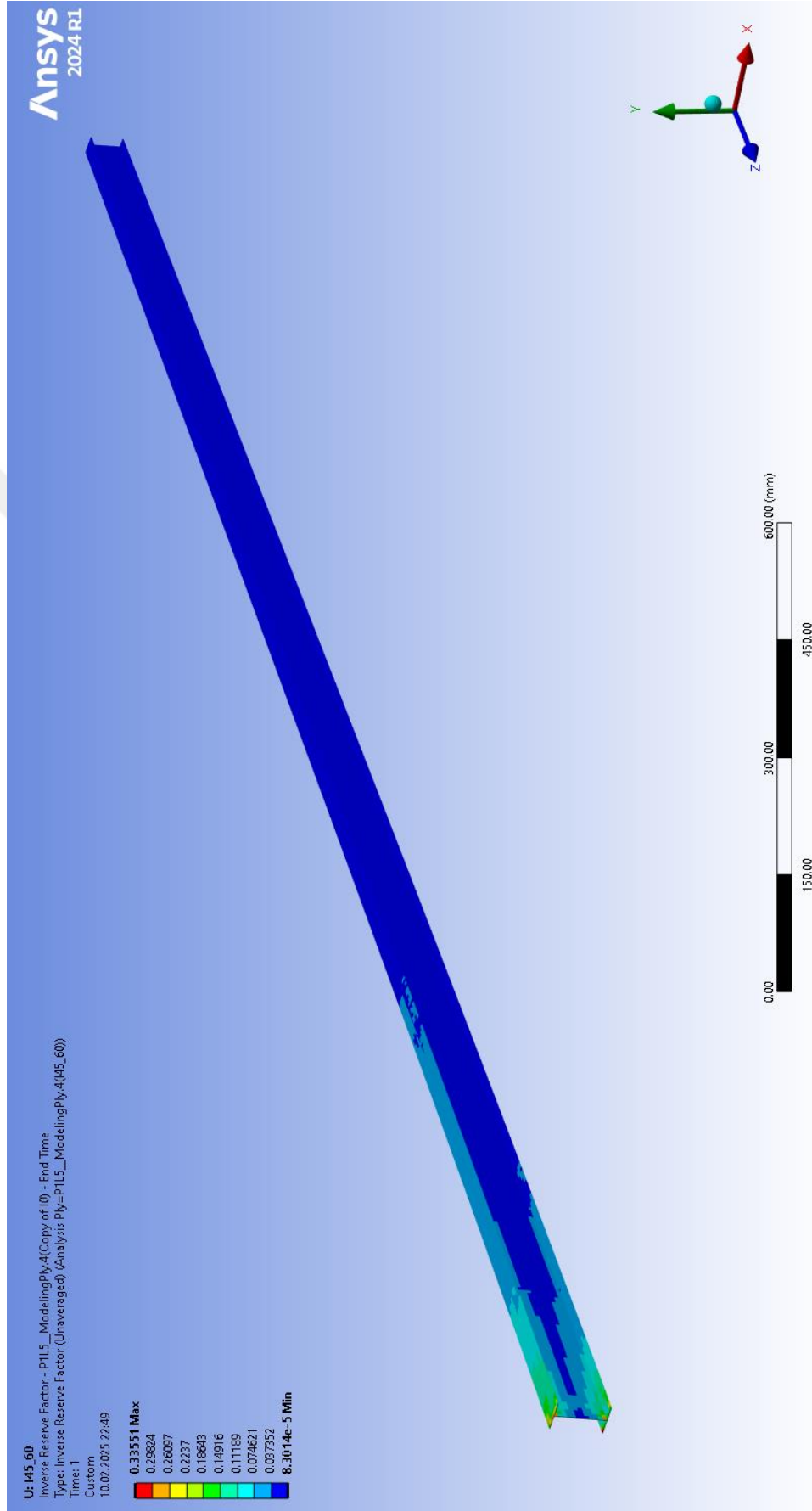
EK-101 9. Konfigürasyon 3. Katman IRF değerleri



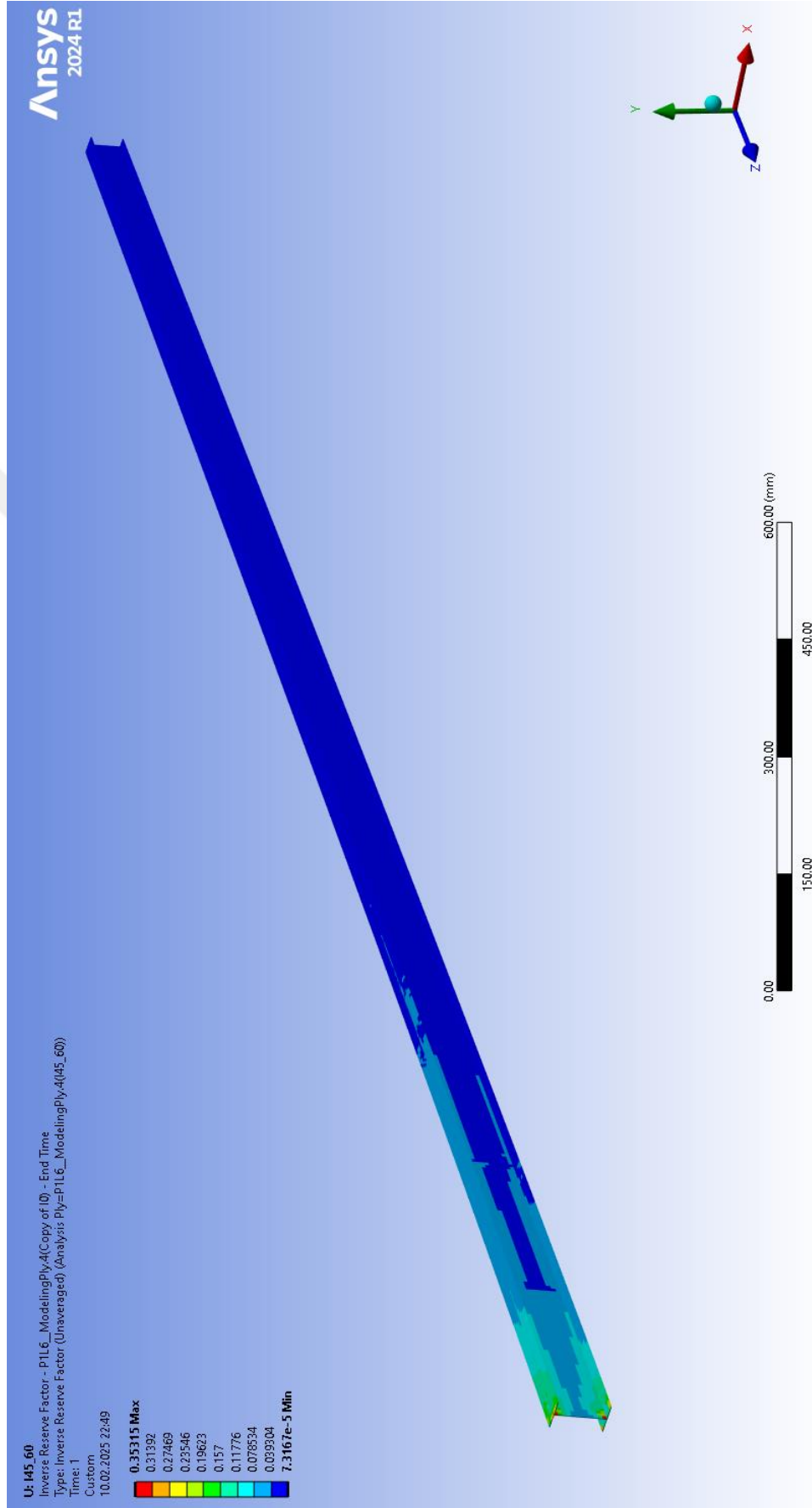
