



**UZAY UYGULAMALARINDA KULLANILAN KOMPOZİT  
SARGILI BASINÇLI BİR TANKIN YAPISAL TASARIMI VE  
ANALİZİ**

**STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS OF A  
COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL USED  
IN SPACE APPLICATIONS**

**MUZAFFER ÇETİN**

**Prof. Dr. BORA YILDIRIM**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

MUZAFFER ÇETİN'in hazırladığı "Uzay Uygulamalarında Kullanılan Kompozit Sargılı Basıncılı Bir Tankın Yapısal Tasarımı ve Analizi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Yard. Doç. Dr. Benat KOÇKAR  
Başkan

.....

Prof. Dr. Bora YILDIRIM  
Danışman

.....

Yard. Doç. Dr. Behçet Uğur TÖREYİN  
Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/07/2014

MUZAFFER ÇETİN

## ÖZET

# UZAY UYGULAMALARINDA KULLANILAN KOMPOZİT SARGILI BASINÇLI BİR TANKIN YAPISAL TASARIMI VE ANALİZİ

**Muzaffer ÇETİN**

**Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bora YILDIRIM**

**Temmuz 2014, 69 sayfa**

Bu tez çalışmasında, uzay alanında uydu itki sisteminde kullanılacak olan kompozit sarımlı basınçlı bir yakıt tankının mekanik tasarımı ve yapısal analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu yakıt tankının tasarım aşamalarında, aynı hacme sahip tamamen metal malzemelerden üretilmiş yakıt tanklarına göre daha hafif olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca benzeri kompozit yakıt tankları için gerekli tasarım aşamaları da ortaya konmuştur. Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde ANSYS yazılımı kullanılmış, bu yazılım ile tankı oluşturan metal ve kompozit kısımların gerilim-gerinim analizleri, kompozit sarım için en uygun fiber açısının belirlenmesi, otofretaj (autofrettage), modal ve rastgele titreşim analizleri, metal astarda oluşabilecek çatlak senaryoları ve yorulma analizleri gerçekleştirilerek sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Kompozit yapıda oluşabilecek hasarı belirlemek için ise, yaygın olarak kullanılan Tsai-Hill, Tsai-Wu ve Hashin teorileri dikkate alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** filaman sarım, kompozit sarımlı basınçlı tank, otofretaj, rastgele titreşim, kompozit hasar teorileri, hasar analizi.

## **ABSTRACT**

# **STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS OF A COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL USED IN SPACE APPLICATIONS**

**Muzaffer ÇETİN**

**Master of Science, Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Bora YILDIRIM**

**July 2014, 69 pages**

In this thesis, structural design and analysis of a composite overwrapped pressure vessel (COPV) used in satellite propulsion system is presented. The aim is also design a composite tank lighter than all-metal fuel tanks having the same volume. Moreover, necessary design stages have been revealed for similar composite overwrapped pressure vessels. The finite element analysis software, ANSYS is used to perform stress-strain analysis of both metal and composite parts, determine the optimum winding angle, tank autofrettage, modal and random vibration analysis, fracture and fatigue analysis for the metal liner to obtain numerical results. Tsai-Hill, Tsai-Wu and Hashin theories have been implemented to detect various failure modes of the composite part.

**Keywords:** filament winding, composite overwrapped pressure vessel (COPV), autofrettage, random vibration, composite failure theories, fracture mechanics.

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesi sırasında değerli yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren Prof. Dr. Bora YILDIRIM' a en içten teőekkürlerimi sunarım.

ANSYS programı ile ilgili verdikleri destekten ve gösterdikleri ilgiden dolayı Anova Mühendislik yetkililerine çok teşekkür ederim.

Ayrıca, çalıőmalarım sırasında bana yardım ve desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK UZAY'da bulunan iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ETİK .....	iii
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar .....	vi
ÇİZELGELER.....	vii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....	2
2.1 Takviye Malzemeler .....	2
2.1.1 Cam Elyaf .....	2
2.1.2 Karbon (Grafit) Elyaf .....	2
2.1.3 Aramid Elyaf .....	3
2.2 Matris Malzemeler .....	4
3. KOMPOZİT SARGILI BASINÇLI TANKLAR (KSBT) .....	6
3.1 Filaman Sargı Yöntemi.....	7
3.1.1 Kutupsal Sargı .....	7
3.1.2 Helisel Sargı .....	8
3.1.3 Çember Sargı .....	9
4. KOMPOZİT SARGILI BASINÇLI TANKIN YAPISAL TASARIMI .....	10
4.1 Tank Hacminin Belirlenmesi.....	10



4.2	Tankın Mekanik Yapısı.....	11
5.	KOMPOZİT SARIMLI TANKLARIN YAPISAL ANALİZİ .....	13
5.1	Kompozit Malzemelerde Gerilme-Gerinim Analizi .....	13
5.2	Kompozit Yapılar İçin Hasar Teorileri .....	17
5.2.1	Maksimum Gerilme Teorisi .....	17
5.2.2	Maksimum Gerinim Teorisi .....	18
5.2.3	Tsai-Hill Teorisi .....	20
5.2.4	Tsai-Wu Teorisi.....	21
5.2.5	Hashin Teorisi.....	22
5.3	Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	25
5.3.1	Gerilim-Gerinim Analizi ve Fiber Açılarının Belirlenmesi.....	25
5.3.2	Otofretaj (Autofrettage).....	28
5.3.3	Çatlak Analizi .....	37
5.3.4	Modal Analiz .....	48
5.3.5	Rastgele Titreşim Analizi .....	49
5.3.6	Yorulma Analizi.....	56
6.	SONUÇ.....	60
	KAYNAKLAR.....	62
	EK-A.....	64
	ÖZGEÇMİŞ .....	69

## TABLULAR

Tablo 4.1. Tank tasarım kriterleri.....	10
Tablo 5.1. Doğal frekans ve mod şekilleri.....	49
Tablo 5.2. Yeterlilik Seviyesi Rastgele Titreşim Seviyeleri .....	50
Tablo 5.3. X, Y, Z Eksenleri Rastgele Titreşim Değerleri .....	52

## ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Bazı kompozit malzemelerin fiber yönündeki gerilim-gerinim grafikleri [3] .....	3
Çizelge 2.2. Fiber, kompozit ve matris malzemenin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [5] .....	5
Çizelge 4.1. Ksenon için izotermal çizgiler .....	11
Çizelge 5.1. İdeal fiber açısı (P=220 bar) .....	27
Çizelge 5.2. Al 6061-T6 için çift doğrulu izotropik sertleşme grafiği.....	30
Çizelge 5.3. Basınçlandırma ile otofretaj ve patlatma aşamaları .....	31
Çizelge 5.4. Metal astarda (Al6061-T6) oluşan maksimum gerilim ve maksimum deformasyonlar.....	32
Çizelge 5.5. 1 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için J integral grafiği .....	41
Çizelge 5.6. 1 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için J integral grafiği ....	41
Çizelge 5.7. 1 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği ....	42
Çizelge 5.8. 2 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için J integral grafiği .....	42
Çizelge 5.9. 2 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için J integral grafiği ....	43
Çizelge 5.10. 2 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği ..	43
Çizelge 5.11. 3 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için J integral grafiği ....	44
Çizelge 5.12. 3 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için J integral grafiği ..	44
Çizelge 5.13. 3 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği ..	45
Çizelge 5.14. Kritik çatlak bölgesinde oluşan J integrallerin Jc ile karşılaştırılması .....	46
Çizelge 5.15. En kritik çatlak durumu için oluşturulmuş (a=0.5mm ve c= 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm) senaryolara ait J integral grafiği.....	47
Çizelge 5.16. X, Y, Z Eksenleri Rastgele Titreşim Profili .....	53
Çizelge 5.17. X ve Y yönleri için rastgele titreşim analiz sonuçları .....	54

Çizelge 5.18. Z yönü rastgele titreşim analiz sonuçları .....	55
Çizelge 5.19. Toplam gerinim ömrü.....	58
Çizelge 5.20. Al6061-T6 için yorulma analizlerinde kullanılan gerinim özelliklerine bağlı ömür grafiği (ANSYS) .....	58

## ŞEKİLLER

Şekil 3.1. Çeşitli şekillerde kompozit sarımlı tanklar (a) silindirik ve küresel tanklar (NASA), (b) konik tank [6].....	6
Şekil 3.2. Örnek Filaman Sargı Sistemi.....	7
Şekil 3.3. Kutupsal sargı.....	8
Şekil 3.4. Helisel sargı.....	8
Şekil 3.5. Çember sargı.....	9
Şekil 4.1. Kompozit sarımlı tanka ait ölçüler (mm).....	12
Şekil 5.1. Fiber için koordinat eksenini.....	14
Şekil 5.2. Düzlemsel gerilim koşulundaki bir kompozit katmanın fiber açısı ve eksen takımı.....	16
Şekil 5.3. 3 boyutlu kompozit bir katman için koordinat eksenini.....	23
Şekil 5.4. ANSYS Workbench ile kompozit tank modellemesi akış şeması.....	26
Şekil 5.5. Kompozit sarımlı tank için katman dizilimi ve fiber açıları.....	28
Şekil 5.6. a) Otofretaj sırasında oluşan gerilim dağılımı, b) Otofretaj sonrasında oluşan gerilim dağılımı [15].....	29
Şekil 5.7. Otofretaj işleminin çatlak oluşumuna etkisi [15].....	29
Şekil 5.8. Metal astarda görülen toplam deformasyon (Aşama 7: 170bar).....	33
Şekil 5.9. 230 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16).....	35
Şekil 5.10. 280 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:1).....	35
Şekil 5.11. 280 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16).....	36
Şekil 5.12. 290 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16).....	36
Şekil 5.13. Yarı eliptik yüzey çatlağı.....	37
Şekil 5.14. Çatlak ilerleme modları ve yükleme tipleri.....	37
Şekil 5.15. 3 farklı kritik bölgedeki çatlak pozisyonları.....	38
Şekil 5.16. Çatlak modellemesinde kullanılan örnek bir sayısal ağ.....	39

Şekil 5.17. Çatlak ucunda oluşturulmuş keyfi hat .....	40
Şekil 5.18. Çatlak analizi sonucu çatlak bölgesinde oluşan örnek bir açılma .....	47
Şekil 5.19. 170 bar basınçlandırma testi için ömür analizi .....	59
Şekil 5.20. 212.5 bar basınçlandırma testi için ömür analizi .....	59

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Simgeler

$\sigma$	Normal Gerilme
$\tau$	Kayma Gerilmesi
$\varepsilon$	Normal Gerinim
$\gamma$	Kayma Açısı
$\nu$	Poisson Oranı
$\rho$	Yoğunluk
$E$	Elastisite Modülü
$G$	Kayma Modülü
$K$	Gerilim Şiddet Faktörü
$K_{IC}$	Kırılma Tokluğu

## Kısaltmalar

KSBT	Kompozit Sarımlı Basınçlı Tank
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
NASA	National Aeronautics and Space Administration
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
ACP	ANSYS Composite Prepost
ASD	Acceleration Spectral Density (İvme Spektral Yoğunluk)
PSD	Power Spectral Density (Güç Spektral Yoğunluk)

# 1. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde artan rekabet nedeniyle, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelerin tasarlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu tip malzemelerin en önemli olanlarından olan kompozit malzemeler de bu ihtiyacı karşılamak amacıyla 1960'lı yıllardan günümüze kadar önemli bir gelişim göstermiştir. Kompozit malzemelerin diğer metal malzemelere göre düşük özgül ağırlıklarına oranla mukavemetlerinin yüksek olması, korozyona dayanımları, ısı ve elektrik yalıtkan özelliklerinden dolayı ilgiyi hep üzerine çekmiş, kompozit üretim teknolojilerinin gelişmesiyle de birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Özellikle fırlatma maliyetlerini düşürmek için, uydu ve uzay araçlarında kullanılan birçok yapısal eleman metallere göre daha hafif ve mukavemeti yüksek olmasından dolayı kompozit malzemeler kullanılarak tasarlanmakta ve üretilmektedir. Bu yapısal elemanlar taşıyıcı elemanlar olabileceği gibi yük taşımayan ama hafif olması istenen parçalar da olabilmektedir. Yakıt tankları da bu tip uzay araçlarında kullanılan ve önemli bir ağırlığa sahip elemanlardandır. Daha önceleri uydu ve uzay araçlarında kullanılan yakıt tankları tamamen metal malzemelerden üretilirken, günümüzde, yaklaşık %40-%50 oranında daha hafif olan kompozit malzemelerden üretilmeye başlanmıştır. Genellikle bu tanklar "Tip III" olarak bilinen, ince metal iç astar üzerine tamamen kompozit sargılı tank tipi olmaktadır. İç kısımdaki metal astar tank içinde muhafaza edilen yakıtın sızdırmazlığını sağlarken, kompozit kısım tankın yüksek basınca ve çevresel yüklere karşı dayanımını arttırmaktadır. Bu tip bir tankın günümüzdeki en kolay üretim tekniği filaman sarım yöntemidir. Bu yöntem ile birlikte genellikle aksenal simetrik bir paraca üzerine, istenen mukavemet şartlarını karşılayacak şekilde filaman sarım açıları belirlenerek, sarım işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle kompozit sarımlı basınçlı tankların tasarım ve üretim aşamaları tamamen metal olan tanklara göre daha karmaşıktır.

Bu çalışmanın sonraki bölümlerinde sırasıyla kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler, filaman sargı yöntemi, kompozit hasar teorileri ve uydu itki sisteminde kullanılacak olan bir kompozit sarımlı yakıt tankının tasarım aşamaları ve sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmış olan yapısal analizlerine yer verilmiştir.



## **2. KOMPOZİT MALZEMELER HAKKINDA GENEL BİLGİLER**

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı yapısal özelliklere sahip malzemenin çeşitli yöntemlerle mikroskobik yapıda bir araya getirilmesi ile oluşan malzemelere denir. Kompozit malzemeler genelde matris ve takviye malzemelerinden oluşur ve kendini oluşturan bu malzemelerden farklı fiziksel özelliklere sahip olurlar. Bu şekilde, matris ve takviye malzemelerin zayıf yönleri düzeltilerek, daha üstün özelliklere sahip bir malzeme elde edilmiş olur.

### **2.1. Takviye Malzemeler**

Takviye elemanları, kompozit malzemeleri oluşturan fiberlerdir. Bu fiberler kompozit malzemeye mukavemet ve rijitlik sağlarlar. Kısa kısa parçacıklar halinde veya uzun yani devamlı elyaf formunda matris ile belirli bir oranda karıştırılarak kullanılırlar. Uzay ve havacılık alanında daha çok uzun elyaf formu tercih edilirken, kısa elyaf formu genellikle pres veya enjeksiyon kalıp üretimlerinde kullanılmaktadır. Genellikle kompozit malzemeyi oluşturan matris ve fiber karışımının %50'den fazla kısmını fiber malzeme oluşturmaktadır. Oluşturulmuş kompozit malzeme, fiber doğrultusunda yüksek dayanım sağlarken, bu durum fiber doğrultusuna dik yönde daha zayıftır. Endüstride en çok tercih edilen takviye malzemeler cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaflardır. [1], [2]

#### **2.1.1. Cam Elyaf**

Cam elyaflar yaklaşık 1260 °C de erimiş camın küçük delikli burçlardan çekilmesi ile elde edilmektedir. Çekildikten hemen sonra kısa süre içinde soğutularak makaralara sarılmaktadır. Bu fiberlerin en çok kullanılan iki tipi vardır. Bunlar E-camı ve S-camıdır. E-camı alumino-borosilikat esaslıdır ve yüksek elektriksel yalıtkanlığına sahiptir. S-camı ise E-camına göre mukavemeti daha yüksektir ve içeriğinde magnezyum alüminasilikat bulunmaktadır. S-camı daha çok yüksek sıcaklık ve yüksek dayanım gereken yerlerde kullanılır.

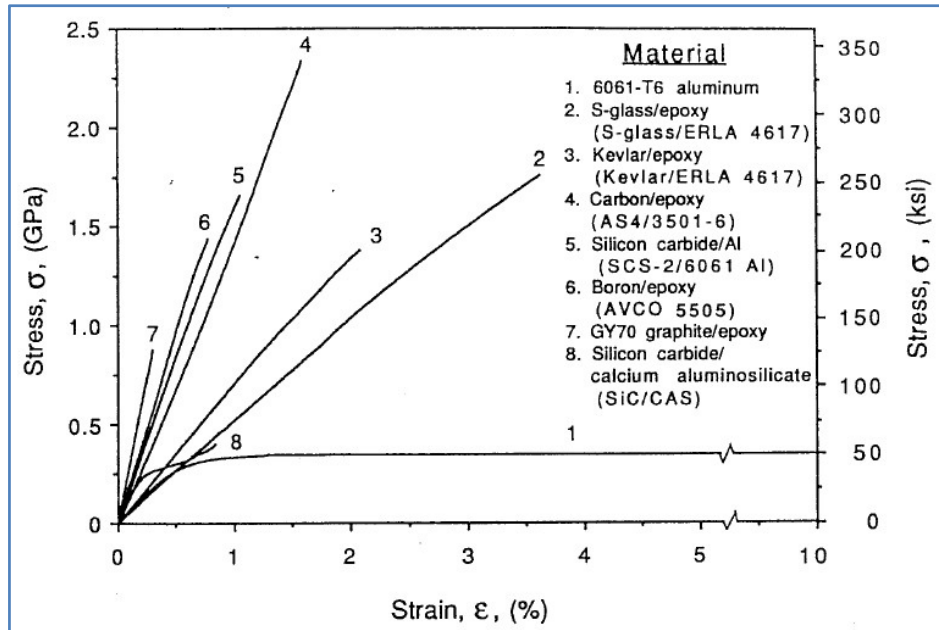
#### **2.1.2. Karbon (Grafite) Elyaf**

Karbon elyaflar, bazı organik maddelerin yüksek basınç ve sıcaklıklarda ısıtılma tabii tutularak üretilir. Bu organik maddeler genellikle PAN (Poliakrilonitril ) veya bir petrol yan ürünü olan zifttir. Piyasada daha çok PAN esaslı karbon elyaflar tercih edilmektedir. Bu elyaflar diğer elyaf türlerine göre daha yüksek elastik modülüne sahiptirler ve 1500°C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabilmektedir. Ayrıca ısı iletkenlikleri de bakıra göre 3 kat daha fazladır. Bu özelliklerinden dolayı birçok hava

ve uzay araçlarında yapısal eleman olarak kullanılmışlardır. Dezavantajları ise düşük genleşme katsayısı, kırılgenlik ve diğler elyaflara göre daha pahalıdır.

### 2.1.3. Aramid Elyaf

Aramid elyaflar polimer esaslıdır ve içeriğinde p-fenilen terefitalamid bulunmaktadır. Bu elyafların piyasada en çok bilinen tipi, Dupont firması tarafından üretilen Kevlar'dır. Elastisite modülü karbon elyaflardan daha düşük ama cam elyaflardan da yüksektir. Diğler elyaflara oranla düşük özgül ağırlık, yüksek darbe dayanımı ve yüksek aşınma dayanımına sahiptirler. Dezavantajları ise aramid elyaflar, matris malzeme ile yapışma oranları diğler elyaflara göre düşüktür. Bu nedenle reçinede küçük çatlaklar meydana gelmekte ve bu nedenle nem tutma oranı yükselmektedir. Ayrıca bazı ultraviyole ışıklardan etkilendikleri için sürekli karanlık ortamlarda saklanmaları gerekmektedir. Aramid elyaflar piyasada ağırlıklı olarak balistik koruma uygulamalarında, hava araçları gövde parçalarında, tekne gövdelerinde ve Çizelge 2.1'de bazı kompozit malzemelerin 6061-T6 serisi alüminyum ile karşılaştırmalı gerilim-gerinim grafikleri verilmiştir.



Çizelge 2.1. Bazı kompozit malzemelerin fiber yönündeki gerilim-gerinim grafikleri [3]

## 2.2. Matris Malzemeler

Matris malzemeler veya reçineler genellikle polimer, metal veya seramik esaslı malzemelerdir. Kompozit bir yapıdaki asıl görevleri;

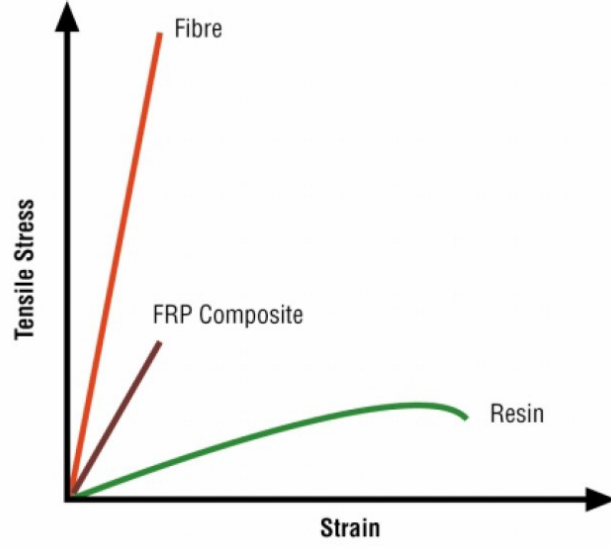
- fiberleri bir arada tutup şekil vermek,
- fiberler arasında yük dağılımını sağlamak,
- herhangi bir fiberin hasarı durumunda diğerlerini bu etkiden ayırt etmek,
- ve fiberleri çevresel etkilerden korumaktır. [4]

İyi yapışma, kolay işlenebilme, elektrik yalıtkanlığı ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı piyasada ağırlıklı olarak polimer esaslı matrisler kullanılmaktadır. Polimer esaslı matrisler ise kendi aralarında termoplastikler ve termosetler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Termoplastikler, metallerde olduğu gibi ısıtılıp eritildikten sonra istenilen şekil verilir ve daha sonra da soğutularak katılaştırılırlar. Yani geri dönüşümü olan polimer yapılarıdır. En tipik örnekleri naylon, polipropilen ve polietilendir. Termosetler ise bir kompozit yapı oluşturulurken belirli miktarlarda katalizörler ile karıştırılırlar ve fiber malzemeye nüfuz ettirilerek kullanılırlar. Termoset ile katalizör malzeme arasında geri dönüşümü olmayan kimyasal reaksiyonlar meydana gelmesi nedeniyle ısı ile tekrar sıvı hale dönüşmezler. Ancak belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldıkça mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir. Endüstride en çok kullanılan termosetler ise polyester, vinilester ve epoksidir. Havacılık ve uzay sektöründe ise iyi yapışma, düşük büzüşme ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı ağırlıklı olarak epoksi kullanılmaktadır. [1]

Kompozit bir malzeme oluşturulurken fiber ve matris malzeme belirli oranlarda bir araya getirilirler. Bu oran genellikle %60 fiber ve %40 matris olmaktadır. Bu nedenle matris malzemenin özellikleri, kompozit malzemenin özelliklerini belirleyici niteliktedir. Bu özellikler ise;

- sıcaklık ve çevresel etkilere olan direnç,
- çekme mukavemeti,
- basma mukavemeti,
- ve kesme mukavemetidir.

Çizelge 2.2'de fiber, kompozit ve matris malzemelerin gerilme-gerinim özellikleri karşılaştırılmaktadır. Buna göre fiber ve matris malzemenin karışım oranı, kompozit malzemenin özelliklerinin nasıl değiştiği görülebilmektedir.



Çizelge 2.2. Fiber, kompozit ve matris malzemenin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [5]

### 3. KOMPOZİT SARGILI BASINÇLI TANKLAR (KSBT)

Kompozit sarımlı basınçlı tanklar, iç kısımda gaz veya sıvı sızdırmazlığı sağlayan metal veya plastik bir astar üzerine filaman sarılarak üretilen tanklardır. İç kısımdaki astarın görevi sızdırmazlık olmasına rağmen bazı durumlarda oluşan yapısal yükleri de paylaşmaktadır. Asıl yükü taşıyan ve yapısal dayanımı sağlayan yapı, astar üzerine katmanlar haline sarılmış olan kompozit yapıdır. Kompozit malzemelerin düşük yoğunluk oranlarına göre yüksek mukavemete sahip olmalarından dolayı, tamamen metal olarak tasarlanan yapılardan daha hafif tasarlanabilmektedir.

Kompozit sarımlı tanklar çeşitli şekillerde üretilebilmesine rağmen genellikle silindirik, küre veya koni şeklinde üretilmektedir. Piyasada en çok silindirik tanklar tercih edilmektedir.



(a)



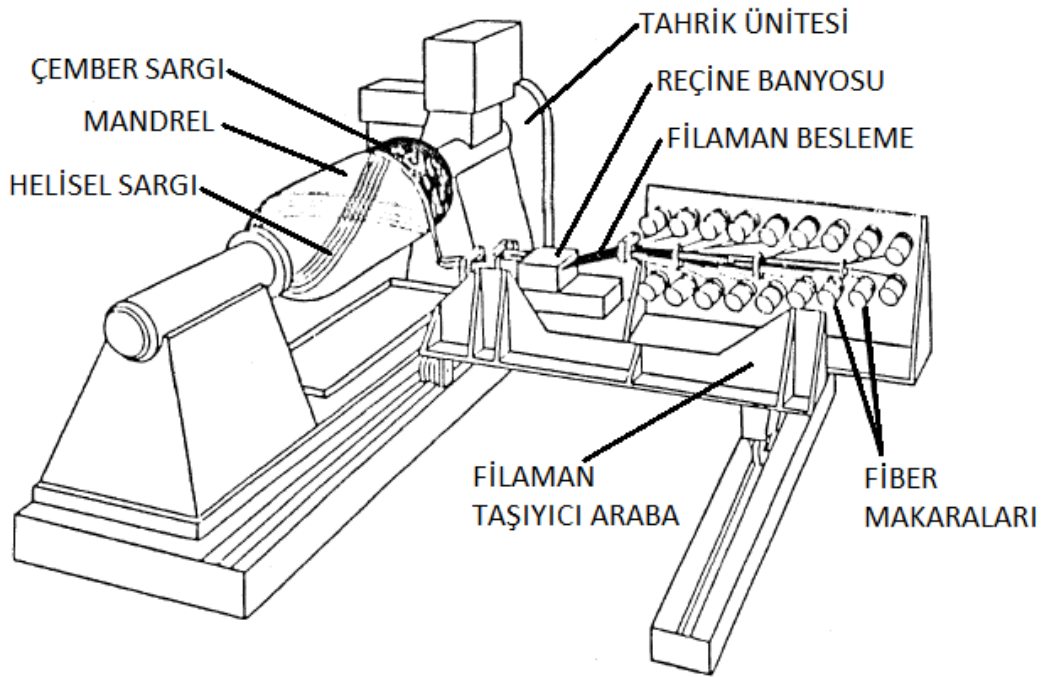
(b)

Şekil 3.1. Çeşitli şekillerde kompozit sarımlı tanklar (a) silindirik ve küresel tanklar (NASA), (b) konik tank [6]

Kompozit sarımlı tankların en kolay üretim tekniği filaman sargı yöntemidir. Bu yöntem ile filaman sarım işlemi daha önce belirlenmiş açılarda otomatik olarak yapılabilmektedir.

### 3.1. Filaman Sargı Yöntemi

Filaman sargı yöntemi, bir dönme eksenini olan kompozit parçaların kolay bir şekilde üretilmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem ile dönen bir mandrel üzerindeki parçaya, kesintisiz filaman veya lif demetinin uygun bir reçine ile ıslatılarak, istenilen açılarda ve sabit gerilim altında sarım yapılmaktadır. Yaygın örneklerinin arasında borular, silindirik tanklar, basınçlı tanklar, roket motor gövdeleri, vb. bulunmaktadır. Örnek bir filaman sargı sistemi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



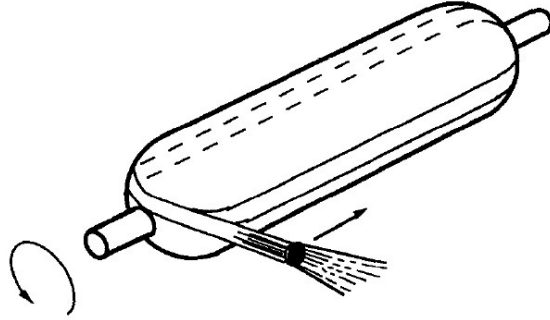
Şekil 3.2. Örnek Filaman Sargı Sistemi

Filaman sargı yönteminde 3 farklı sargı tipi kullanılmaktadır. Bunlar, çember sargı, kutupsal sargı ve helisel sargı tipleridir.

#### 3.1.1. Kutupsal Sargı

Kutupsal sargı tipinde, filaman durağan bir mandrelin eksenini boyunca sarılmaktadır. Her bir turun sonunda mandrel belli bir açıda dönerek tekrar durur ve bu işlem tüm yüzey sarılana kadar devam eder. Bu sarımın sonunda, aynı açıda fakat biri diğerinin negatifi olacak şekilde 2 katman oluşmaktadır. Kutupsal sargının açısı tankın uzunluğu ve tankın iki ucunda bulunan bağlantı arayüzlerinin çapına bağlıdır.

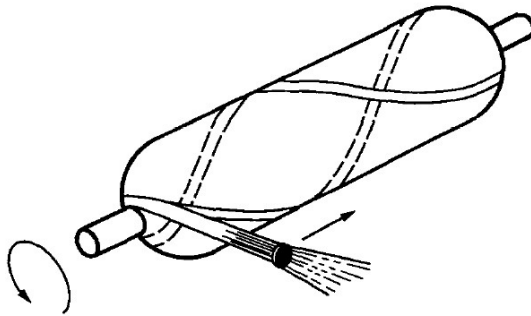
olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sabit bir açıda sarım yapılmaktadır. Aşağıda örnek bir kutupsal sargı tipi göstermektedir.



Şekil 3.3. Kutupsal sargı

### 3.1.2. Helisel Sargı

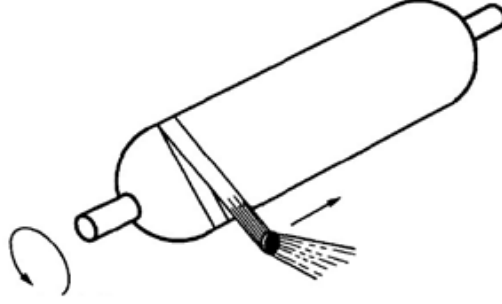
Helisel sargı tipinde, filaman taşıyıcı sürekli dönen bir mandrelin ekseni boyunca ileri ve geri hareket ederek sarım yapılmaktadır. Filaman taşıyıcının hareket hızı ile mandrel dönüş hızı istenilen sarım açısını oluşturabilmek için ayarlanmaktadır. Tüm yüzey sarılana kadar bu işlem devam etmektedir ve sonuç olarak yine aynı açıda fakat biri diğerinin negatifi olacak şekilde 2 katman oluşmaktadır. Bu sarım tipinde üst üste farklı açılarda sarım gerçekleştirilebilmektedir ve bu farklı açılarda oluşmuş olan kompozit katmanlar, o yapının mekanik özelliklerini belirlemektedir. Aşağıda örnek bir helisel sargı tipi göstermektedir.



Şekil 3.4. Helisel sargı

### 3.1.3. Çember Sargı

Çember sargı ise, özel bir helisel sargı tipidir. Bu sargı tipinde filaman mandrel üzerine yaklaşık 90° olan bir açıda sarılmaktadır ve çember yönündeki dayanımı arttırmak için kullanılır. Aşağıda rnek bir çember sargı tipi göstermektedir.



Şekil 3.5. Çember sargı



#### 4. KOMPOZİT SARGILI BASINÇLI TANKIN YAPISAL TASARIMI

Kompozit sarımlı basınçlı bir tankın yapısal tasarımını yapabilmek için çeşitli gereksinimlerin bilinmesi gerekmektedir. Bu gereksinimler ise tankın kullanılma amaçlarına uygun olarak belirlenmelidir. Bu çalışmada tasarlanan tank, uydu projelerinde kullanılacağı için tankın hem fırlatma yüklerine dayanması, hem uzay koşullarına uygun hem de mümkün olduğunca hafif yapıda olması beklenmektedir. Tablo 4.1' de verilmiş olan gereksinimler ECSS standartları [7] ve daha önce uzay geçmişine sahip ETS VIII uydusunda kullanılmış olan ksenon tanka ait kriterler [8] baz alınarak oluşturulmuştur.

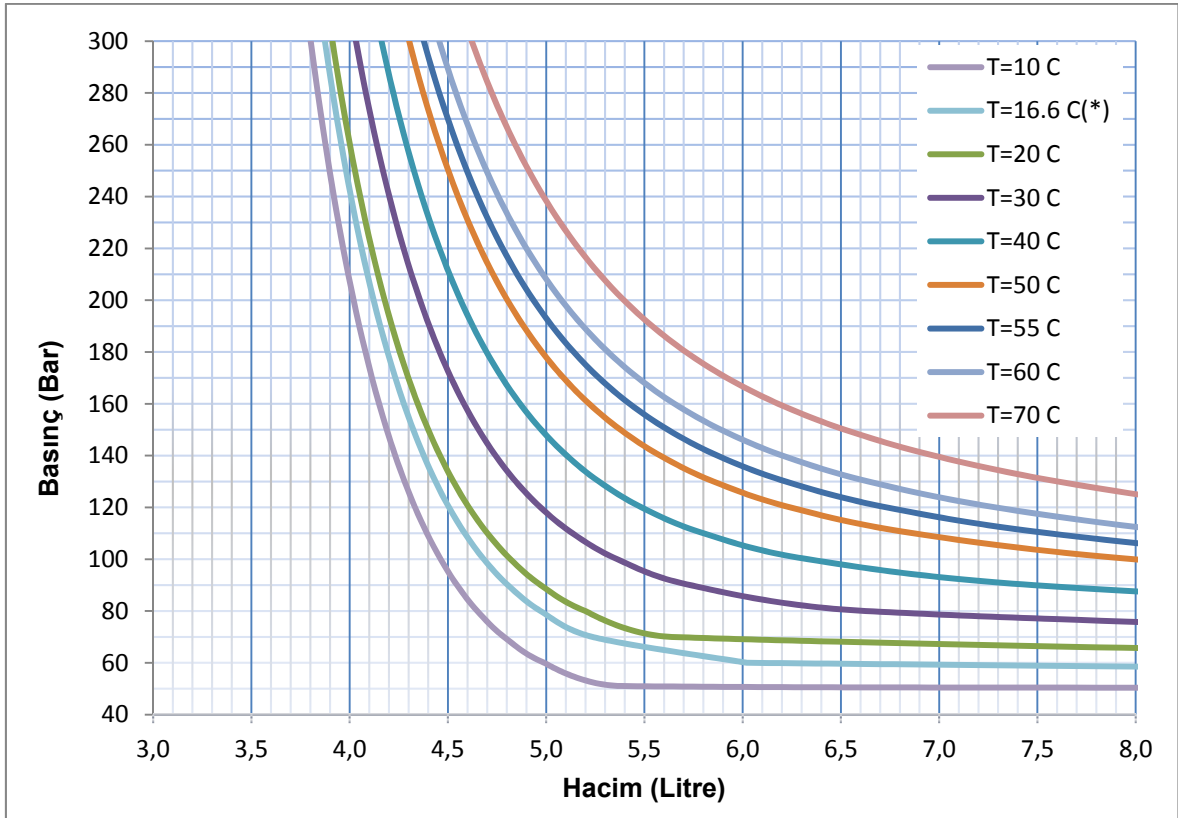
Tablo 4.1. Tank tasarım kriterleri

Parametre	Gereksinim
Maksimum Beklenen Operasyon Basıncı (MOB)	170 bar - (test: 50 tekrar)
Test Basıncı (MOB x 1.25)	212.5 bar (minimum) - (test: 5 tekrar)
Patlama Basıncı (MOB x 1.5)	255 bar (minimum)
Yakıt Ağırlığı	9 kg ksenon gazı
Tank Ağırlığı	1.2 kg (maksimum)
Tank Kapasitesi	5 litre (minimum)
Doğal Frekans	>100 Hz
Hasar Kipi	Patlama öncesi sızdırma
Çalışma Sıcaklığı	5°C - 55°C

##### 4.1. Tank Hacminin Belirlenmesi

İtki sisteminin kullanılacağı uydunun kullanım ömrü boyunca, yörüngedeki olası manevraları düşünülerek hesaplanmış olan 9kg'lık ksenon için uygun bir tank

hacminin belirlenmesi gerekmektedir. Tank hacminin belirlenebilmesi için öncelikle tankın içine konacak olan ksenona ait izotermal çizgilerin bilinmesi gerekmektedir. Çizelge 4.1’ de 9 kg ksenon için çeşitli sıcaklıklarda elde edilmiş izotermal çizgiler bulunmaktadır. [9] Bu grafikten, maksimum tasarım sıcaklığı olan 55°C için 170 bar basınçta yaklaşık 5,3 litrelik bir hacme ihtiyaç duyulduğu ortaya çıkmaktadır. Bu bilgi ile birlikte diğer tasarım kriterleri dikkate alınarak, tankın mekanik tasarımı aşamasına geçilmektedir.

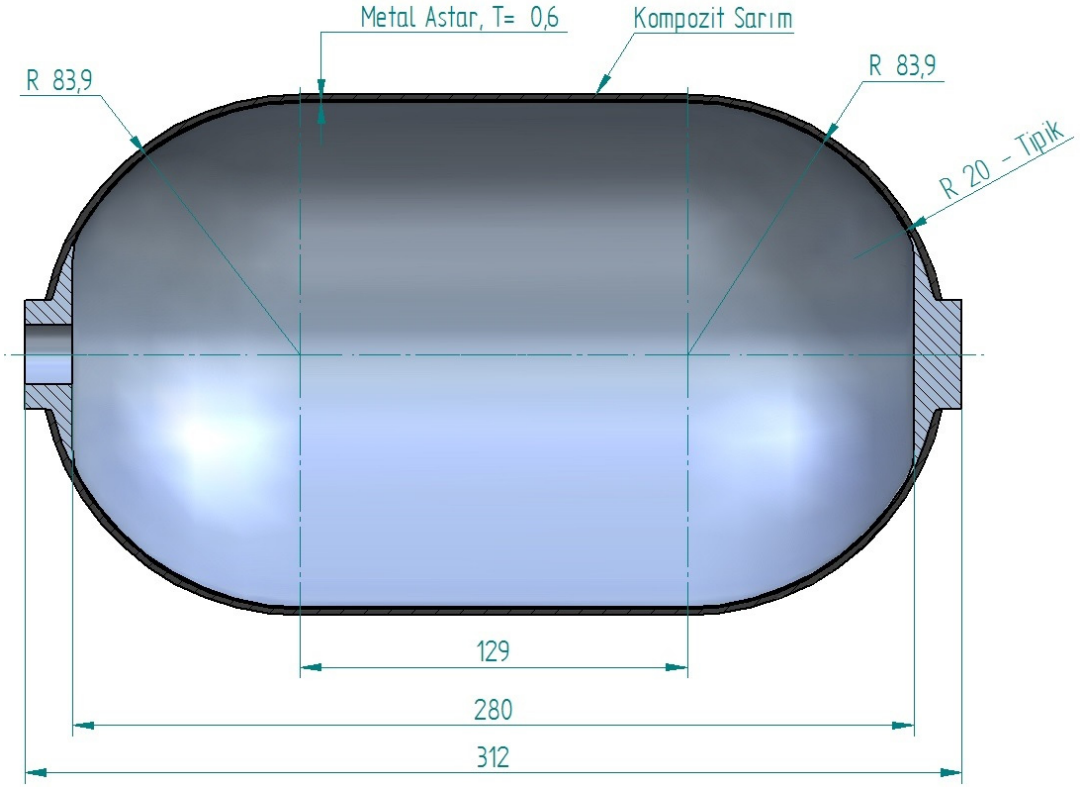


Çizelge 4.1. Ksenon için izotermal çizgiler

#### 4.2. Tankın Mekanik Yapısı

Kompozit sarımlı tankın mekanik yapısı, iç kısımda sızdırmazlığı sağlayan 0.6mm kalınlığında alüminyum metal astar ile bu astarın basınca karşı dayanımını arttıran dış yüzeye sarılmış karbon-epoksi kompozit malzemeden oluşmaktadır. İleriki aşamalarda analiz çalışmalarında kullanılmak üzere tankın mekanik modelinin oluşturulması gerekmektedir. Daha önceki bölümde belirlenmiş hacim (yaklaşık 5.3lt) bilgisi ile malzeme bilgisi kullanılarak, ağırlık sınırları içerisinde kalınacak şekilde

bir mekanik model oluşturulmuştur. Bu mekanik modele ait ölçüler de Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kompozit sarımlı tanka ait ölçüler (mm)

## 5. KOMPOZİT SARIMLI TANKLARIN YAPISAL ANALİZİ

### 5.1. Kompozit Malzemelerde Gerilme-Gerinim Analizi

Kompozit sarımlı tankların yapısal analizini yapabilmek için öncelikle kompozit bir yapının gerilme-gerinim bağıntılarının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için de genelleştirilmiş Hooke kanunu kullanılmaktadır.

Üç boyutlu anizotropik bir cismin mukavemet hesabı için, Hooke kanunu aşağıdaki gibi yazılmaktadır [10] [11];

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

(5.1)'de verilen [C] matrisi, katılık matrisi olarak ifade edilmektedir ve (5.2)'de verildiği gibi de yazılabilmektedir.

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.2)$$

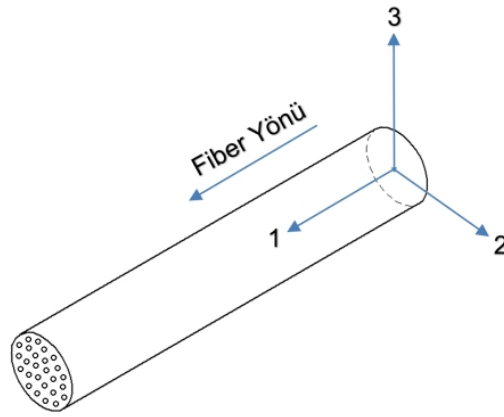
Benzer şekilde,

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

(5.4)'te verilen [S] matrisi ise uygunluk matrisi olarak ifade edilmektedir ve [C] matrisinin tersine eşittir.

Birbirine dik üç düzleme göre malzemede simetrik özellik varsa bu malzemelere “ortogonal anizotropik” malzeme yani kısaca “ortotropik” malzeme denir. Kompozit malzemeleri oluşturan fiberler de Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, fiber yönüne dik iki düzlemde simetrik özelliğe sahip olmasından dolayı bu malzemeler ortotropik olarak kabul edilir.



Şekil 5.1. Fiber için koordinat eksenleri

Ortotropik bir malzeme için ise gerilim-gerinim ilişkisi için Hooke kanunu, (5.5)'de olduğu gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

ve aynı şekilde, (5.4)'te verilen eşitlik ise aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

(5.6)'da verilen eşitlik, mühendislik sabitleri yazıldığında ise (5.7)'deki hale gelmektedir. Burada E, G ve  $\nu$  sırasıyla elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

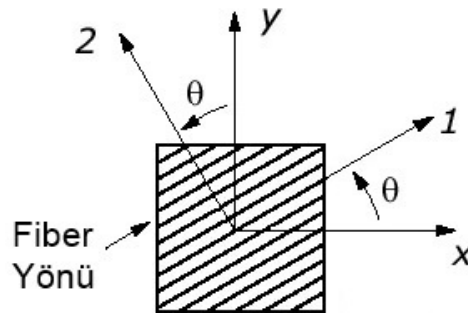
Genellikle silindirik bir basınçlı tankın yarıçapının et kalınlığına oranı 10 kattan daha büyükse, bu yapı ince cidarlı yapı olarak kabul edilmektedir. Bu durumda ise düzlemsel gerilim koşulu sağlanmakta ve ortotropik malzeme için  $\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$  olmaktadır. Böylece (5.5), (5.6) ve (5.7)'de verilen bağıntılar aşağıdaki hallerine dönüşmektedir [12].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.10)$$

Düzlemsel gerilim altındaki kompozit bir katmanın gerilme-gerinim ilişkisini yazabilmek için x-y koordinat düzleminin, 1-2 ile ifade edilen koordinat sistemine dönüşümü sağlanmalıdır. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, 1 ile gösterilen eksen fiber yönünü ve 2 ile gösterilen eksen de buna dik olan eksenini ifade etmektedir. Kompozit malzemelerin istenilen yönlerde mukavemetini arttırmak için bunu oluşturan fiberler belirli açılarda yönlendirilmektedir.  $\theta$  ise bu fiber açısını ifade etmektedir.



Şekil 5.2. Düzlemsel gerilim koşulundaki bir kompozit katmanın fiber açısı ve eksen takımı

Bu durumda gerilim bağıntısı (5.11)'de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5.11)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Burada verilen [T] matrisi dönüşüm matrisi olarak ifade edilmektedir ve “ $c = \cos \theta$ ”, “ $s = \sin \theta$ ” anlamına gelmektedir.

Böylece gerilim ve gerinim eşitlikleri x-y ve 1-2 koordinat sistemi cinsinden aşağıda verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{Bmatrix} \quad (5.13)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} / 2 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} / 2 \end{Bmatrix} \quad (5.14)$$

## 5.2. Kompozit Yapılar İçin Hasar Teorileri

### 5.2.1. Maksimum Gerilme Teorisi

Maksimum gerilme teorisine göre, eğer kompozit katmanın asal eksenlerinin herhangi birinde, malzemenin bu yönlere ait basma, çekme ve kayma gerilimleri sınırına ulaşır veya geçerse malzemede hasar oluşur. Buna göre aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır. [3]

Çekme gerilimleri için:



$$\sigma_1 \geq F_{1t}, \quad \sigma_2 \geq F_{2t} \quad (5.15)$$

Basma gerilimleri için:

$$\sigma_1 \leq F_{1c}, \quad \sigma_2 \leq F_{2c} \quad (5.16)$$

ve kayma gerilimi için:

$$|\tau_{12}| \geq F_6 \quad (5.17)$$

kullanılır. Bu ifadelerde kullanılan;

$F_{1t}$ : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı

$F_{2t}$ : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı

$F_{1c}$ : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı

$F_{2c}$ : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

$F_6$ : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı,

anlamlarına gelmektedir.

### 5.2.2. Maksimum Gerinim Teorisi

Maksimum gerilme teorisine benzer bir şekilde maksimum gerinim teorisinde de, eğer kompozit katmanın asal eksenlerinin herhangi birinde, malzemenin bu yönlere ait basma ve çekme birim uzamaları ile kayma açısı sınırına ulaşır veya geçerse malzemedede hasar oluşur. Buna göre aşağıdaki ifadeler kullanılmaktadır.

Çekme gerinimleri için:

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{1t}, \quad \varepsilon_2 \geq \varepsilon_{2t} \quad (5.18)$$

Basma gerinimleri için:

$$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c}, \quad \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{2c} \quad (5.19)$$

ve kayma açısı için:

$$|\gamma_{12}| \geq \gamma_6 \quad (5.20)$$

kullanılır. Bu ifadelerde yazılan;

$\varepsilon_{1t}$ : 1 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

$\varepsilon_{2t}$ : 2 yönündeki maksimum çekme birim uzaması

$\varepsilon_{1c}$ : 1 yönündeki maksimum basma birim uzaması

$\varepsilon_{2c}$ : 2 yönündeki maksimum basma birim uzaması

$\gamma_6$ : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı

anlamlarına gelmektedir. Ayrıca (5.18), (5.19) ve (5.20)'de verilen gerinimler ve kayma açısı, gerilimler cinsinden sırasıyla, eşitlik (5.21), (5.22) ve (5.23)'teki gibi yazılabilmektedir.

$$\varepsilon_1 = \frac{(\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2)}{E_1} \quad (5.21)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{(\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1)}{E_2} \quad (5.22)$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (5.23)$$

Maksimum değerleri hesaplamak için ise aşağıdaki eşitlikler yazılmaktadır.

$$\varepsilon_{1t} = \frac{F_{1t}}{E_1}, \quad \varepsilon_{2t} = \frac{F_{2t}}{E_2} \quad (5.24)$$

$$\varepsilon_{1c} = \frac{F_{1c}}{E_1}, \quad \varepsilon_{2c} = \frac{F_{2c}}{E_2}, \quad \gamma_6 = \frac{F_6}{G_{12}}$$

### 5.2.3. Tsai-Hill Teorisi

Tsai-Hill teorisi anizotropik malzemeler için von Mises teorisinden uyarlanmış bir teoridir. Buna göre düzlemsel gerilim durumu için, eğer aşağıdaki koşul oluşursa malzeme hasar oluşur. [3]

$$\left(\frac{\sigma_1}{F_1}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_1^2} + \left(\frac{\sigma_2}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{F_6}\right)^2 \geq 1 \quad (5.25)$$

Bu teoride çekme ve basma dayanımları arasında herhangi bir ayırım yapılmamaktadır. Buna göre;

$$F_1 = \begin{cases} F_{1t}, (\sigma_1 > 0) \\ F_{1c}, (\sigma_1 < 0) \end{cases} \quad (5.26)$$

$$F_2 = \begin{cases} F_{2t}, (\sigma_2 > 0) \\ F_{2c}, (\sigma_2 < 0) \end{cases}$$

olmaktadır. (5.25) eşitliğinde verilen değerleri  $\sigma_x$  cinsinden yazmak için ise aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta \\ \tau_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (5.27)$$

Böylece, çekme dayanımını bulmak için;

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_{1t}^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_{2t}^2} + \left( \frac{1}{F_6^2} - \frac{1}{F_{1t}^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \quad (5.28)$$

basma dayanımı için ise;

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_{1c}^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_{2c}^2} + \left( \frac{1}{F_6^2} - \frac{1}{F_{1c}^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \quad (5.29)$$

eşitliği yazılabilmektedir.

#### 5.2.4. Tsai-Wu Teorisi

Tsai-Wu teorisi, Gol'denblat ve Kopnov tarafından anizotropik malzemeler için geliştirilmiş hasar teorisinin basitleştirilmiş halidir ve (5.30)'da gösterilmiştir. [3]

$$f_i \sigma_i + f_{ij} \sigma_i \sigma_j \geq 1 \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (5.30)$$

Yukarıdaki eşitlik, (5.31)'de verilmiş haliyle de yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_3 \sigma_3 + f_4 \sigma_4 + f_5 \sigma_5 + f_6 \sigma_6 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{33} \sigma_3^2 \\ + f_{44} \sigma_4^2 + f_{55} \sigma_5^2 + f_{66} \sigma_6^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2f_{13} \sigma_1 \sigma_3 + 2f_{23} \sigma_2 \sigma_3 \geq 1 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Tsai-Wu teorisine göre, yukarıdaki ifadenin 1 veya daha büyük değerler alması durumunda, malzemede hasar oluşacağı öngörülmektedir.

Düzlemsel gerilim koşulunda ise bu ifade;

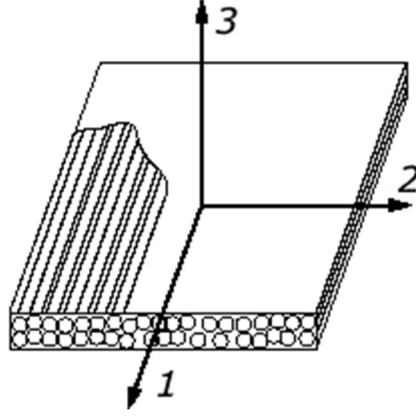
$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_{12}^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 \geq 1 \quad (5.32)$$

olmaktadır. (5.32)'de verilen katsayıları bulmak için ise aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} f_1 &= \left( \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \right), & f_2 &= \left( \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \right), \\ f_{11} &= \frac{1}{F_{1t} * F_{1c}}, & f_{22} &= \frac{1}{F_{2t} * F_{2c}}, \\ f_{66} &= \frac{1}{F_6^2}, & f_{12} &= -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{F_{1t} * F_{1c}} * \frac{1}{F_{2t} * F_{2c}}} \end{aligned} \quad (5.33)$$

### 5.2.5. Hashin Teorisi

Hashin teorisi hasar tipini ayırt edebilen bir teoridir. Yani, hasarın fiber veya matris malzemede olup olmadığını tespit edebilir. Bu nedenle en çok tercih edilen teorilerden biridir. Bu teoride verilmiş, fiber için hasar koşulu ise maksimum gerilim teorisindeki koşul ile benzerdir. Aşağıda bu teoriye ait koşul ve eşitlikler verilmiştir.