EK-102 9. Konfigürasyon 4. Katman IRF değerleri



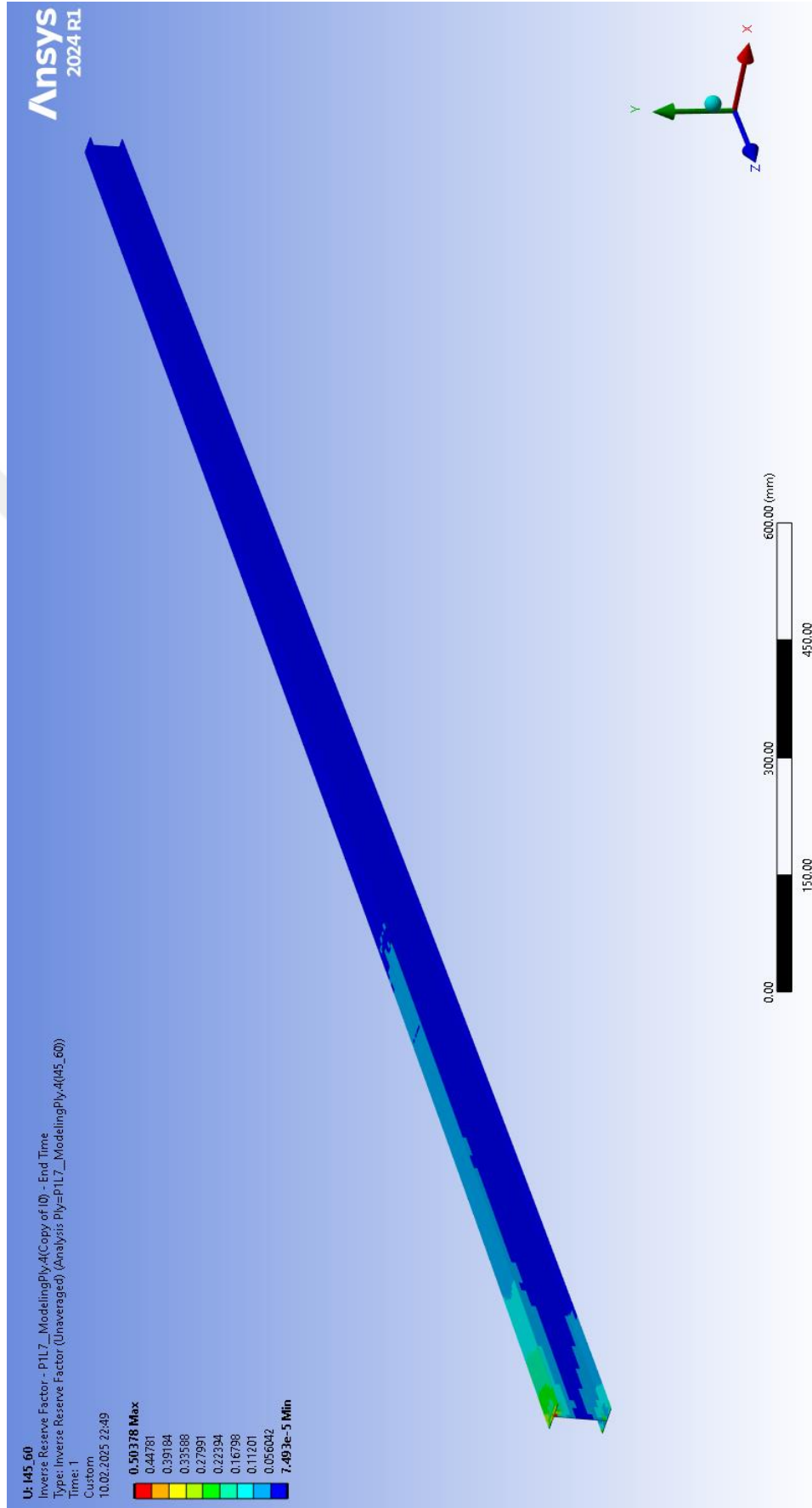
EK-103 9. Konfigürasyon 5. Katman IRF değerleri



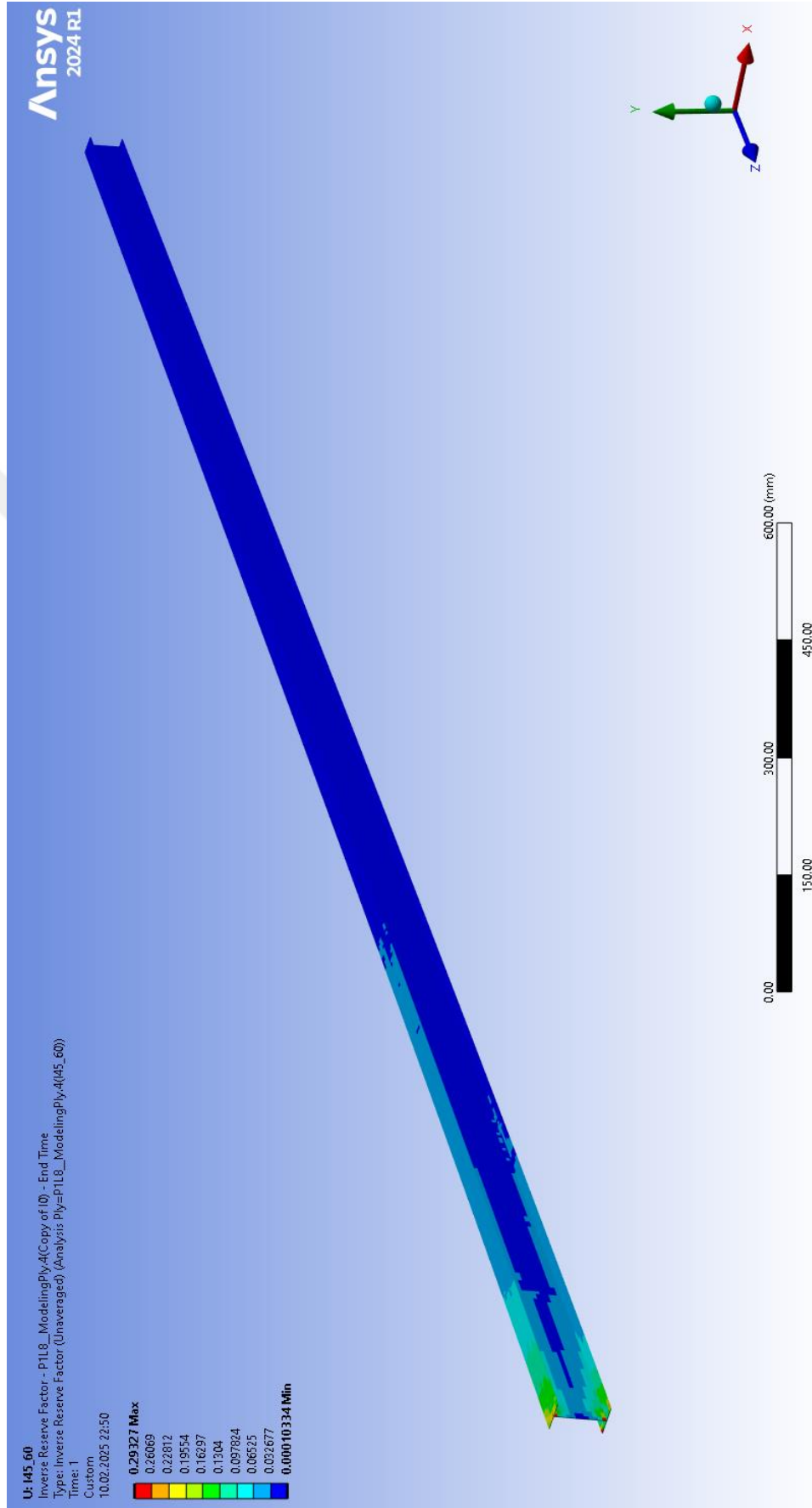
EK-104 9. Konfigürasyon 6. Katman IRF değerleri