Şekil 5.3. 3 boyutlu kompozit bir katman için koordinat eksenleri

Şekil 5.3'e göre 1 yönü fiber yönünü, 2 yönü matris yönünü ve 3 yönü ise katmanın içine doğru olan yönü göstermektedir. Hashin teorisine göre [13];

1.  $\sigma_{11} > 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 1 yönünde çekme hasarı oluşur.

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \geq 1 \quad (5.34)$$

2.  $\sigma_{11} < 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 1 yönünde basma hasarı oluşur.

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 \geq 1 \quad (5.35)$$

3.  $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 2 yönünde çekme hasarı oluşur.

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \geq 1 \quad (5.36)$$

4.  $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 2 yönünde basma hasarı oluşur.

$$\left[ \left( \frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} \right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \geq 1 \quad (5.37)$$

5.  $\sigma_{33} > 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 3 yönünde çekme hasarı oluşur.

$$\left( \frac{\sigma_{33}}{Z_T} \right)^2 \geq 1 \quad (5.38)$$

6.  $\sigma_{33} < 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 3 yönünde basma hasarı oluşur.

$$\left( \frac{\sigma_{33}}{Z_C} \right)^2 \geq 1 \quad (5.39)$$

Şekil 5.3'te gösterilen koordinat eksenine göre, yukarıdaki ifadelerde kullanılan;

$X_T$ : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı

$Y_T$ : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı

$Z_T$ : 3 yönündeki maksimum çekme dayanımı

$X_C$ : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı

$Y_C$ : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

$Z_C$ : 3 yönündeki maksimum basma dayanımı

$S_{12}$ : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı

$S_{23}$ : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı, anlamlarına gelmektedir.

Düzlemsel gerilim koşulunda ise Hashin teorisi şu şekilde ifade edilmektedir;

1.  $\sigma_{11} > 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 1 yönünde çekme hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (5.40)$$

2.  $\sigma_{11} < 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 1 yönünde basma hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1 \quad (5.41)$$

3.  $\sigma_{22} > 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 2 yönünde çekme hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (5.42)$$

4.  $\sigma_{22} < 0$  için aşağıdaki koşul sağlanırsa, 2 yönünde basma hasarı oluşur.

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2S_{23}}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (5.43)$$

### 5.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

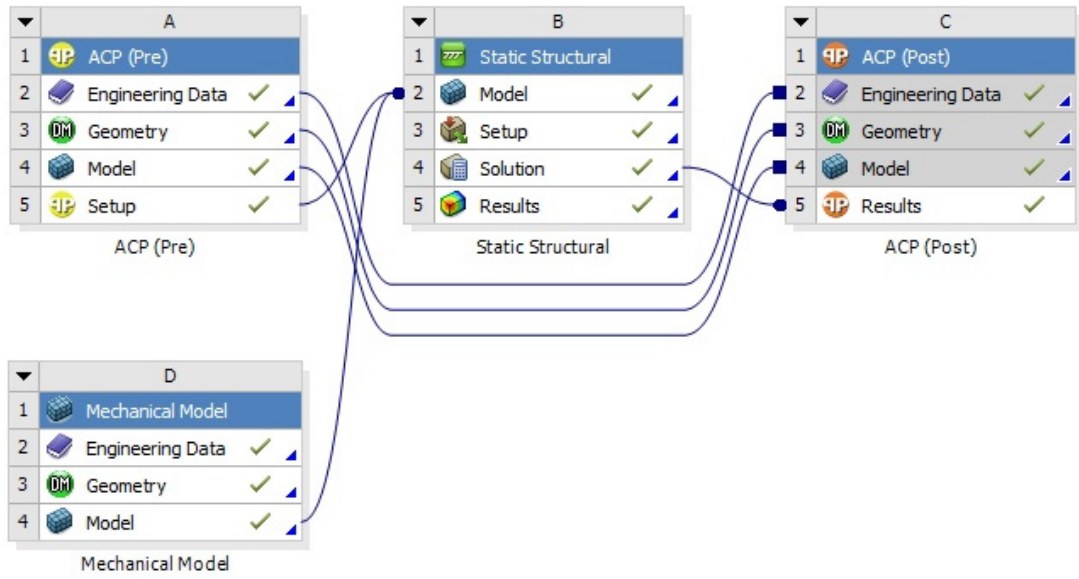
#### 5.3.1. Gerilim-Gerinim Analizi ve Fiber Açılarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi ile kompozit sarımlı basınçlı bir tankın yapısal analizini yapmak için ANSYS Workbench yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımda kompozit yapıların daha detaylı modellenmesi ve incelenmesi için ANSYS Composite Prepost (ACP) modülü kullanılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Analiz modelini oluşturmak için öncelikle tankın katı modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu katı model kullanılarak, hem metal astar hem de kompozit kısım modellenmiştir. Şekil 5.4'te bu modele ait akış şeması gösterilmiştir. Bu şemada, "ACP(Pre)" kısmı kompozit yapıya ait malzeme özellikleri, katman sayısı ve yerleşimi, fiber açıları gibi özelliklerin girildiği ve analize hazırlandığı bölümdür.



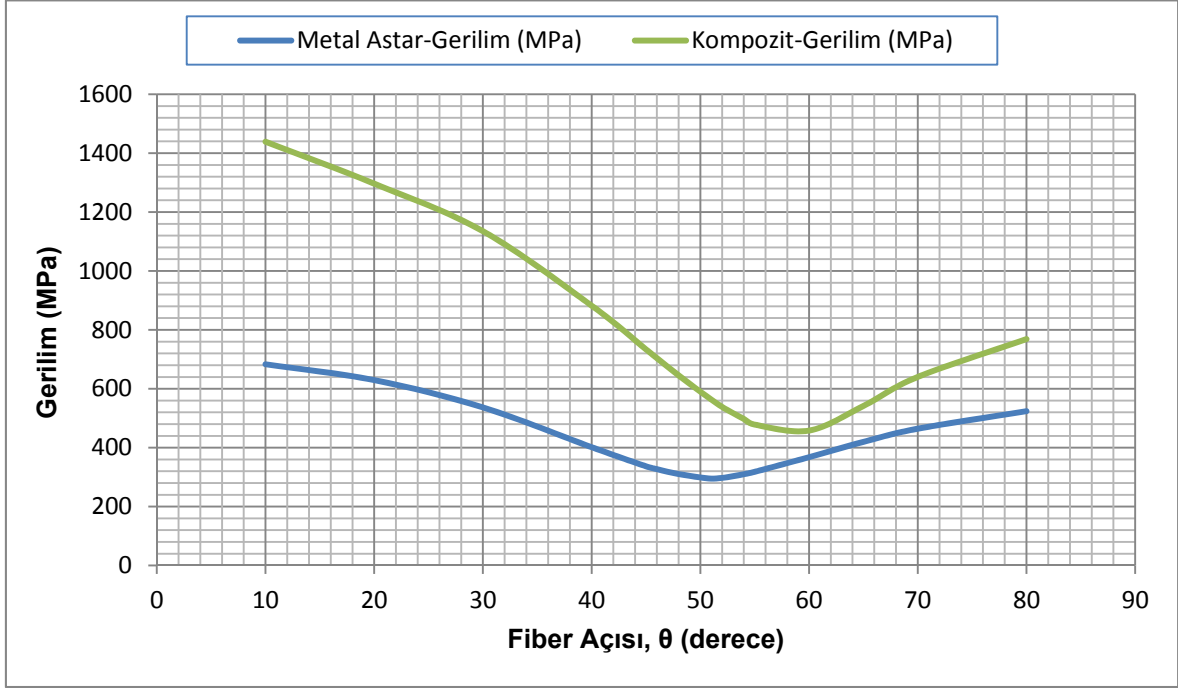
“Mechanical Model” kısmı ise tankın metal astarının modellendiği kısımdır. Bu iki bölüm daha sonradan “Static Structural” modülü ile birleştirilerek, tankın hem metal hem de kompozit kısımlarının birbirleri ile ilişkilendirilmeleri sağlanmaktadır. Daha sonra “Static Structural” kısmında, analiz tipi, basınç ve sınır koşulları gibi bilgiler girilerek analizler gerçekleştirilmiştir. ACP(Post) modülü ise kompozit yapının analiz sonrası oluşmuş tüm sonuçlarının, özellikle kompozit hasar teorilerinin detaylı bir şekilde incelendiği kısımdır.



Şekil 5.4. ANSYS Workbench ile kompozit tank modellemesi akış şeması

“ACP(Pre)” kısmı oluşturulurken, öncelikle kompozit malzeme için seçilmiş olan “TORAYCA T800H” [14] karbon fiberin özellikleri girilmiştir. Üreticinin verdiği kompozit bilgilerine göre malzeme %60 fiber ve %40 epoksi olacak şekilde oluşturulmuştur. Her bir katman için bu şekilde oluşturulmuş malzemenin özellikleri atanmıştır. Daha sonra ise katmanlar oluşturulmuş ve birçok lineer analiz yapılarak ortalama kullanılması gereken katman sayısı bulunmuştur. Bu katmanlara ait en ideal fiber açısını bulmak için ise, programda fiber açıları parametrik olarak değişecek şekilde ayarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenmek istenen bu açılar helisel olarak sarılacak olan fiberlere ait açılardır. Yapılan analizler sonucunda, Çizelge 5.1’de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlarda her bir fiber açısı için metal astar ve kompozit yapı üzerinde oluşan gerilimler gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre eğer kompozit malzeme dikkate alınırsa ideal fiber açısının  $59^\circ$  olması uygun olacaktır. Ama asıl dikkate alınması gereken Al6061-T6

malzemesinden tasarlanmış olan metal astardır. Çünkü sızdırmazlığı sağlayan asıl kısım metal astardır ve dayanımı kompozit yapıdan çok çok düşüktür. Bu nedenle metal astar üzerinde oluşabilecek en düşük gerilme dikkate alınmış ve elde edilen sonuçlara bakılarak, helisel sarım için ideal fiber açısının  $51^\circ$  olmasına karar verilmiştir.



Çizelge 5.1. İdeal fiber açısı (P=220 bar)

Katmanlara ait fiber açıları belirlendikten sonra “non-linear” analizler gerçekleştirilerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan bir dizi analizler sonucunda, mümkün olan en hafif ve istenen basınç koşullarına dayanacak bir tank için, Şekil 5.5’de gösterilmiş olan katman dizilimi ve fiber açıları elde edilmiştir.

K18	K17, K18: (90°/90)
K17	
K16	K15, K16: (51°/-51°)
K15	
K14	K13, K14: (90°/90)
K13	
K12	K11, K12: (51°/-51°)
K11	
K10	K9, K10: (51°/-51°)
K9	
K8	K7, K8: (51°/-51°)
K7	
K6	K5, K6: (51°/-51°)
K5	
K4	K3, K4: (51°/-51°)
K3	
K2	K1, K2: (51°/-51°)
K1	
Al 6061-T6	

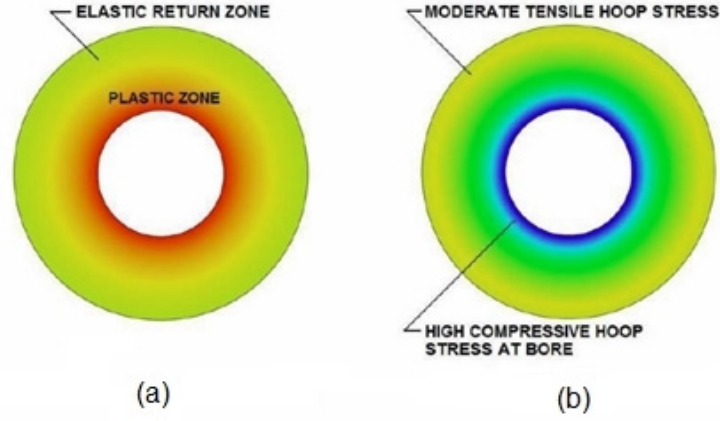
Şekil 5.5. Kompozit sarımlı tank için katman dizilimi ve fiber açıları

### 5.3.2. Otofretaj (Autofrettage)

Kompozit sarımlı basınçlı tanklar, filaman sargı işlemi tamamlandıktan sonra önemli bir işleme daha tabi tutulmaktadır. Bu işlem, metal astarın akma mukavemeti aşılacak şekilde kompozit tank basınçlandırılır ve metal astarın iç yüzeyinin plastik deformasyona uğratılması sağlanır. Bu işlem sırasında metalin maksimum çekme mukavemeti de aşılmamaktadır. Yapılan bu üretim işlemine otofretaj (autofrettage) denilmektedir. Otofretaj işlemi sırasında tanka uygulanan basınç, test basıncı ile patlama basıncı arasında bir değerdir.

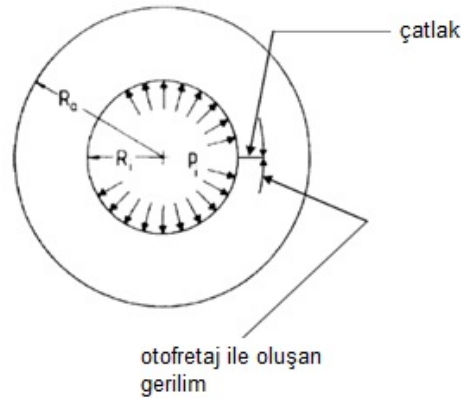
Otofretaj işlemi özellikle basınçlı tankların yorulma ömrünü arttıran, çatlak gelişimini engelleyen ve basınç dayanımını arttıran bir işlemdir. Bu yöntem sayesinde düşük maliyetli malzemelerin, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılması sağlanmaktadır. [15]

Otofretaj işlemi Şekil 5.6'da gösterildiği gibi 2 aşamada ifade edilebilir. Şeklin (a) kısmında öncelikle yüksek basınç uygulanmakta ve bu yüksek basınç nedeniyle parçanın iç kısmında plastik deformasyon olurken dışa doğru gidildiğinde elastik bir davranış sergilemektedir. Basınç tekrar sıfırlandıktan sonra şeklin (b) kısmında görüldüğü gibi dış kısım elastik olarak eski haline dönmeye çalışırken, parçanın iç yüzeyinde bir basma kuvveti oluşmaktadır. Bu ön gerilme sayesinde parçanın basınç dayanımı artırılmış olmaktadır.



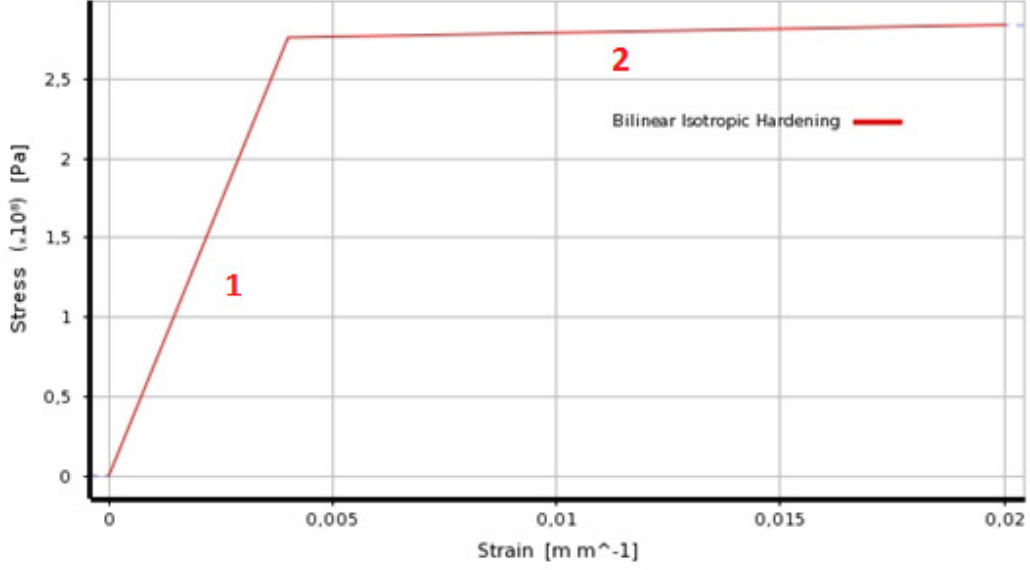
Şekil 5.6. a) Otofretaj sırasında oluşan gerilim dağılımı, b) Otofretaj sonrasında oluşan gerilim dağılımı [15]

Ayrıca Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, otofretaj işlemi parçanın iç yüzeyinde bulunan olası küçük çatlakların, içerideki otofretaj basıncı ile oluşan gerilim sayesinde çatlak yüzeylerini birbirine basarak çatlakın belirli bir büyüklükten daha fazla ilerlemesini engellemektedir.



Şekil 5.7. Otofretaj işleminin çatlak oluşumuna etkisi [15]

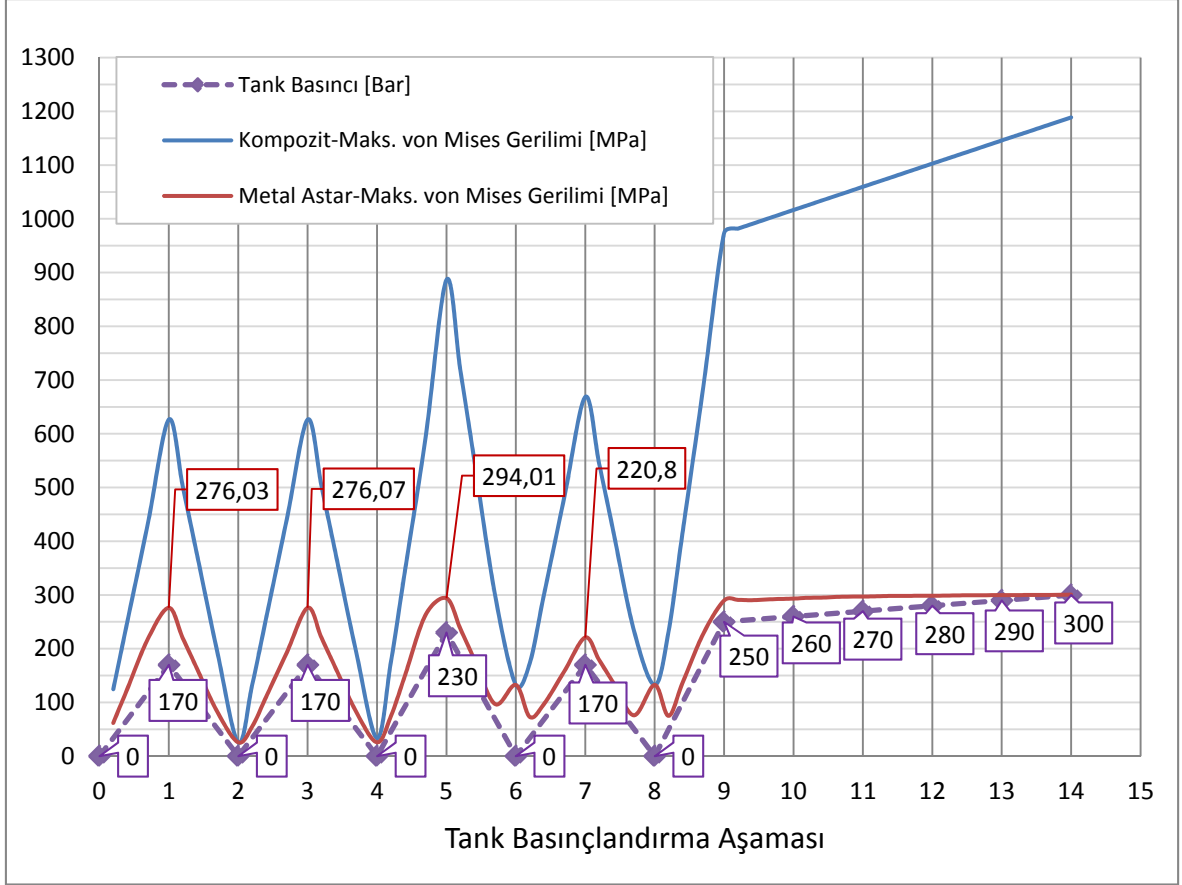
Otofretaj ve sonrasında patlatma analizleri için doğrusal olmayan (non-linear) çözüm kullanılmıştır. Bu analizleri yapabilmek için öncelikle ANSYS Workbench yazılımında alüminyum için çift doğrulu izotropik sertleşme özelliği aktif hale getirilmiştir. Yazılımda kullanılan bu gerilim-gerinim grafiği Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.



Çizelge 5.2. Al 6061-T6 için çift doğrusal izotropik sertleşme grafiği

Bu grafikte gösterilen 1 numaralı doğru boyunca, malzeme elastik özellikte olup yüklemeye kaldırıldığında malzeme eski haline dönebilmektedir. Ancak yüklemeye miktarı arttırıldıkça, 1 numaralı doğrudan 2 numaralı doğruya geçiş olmakta ve bu doğru boyunca da malzemede gerilim sertleşmesi gerçekleşmektedir. 1 numaralı doğrudan 2 numaralı doğruya geçiş kademesi aslında malzemenin akma sınırı olan 276 MPa değerine denk gelmektedir.

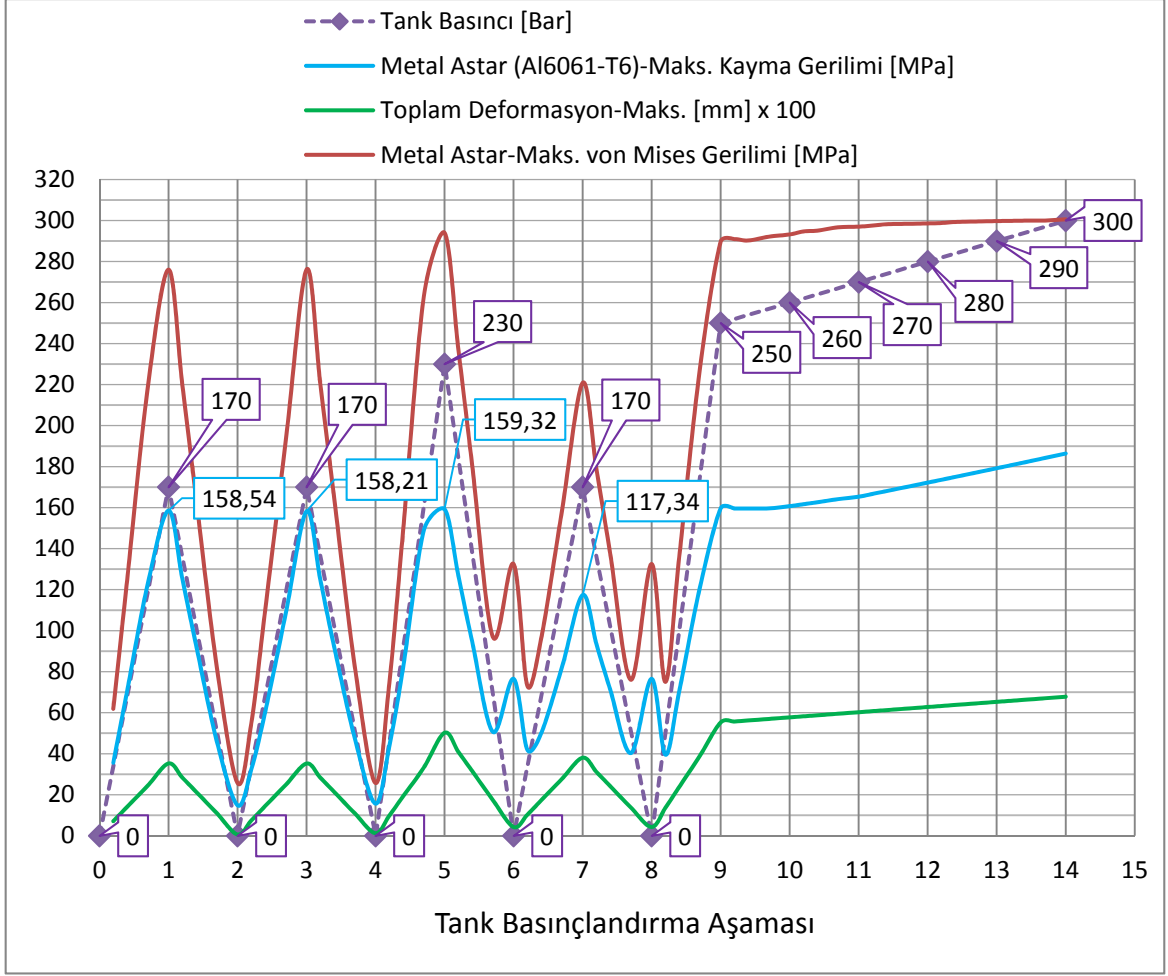
Analizlerde otofretaj etkisini görebilmek için çeşitli basınçlandırma aşamaları kullanılmıştır. Bu aşamalar Çizelge 5.3'te gösterildiği gibi öncelikle maksimum operasyon basıncı (MOB) olan 170 bar ile başlayıp sonra basınç 0 bara indirilmiş, daha sonra bu aşama tekrarlanarak bu basınçta metal astar üzerinde herhangi bir değişikliğin olmadığı gösterilmiştir. Aşama 5'te ise otofretaj basıncı olarak 230 bar kullanılmıştır. Bu basınç 1.25xMOB test basıncı ile 1.5xMOB patlama basıncı arasında bir basınçtır. Bu analizde otofretaj basıncı yaklaşık 1.35xMOB olmaktadır. Otofretaj uygulandığında metal üzerindeki maksimum gerilme yaklaşık 294 MPa olmaktadır. Bu değer 276 MPa [16] akma sınırından fazla ve metalin maksimum çekme mukavemeti olan 310 MPa'dan [16] da düşük bir değerdir. Bu da seçilmiş olan otofretaj basıncının uygun olduğunu göstermektedir.



Çizelge 5.3. Basınçlandırma ile otofretaj ve patlatma aşamaları

Aşama 6'da tank içindeki basınç 0 bara indirildiğinde ise metal astarda oluşmuş olan ön gerilim rahatlıkla gözlenebilmektedir. Aşama 7'de ise tank içindeki basınç tekrar operasyon basıncı olan 170 bara çıkartılmış ve bu aşamada metal astar üzerinde oluşmuş olan gerilimin yaklaşık maksimum 221 MPa olduğu görülmüştür. Otofretaj öncesinde bu değer yaklaşık 276 MPa olduğu görülmüştü. Bu durum otofretaj işlemi sonucunda tankın basınç dayanımının arttırıldığını göstermektedir.

Tank basınçlandırma aşamaları sırasında metal astarda (Al6061-T6) oluşmuş olan gerilim ve deformasyon analiz sonuçları da Çizelge 5.4'te verilmiştir. Bu çizelgede, otofretaj öncesi ve sonrasında metal astarda üzerinde görülen maks. von Mises gerilimi, maks. kayma gerilimi ve maks. deformasyon sonuçlarının basınca bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir.

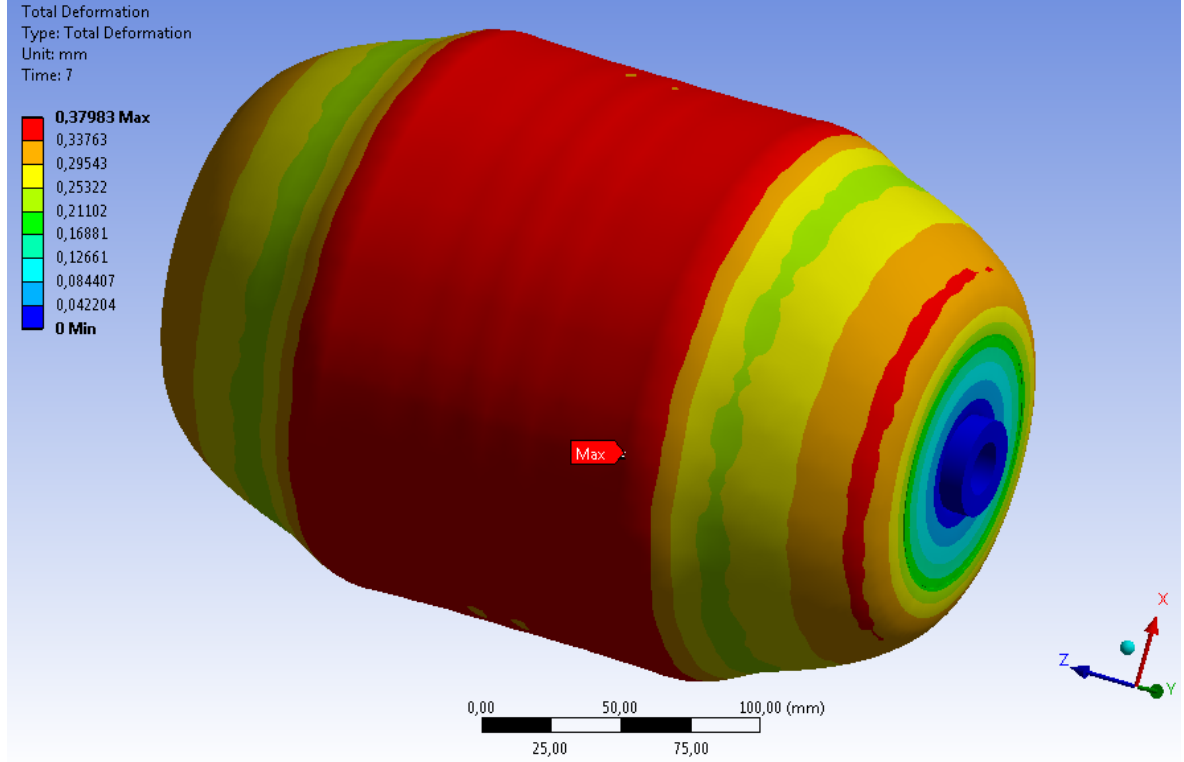


Çizelge 5.4. Metal astarda (Al6061-T6) oluşan maksimum gerilim ve maksimum deformasyonlar

Yukarıdaki çizelgede mm olarak verilmiş olan deformasyon değerleri, grafiğin bütünlüğü sağlamak amacıyla 100 kat büyütülerek gösterilmiştir. Bu şekilde hangi aşamada ne tür değişikliklerin olduğu bütün halde rahatlıkla görülebilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde otofretaj öncesinde metal astar üzerinde oluşmuş olan maksimum kayma gerilimi yaklaşık 158MPa olmaktadır. Ayrıca otofretaj sırasında yani 230bar basınçlandırma aşamasında da yaklaşık 159MPa'lık bir kayma gerilimi görülmektedir. Bu değerler, Al6061-T6 için verilmiş olan 207MPa kayma gerilimi [16] değerinin altında kalmaktadır. Bu nedenle metal astarda otofretaj aşamasında kayma gerilimi nedeniyle herhangi bir hasar oluşmayacaktır. Tasarlanan bu yakıt tankı otofretaj işleminden sonra kullanılacağı için, aşama 7'de görüldüğü gibi otofretaj sonrası uygulana 170bar (MOB) çalışma basıncında oluşan maksimum

kayma gerilimi yaklaşık 117MPa olmaktadır. Yine beklendiği gibi otoretaj nedeniyle kayma geriliminde de önemli bir azalma oluşmuştur.

Deformasyon sonuçları incelendiğinde ise otoretaj sırasında maksimum 0.5mm deformasyon oluşurken, 7. Aşamada 170bar basınç altında maksimum 0.38mm deformasyon oluşmaktadır. Tank üzerinde maksimum deformasyonun olduğu bölge ise Şekil 5.8'de görüldüğü gibi tankın çember bölgesidir.



Şekil 5.8. Metal astarda görülen toplam deformasyon (Aşama 7: 170bar)

Tankın patlama basıncını saptamak için ise tank içindeki basınç kademeli olarak 300bar basınca kadar çıkarılmaktadır. Tankın patlama durumu Çizelge 5.3 veya Çizelge 5.4'ten anlaşılamamaktadır. Bu nedenle metal astar üzerindeki kompozit malzemenin hasar görüp görmediği kontrol edilmelidir. Eğer kompozit malzemede hasar oluşuyorsa patlamanın olacağı anlaşılabilmektedir. Bu nedenle ANSYS yazılımı ile, daha önceki bölümlerde anlatılmış olan kompozit hasar teorileri incelenmiştir. ANSYS yazılımında bu hasar teorilerini incelemek için "ACP (post)" modülü kullanılmıştır. Bu modül sayesinde kompozit malzemede hangi aşamada, hangi katmanda ve hangi hasar teorisine göre hasar oluştuğu görülebilmektedir.



Şekil 5.9'dan Şekil 5.12'ye kadar verilen şekillerde, en önemli aşamalarda ve en kritik katmanlarda oluşmuş hasar durumları gösterilmektedir. Bu şekillerde, her bir eleman üzerinde gösterilmiş kısaltmalarda;

s1, s2 - maksimum gerilme

e1, e2, e3 - maksimum gerilme

th – Tsai-Hill

tw – Tsai-Wu

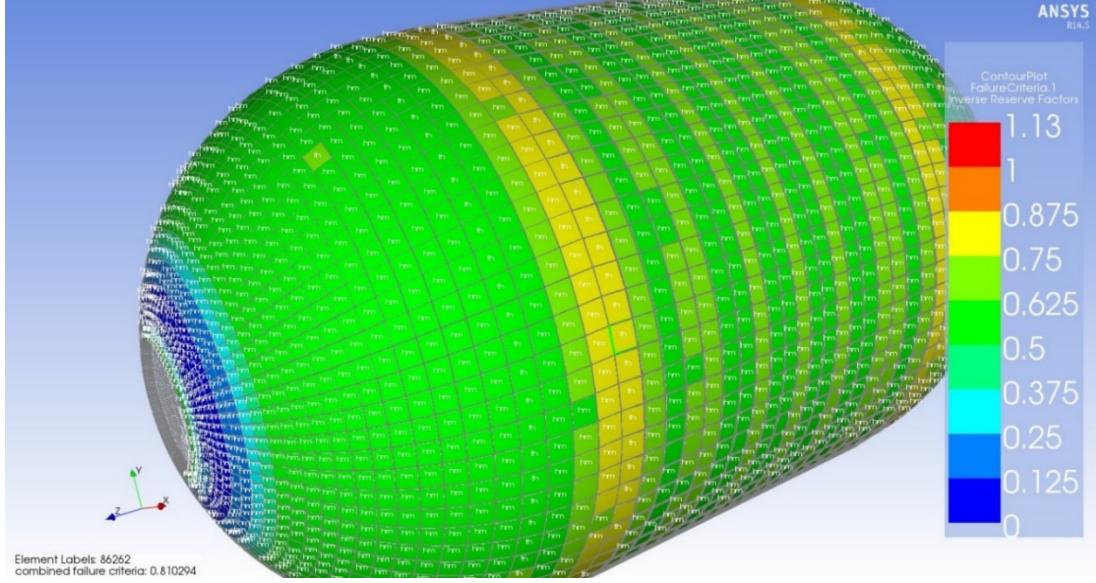
hf, hm, hd – Hashin, teorilerini ifade etmektedir.

Her bir eleman üzerinde gösterilmiş olan kısaltmalar, bu 5 farklı teori arasından en yüksek değere sahip olan teoriyi ifade etmektedir. Bu teorilere göre hasar durumu 1 ve üzerinde olan yani renk kodu ile kırmızı renk ile gösterilmiş bölgelerde hasar oluşacağı anlaşılmaktadır. Şekil 5.9'a bakıldığında otofretaj işlemi sırasında, 230bar basınçta kompozit malzemenin herhangi bir hasar almadığı görülmektedir. Burada gösterilen 16 numaralı katman bütün kompozit katmanlar arasındaki en kritik katmanı göstermektedir.

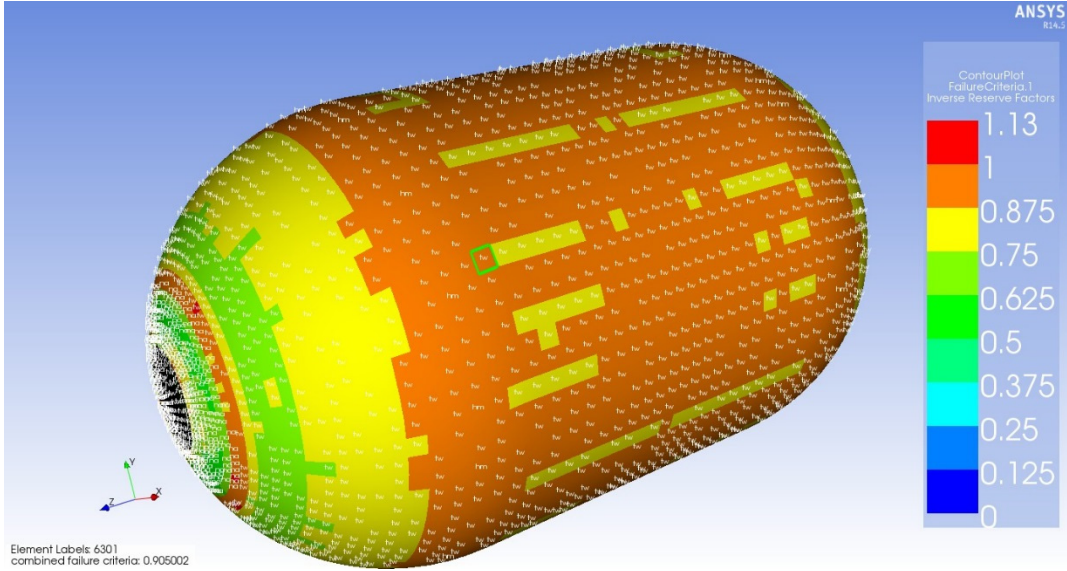
Patlama basıncını tespit etmek için ise, tüm basınçlandırma aşamaları takip edildiğinde kompozit malzemenin 280 bar basınçta hasar almaya başladığı görülmektedir.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de 280 bar basınç altında en kritik 2 katmanın hasar durumları gösterilmiştir.

Şekil 5.10'a göre 1 numaralı katmanda hasar oluşmamasına rağmen, çember bölgesinin sınır gerilimlere ulaştığı anlaşılabilmektedir.

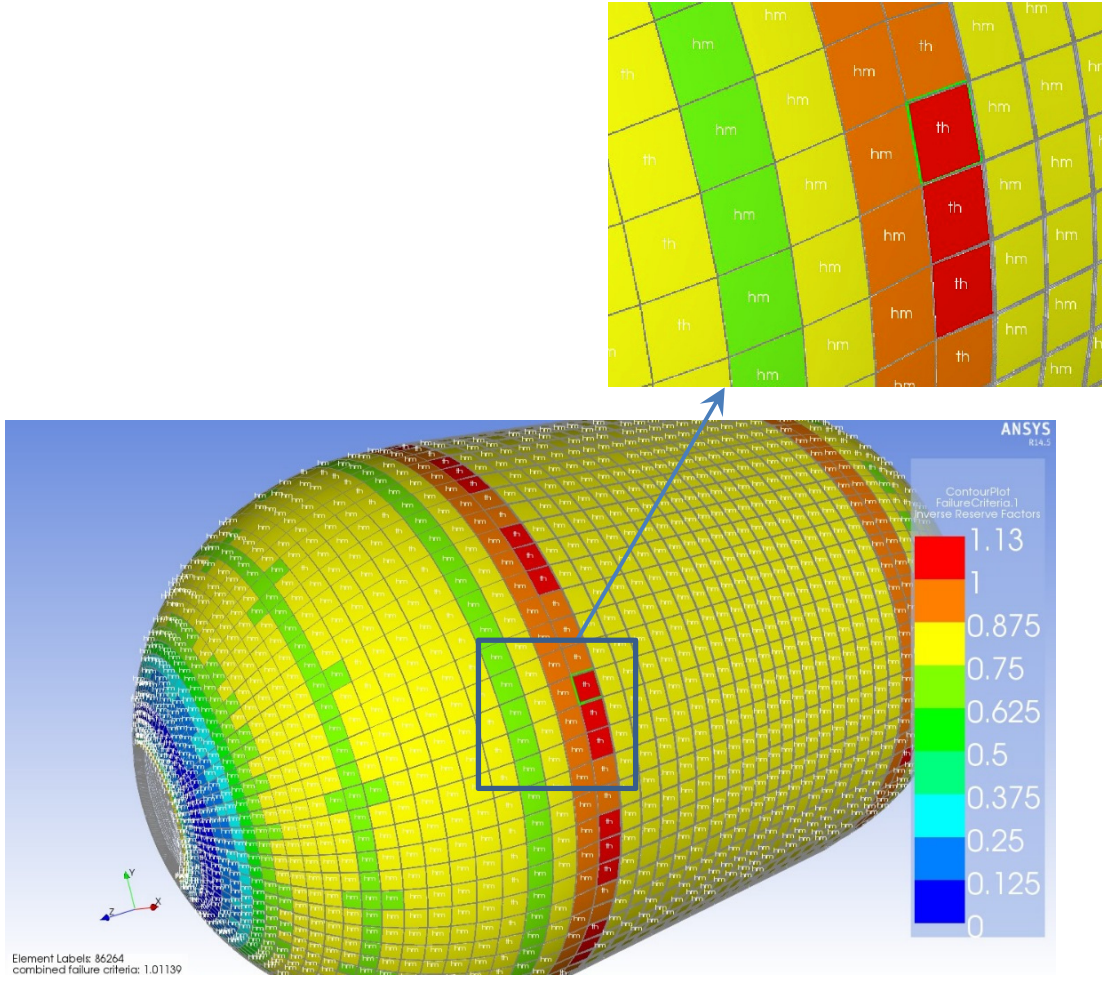


Şekil 5.9. 230 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16)

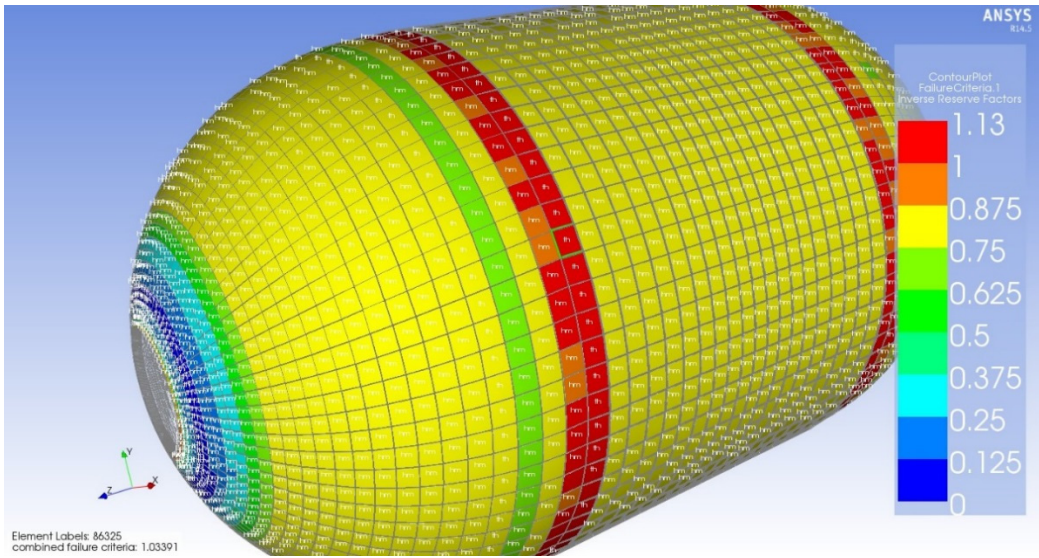


Şekil 5.10. 280 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:1)

Fakat Şekil 5.11’de gösterilen 16 numaralı katmana bakıldığında çember bölgesi ile kubbe bölgesinin birleşimi olan bölgede hasar oluşumunun başladığı gözlenebilmektedir. Bu bölgede Tsai-Hill ve Hashin teorilerine göre hasar oluştuğu anlaşılabilir. Bu durum Şekil 5.12’de 290bar basınç için verilmiş şekilde daha belirgin olarak anlaşılabilir. Bu sonuçlar ele alındığında, kompozit sarımlı basınçlı tankın patlama basıncı 280bar olarak kabul edilmiştir.



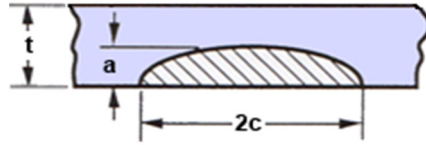
Şekil 5.11. 280 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16)



Şekil 5.12. 290 bar basınçtaki tankın kompozit hasar durumu (katman no:16)

### 5.3.3. Çatlak Analizi

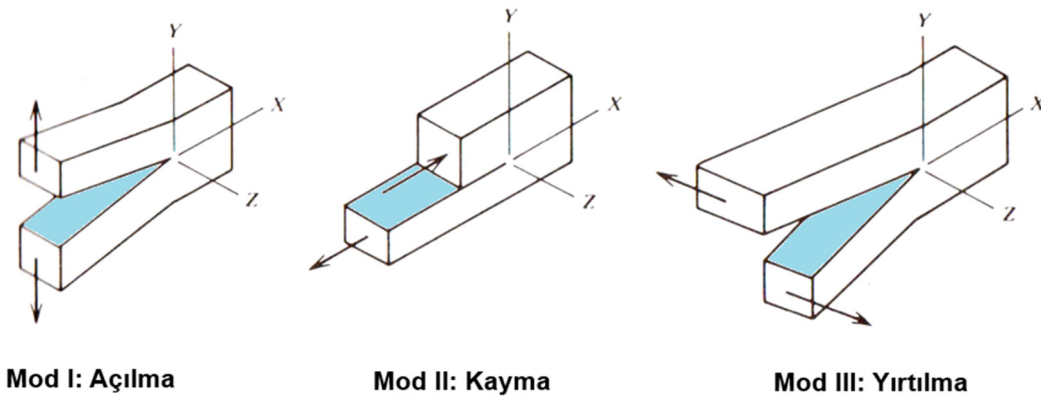
Kompozit sarımlı basınçlı tanklarda tasarım gereksinimi olarak patlama öncesi sızdırma şartını sağlamak için, ANSYS Workbench yazılımında çeşitli çatlak senaryoları incelenmiştir. Bu analizlerde kullanılan çatlak tipi ise programdaki kısıttan dolayı sadece eliptik çatlaktır. Şekil 5.13'te analizlerde kullanılan örnek bir çatlak tipi gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Yarı eliptik yüzey çatlağı

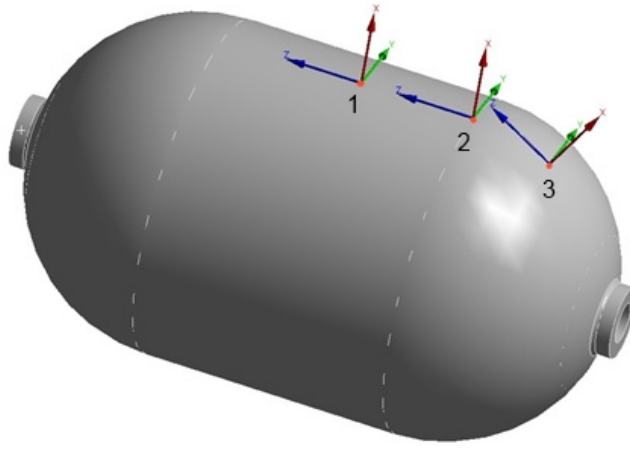
Bu analizlerin sonuçlarına göre, fırlatma sırasında veya uzaydaki operasyonlar sırasında eğer tankta bir çatlak oluşursa bu çatlağın ani bir şekilde açılıp açılmayacağına bakılmıştır. Çatlağın büyümesi veya açılması durumu aslında tankın patlaması anlamına gelmektedir ve bu durum da tankın içinde bulunduğu yapıya zarar vermesi demektir. Bu nedenle böyle durumlarda tankın patlamadan yavaşça sızdırması istenmektedir ve bu şekilde tankın etrafında bulunan yapılara hiç zarar verilmemiş veya zarar en aza indirgenmiş olur.

Yükleme tiplerine göre çatlaklar 3 farklı şekilde incelenmektedir. Şekil 5.14'te gösterildiği gibi bu çatlak modları sırasıyla açılma, kayma ve yırtılma modlarıdır.



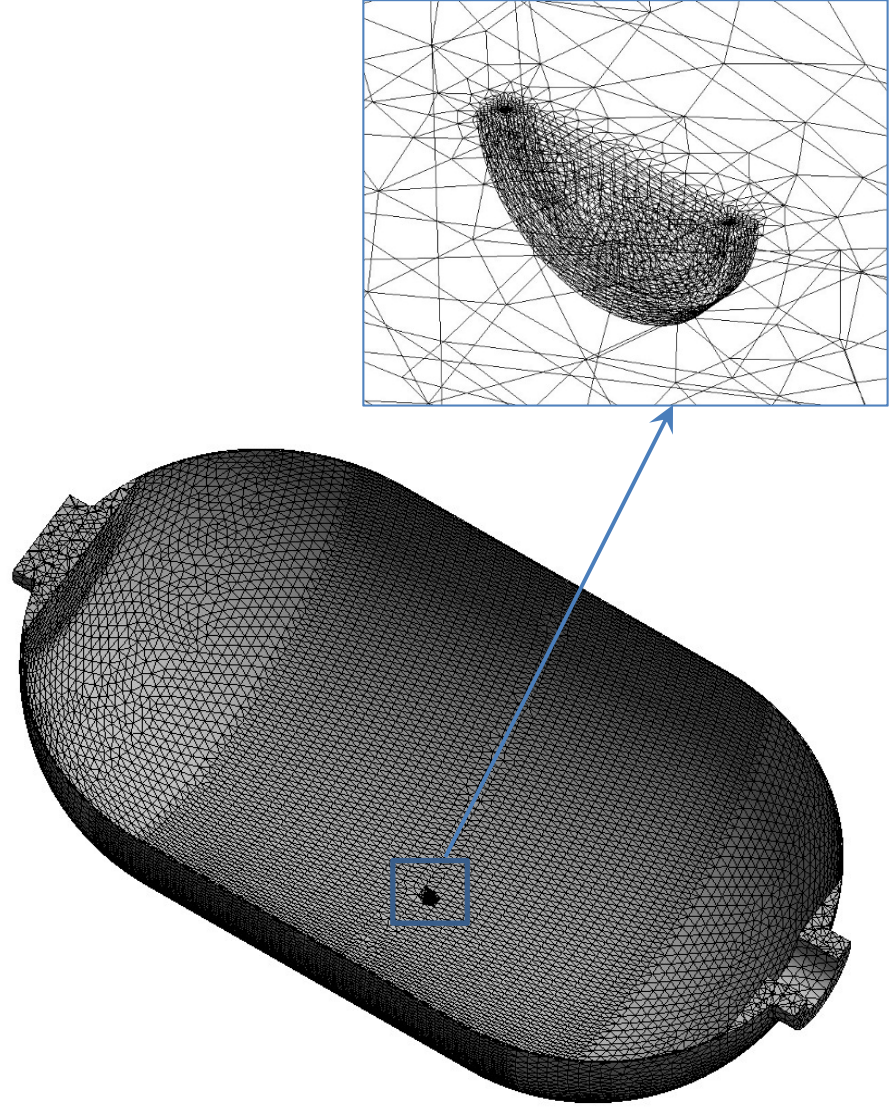
Şekil 5.14. Çatlak ilerleme modları ve yüklem tipleri

Çatlak analizi tankın metal astarında yani sızdırmazlığı sağlayan kısmında gerçekleştirilmiştir. Çatlak analizleri metal astarın olası kaynak bölgeleri ve basınçlandırma sırasında oluşan deplasmanların fazla olduğu kritik bölgeler için yapılmıştır. Şekil 5.15'de gösterilen tankın 3 farklı kritik bölgesi için ve her bölgede 0°, 45° ve 90°'lik açılardaki çatlaklar oluşturularak analizler yapılmıştır. Burada tankın silindir eksenini 0° açığı temsil etmektedir. 0°, 45° ve 90°'lik açılardaki çatlaklar için de a/c oranı 1/5 den başlayarak 2/5, 3/5, 4/5 ve 5/5 olmak üzere 5 farklı çatlak tipi incelenmiştir. 0.6mm kalınlıkta olan metal astar için a değeri en büyük 0.5mm alınmıştır ve yukarıda belirtilen oranlarda değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir.