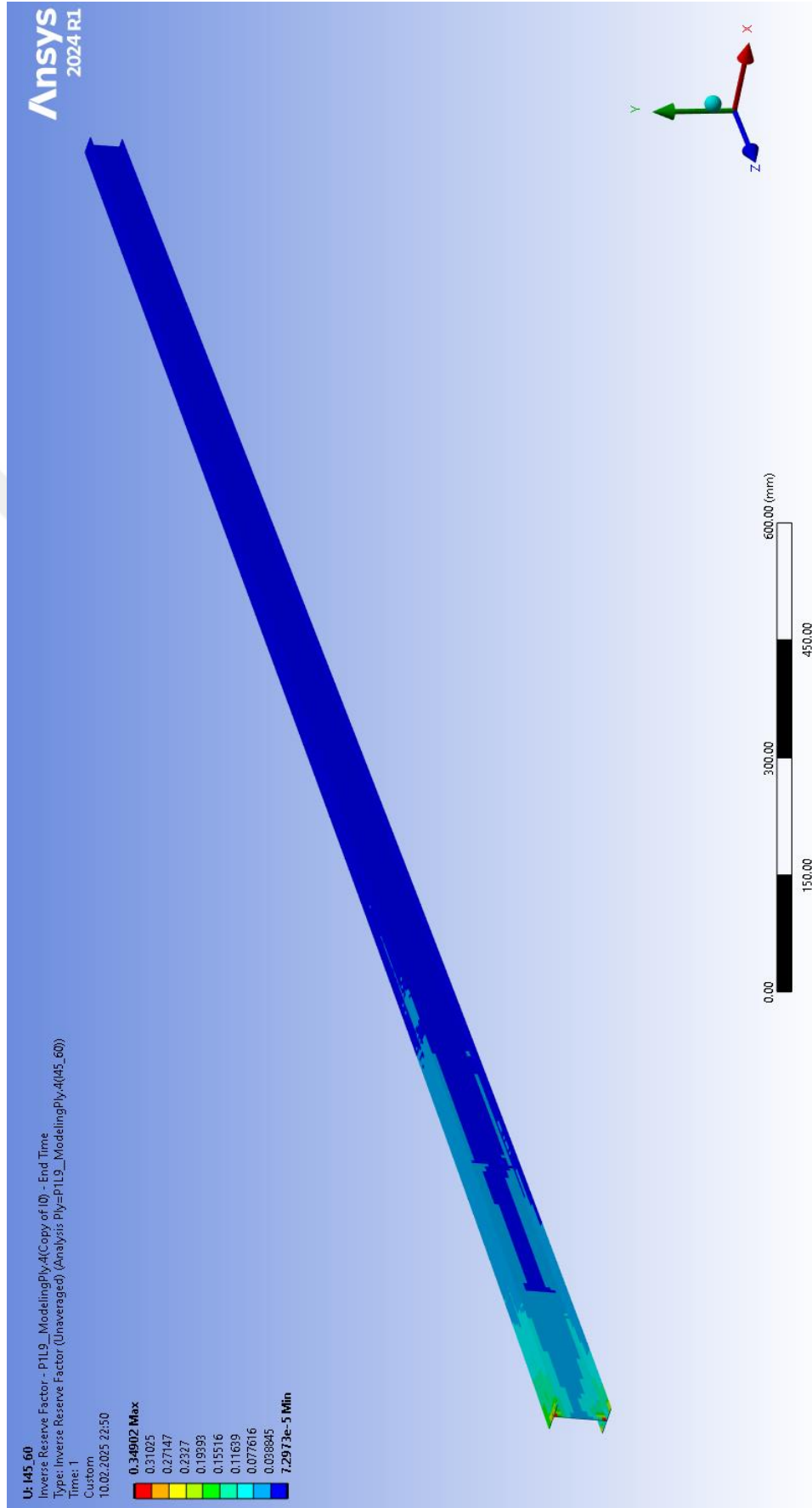
EK-105 9. Konfigürasyon 7. Katman IRF değerleri



EK-106 9. Konfigürasyon 8. Katman IRF değerleri



EK-107 9. Konfigürasyon 9. Katman IRF değerleri



EK-108 9. Konfigürasyon 10. Katman IRF değerleri