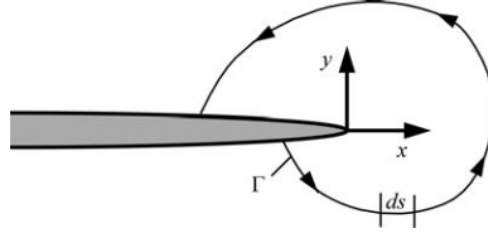
Şekil 5.15. 3 farklı kritik bölgedeki çatlak pozisyonları

Şekil 5.16'da ise bu çatlak analizlerinde kullanılmış örnek bir sayısal ağ modeli gösterilmiştir. ANSYS Workbench 14.5 programında çatlak analizini gerçekleştirmek için, sayısal ağda kullanılan eleman tipleri sadece tetrahedron elemanlar olabilmektedir. Çatlak analizler, güvenli tarafta kalabilmek için, tank basıncının 220 bar olduğu durum için yapılmıştır. 220bar basınç, test basıncı olan 212.5bar basıncın biraz üstü olarak seçilmiştir.



Şekil 5.16. Çatlak modellemesinde kullanılan örnek bir sayısal ağ

Analiz sonuçlarını değerlendirmek için, çeşitli boyutlardaki çatlaklara ait J-integral ve K (gerilim şiddet faktörü) değerleri karşılaştırılmıştır. J-integral, 1968 yılında James R. Rice tarafından bulunmuş olan elastik-plastik hasar parametresi olarak bilinmektedir. J-integral metodu, bir çatlağın ilerlemesine bağlı olarak ortaya çıkan potansiyel enerjideki değişim miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. Yani çatlakta ilerleme olup olmayacağının bir göstergesidir. J-integral hesaplaması için Şekil 5.17'de gösterilmiş bir çatlak etrafında keyfi bit hat oluşturulmaktadır ve bu hat boyunca çizgi integral alınmaktadır [17].



Şekil 5.17. Çatlak ucunda oluşturulmuş keyfi hat

Hattan bağımsız olan bu çizgi integral ifadesi (5.44)'te gösterilmiştir.

$$J = \int_{\Gamma} \left( w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (5.44)$$

Yukarıdaki denklemde;

$w$  : gerilme enerji yoğunluğu

$T_i$ : gerilim vektörü bileşenleri

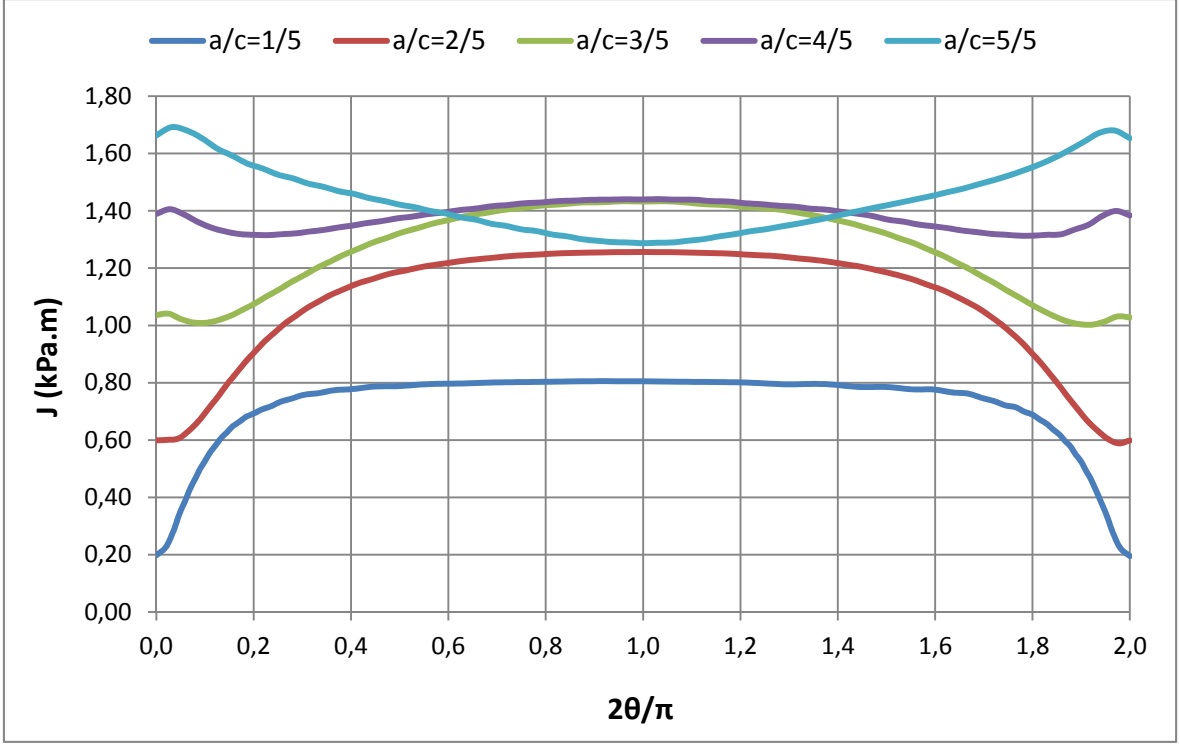
$u_i$ :deplasman vektörü bileşenleri

$ds$  :  $\Gamma$  hattı boyunca alınmış uzunluk parçası, anlamlarına gelmektedir. (5.44)'te verilmiş olan gerilme enerji yoğunluğu ( $w$ ) ifadesini bulmak için ise aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

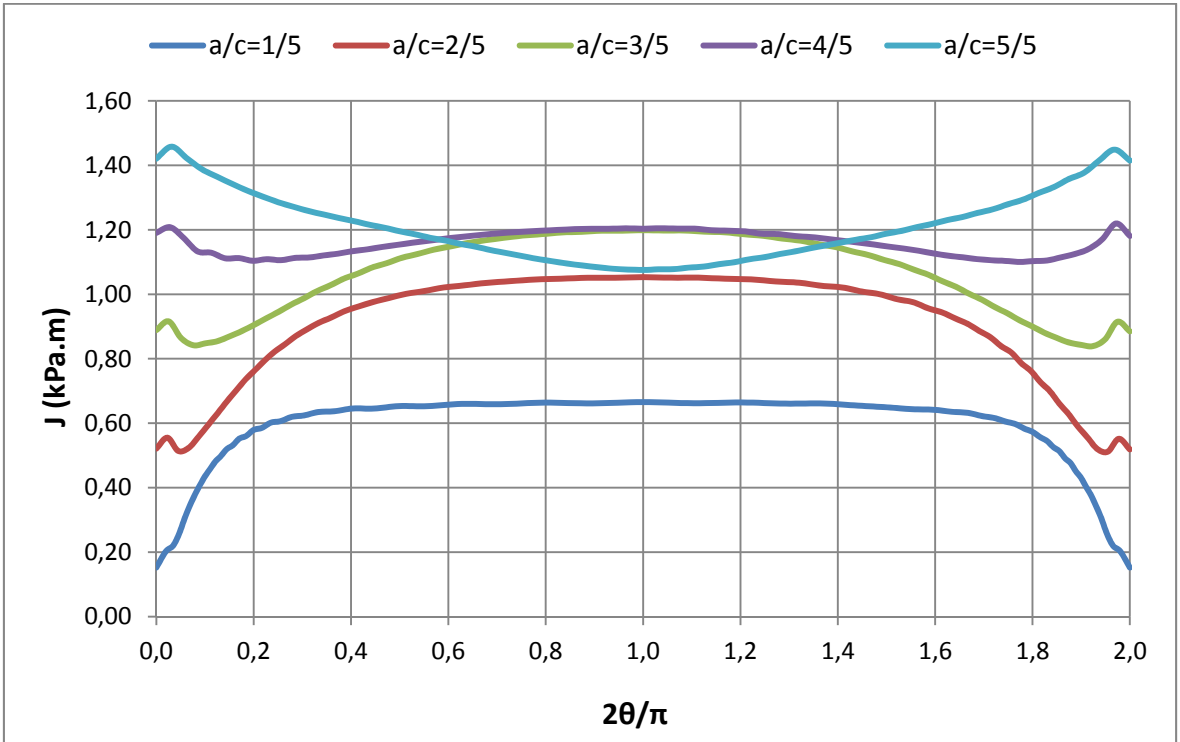
$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (5.45)$$

(5.45)'de gösterilmiş olan denklemde verilen  $\sigma_{ij}$  gerilim tensörünü,  $\varepsilon_{ij}$  ise gerinim tensörünü ifade etmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiş analizler sonucunda elde edilen  $J$  integral değerleri Çizelge 5.5'den Çizelge 5.13'e kadar olan grafiklerde gösterilmiştir.

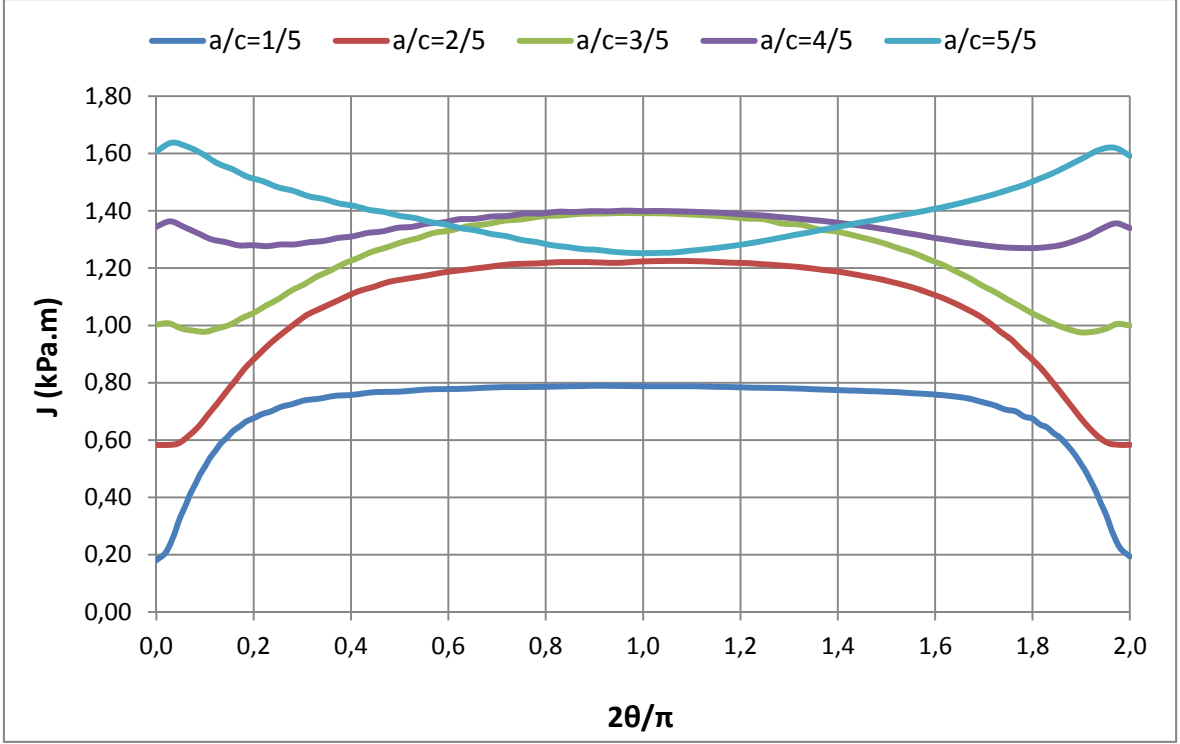


Çizelge 5.5. 1 numaralı çatlak bölgesi,  $0^\circ$  açılı çatlaklar için J integral grafiği

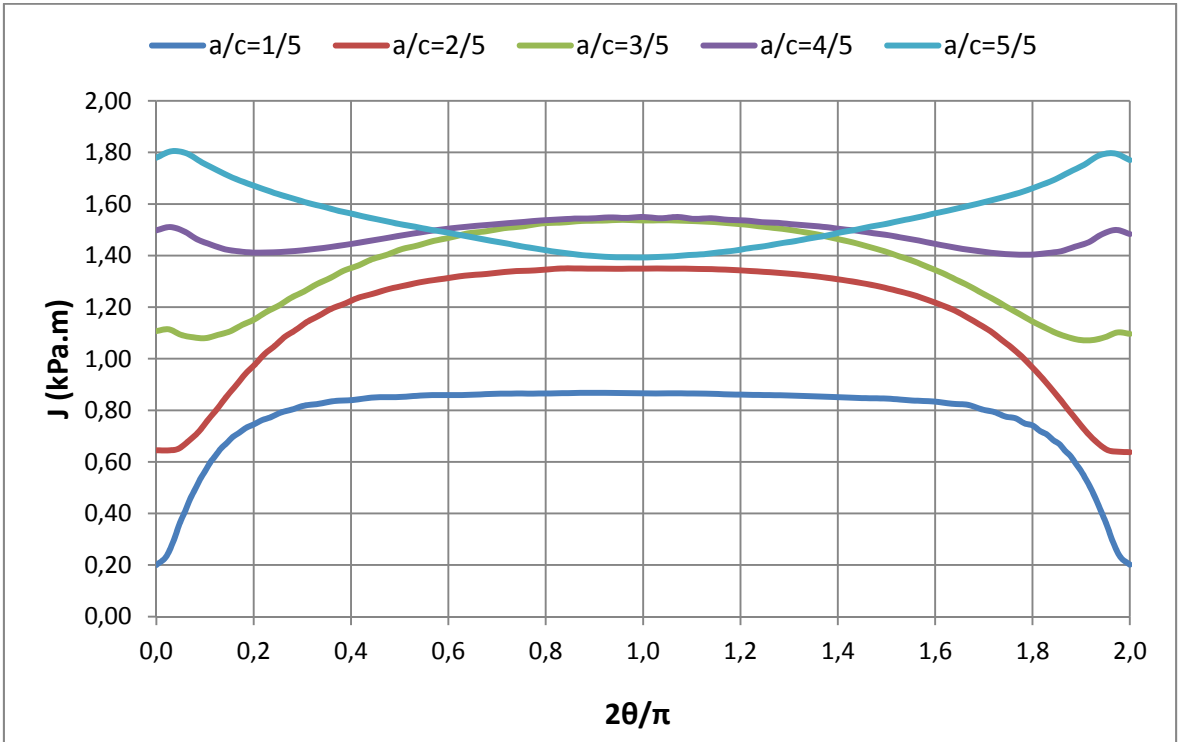


Çizelge 5.6. 1 numaralı çatlak bölgesi,  $45^\circ$  açılı çatlaklar için J integral grafiği

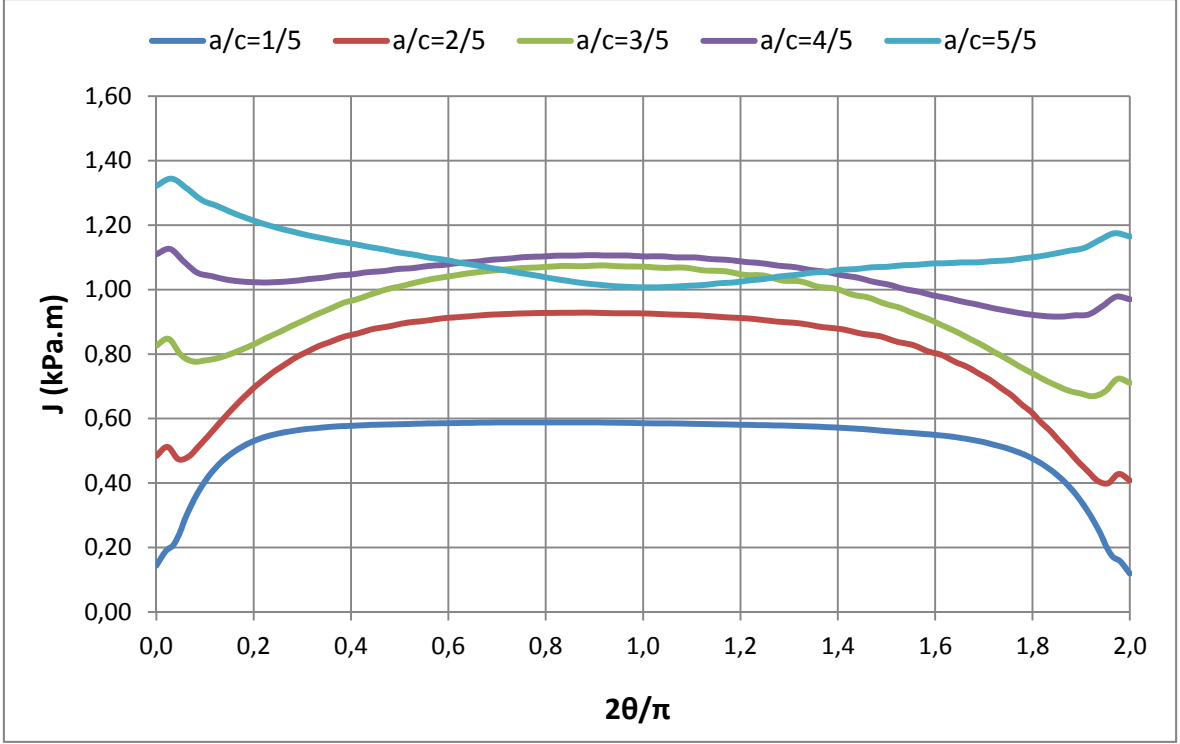




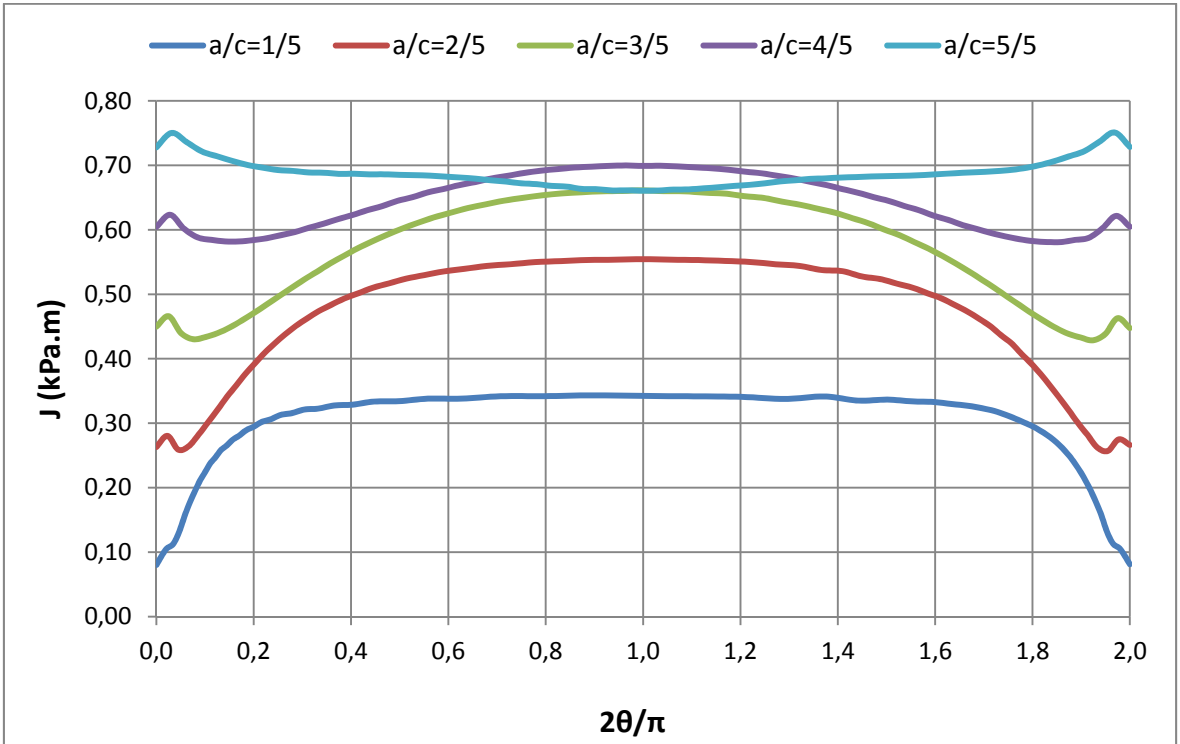
Çizelge 5.7. 1 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği



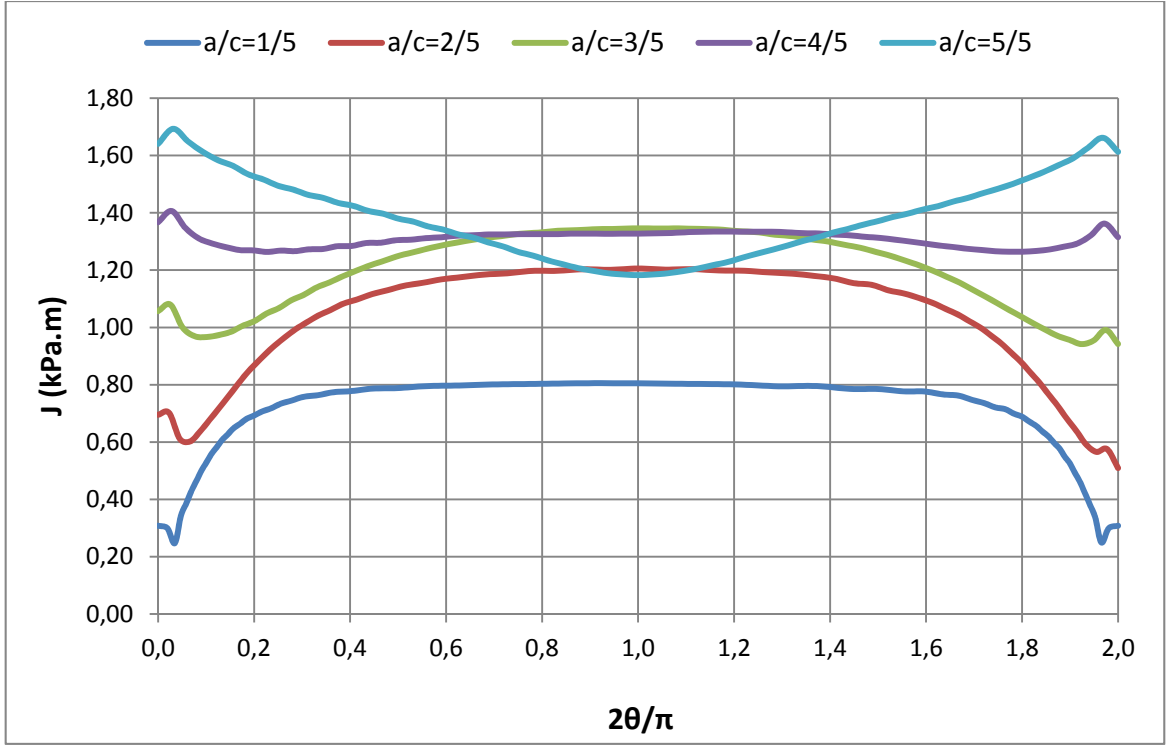
Çizelge 5.8. 2 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için J integral grafiği



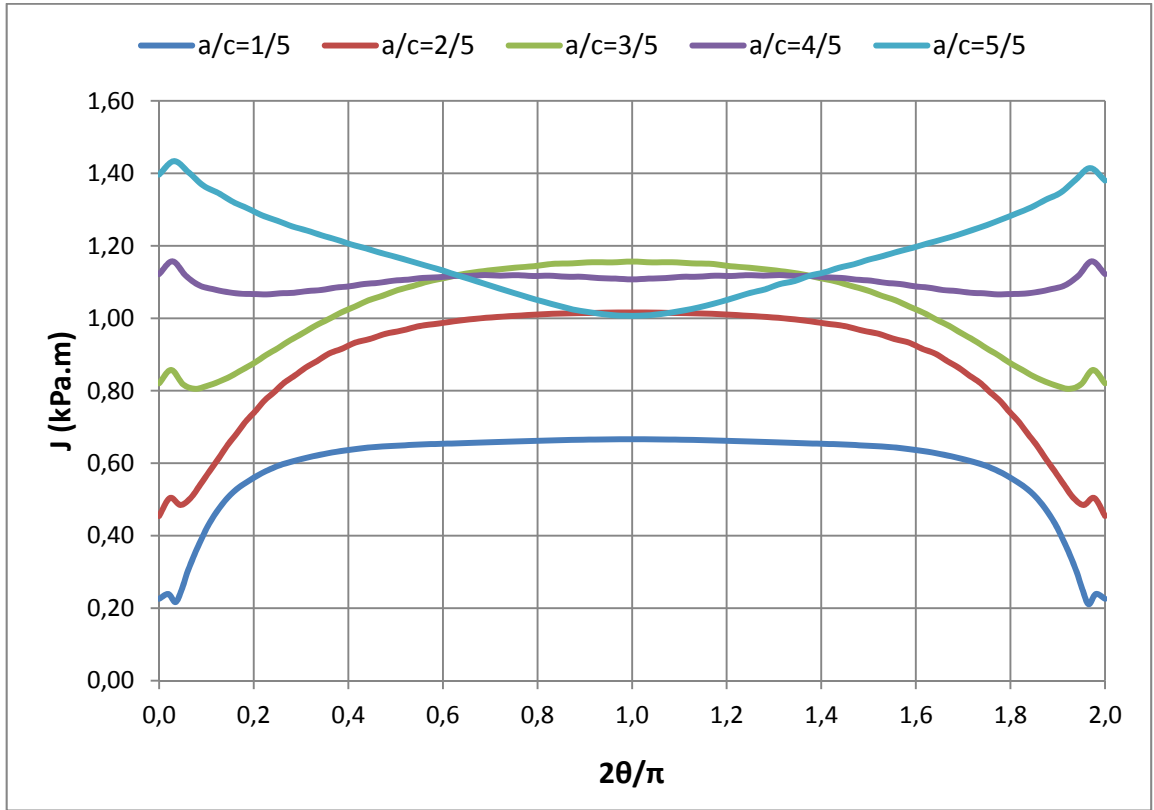
Çizelge 5.9. 2 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için J integral grafiği



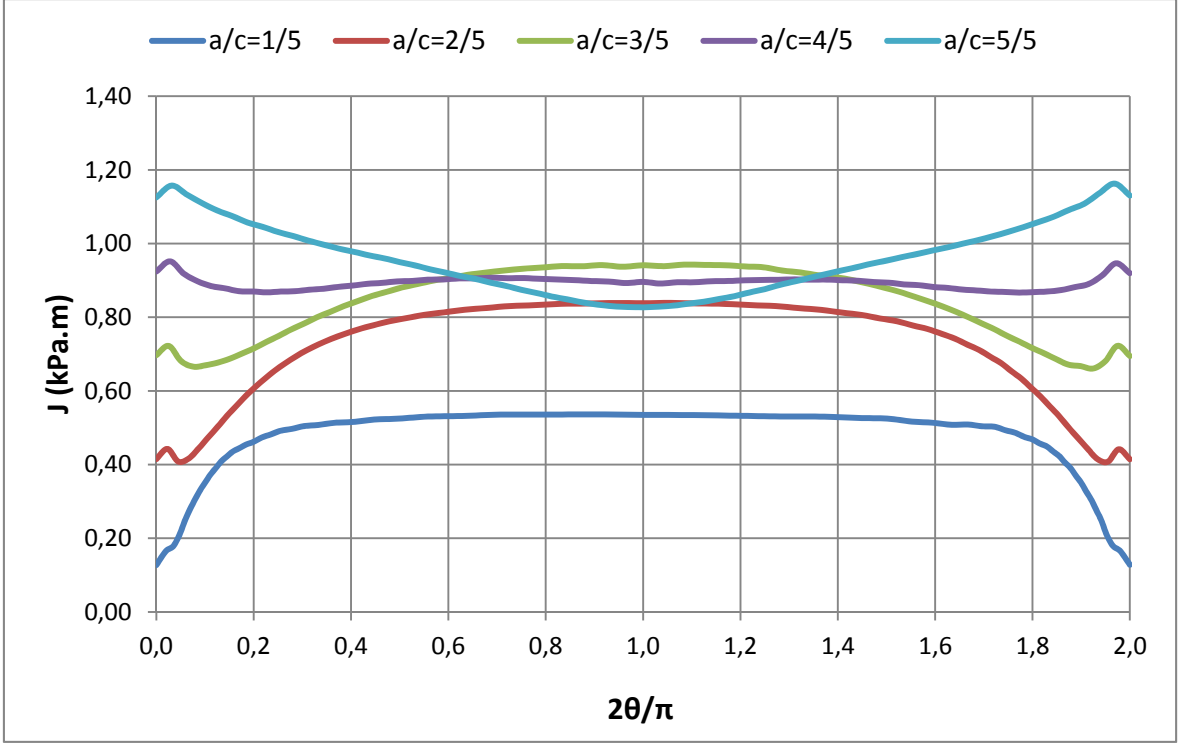
Çizelge 5.10. 2 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği



Çizelge 5.11. 3 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için J integral grafiği



Çizelge 5.12. 3 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için J integral grafiği



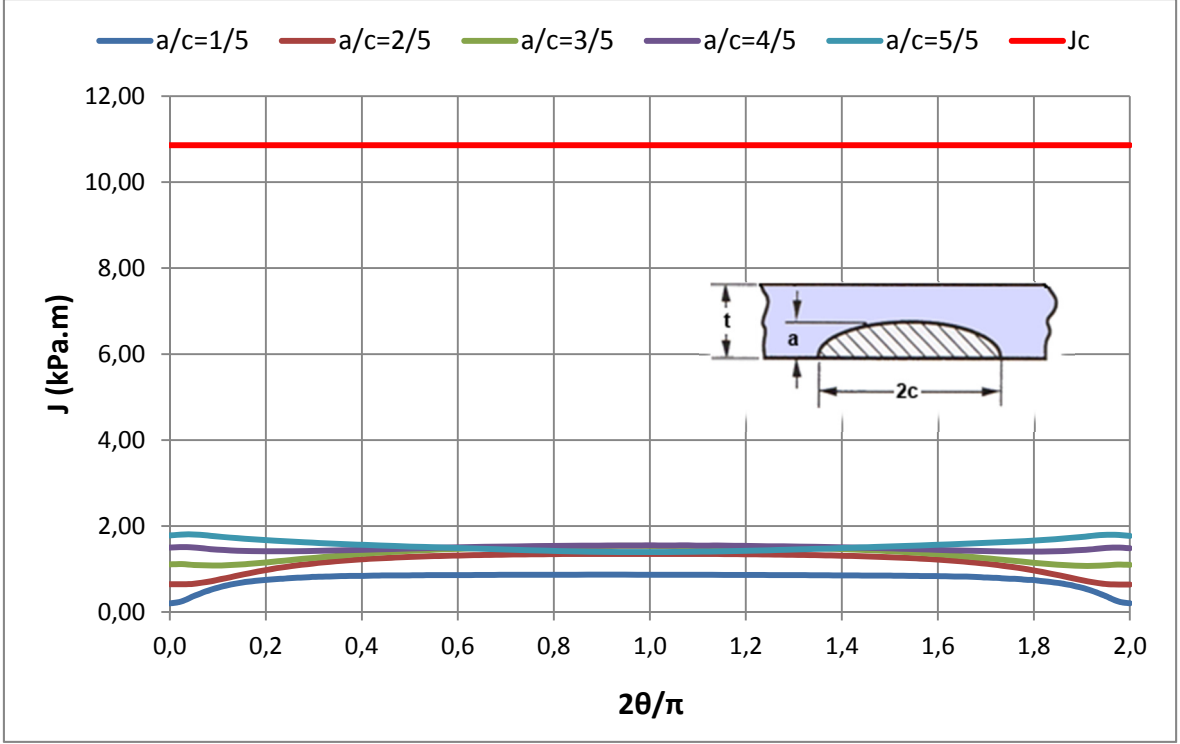
Çizelge 5.13. 3 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için J integral grafiği

Yukarıda verilmiş olan J integral grafiklerine bakıldığında, 2 numaralı bölgede ve 0° açılı çatlakın en kritik olduğu görülmektedir. Bu çatlakta ilerleme olup olmadığını anlayabilmek için ise J integralin kritik değerinin hesaplanması gerekmektedir.

J integralin kritik değeri, düzlemsel gerinim koşulu için [18];

$$J_c = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_{Ic}^2 \quad (5.46)$$

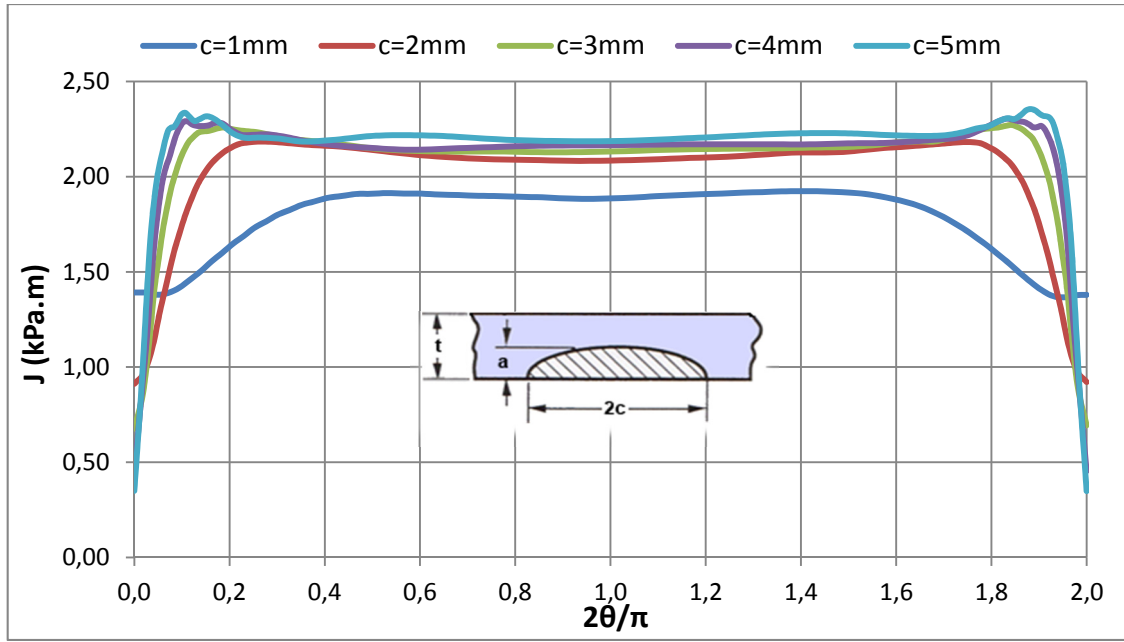
Alüminyum 6061-T6 için  $\nu$ , E ve  $K_{Ic}$  değerleri [16], (5.46)'da yerine konulduğunda  $J_c = 10.86(kPa.m)$  olarak bulunmaktadır. Bu değer, Çizelge 5.8'de verilmiş olan en kritik çatlak durumunu gösteren grafikte gösterildiğinde ise Çizelge 5.14 elde edilmektedir.



Çizelge 5.14. Kritik çatlak bölgesinde oluşan J integrallerin  $J_c$  ile karşılaştırılması

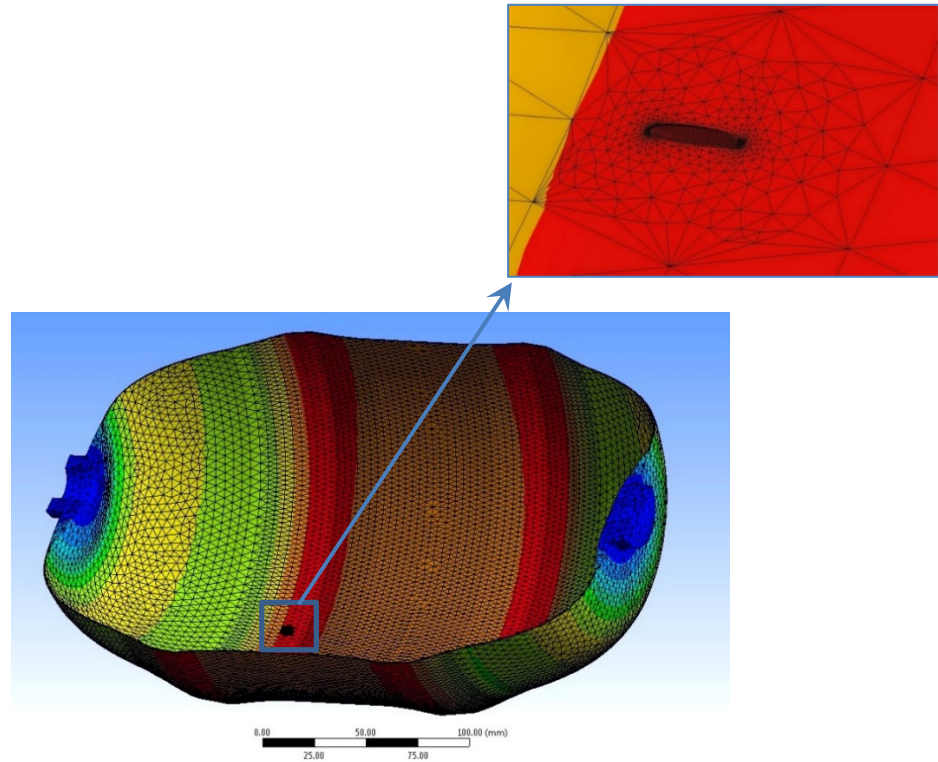
Çizelge 5.14'e göre analizler sonucu elde edilmiş J integral değerleri  $J_c$  değerinden daha küçük olması nedeni ile en kritik çatlak durumunda bile çatlakın ilerlemeyeceği ve patlamanın olmayacağı öngörülmektedir. Aynı çatlak bölgeleri için elde edilmiş gerilim şiddet faktörleri ( $K_1$ ) de, Çizelge EK-A 1 den Çizelge EK-A 9'a kadar verilmiş olan grafiklerde gösterilmiştir.

Bu senaryolar dışında, çatlak boyunun yani c değerinin daha büyük olma durumu da incelenmiştir. Bunun için en kritik çatlak bölgesi olan 2 numaralı bölge ve  $0^\circ$  açılı çatlak durumu ele alınmış ve senaryolar oluşturulmuştur. Bu çatlaklar için  $a=0.5\text{mm}$  değeri sabit tutulmak şartıyla, c değeri 1mm ile 5mm aralığında değiştirilerek Çizelge 5.15'de gösterilmiş olan grafik elde edilmiştir. Bu grafiğe göre J integralin kritik değeri olan 10.86 (kPa.m) aşılmamış ve  $c=5\text{mm}$  'ye kadar olan çatlakların bile ilerlemediği ortaya çıkmıştır.



Çizelge 5.15. En kritik çatlak durumu için oluşturulmuş ( $a=0,5\text{mm}$  ve  $c= 1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $3\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $5\text{mm}$ ) senaryolara ait J integral grafiği

Analizler sonucunda oluşmuş örnek bir açılma da Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Çatlak analizi sonucu çatlak bölgesinde oluşan örnek bir açılma

#### 5.3.4. Modal Analiz

Modal analiz, yapıların titreşim kaynağından dolayı uyarılması ile oluşan dinamik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu özellikler o yapının doğal frekansı ve mod şekilleridir. Doğal frekans, o cismin kütlesine ve esnekliğine bağlı olan, bu frekansta uyarıldığında ise yüksek genlikte salınımların gerçekleştiği frekanstır. Eğer bir yapı doğal frekansında uyarılırsa, o yapı rezonansa girer ve artık kendi bütünlüğünü koruyamaz hale gelir. Bu nedenle, tasarım aşamasında yapının doğal frekanslarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Mod şekilleri de bu frekanslarda oluşan şekilleri göstermektedir.

Doğal frekansların hesaplanabilmesi için ise (5.47)'de verilmiş olan genel hareket denklemi oluşturularak çözümü yapılmaktadır.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (5.47)$$

Yukarıdaki denklemde;

[M]: Kütle matrisi

[C]: Sönümlenme matrisi

[K]: Katılık matrisi

{F}: Kuvvet vektörü

{ $\ddot{x}(t)$ }: İvme vektörü

{ $\dot{x}(t)$ }: Hız vektörü

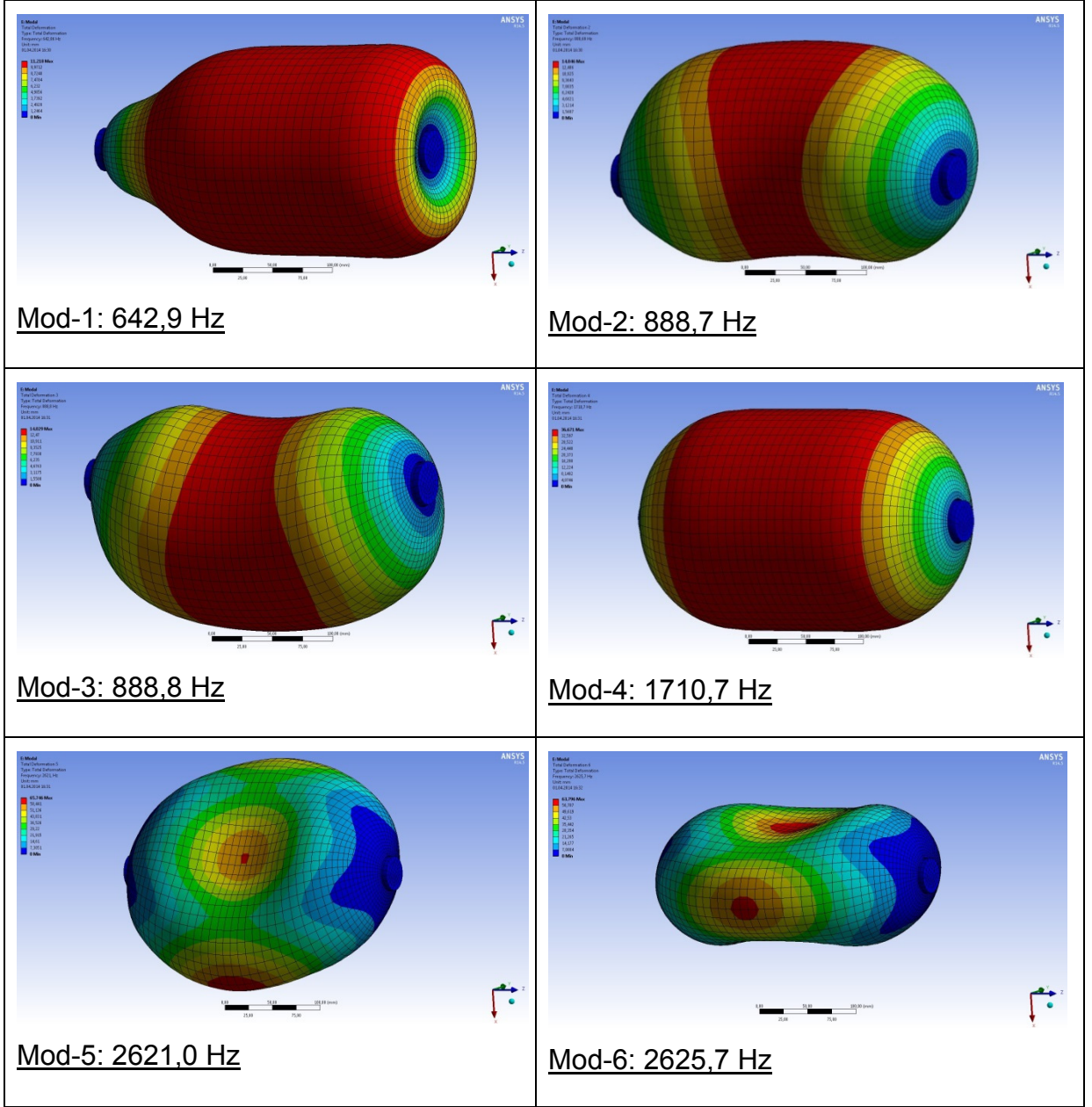
{ $x(t)$ }: Yer değiştirme vektörü

anlamlarına gelmektedir. [19]

ANSYS Workbench yazılımında modal analizleri yapabilmek için, daha önce gerilim-gerinim analizleri için hazırlanmış olan modele "Modal" modülü eklenerek aynen kullanılmıştır. Modal ve titreşim analizlerinde kütle bilgisi önemli olduğundan, tank içindeki yakıtın ağırlığı (9kg) nokta ağırlık (Point Mass) olarak girilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ise Tablo 5.1'de gösterilmiş olan doğal frekans ve mod şekilleri elde edilmiştir. Buna göre tankın ilk doğal frekansı 642,9Hz olarak bulunmuştur. Tablo 4.1'de verilmiş olan tasarım kriterlerine göre, tankın ilk doğal

frekansının 100Hz'den daha büyük olması istenmektedir. Yapılan modal analiz sonucunda bu isterin karşılandığı gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Doğal frekans ve mod şekilleri



### 5.3.5. Rastgele Titreşim Analizi

Titreşim, normal hayatta sürekli karşımıza çıkan mekanik salınım hareketleridir. Bu salınımlar periyodik olabileceği gibi rastgele salınımlar şeklinde de olabilirler. Bir aracın bozuk bir yolda ilerlemesi, roketin fırlatılması gibi durumlarda oluşan salınımlar rastgele titreşimlerdir. Bu tip titreşimler, sinüs dalgası gibi kendini tekrar etmeyen ve hareket formu daha önceden tahmin edilemeyen titreşimlerdir. Uzay için



tasarlanan ekipmanların fırlatma öncesinde, yeryüzünde yapılacak testlerde de gerçeğe en yakın durumun simülasyonunu yapmak için rastgele titreşim testleri yapılmaktadır. Bu testler öncesinde ekipmana uygulanacak yükleri ve ölçüm noktalarını belirlemek için rastgele titreşim analizleri gerçekleştirilmektedir.

ECSS [7] standardında 50 kg'dan küçük kütleler için yeterlilik seviyesi rastgele titreşim seviyelerini belirlemek amacıyla Tablo 5.2'de verilmiş olan formül ve değerler kullanılmıştır. Yeterlilik seviyesi, fırlatma sırasında beklenen maksimum seviyelerin güvenlik faktörü oranında artırılarak belirlenen test seviyesidir ve ekipmana uygulanan en zorlu test aşamasıdır. Yani, fırlatma sırasında oluşan seviyeler, yeterlilik seviyesini aşamaz.

Tablo 5.2. Yeterlilik Seviyesi Rastgele Titreşim Seviyeleri

Frekans(Hz)	Seviye
20-100	+3 dB/octave
100-300	$PSD(M) = 0,12 \frac{g^2}{Hz} \times (M+ 20 kg) / (M+ 1kg)$
300-2000	-5 dB/octave

(5.48)'de verilen denklemde "M", testi yapılacak olan ekipmanın kütlesini (tank+yakıt) ifade etmektedir. "PSD" ise "güç spektral yoğunluk" anlamına gelir ve titreşim testleri sırasında ivmeölçerlerden gelen güç değerinin okunması ile elde edilir. Bu denklemde tankın kütlesi olan M=9.976kg yerine konulduğunda PSD=0,3280g<sup>2</sup>/Hz olarak bulunur. Bu değer 100Hz ile 300Hz frekansları arasındaki güç spektral yoğunluğunu vermektedir ve diğer frekans aralıkları için PSD değerleri ise Tablo 5.2'de belirtilen seviyelerde değiştirilerek hesaplanmaktadır.

$$PSD(M) = 0,12 \frac{g^2}{Hz} \times (M+ 20 \text{ kg}) / (M+ 1 \text{ kg}) \quad (5.48)$$

(5.49) ile (5.54) arasında verilmiş olan denklemler sayesinde Tablo 5.3'teki değerleri hesaplanmıştır. [20] Bu denklemlerde yazılmış olan alt indislerdeki “H” harfi yüksek değeri ifade ederken “L” harfi düşük değeri ifade eder.

Öncelikle (5.49)'da verilmiş olan denklem ile iki frekans arasındaki (FL ve FH) oktav sayısı bulunmaktadır. Oktav sayısı iki frekans arasındaki aralığı ifade eder. Örneğin 1Hz ile 2Hz arasında 1 oktav varken, 1000Hz ile 2000Hz arasında da 1 oktav aralık vardır.

$$\# \text{octaves} = \frac{\log(F_H / F_L)}{\log(2)} \quad (5.49)$$

Daha sonra (5.50) ile desibel sayısı hesaplanmaktadır. Desibel, iki değer arasındaki oranı ifade etmek için kullanılan logaritmik ve birimsiz bir değerdir. Bu denklemde “ASD” ise “ivme spektral yoğunluk” anlamına gelir.

$$dB = 10 \log(ASD_H / ASD_L) \quad (5.50)$$

Üçüncü olarak da, Çizelge 5.16'da gösterilmiş olan doğru parçalarının eğimleri hesaplanmaktadır. İki frekans (FL ve FH) arasındaki eğimi bulmak için (5.51)'de verilmiş olan denklem kullanılmıştır ve eğim “m” ile ifade edilmiştir.

$$m = dB / \# \text{octaves} \quad (5.51)$$

Sonraki aşamada ise Çizelge 5.16'da gösterilen doğru parçalarının altında kalan alan hesaplanmaktadır. Bunun için (5.52)'de verilmiş olan denklem kullanılmaktadır.

$$A = 10 \log(2) \frac{ASD_H}{10 \log(2) + m} \left[ F_H - (F_L) \left( \frac{F_L}{F_H} \right)^{m/10 \log(2)} \right] \quad (5.52)$$

Eğer eğim (m) negatif bir değer aldıysa, denklem (5.52) geçersiz hale gelir ve bunun yerine denklem (5.53) kullanılır.

$$A = ASD_L \times F_L \times \ln \left( \frac{F_H}{F_L} \right) \quad (5.53)$$

En son olarak da, Grms değerine ulaşmak için bulunan alanların karekökü hesaplanır.

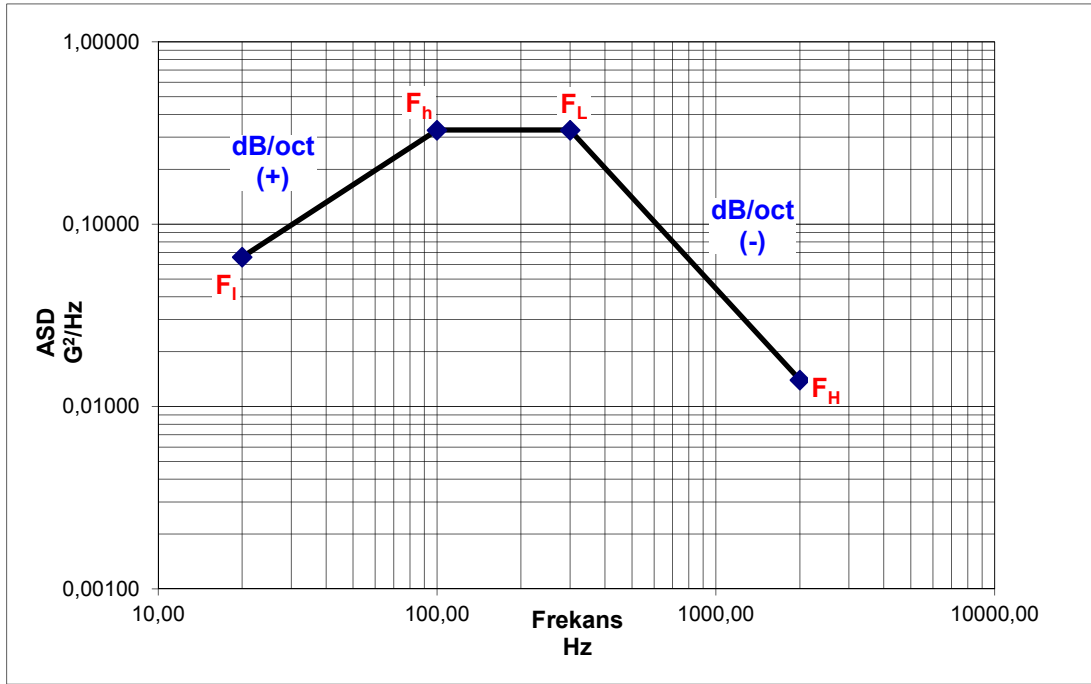
$$Grms = \sqrt{A} \quad (5.54)$$

Tüm bu hesaplamaların ardından Tablo 5.3 oluşmuş olur ve daha sonrada Çizelge 5.16'da gösterilmiş olan titreşim profili elde edilir. Tabloda verilmiş olan 13.70 Grms değeri test sırasında ekipmana uygulanacak olan toplam yükü göstermektedir.

Tablo 5.3. X, Y, Z Eksenleri Rastgele Titreşim Değerleri

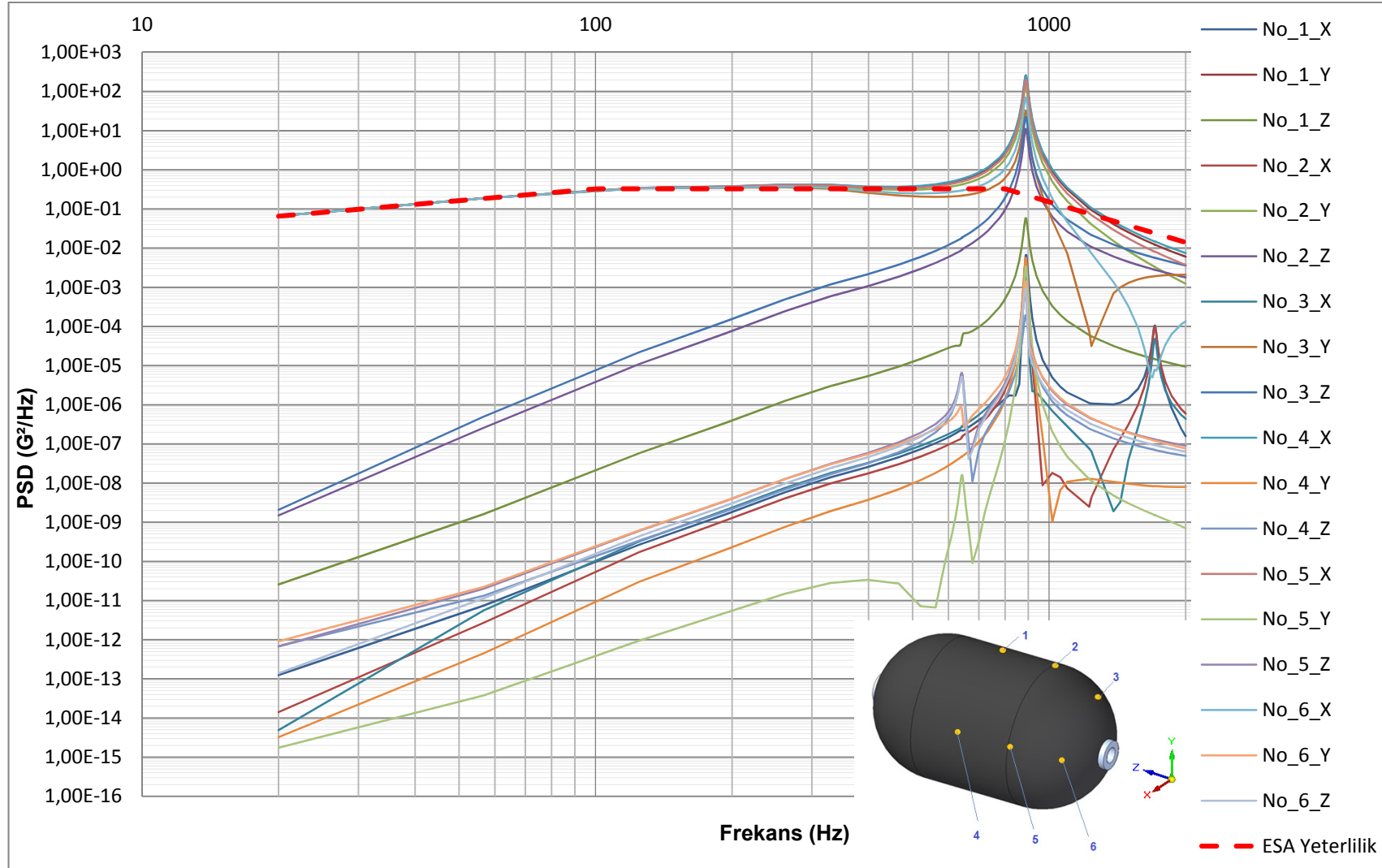
				Eğim		İvme
Frekans(Hz)	ASD(G <sup>2</sup> /Hz)	dB	Oct	dB/Oct	Alan	Grms
20,00	0,0660	*	*	*	*	*
100,00	0,3280	6,96	2,32	3,00	15,77	3,97
300,00	0,3280	0,00	1,58	0,00	81,37	9,02
2000,00	0,0140	-13,70	2,74	-5,00	187,63	<b>13,70</b>

ANSYS programında rastgele titreşim analizi yapmak için, “Random Vibration” modülü seçilmiştir. Bu modülde istenilen titreşim yükünü belirtmek için “PSD G Acceleration” seçilmiş ve Tablo 5.3’te verilmiş olan frekans ve ASD( $G^2/Hz$ ) değerleri girilerek, Çizelge 5.16’da gösterilmiş olan profil oluşturulmuştur. Analizler 3 yönde de aynı titreşim profili kullanılarak, her yön için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu şekilde yakıt tankının uydu veya uzay aracı içerisinde dikey veya yatay pozisyonlarda kullanılabilir olup olmadığının testi yapılacaktır.

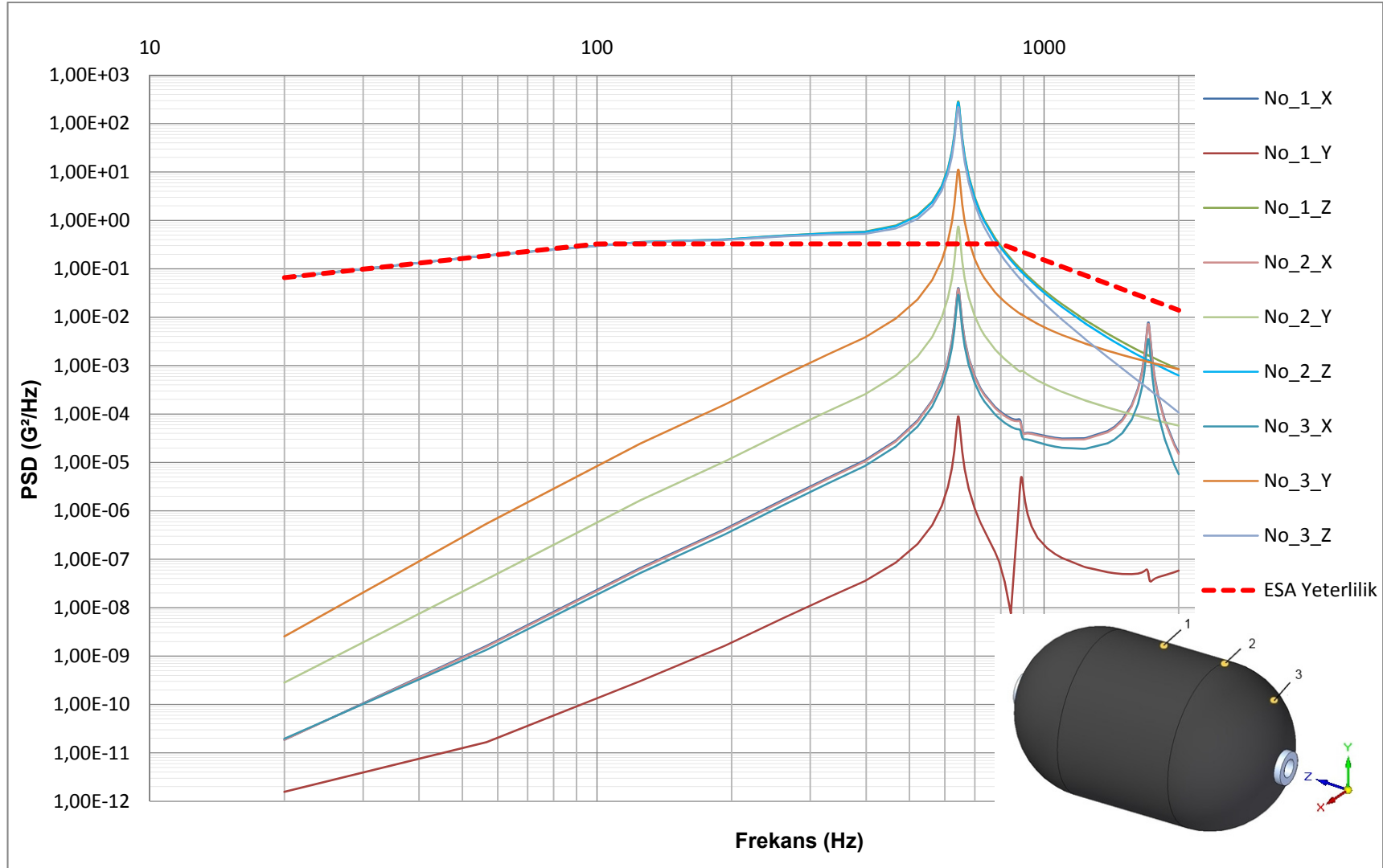


Çizelge 5.16. X, Y, Z Eksenleri Rastgele Titreşim Profili

Yapılan analizler sonucunda, X ve Y yönleri için Çizelge 5.17 ve Z yönü için de Çizelge 5.18’de verilmiş olan sonuçlar elde edilmiştir. Çizelgelerdeki tank şeklerinin üzerinde gösterilmiş olan noktalar ivme ölçüm noktalarını ifade etmektedir.



Çizelge 5.17. X ve Y yönleri için rastgele titreşim analiz sonuçları



Çizelge 5.18. Z yönü rastgele titreşim analiz sonuçları

### 5.3.6. Yorulma Analizi

Kompozit sarımlı tank üretildikten sonra bazı basınçlandırma testlerine tabi tutulmaktadır. Bu testler Tablo 4.1’de verilmiş olan bilgilere göre, operasyon basıncı olan 170bar (MOB) basınçta 50 tekrar ve test basıncı olan 212.5bar (MOB x 1.25) basınçta da 5 tekrar uygulanmaktadır. Bu tip çevrimler malzeme yapısında yıpranmalara neden olmakta ve belirli bir ömür sonunda da yorulma sonucu malzemede hasar oluşmaktadır. Bu nedenle, tasarım aşamasında yorulma analizlerinin yapılarak bir öngörüye sahip olunması gerekmektedir.

Yorulma analizlerini gerçekleştirmek için, temelde iki tip yaklaşım kullanılmaktadır. Birincisi gerilme ömrü (stress-life, SN), ikincisi gerinim ömrü (strain-life, EN) olarak bilinmektedir. Gerilme ömrü yaklaşımında, yorulmaya uğrayacak malzemede sadece elastik deformasyon olacağı kabul edilmektedir. Ayrıca bu yöntem sadece yüksek tekrarlı yorulmalarda (High Cycle Fatigue, HCF), yani tekrar sayısı 100000’den büyük olan durumlarda kullanılmaktadır. Gerinim ömrü yaklaşımı ise malzemenin hem elastik hem de plastik deformasyona uğraması ile oluşacak yorulma analizlerinde kullanılabilir. Ayrıca gerinim ömrü yaklaşımı hem yüksek tekrarlı (>10e5) hem de düşük tekrarlı (<10e5) yorulma durumları için geçerli bir yaklaşımdır [21]. Bu çalışmada tasarlanan tankın, yukarıda verilmiş olan testler sırasında uygulanan basınçlandırma tekrar sayısı ve metal astarda oluşan plastik deformasyon aşamaları göz önüne alındığında, yorulma analizlerinin gerinim ömrü yöntemi ile yapılması uygun görülmüştür.

Gerinim ömrü, elastik gerinimler ile plastik gerinimlerin toplamı ile oluşan toplam gerinim ömrü ile hesaplanmaktadır. Elastik gerinim ömrü, (5.55)’de verilmiş olan Basquin eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b \quad (5.55)$$

Plastik gerinim ömrü ise (5.56)’da verilmiş olan Coffin-Manson eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (5.56)$$

(5.55) ve (5.56) eşitliklerinin toplamı ile de (5.57)'de verilmiş olan toplam gerinim ömrü eşitliği ortaya çıkmaktadır.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f (2N_f)^c \quad (5.57)$$

Yukarıdaki eşitlikte;

$\Delta \varepsilon$  : Gerinim aralığı

$\sigma_f$  : Yorulma dayanım değeri

$\varepsilon_f$  : Yorulma sünekliği değeri

$N_f$  : Çevrim sayısı ( $2N_f=1$  tekrar)

$E$  : Elastisite modülü

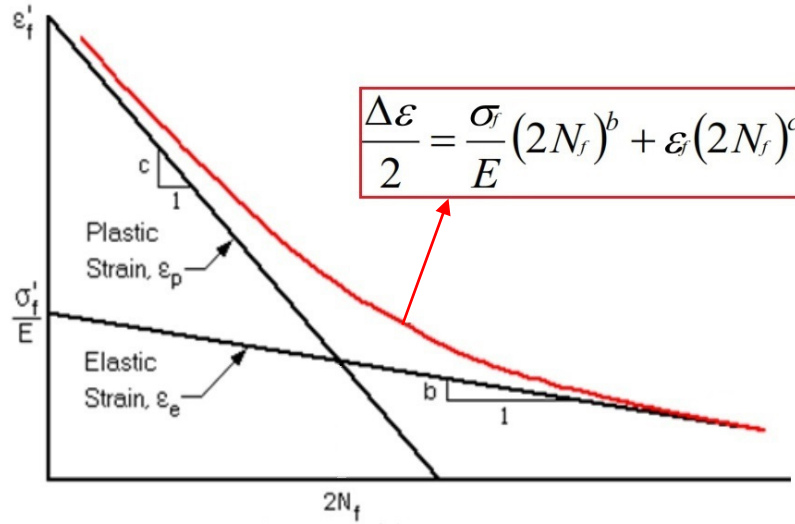
$b$  : Yorulma dayanım katsayısı

$c$  : Yorulma sünekliği katsayısı,

anlamlarına gelmektedir. Bu değerlerin grafik üzerindeki gösterimi ise Çizelge 5.19'da verilmiştir.

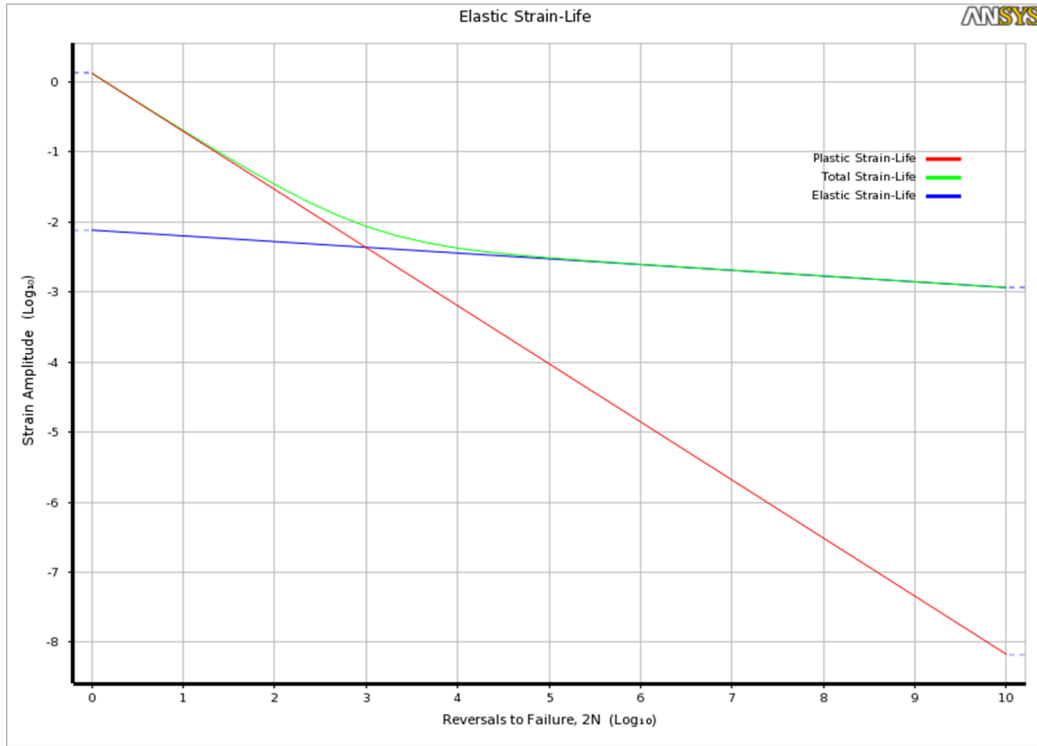
Kompozit sarımlı tankın yorulma analizi ise, yorulmaya en çok maruz kalan metal astar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı gerinim ömrü yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle ANSYS nCode programında "nCode EN Constant" modülü seçilmiştir. 170bar basınçtaki yorulma analizleri için, öncelikle bu basınçta otofretaj sonrası oluşan gerilme-gerinim sonuçları elde edilmiş ve bu sonuçlar nCode analizlerine girdi teşkil etmiştir. Bu analizlerde, nCode malzeme kütüphanesinden Al6061-T6'ya ait malzeme bilgileri seçilmiştir.





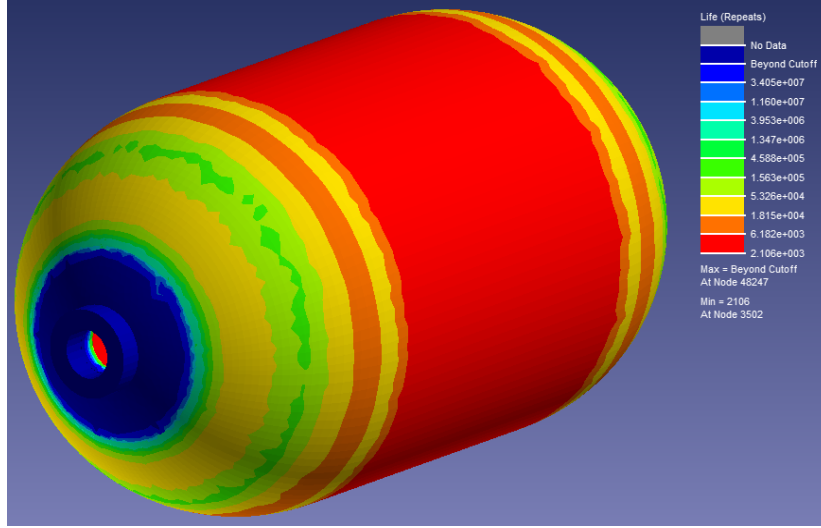
Çizelge 5.19. Toplam gerinim ömrü

Bu malzemenin gerinim özelliklerine bağlı ömür grafiği ise Çizelge 5.20'de gösterilmiştir. Bu grafikte Al6061-T6'ya ait, (Çizelge 5.19'da gösterildiği gibi) plastik, elastik ve toplam gerinim ömrü ile ilgili bilgiler gösterilmektedir.



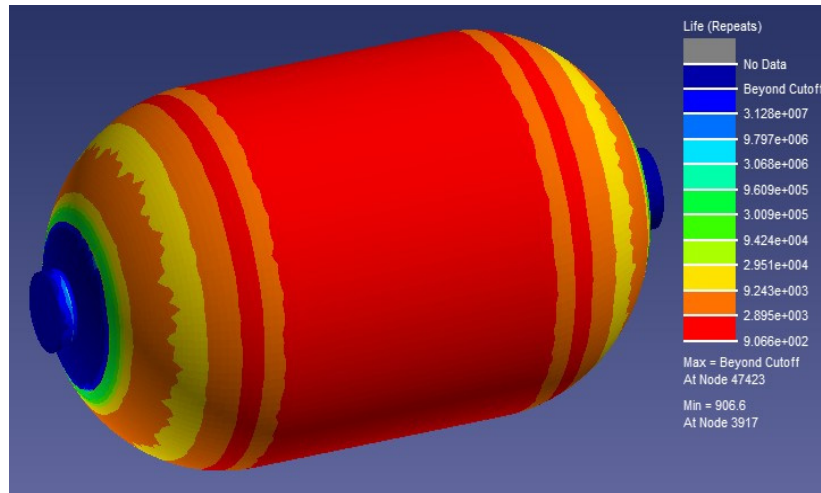
Çizelge 5.20. Al6061-T6 için yorulma analizlerinde kullanılan gerinim özelliklerine bağlı ömür grafiği (ANSYS)

170bar için elde edilen sonuçlar Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, tankın metal astarında yorulmaya en çok maruz kalan kısmının çember bölgesi olduğu görülmektedir. Bu kritik bölgeye ait en düşük ömür ise 2106 tekrar olarak görülmektedir. Tank tasarım kriterlerinde, 170bar basınçlandırma testleri için 50 tekrar istenmiş ve analiz sonuçlarına göre bu isterin rahatlıkla karşılanabileceği görülmüştür.



Şekil 5.19. 170 bar basınçlandırma testi için ömür analizi

Benzer diğer bir analizde 212.5bar (test basıncı) için gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçlarına göre en kritik bölgeye ait ömrün yaklaşık 906 tekrar olduğu görülmüştür. Bu değer test basıncı için istenen 5 tekrarı fazlasıyla karşılamaktadır.



Şekil 5.20. 212.5 bar basınçlandırma testi için ömür analizi

## 6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, uydu elektrikli itki sisteminde kullanılmak üzere kompozit sargılı basınçlı bir tankın tasarım ve analiz aşamaları ortaya konmuştur. Tankın teknik gereksinimleri; 9kg'lık ksenon yakıt ihtiyacı, uzay ortamında çalışma şartları, fırlatma yükleri ve diğer teknik ihtiyaçlar düşünülerek ESA standartlarına uygun bir şekilde oluşturulmuş ve Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu teknik gereksinimleri karşılayacak şekilde yakıt tankının mekanik tasarımı yapılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek için ise ANSYS yazılımı kullanılmıştır.

Yapısal analiz modeli, alüminyum metal astar (Al6061-T6) ve bunun üzerine sarılmış kompozit katmanlardan (Toray T800H-epoksi) oluşmaktadır. Her iki ucundan sabitlenmiş olan bu kompozit sargılı tankın, gerilim-gerinim analizleri sonucunda 170bar çalışma basıncı, 212.5bar test basıncı ve 255bar patlama basıncı ihtiyaçlarını karşılamak için Şekil 5.5'de verilmiş olan katman dizilimi ve bu katmanların fiber açıları ortaya konmuştur.

Yapılan otofretaj analizleri ile otofretaj öncesinde 170bar basınçta tankın metal astarı üzerinde oluşan 276MPa'lık maksimum von Mises gerilimi değerinin, otofretaj işlemi sonrasında 221MPa değerine düştüğü gözlenmiştir. Bu şekilde otofretaj işleminin olumlu etkisi ortaya konmuştur. Bu işlem sonrasında, tank içerisindeki basınç 300bar değerine kadar kademeli olarak arttırılmış ve bu şekilde tankın patlama basıncının tespiti sağlanmıştır. Bu analiz sonuçlarına göre tankın patlama basıncı yaklaşık 280bar olarak ortaya çıkmış ve bu durum teknik gereksinimlerde istenmiş olan minimum 255bar patlama basıncı şartını sağlamıştır.

Tankın metal astarı üzerinde 3 farklı kritik bölgede 0°, 45° ve 90° açılarda ve farklı büyüklüklerde 50 çeşit çatlak senaryosu oluşturulmuş ve bu analizler sonucunda ortaya çıkan J integral değerleri, malzemenin kritik J integral değeri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre; en kötü senaryoda bile bu değerler kritik değeri aşmamış ve bu nedenle de metal astar üzerinde oluşabilecek küçük çatlakların ilerlemeyeceği anlaşılmıştır. Bu durumda çatlak ilerlemesinden dolayı ani bir patlama oluşmayacağı görülmüştür. Böylece, teknik gereksinimlerde istenmiş olan patlama öncesi sızdırma şartının sağlandığı gösterilmiştir.

Tasarlanmış olan bu yakıt tankının boş ağırlığı 0.976kg olarak ortaya çıkmış ve bu değer teknik gereksinim şartlarında verilmiş olan maksimum 1.2kg sınırını aşmamıştır.

Tankın titreşim karakteristiğini ortaya çıkarmak için ise, öncelikle 9kg'lık yakıt ağırlığı tankın ağırlığına dahil edilmiş ve daha sonrada modal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda tankın doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Tankın en küçük doğal frekansının 100Hz'den daha büyük olduğu gösterilerek teknik gereksinimlerdeki frekans şartının sağlandığı gösterilmiştir.

Fırlatma sırasında oluşabilecek rastgele titreşim yüklerini belirlemek için ESA standartlarında verilmiş olan yeterlilik seviyesi değerleri kullanılmış ve gerekli hesaplamalar yapılarak rastgele titreşim profili elde edilmiştir. Bu profil kullanılarak yapılan rastgele titreşim analizleri sonucunda, tankın titreşim davranışı ortaya konmuştur.

Fırlatma öncesinde yapılması gereken tank basınçlandırma testleri için yorulma analizleri gerçekleştirilmiş ve ömür değerleri ortaya konmuştur. Bu analizlerde tankın çalışma basıncı olan 170bar ve test basıncı olan 212.5bar durumları incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 0-170 bar çevriminde tankın metal astarında görülen en kritik bölgenin 2106 tekrara dayandığı ve bu durumda teknik gereksinimlerdeki en az 50 tekrar şartının fazlasıyla karşılandığı ortaya konmuştur. Benzer şekilde 0-212.5 bar çevriminde en kritik bölgenin 906 tekrara dayandığı görülmüş ve böylece teknik gereksinimlerdeki en az 5 tekrar şartının sağlandığı gösterilmiştir.

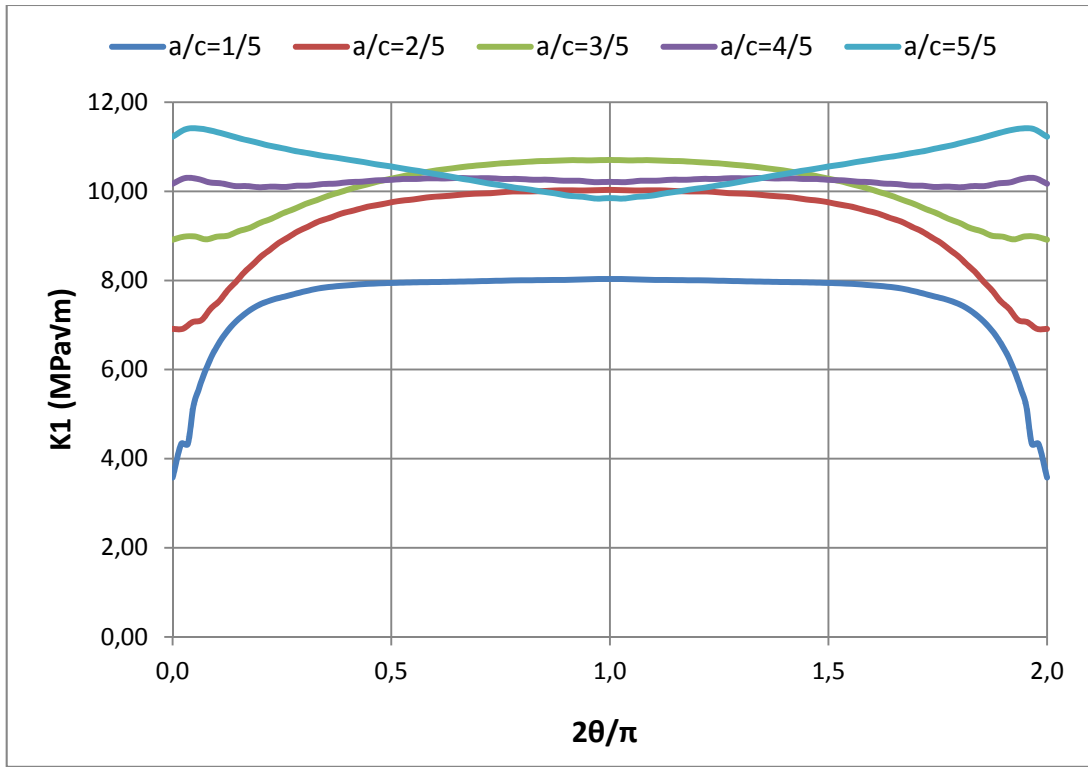
Gerçekleştirilmiş olan tüm bu analiz çalışmalarında ortaya çıkan sonuçların doğrulanması için, belirtilen özelliklerdeki tankın üretilmesi ve ilgili testlerin yapılarak sonuçlarının karşılaştırılması hedeflenmektedir. Bu karşılaştırmalar sonucunda oluşabilecek farklılıklar değerlendirilerek, gerekli görülmesi halinde analiz modelinin düzenlenmesi öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

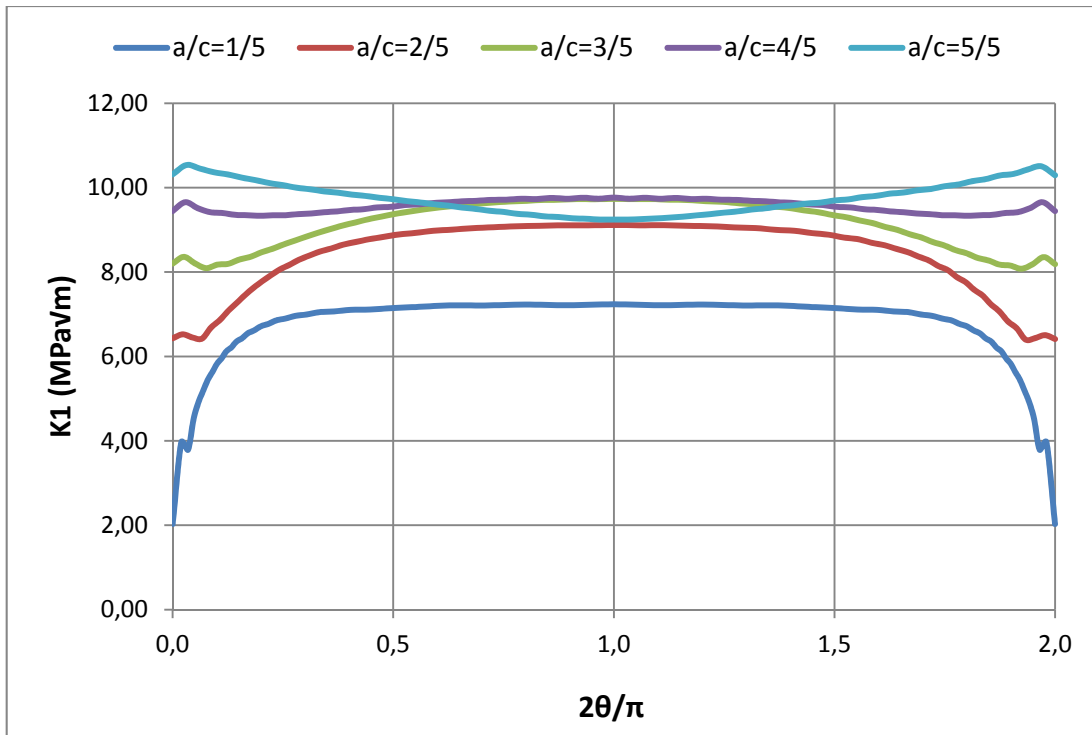
- [1] Mazumdar S., Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2002.
- [2] Harris B., Engineering composite materials, The Institute of Materials, London, 1999.
- [3] Daniel, I.M., Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, New York, 1994.
- [4] Baker, A.A., Dutton, S., Kelly, D.W., Composite Materials for Aircraft Structures, 2nd Edition, AIAA, Reston, VA, 2004.
- [5] SP Systems, Composites Engineering Materials-Guide to Composites, <http://www.bolton.ac.uk/CODATE/SPHandbook.pdf>, (Temmuz, 2014).
- [6] ATK Pressurant Tanks, [http://www.psi-pci.com/Pressurant\\_Tanks.htm](http://www.psi-pci.com/Pressurant_Tanks.htm), (Mayıs, 2014).
- [7] European Cooperation for Space Standardization, ECSS-E-10-03A, Space Engineering: Testing, 15 February 2002.
- [8] Tam W. H., Jackson A. C., Nishida E., Kasai Y., Design and Manufacture of The ETS VIII Xenon Tank, AIAA2000-3677.
- [9] The National Institute of Standards and Technology, Isothermal Properties for Xenon, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>, (Nisan, 2013).
- [10] Kaw, Autar K., Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
- [11] Dursun T., Civata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.

- [12] Reddy J. N., Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, Second Edition, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2004.
- [13] Hashin Z., "Failure criteria for unidirectional fibre composites", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, 1980, sayfa 329-334.
- [14] Toray Carbon Fibers America Inc.,  
<http://www.toraycfa.com/pdfs/T800HDataSheet.pdf>, (Kasım, 2013).
- [15] Maximator Test, LLC, White Paper-Autofrettage, <http://www.maximator-test.com/about/White-Paper-Autofrettage.pdf>, (Mayıs, 2014).
- [16] ASM Material Data Sheet, Aluminum 6061-T6,  
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>,  
(Kasım, 2013).
- [17] Anderson T. L., Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Third Edition , CRC Press,Boca Raton, FL, 2005.
- [18] Vardar Ö., Fracture Mechanics, Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, 1988.
- [19] Wijker J., Mechanical Vibrations in Spacecraft Design, Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [20] FEMCI Book - Calculating Grms,  
<http://femci.gsfc.nasa.gov/random/randomgrms.html>, (Ocak, 2014).
- [21] Introduction to ANSYS nCode DesignLife v 14.5, Eğitim Notu, ANSYS, Inc., 2013.

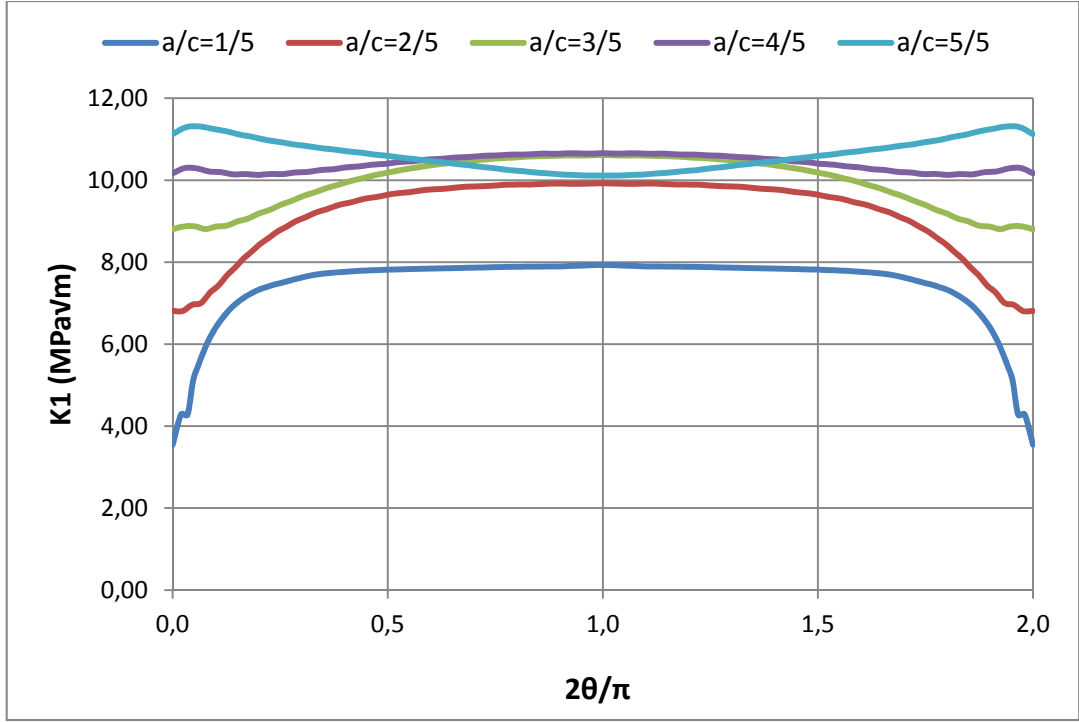
## EK-A



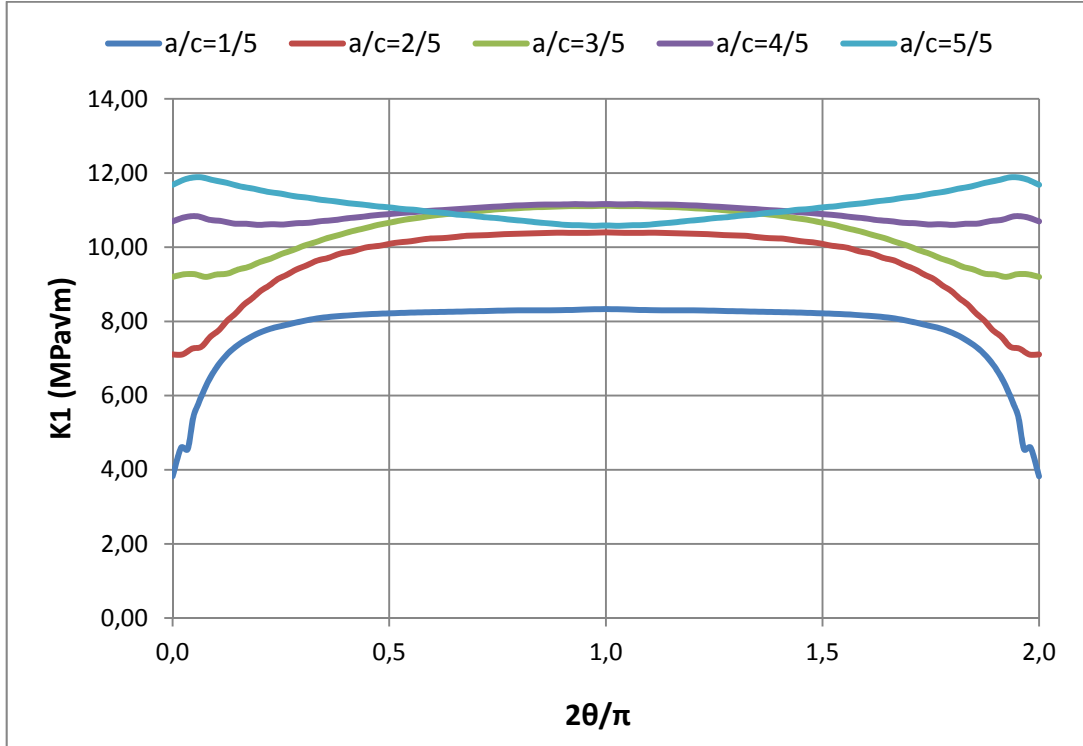
Çizelge EK-A 1. 1 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri



Çizelge EK-A 2. 1 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri

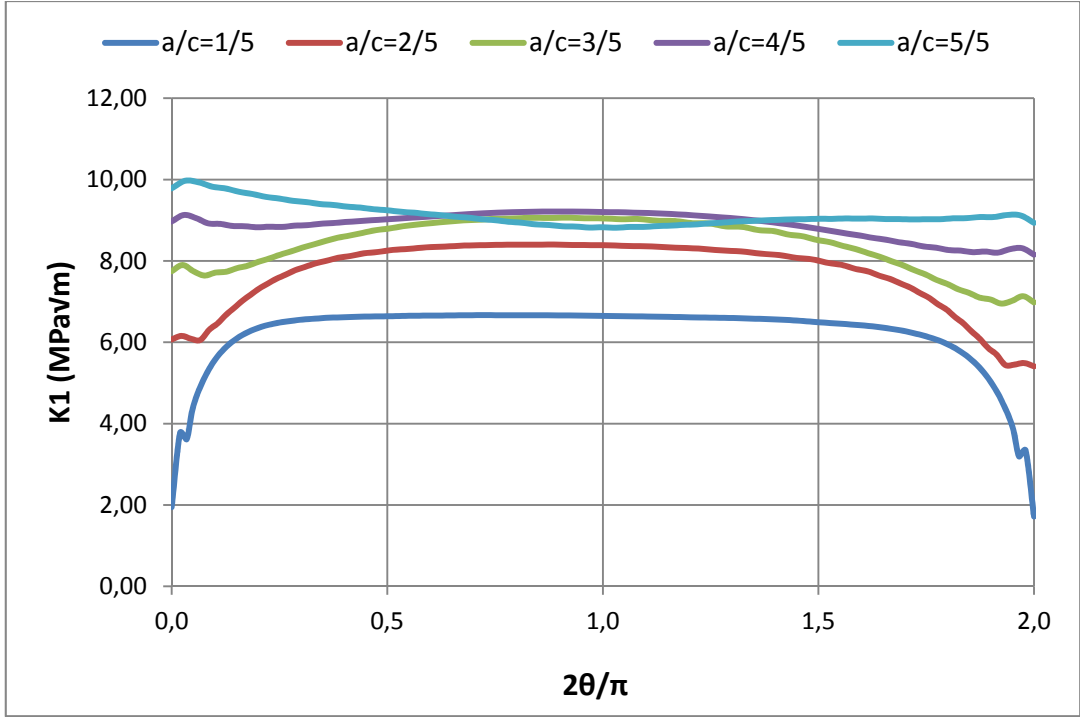


Çizelge EK-A 3. 1 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri

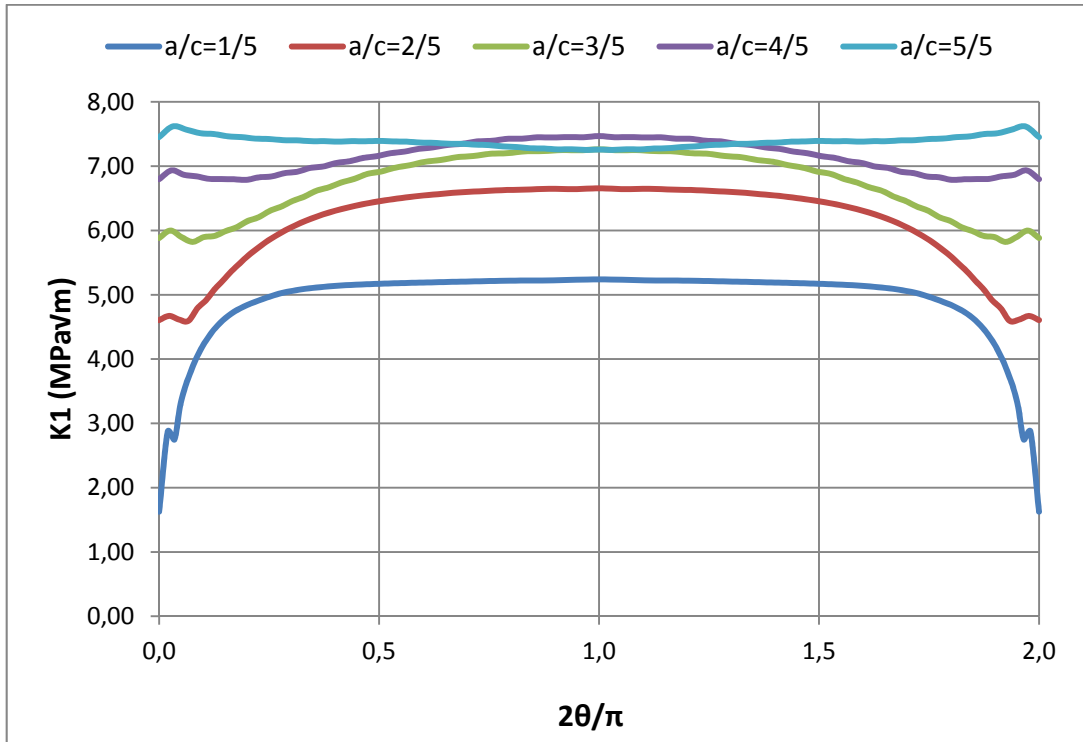


Çizelge EK-A 4. 2 numaralı çatlak bölgesi, 0° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri

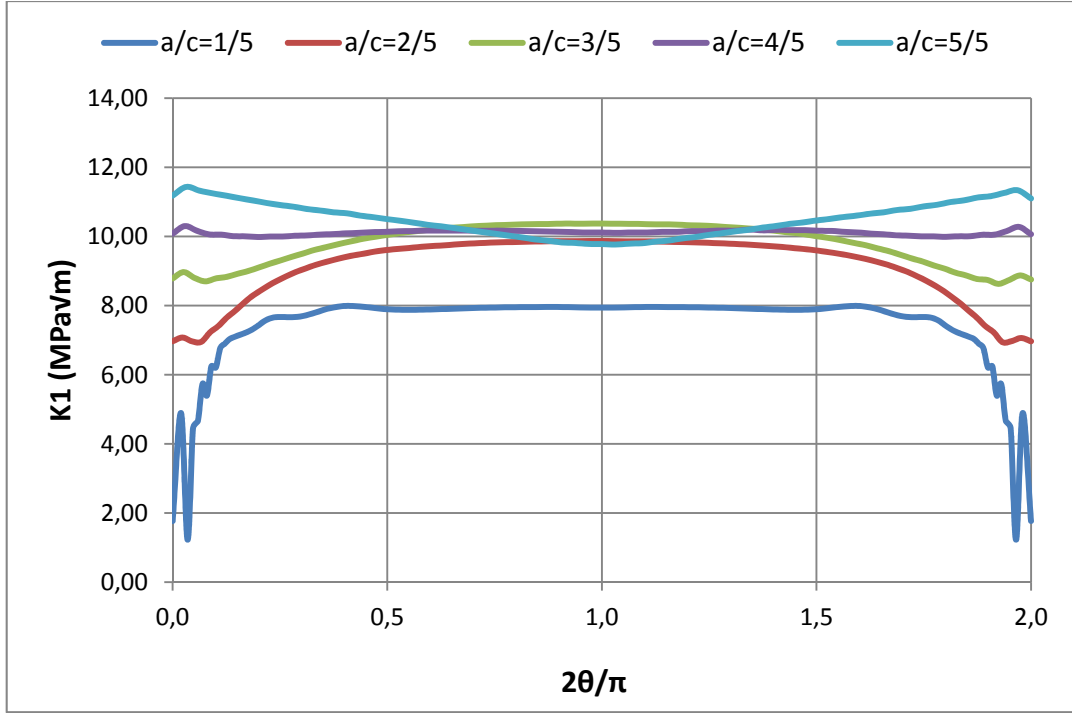




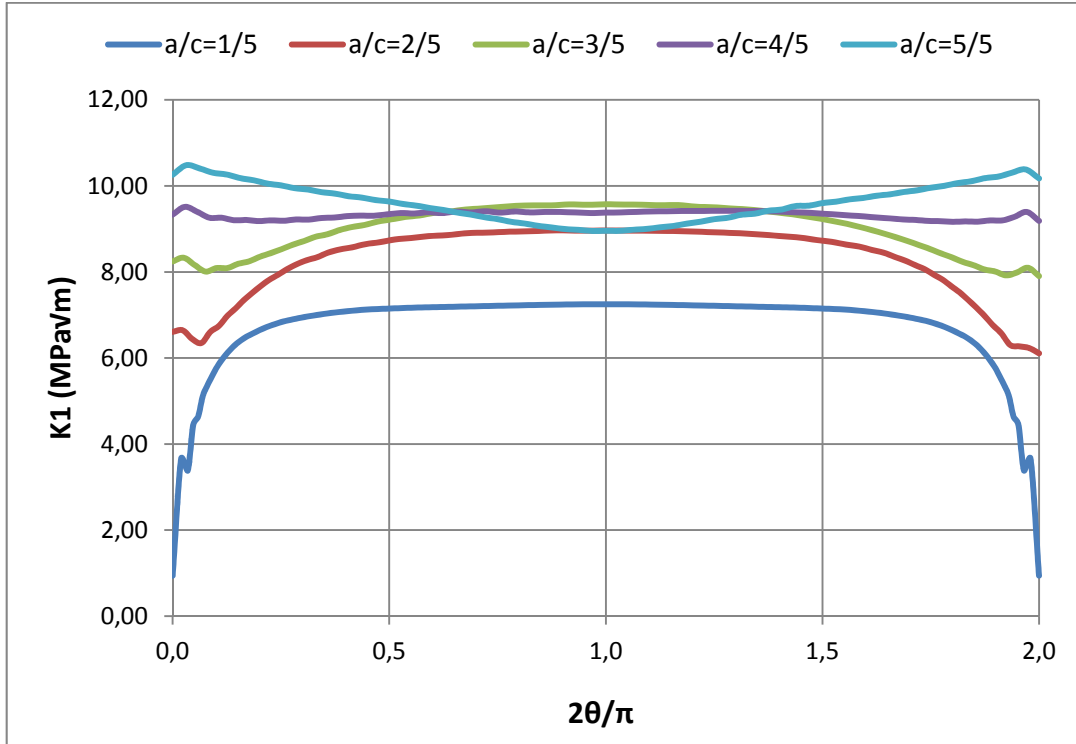
Çizelge EK-A 5. 2 numaralı çatlak bölgesi, 45° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri



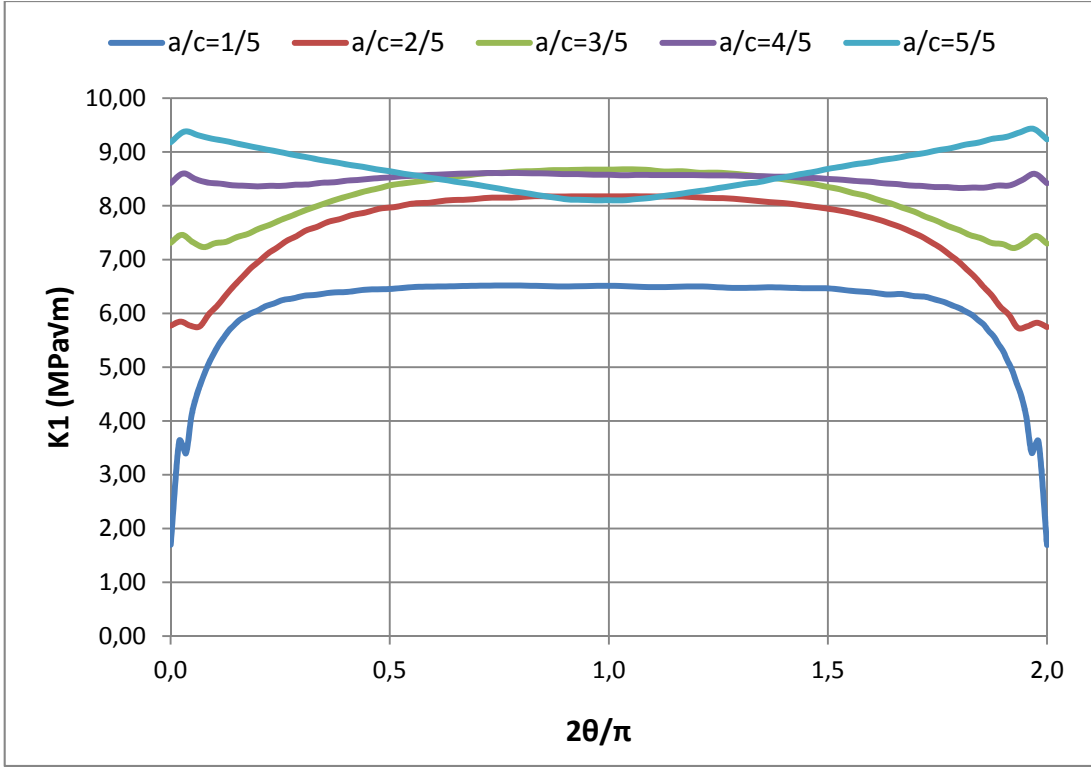
Çizelge EK-A 6. 2 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri



Çizelge EK-A 7. 3 numaralı çatlak bölgesi,  $0^\circ$  açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri



Çizelge EK-A 8. 3 numaralı çatlak bölgesi,  $45^\circ$  açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri



Çizelge EK-A 9. 3 numaralı çatlak bölgesi, 90° açılı çatlaklar için gerilim şiddet faktörleri

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı :Muzaffer Çetin

Doğum Yeri :Tercan/Erzincan

Doğum Yılı :01.01.1978

Medeni Hali :Evli

E-posta :muzaffercetin@gmail.com

Adresi :Dil Devrimi Caddesi Metrokent Sitesi C1-8 Eryaman/ Ankara

### Eğitim

Lise : Eryaman Lisesi

Ön Lisans : O.D.T.Ü. Endüstriyel Otomasyon

Lisans : O.D.T.Ü. Makine Mühendisliği

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – Çok iyi

### İş Deneyimi

2007-Halen: Uzman Araştırmacı, TÜBİTAK UZAY, Ankara

2003-2006: Mekanik Tasarımcı, Tasarım Mühendislik, Ankara

2001-2002: Teknik Uzman, Havelsan A.Ş., Ankara

### Deneyim Alanları

Mekanik tasarım, yapısal analiz, mekanik entegrasyon, yapısal test.

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar