

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN DEPOLAMA TANKLARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Çetin KARAKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet OĞUR

Ortak Danışman : Prof. Dr. M. Oktay ALNIAK

Temmuz 2011

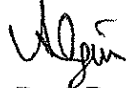
T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALÜMİNYUMDAN ÜRETİLEN BASINÇLI KAPLARIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
BİLGİSAYAR YARDIMI İLE MODELLENMESİ**

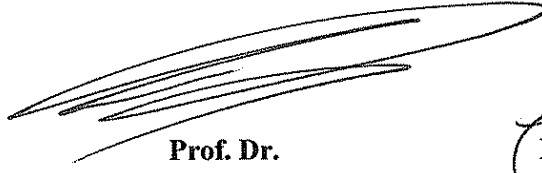
DOKTORA TEZİ
Mak. Yük. Müh. Çetin KARAKAYA

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

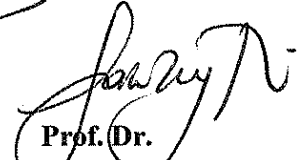
Bu tez 18/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği / Öyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Ahmet OĞUR
Jüri Başkanı



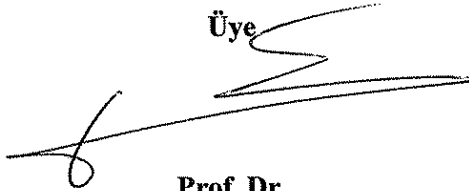
Prof. Dr.
Mustafa Oktay ALNIAK
Üye



Prof. Dr.
Sakin ZEYTİN
Üye



Prof. Dr.
Adnan DİKİCİOĞLU
Üye



Prof. Dr.
Erdiñ KALUÇ
Üye



Doç. Dr.
Murat VURAL
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Mustafa ÖZDEMİR
Üye



TEŞEKKÜR

Akademik hayata girişime vesile olan ve ilk günden bu yana desteğini esirgemeyen Danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet OĞUR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez sürecinde desteklerini esirgemediği için ortak tez danışmanım Sayın Prof. Dr. M. Oktay ALNIAK' a, Doktora Tez İzleme Komitesi' nde bulunan ve tezin olgunlaşmasına katkı sağlayan Hocalarım Sayın Prof. Dr. Sakin ZEYTİN' e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR' e, San-Tez destek programı kapsamında çalışmayı destekleyerek üniversite-sanayi işbirliğinin önünü açan Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, Sanayi Ar-Ge Genel Müdürlüğü' ne, tez çalışmasının prototip imalatı aşamasında engin bilgilerini ve tecrübelerini ticari kaygı duymaksızın bizimle paylaşan ve teze değer katan Elimsan Metalurji A.Ş. Genel Müdürü Sayın Mustafa ERTÜRK' e, deneysel çalışmalar esnasında laboratuvar imkânlarını kullanmama izin veren Sayın Hocam Prof. Dr. Fatih ÜSTEL' e, deney numunelerinin hazırlanmasında tel erozyon makinesini kullanmamıza izin veren Arma Filtre Sistemleri A.Ş. firmasına, deney numunelerinin ve prototip tankların kesilmesinde verdikleri destek için Kar Metal San. ve Tic. Ltd. Şti' ne, tahribatsız deneylerin gerçekleştirilmesinde göstermiş oldukları kolaylık nedeniyle Dekat Test A.Ş. firmasına, hassas koordinat ölçümleri için cihazlarını kullanmamıza izin veren Anadolu Rulman A.Ş. firmasına, hidrostatik basınç testlerini gerçekleştirmek üzere, tüp patlatma test düzeneğini kullanmamıza izin veren Gebze Aygaz Tesisleri' ne teşekkür ederim. Çalışmalarında manevi yardımlarını esirgemeyen ve her zaman desteğini hissettiğim eşim Dilek KARAKAYA ve çocuklarıma, desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan annem ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez; Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Sanayi Ar-Ge Genel Müdürlüğü tarafından (Proje No: 000123.STZ.2007-1) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2009-50-02-021).

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Hidrojen Enerjisi	12
1.2.1. Hidrojen.....	12
1.2.2. Hidrojen Gazı	13
1.2.3. Hidrojenin Araçlarda Kullanımı.....	16
1.2.4. Hidrojen enerjisinin farklı alanlarda kullanımı	20
1.2.5. Hidrojen depolama metotları.....	29
1.2.6. Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankları	30
1.3. Tezin amacı ve kapsamı	32
1.3.1. Kullanılan yöntemler.....	33
1.3.2. Beklenen ve elde edilen sonuçlar	34

BÖLÜM 2.

PROTOTİP İMALATI	40
2.1. Giriş	40
2.2. Prototip İmalatı.....	40
2.2.1. Tez kapsamında üretilen tüplerde depolanabilecek hidrojen miktarı.....	45
2.2.2. Kullanılan alüminyum alaşımları	47
2.2.3. Isıl işlemler	51

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	60
3.1. Giriş.....	60
3.2. Deneylede kullanılan tüplerin malzeme özellikleri	60
3.3. Çekme deneyi	64
3.4. Hidrostatik Basınç Testleri (Patlatma Deneyi).....	67
3.4.1. Patlama deneyinin değerlendirilmesi	68
3.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	70
3.6. Optik Mikroskop İncelemeleri	75
3.7. X-Ray Diffraction (XRD) Analizleri	76
3.8. Kesitteki Cidar Kalınlığı Dağılımı	77
3.9. Sıvı Penetrant Testleri	80
3.10 X-Ray ile Radyografik Muayeneler	83
3.11 Ultrasonik Kalınlık Ölçümleri.....	83

BÖLÜM 4.

MODELLEME VE ANALİZLER.....	85
4.1. Giriş.....	85
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi	85
4.3. Sonlu Eleman Analizleri	96
4.3.1 Kompozit Malzemelerde Sonlu Elemanlar Analizi	103
4.4. CAD Modellerinin Oluşturulması	123
4.4.1. Hidrojen Depolama Tanklarının Matematiksel Modellemesi.....	124
4.4.2. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Analiz Çalışmalarının Gerçek Modele Uygun Hale Getirilmesi	125
4.5. Alüminyum Tüp Sonlu Eleman Analiz Modellerinin Oluşturulması	127
4.5.1. Basınç Testi Koşulları	128
4.5.2. Sonlu eleman analiz (ANSYS) sonuçları	129
4.5.3. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	130

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	140
5.1. Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	140

5.2. Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirmesi.....	140
5.2.1. Çekme Testi Sonuçları	140
5.2.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları	141
5.3. Tahribatsız Deney Sonuçları (NDT)	141
5.3.1. Ultrasonik Kalınlık Ölçümleri Sonuçları	141
5.3.2. Radyografik Muayene Sonuçları.....	142
5.3.3. Sıvı Penetrant Testi Sonuçları	142
5.4. XRD Analizi Sonuçları	142
5.5. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları	143
5.6. Hidrostatik Basınç Testi Sonuçları.....	143
5.7. Genel Sonuçlar ve Öneriler	143
KAYNAKLAR	146
ÖZGEÇMİŞ	156

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	:Alan
E	:Young (Elastisite) modülü
E_p	:Plastik pekleşme modülü
E_t	:Tanjant modülü
f_i, f_j	:Düğümlerdeki kuvvetler
F	:Kuvvet
G	:Kayma modülü
i, j	:İki düğüm noktası
n	:Pekleşme üsteli
t	:Zaman
u_i, u_j	:Düğümelerin yer değiştirmeleri
x	:Yer değiştirme miktarı
α	:Isıl genleşme katsayısı
β	:Pekleşme parametresi
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$:Kayma deformasyonları (zorlanmaları)
Δ	:Yer değişimi
Δl	:Boydaki değişim
ε	:Zorlanma
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$:Normal deformasyonlar (zorlanmalar)
$\dot{\varepsilon}$:Şekil değişim hızı
ε_{eff}^p	:Efektif plastik zorlanma (plastik şekil değişim hızı)
θ	:Salınım açısı (derece)
ν	:Poisson oranı
ρ	:Yoğunluk
σ	:Gerilme
σ_a	:Akma gerilme değeri
σ_t	:Teğetsel gerilme
σ_r	:Radyal gerilme

σ_l	:Boyuna gerilme
σ_0	:Başlangıçtaki akma gerilmesi
σ_{maks}	:Maksimum çekme gerilmesi
M_x, M_y, M_{xy}	:Momentler
$p(x, y)$: Dış kuvvetler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$:Normal gerilmeler
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$:Kayma gerilmeleri
u, v, w	:x, y, z koordinat bileşenleri
I	:Atalet momenti
P	: Basınç
V_{gaz}	: Belirli bir gaz hacmi
z	: Sıkıştırılabilirlik faktörü
R	: Gaz sabiti
T	: Sıcaklık (Kelvin)
B	: Burgers vektörü
L	: Çökelti arası mesafe
p_b	:Patlama basıncı akma basıncının
p_y	:Akma basıncı
i, j	:İki düğüm noktası
u_i, u_j	:Düğümün yer değiştirmeleri
f_i, f_j	:Düğümdeki kuvvetler
k	:Yay sabiti (rijitliği)
$[k]$:Elemanın katılık matrisi
$\{f_i\}$:Elemanın sıcaklık kuvvet vektörü
$\{f_b\}$:Eleman cisim kuvvet vektörü
$\{f_s\}$:Eleman yüzey kuvvet vektörü
C_{kj}	:Elastiklik katsayısı
$[S]$:Uygunluk matrisi
$[T]$:Dönüşüm matrisi
$[R]$:Reuter matrisi
X^C	: 1 yönündeki maksimum basma dayanımı
X^T	: 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı
Y^C	: 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

Y^T	: 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı
Z^C	: 3 yönündeki maksimum basma dayanımı
Z^T	: 3 yönündeki maksimum çekme dayanımı
S_{12}	: 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
S_{23}	: 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
S_{13}	: 1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
e_1^C	: 1 yönündeki maksimum basma birim uzaması
e_1^T	: 1 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
e_2^C	: 2 yönündeki maksimum basma birim uzaması
e_2^T	: 2 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
e_3^C	: 3 yönündeki maksimum basma birim uzaması
e_3^T	: 3 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
g_{12}^F	: 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı
g_{23}^F	: 2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı
g_{13}^F	: 1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı
C - P	: Cowper –Symonds parametreleri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi.....	15
Şekil 1.2.	Hidrojen enerjisinin kullanımının yıllara göre dağılımı ile ilgili öngörü.16	
Şekil 1.3.	Firmalar ve hidrojen ile çalışan hibrit araç prototipleri.....	17
Şekil 1.4.	Bir kamyonet kasasında kompozit hidrojen tanklarının muhafaza edilmesi	18
Şekil 1.5.	Peugeot Partner' de yüksek basınçlı hidrojen tanklarının yerleşimi	18
Şekil 1.6.	Otobüslerde kompozit hidrojen tanklarının kullanımı (Chrysler).....	18
Şekil 1.7.	Otobüslerde kompozit hidrojen tanklarının kullanımı (Mercedes)	19
Şekil 1.8.	Nissan Xterra model hibrit araç prototipi.....	19
Şekil 1.9.	Ford P2000 model hibrit araç prototipi	19
Şekil 1.10.	TÜBİTAK MAM ile Ford Otosan' ın birlikte tamamladığı hibrit araç ...	20
Şekil 1.11.	Yakıt pilli forklift prototipi	21
Şekil 1.12.	Mobil hidrojen evi projesi	21
Şekil 1.13.	Hidrojen ile çalışan golf aracı prototipi.....	21
Şekil 1.14.	Engelliler için geliştirilen üç tekerlekli hibrit araç	22
Şekil 1.15.	Bozcaada hidrojen adası projesi	22
Şekil 1.16.	İstanbul Deniz Otobüsleri (İDO) yakıt pilli kesintisiz güç kaynağı.....	22
Şekil 1.17.	Hidrojen ikmal istasyonu genel görünüşü	24
Şekil 1.18.	Madrid' te kurulu bir ticari ikmal istasyonunun genel görünüşü	25
Şekil 1.19.	Araçlarda yakıt pili sistemi	25
Şekil 1.20.	Sıvı Hidrojen ile çalışan BMW model bir araç yakıt sisteminin şematikgörünüşi.....	25
Şekil 1.21.	Tam otomatik çift basınçlı ikmal istasyonu	26
Şekil 1.22.	Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankının genel görünümü	30
Şekil 1.23.	Kompozit hidrojen tanklarında genel olarak kullanılan malzemeler	31
Şekil 1.24.	Alüminyum tank üzerine karbon lifi takviyesinin sarılması	32

Şekil 2.1.	Hidrolik pres yardımıyla içi dolu silindirden içi boş kap şeklinde silindir elde edilmesi.....	41
Şekil 2.2.	Boy uzatma işleminin görünüşü.....	41
Şekil 2.3.	İlk şekillendirme ile ikinci şekillendirme işleminin karşılaştırılması	42
Şekil 2.4.	Alüminyum hidrojen tankın uç kısmını büzme işlemi	42
Şekil 2.5.	Matristen çıkan malzemenin homojen akamamasının görünüşü	43
Şekil 2.6.	Prototip teknik resimleri.....	43
Şekil 2.7.	Çatlak-iç boşlukların görünüşü	44
Şekil 2.8.	Yırtılma ve kapanma probleminin görünüşü.....	44
Şekil 2.9.	Hazırlanan numunelere ait görünüş.....	45
Şekil 2.10.	Yaşlandırma ısıl işlemi sıcaklık-zaman faz diyagramı	53
Şekil 2.11.	Çökelti arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar	56
Şekil 2.12.	Aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi	56
Şekil 2.13.	AA 6063 alaşımlı numunelerin Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri;	6
Şekil 3.1.	Deney parçalarının tank üzerindeki yeri	58
Şekil 3.2.	Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz	65
Şekil 3.3.	TS 138 EN 10002-1' e göre borudan çıkarılan çekme numunesinin ölçüleri.....	66
Şekil 3.4.	Çekme testleri için numunelerin çıkarıldığı tüp kesiti	66
Şekil 3.5.	AA6061 AA6063 AA6082 Alaşımları için elde edilen çekme deneyi akma gerilmesi sonuçları (MPa)	66
Şekil 3.6.	Çekme işlemi tamamlanmış test numunesi	67
Şekil 3.7.	Tipik hidrolik patlama deney düzeneği.....	67
Şekil 3.8.	AA6061 T6 prototipinin hidrostatik basınç testinden sonraki görünümü.....	68
Şekil 3.9.	AA6000 serisi alüminyum alaşımları için ısıl işlem – alaşım türü – patlatma basıncı grafiği	68
Şekil 3.10.	Çatlağın çevresel gelişiminin ve dallanmasının gösterimi.....	70
Şekil 3.11.	Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler.....	71
Şekil 3.12.	Numunelerin kalıp içerisindeki yerleşimi	71
Şekil 3.13.	Vickers sertliğinin sıralı bir şekilde ölçüldüğü noktalar	73
Şekil 3.14.	AA6061 alüminyum alaşımı tankın farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı..	73
Şekil 3.15.	AA6063 alüminyum alaşımı tankın farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı..	73

Şekil 3.16. AA6082 alüminyum alaşımı tankın farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı..	74
Şekil 3.17. Ölçümlerin gerçekleştirildiği cihaza ait ekran görüntüsü.....	74
Şekil 3.18. Optik mikroskop görünüşü.....	75
Şekil 3.19. AA6063 ısıtılmış tankın kesitine ait mikroyapı fotoğrafı (200X).....	76
Şekil 3.20. AA6061 F numunesinin XRD analizi sonucu.....	76
Şekil 3.21. Ölçüm yapılan noktaların tankın açılımı üzerindeki yerleri.....	77
Şekil 3.22. Ölçüm noktalarının dairesel kesit üzerinde görünüşü.....	77
Şekil 3.23. AA 6061 tankına ait farklı bölgelerde cidar kalınlığı dağılımı.....	79
Şekil 3.24. AA 6063 tankına ait farklı bölgelerde cidar kalınlığı dağılımı.....	79
Şekil 3.25. AA 6082 tankına ait farklı bölgelerde cidar kalınlığı dağılımı.....	80
Şekil 3.26. AA6082 T4 tankına ait penetrant testi görünüşü.....	81
Şekil 3.27. AA6061 F tankına ait penetrant testi görünüşü.....	81
Şekil 3.28. AA6061 T6 - AA6063 T6 – AA6082 T6 tanklarına ait penetrant testleri görünüşleri.....	81
Şekil 3.29. Tüplerde derin çiziklere ait görünüş.....	82
Şekil 3.30. Çekilen röntgen filmine ait örnek bir görüntü.....	83
Şekil 3.31. Kesitte ultrasonik kalınlık ölçüm sonuçları.....	84
Şekil 4.1. Dişli parçasının sonlu eleman modeli.....	87
Şekil 4.2. Doğrusal sonlu elemanlara ayrılmış 1 boyutlu cisim.....	88
Şekil 4.3. Dörtgen sonlu elemanlara ayrılmış 2 boyutlu cisim.....	88
Şekil 4.4. Dikdörtgen prizma elemanlara ayrılmış 3 boyutlu cisim.....	88
Şekil 4.5. Kütle kuvvetleri, yüzey kuvvetleri ve tekil kuvvetler altındaki çubuğun sonlu elemanlar modeli.....	90
Şekil 4.6. Üniorm kesite sahip katı eleman üzerine F kuvvetinin uygulanışı.....	91
Şekil 4.7. Şekil 4.5'deki modelin yay modeline dönüştürülmesi.....	91
Şekil 4.8. Yay elemanı.....	92
Şekil 4.9. Lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi ..	92
Şekil 4.10. Yüzeylerdeki gerilme durumu.....	94
Şekil 4.11. Eksen takımları.....	107
Şekil 4.12. Solid 164 eleman tipi.....	118
Şekil 4.13. Kinematik ve izotropik pekleşme modellerinde elastik-plastik davranış (10 deforme olmamış boy, 1 deforme olmuş boy).....	122
Şekil 4.14. Tank CAD modeli.....	124

Şekil 4.15. İç ve dış basınca maruz ince cidarlı silindirlerde gerilme dağılımı.....	124
Şekil 4.16. Tankın çevresel kesit farklılığın açıklaması.....	126
Şekil 4.17. Mesh yapılmış tankın FEA modeli.....	128
Şekil 4.18. Tankın içerisine uygulanan basıncın görünümü.....	128
Şekil 4.19. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında von-Mises eşdeğer gerilme (Mpa).....	129
Şekil 4.20. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında toplam deformasyon (mm).....	129
Şekil 4.21. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ).....	130
Şekil 4.22. AA 6061 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği.....	130
Şekil 4.23. AA 6061 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	131
Şekil 4.24. AA 6061 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği..	131
Şekil 4.25. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği ..	132
Şekil 4.26. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	132
Şekil 4.27. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	132
Şekil 4.28. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği .	133
Şekil 4.29. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	133
Şekil 4.30. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	133
Şekil 4.31. AA 6063 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği.....	134
Şekil 4.32. AA 6063 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	134
Şekil 4.33. AA 6063 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği..	134
Şekil 4.34. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği ..	135
Şekil 4.35. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	135
Şekil 4.36. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	135
Şekil 4.37. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği ..	136
Şekil 4.38. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	136
Şekil 4.39. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	136
Şekil 4.40. AA 6082 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği.....	137
Şekil 4.41. AA 6082 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	137
Şekil 4.42. AA 6082 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği..	137
Şekil 4.43. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği ..	138
Şekil 4.44. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	138

Şekil 4.45. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	138
Şekil 4.46. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer gerilme grafiği ..	139
Şekil 4.47. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği.....	139
Şekil 4.48. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği	139

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Hidrojenin tarihsel gelişimi(16. YY-1974)	13
Tablo 1.2. Hidrojenin genel özellikleri.....	14
Tablo 1.3. Hidrojenin diğer yakıtlar ile karşılaştırılması	15
Tablo 1.4. Hidromobil yarışına katılan hidrojen ile çalışan prototip araçlar.....	23
Tablo 1.5. Japon otomotiv firmalarının hidrojen ile çalışan prototip araçları ve özellikleri.....	27
Tablo 1.6. Her bir kWh için maliyet (\$/kWh)	29
Tablo 2.1. Saf alüminyum özellikleri	48
Tablo 2.2. Mekanik işlem (dövme) alaşımlarının kodlama sistemi	48
Tablo 2.3. AA 6063 malzemesinin kimyasal kompozisyonu	49
Tablo 3.1. Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri	60
Tablo 3.2. Alüminyum ekstrüzyon profilleri mekanik özellikleri (EN 755-2)	61
Tablo 3.3. AA6061 alaşımına ait mekanik özellikler	63
Tablo 3.4. Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Vickers)	72
Tablo 3.5. Kalınlık ölçüm sonuçları tablosu.....	78

ÖZET

Anahtar kelimeler: AA6061, AA6063, AA6082 Al Mg Si alaşımları, yüksek basınca dayanıklı hidrojen depolama tankları, hidrojen tanklarının sonlu elemanlar analizi

Bu tezde, liner olarak adlandırılan ve yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tüpü olarak kullanılan dikişsiz alüminyum tüplerin bilgisayar destekli tasarımı ve analizi yapılmıştır. Prototiplerin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir.

Bu çalışmada, tankların imalatında kullanılan 6000 serisi Al Mg Si alaşımı olan AA6061, AA6063 ve AA6082 malzemelerden üretilen tüplerin davranışları incelenmiştir. Tüplerin kalite standartlarını sağlayıp sağlayamadıkları incelenmiştir.

Bu tez kısmi olarak Sanayi ve Ticaret Bakanlığının San-Tez (Sanayi Tezleri) Programı tarafından desteklenmiştir. Bu San-Tez 123 projesinde, Türkiye’de ilk kez yüksek basınca dayanıklı hidrojen depolama tanklarının ar-ge çalışmaları yapılmış ve prototipler üretilmiştir. 6000 serisi Al Mg Si alaşımı malzemelerle üretilen prototiplerin yüksek basınç altındaki davranışları bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Her alaşım ile üretilen prototipler hidrostatik basınç testleri ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında; AA6061, AA6063, AA6082 alaşımlarından yapılan her bir prototip için hidrostatik basınç testleri ve sonlu elemanlar analizleri ısıtılma işlemi, T4 ve T6 ısıtılma işlem durumlarına göre tekrarlanmıştır. Çekme deneyi için deney parçaları üretilmiş ve gerilme uzama diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen veriler analiz için bilgisayar modeline girilmiştir. Ayrıca, plastik deformasyona uğrayan tankların yapılarındaki değişimi anlamak için mikroyapıları incelenmiştir. Sertlik dağılımlarına ve mikroskop görüntülerine bakılmıştır. XRD analizi ile içyapıda ısıtılma işlemiyle ilgili olarak ortaya çıkan yapılar gözlemlenmiştir. Tahribatsız deneyler, radyografik muayene, sıvı penetrant testi, ultrasonik kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Prototip tanklar bu testlerden elde edilen bilgi ile değerlendirilmiştir.

Bu tezin ana hedefi dikişsiz alüminyum tüplerin mekanik özelliklerini bilgisayar modellerinin yardımıyla ve sonlu elemanlar yöntemleriyle belirlemektir. Ayrıca en ideal alaşım türü ve en uygun ısıtılma işlemi tespit etmekte hedeflenmiştir.

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF HYDROGEN STORAGE TANKS AND COMPUTER AIDED MODELING

SUMMARY

Keywords: AA6061, AA6063, AA6082 Al Mg Si alloys, high-pressure hydrogen storage tanks, the finite element analysis of hydrogen tanks

In this thesis, computer aided design and analysis of liners, seamless aluminum tubes used as high-pressure composite hydrogen storage tanks, are done. The mechanical properties and the microstructures of prototypes are examined.

In this study, the behavior of tubes made from AA6061, AA6063 and AA6082 which are alloys of 6000 series used to manufacture tanks, are investigated. Tubes are examined whether they meet the quality standards.

This thesis is partly supported by San-Tez (Industrial Thesis Program of the Ministry of Industry and Commerce). In this San-Tez 123 project, for the first time in Turkey, Research and Development studies of high-pressure hydrogen storage tanks are carried out and prototypes are manufactured. The behaviors of the prototype tanks made from 6000 series Al Mg Si alloys are analysed with the finite element methods under high pressure. The prototypes manufactured for each alloy are tested with hydrostatic pressure tests and both results are compared.

In the scope of the thesis, for each prototype made from AA6061, AA6063, AA6082 alloys, the hydrostatic pressure tests and finite element analyses are repeated according to their heat-treatment status of No Treatment, T4 and T6. Tensile specimens are produced and the stress-strain curves are obtained. The data is inserted to the computer model to analyse. Moreover, the microstructures of the tanks after plastic deformation are examined to understand the variation in their structure. Hardness distribution and microscope images were inspected. The internal forms resulted due to the heat treatment are observed by XRD analysis. Non-destructive tests, radiographic examination, liquid penetrant testing and ultrasonic thickness measurements are done. The prototype tanks are evaluated in the light of the information obtained from these tests.

The main purpose of the thesis is to determine the mechanical properties of seamless aluminum tubes by the help of computer modelling and finite element methods. Furthermore, it is also aimed to identify the most ideal alloy type and the most suitable heat treatment way.

BÖLÜM 1 . GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye olan zararları, araştırmacıları alternatif ve temiz enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya itmiştir. Bu konuda yurtdışında birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar ticari boyut kazanarak, araçlar başta olmak üzere birçok alanda hidrojen enerjisinin kullanılmasını sağlamıştır. Güncel uygulamalar ile birlikte hidrojen farklı şekillerde depolanabilmektedir. Hidrojenin depolanması çalışmaları gaz formunda, yüksek basınçlı kompozit tanklarda başlamıştır.

Araştırmalar sonucunda; hidrojen depolama tanklarının imalatı ile ilgili yurtdışında çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Fakat ülkemizde henüz bu tür çalışmalar ticari kimlik kazanamamış ve yapılan birçok çalışma deneysel aşamada kalmıştır. Bu doktora tezi kapsamında ülkemiz için yeni olan bu konuda çalışma yapılmıştır. Bu tezin sanayide uygulanabilir olması çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır. Günümüzde ticarileşebilir ar-ge çıktıları olan çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda bu çalışmanın bir an evvel ülke ekonomisine katkıda bulunacak ve ülkemiz teknolojik seviyesini arttıracak şekilde uygulamaya geçmesi gerekmektedir.

Hidrojenin depolanması ile ilgili farklı yöntemler olmasına rağmen en çok kullanılan yöntem olan basınçlı kaplarda gaz formunda sıkıştırarak depolama, başlangıç için uygun görünmektedir. Bu aşama başlangıç için atılacak önemli bir adımdır. Teknolojik konuları (tasarım ve imalat altyapısı) içerisinde barındırması nedeni ile ülkemizde somut bir çalışma ortaya konulamamıştır. Çalışmanın zorluklarının başında kompozit malzeme tekniği gelmektedir. Bu çalışma kapsamında tankın imalatı ile ilgili farklı alüminyum serilerinin (AA6061, AA6063, AA6082)

denenmesi, sonlu elemanlar metodu (ANSYS) yardımı ile elde edilen formun bilgisayar destekli basınç testleri, yüksek basınca dayanıklı epoksi ile güçlendirilmiş karbon elyaf kompozit sargı tekniği gelmektedir.

Bu çalışmada, son yıllarda hidrojen depolanması ile ilgili daha fazla gündeme gelen alüminyum depolama tanklarının üretimi, mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar analizi ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınç altında sıkıştırılmış hidrojen depolamada kullanılan bu tankların liner olarak adlandırılan iç kısımları çoğunlukla alüminyumdan üretilmektedir. Tankın hidrojen ile temas eden bu kısmının özellikle incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Tanklar dikişsiz olarak yekpare şekilde üretilmektedir. Tank üretiminin zorluğu buradan gelmektedir.

Çalışma kapsamında 6000 serisi 3 tür alüminyum alaşımından 3 farklı ısıl işlem durumuna göre toplam 9 adet prototip tank üretilmiştir. Prototipler üzerinde tüm mekanik özellikler belirlenmiş ve bilgisayar yardımı ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçların bir kısmı bu çalışmanın devamı ve tamamlayıcısı niteliğinde olan Sanayi Bakanlığı destekli “San-Tez 123: Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tanklarının Üretimi” adlı projede kullanılmıştır.

Hidrojen depolamada kullanılan yüksek basınca dayanıklı tankların liner olarak adlandırılan iç kısmının üzerine karbon elyaf, cam elyaf takviyeli bir kompozit kısım ile sarılarak mukavemeti artırılmaktadır. Bu nedenle literatür çalışması kompozit alüminyum tanklar baz alınarak gerçekleştirilmiştir [1,2].

Hidrojenin sıvı olarak depolanabilmesine rağmen, -253°C 'ye kadar soğutulması gerektiğinden, bu zor bir işlemdir. 1 kg hidrojenin sıvılaştırılması, yaklaşık 10kW-saat elektrik enerjisi gerektirmektedir [1,3].

Hidrojen katı halde de depolanabilmekte, fakat termodinamik olarak $0-100^{\circ}\text{C}$ arası sıcaklıklarda kullanım için uygun olmamaktadır. Bu sıcaklıklarda gravimetrik kapasiteleri ağırlıkça %2,5 H_2 den düşük olması daha uygun, fakat mobil durumlarda kullanımlarını imkansız hale getirmektedir [1,4].

Yüksek basınca dayanıklı kompozit tanklarda hidrojen depolama hızla gelişim göstermektedir. Bu tankların yapıları iki temel bileşene dayanır. Esasen hidrojenin sızmasını engellemek için olan iç gömlek ve tankın mekanik bütünlüğünü sağlayan kompozit yapıdır. Araştırmalar bu yüksek basınçlı depolama sistemlerinin güvenilirlik kalifikasyonları için yeni yöntemler geliştirilmesi yönündedir [1,5].

Yüksek basınçlı gaz depolama sistemlerinde genelde 200 bar civarında basınçla çalışılırken, hidrojen tanklarında hacimsel ve gravimetrik yoğunluğun yüksek olması gerekliliği daha yüksek basınçlara çıkmayı zorunlu kılmıştır [1,6].

Bu amaçla, öncelikle 5000psi (350bar) basınçta hidrojen depolanması sağlanmıştır [1,7].

(Kaliforniya Üniversitesi Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı) LLNL' in, (Amerika Enerji Bakanlığı) DOE, (Amerika Hava Kuvvetleri) USAF, (İleri Savunma Araştırma Projeleri Teşkilatı) DARPA, (Thiokol İtici Güç Şirketi) ATK ile beraber yürüttükleri proje sonucunda, hidrojen depolamada kompozit tankların standartları belirlemede önemli olduğu saptanmıştır. Bu çalışmalarda 10000 psi'nin erişilebilir bir limit olduğuna karar verilmiş ve çalışmalara başlanmıştır [1,8].

Quantum/ATK Trishield™ 5000psi da gaz hidrojen depolama tanklarını piyasaya sürmüştür. 2002 yılında Quantum Technologies 10000 psi (700bar) kompozit Hidrojen Depolama Tankı araştırmaları 2003 yılında sonuç vererek 100lt de 50kg hidrojenin depolanması sağlanmıştır [1,9].

Kompozit tasarım ve yaklaşımları ile tankların ağırlığı azaltılıp maliyeti düşürülmüştür. Algılayıcılar yardımıyla kompozit tankın ömrünün kontrol edilmesi sayesinde emniyet faktörünün aynı güvenilirlikte, fakat daha düşük alınmış ve malzeme verimliliği artırılmıştır. Bu çalışmada ağırlığın azaltılması ve hidrojenin soğutulmasıyla depolama yoğunluğunun artırılması mümkün olmuştur [1,10].

Sızdırmaya dayanıklı kaynaklı iç gömlek (liner), yüksek performanslı karbon kompozit dış sarımı ve darbe dayanımlı dış çevre ile ultra hafif tanklar üretilmiştir. Quantum Technologies tarafından üretilen bu kompozit tanklarla ağırlıkça %11,3 (5,02 kWh/kg) kapasite gösteren hidrojen depolanması başarılmıştır [1,11].

Hidrojen kullanılan sistemlerde metal malzemenin mekanik özellikleri zaman içinde hidrojen nedeniyle olumsuz etkilenebilir. Hidrojenle ilgili uygulamalarda malzemenin kırılma eğilimi uygulamada çokça karşılaşılan bir durumdur (hidrojen gevrekleşmesi). Bunun sebebi bilim çevrelerinde halen tartışmalı bir konu olup, hidrojenin malzeme davranışına etkileri pek çok araştırma için neden oluşturmaktadır. Genel olarak konu, hidrojenin metal üzerinde birikmesi sonucu metalin sünekliğinin azalması ve bu şekilde metalin kırılma eğilimi bir biçimde çatlaması olasılığının artmasıdır [1,5].

Kompozit hidrojen tanklarının şu anki maliyetlerinin hesaplanmasında; 1 kg Hidrojen için depolama maliyetinin 600 USD civarında olması ve hidrojen maliyetinin kW-saat başına 10 ila 17 USD arasında bulunması dolayısı ile daha ekonomik tankların geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [1,12].

Bazı araştırmalarda, gerinim sensörleri kullanarak depolama sisteminin güvenlik seviyesi artırılırken tankın güvenlik katsayısı düşürülerek maliyetlerin azaltılması yönünde çalışmalar yapılmıştır [1,13].

Takeichia ve arkadaşları Al-CFRP kompozit tankı ve bu tankın hidrojen depolama alanı ile birlikte tankın tahmini potansiyelini kullanan, yeni bir hidrojen depolama tankı önermişlerdir. Bu tankın, hidrojen depolama sistemlerini kullanan binek otomobillerde yüksek hacimli yeni adaylardan biri olması gerektiğine inandıklarını belirtmişlerdir. Çalışma sonucuna göre; kompozit hidrojen depolama tankları, hidrojen depolama yoğunluğunun avantajına sahiptir. Al-CFRP kompozit tankın gravimetrik hidrojen yoğunluğu, sadece metal hibrid ve hacimsel hidrojen yoğunluğu kullanan geleneksel hidrojen depolama tankı sistemlerinden daha

yüksektir [14].

Chapelle ve arkadaşları; hidrojen depolama uygulamaları için Tip 3 tankının (Tip 3: başlangıçta cam elyaf daha sonra karbon lifinden oluşan kompozit malzemeli metelsel bir iç kısma sahip tanklar) silindirik bölümünün analitik modellemesini gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlara dayanarak Tip 3 yapısının optimizasyon prosedürünün oluşturulmasının sağlanabileceği belirtilmiştir [15].

Cheol-Ung Kim ve arkadaşları; kompozit sargı ile ilgili yol algoritması kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Buna ek olarak, filament sargı yapılarının davranışlarını tahmin etmek için hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle, uygun eleman tipleri ve filament sargı yapılar için hasar kriterleri incelenmiştir. Buna ek olarak, sonlu elemanlar analizi yöntemi esas alınarak, en uygun tasarım algoritması için genetik algoritma önerilmiştir [16].

Cheol-Ung Kim ve arkadaşları, iç basınç altında Tip 3 tankın filament sargıları için optimal tasarım yapmışlardır. Bu işlem yapılırken daha önceki araştırmalarda öne sürülenlerden daha yeni bir tasarım algoritması kullanmışlardır. Son olarak optimum tasarım algoritması filament sargılı yüksek basınçlı hidrojen tankına uygulanmıştır. Tasarım, performans faktörünü %23,5 arttırmıştır [17].

M. Xia ve arkadaşları, termomekanik yüklemeye maruz kalmış bir sandviç tipli borunun filament sargılarının, gerilmelerinin ve iç basıncının analizi için bir method sunmuşlardır. Bu sürecin, klasik tabakalı levha teorisi üzerine kurulu olduğunu belirtmişlerdir. Sandviç boru 3D analizinde ortotropik bir malzeme modeli olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen hesaplama yöntemi burada, sandviç tipli borunun filament sargılarındaki elastik yapısını tahmin etmek için temel oluşturmuştur. En uygun sarım açısının, dizaynı netleştirme analizinde, kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Bu dizaynın geometri ve yapı malzemelerine göre değişebildiği söylenmiştir. Kalın cidarlı lamine katlı sandviç boru için, 55 ° açı sarımın artık ideal bir düzenleme olduğu kabul edilmiştir [18].

Levend Parnas ve arkadaşları; bir roket motor gövdesinin, özellikle yük altında bir silindirik kompozit yapının, davranışlarını değerlendirmek için bir analitik prosedür geliştirmişlerdir. Silindirik basınçlı tanklar, ince cidarlı ve kalın cidarlı çözümleri adı verilen iki yaklaşım kullanılarak incelenmiştir. Sadece iç basınç yüklenmesi halinde olan kalın cidarlı tank analizinde; en uygun sarım açısının malzeme tipine bağlı olarak $52,1^\circ$ ila $54,1^\circ$ arasında değişken olarak elde edildiği belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre materyal pozitif bir sıcaklık farkı nedeniyle büyüyen bir eğilime sahipse, artan çalışma sıcaklığı sisteminin mekanik performansını düşürdüğünü göstermiştir [19].

P. Iaccarino ve arkadaşları, elyafglas/alüminyum klasik laminat teorisinin sadeliğini koruyarak, yüksek derecede doğrusal olmayan sonucun tahminine yönelik basit bir çözüm önermiştir. Doğrusal elastik faz dışında her deformasyon adımında, alüminyum olan sabitler gerçek malzemenin davranışa bağlı olarak değişmektedir. Metodolojiye göre; tekdüze gerilme testleri ve kayma testleri sonuçları ile teorik tahminleri karşılaştırılarak bir değerlendirme sunulmuştur [20].

Shiladitya Basu ve arkadaşları; iki tür lamine yapısal paneller için progresif hasar analizi metodolojisine dayanan bir hasar mekanizması geliştirmiştir [21].

Kuo-Shih Liu ve arkadaşları; tabakalı bir yapı için progresif kuadratik hasar kriteri geliştirmişlerdir [22].

T. Y. Kam ve arkadaşları; tabakalı kompozit basınçlı kapların hasar dayanımı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmaya göre; analitik verilerin doğrulanması için deneyler yapılmıştır. Analitik hesaplamalarda maksimum gerilme kriteri ve Hoffman hasar kriterini baz almışlardır. Bulunan teorik veriler ile tankların patlatma basınçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır [23].

D. Cohen; kompozit tüplerin kalite ve dayanımında filaman sargının etkisini incelemiştir. Bu çalışmada kompozit kap üretim tasarım değişkenleri deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırma kapsamında 8 adet 20" çapında silindirler kullanılmıştır. Bu

silindirlerin dayanımları, rijitlikleri, kalınlığa göre hacim oranları, kalıntı gerilmeler ve katmanlar arası kayma dayanımları incelenmiştir [24].

D. Cohen ve arkadaşları ayrıca; filament sargılı kompozit basınçlı kapların dayanımında elyaf hacim oranının etkisini de incelemişlerdir [25].

Tae-Kyung Hwang ve arkadaşları; kompozit basınçlı kapların elyaf dayanımlarında boyut etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada lif çekme dayanımına hacimsel boyut etkisi çok adımlı hasar modeli kullanılarak araştırılmıştır [26].

J.Y. Zheng ve arkadaşları tarafından, alüminyum karbon elyaf/epoksi kompozit silindirik katmanların elasto-plastik gerilme analizi ve patlatma dayanımı incelenmiştir. Çalışma kapsamında iç basınç ve termal iç gerilme altında kompozit silindirik tankların elasto-plastik gerilme analizi ve hasar gelişimi incelenmiştir. Özellikle klasik lamine teorisi ve plastisite teorisi kullanılmıştır [27].

P.F. Liu ve arkadaşları; karbon elyaf/epoksi kompozit laminelerin sürekli hasar mekanizmaları kullanarak progresif hasar analizleri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre enerji bazlı bir hasar modeli CDM teorisine göre alüminyum-karbon elyaf/epoksi kompozit laminelerin iç basıncın yükselmesiyle progresif hasar özellikleri belirlenmiştir [28].

P. D. Soden ve arkadaşları; kompozit lamineler için mevcut hasar analizlerinin prediktif kapasitelerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır [29].

John G. Michopoulos; kompozit malzemeler için hasar analizlerinin indirgenebilirliğini incelemiştir. Bu çalışma birleşme ve çapraz indirgenebilirlik çerçevesinin başlangıç adımlarını ortaya koymak için gerçekleştirilmiştir [30].

J. Lee ve arkadaşları; karbon elyaf-epoksi laminelerin kalınlığının basınç dayanımında ki etkisini incelemişlerdir [31].

M. Xia ve arkadaşları; çok katmanlı filament sargılı kompozit boruların iç basınç altındaki analizlerini gerçekleştirmişlerdir [32].

Bogetti ve arkadaşları; kompozit laminelerin nonlinear davranışı ve progresif hasarı tahmin etmek için bir çalışma yapmışlardır [33].

T.Q. Hua ve arkadaşları; otomotiv uygulamaları için sıkıştırılmış hidrojen depolama tank sistemlerinin teknik gereksinimlerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında volumetrik kapasite, gravimetrik kapasite, depolama sistemleri ve maliyet, gaz emisyonları ve verimlilik üzerinde durulmuştur [34].

A. Freni ve arkadaşları; bir metal hidrid bazlı hidrojen depolama tankının sonlu elemanlar bazlı simülasyonunu yapmışlardır. Farklı 3 boyutlu tasarımlar yaparak bu modelleri sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir [35].

Jinyang Zheng ve arkadaşları; yüksek basınçlı hidrojen depolama tanklarının alev alma testi için numerik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu test aşamasında bazı değişkenlere göre karbon elyaf/epoksi yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankının güvenlik performansı incelenmiştir [36].

Aziz Onder ve arkadaşları; kompozit basınçlı tankların patlatma basınçları ile ilgili çalışma yapmışlardır. Bu teorik çalışmaya göre yüksek sıcaklık altında termal gerilmeler arttığından kompozit malzemenin dayanımının azaldığı belirtilmiştir [37].

A. Hocine ve arkadaşları; iç basınca maruz filament sargılı metalik tankın analitik ve deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda elasto-plastik analiz yapılmıştır [38].

S. Camara ve arkadaşları; hidrojen depolama için basınçlı tankların ve karbon elyaf kompozit plakaların ömür tayini çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Farklı zaman ve koşullar altındaki yapıda meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir [39].

C. Frias ve arkadaşları; sargı kısmına sensörlerin yerleştirildiği basınçlı kaplar imal etmişlerdir. Bu sensörlerden alınan bilgileri bilgisayar yazılımına aktararak, tankın davranışları incelenmiştir [40].

P.F. Liu ve arkadaşları sürekli hasar mekanizmaları kullanarak karbon elyaf/epoksi laminelerin progresif hasar analizlerini yapmışlardır [41].

J.C. Velosa ve arkadaşları; yeni nesil bir filmamen sargılı kompozit basınçlı tank geliştirmişlerdir. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi kullanarak optimizasyon yapmışlardır. Deneysel çalışma ile sonlu elemanlar analizini karşılaştırmışlardır [42].

Haiyan Bie ve arkadaşları; yüksek basınçlı hidrojen depolama tankının yorulma ömrünün tayini konusunda bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmayı sonlu eleman analizi tabanlı olarak yürütmüşlerdir. Hsar mekanizmaları ve mikromekanizmalar üzerinde durulmuştur [43].

Jorge Paiva Abrantes ve arkadaşları; alüminyum alaşımı tüplerin hidro-şekillendirmesinin numerik olarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada non-lineer sonlu elemanlar modelinden yararlanılmıştır. Hidro-şekillendirme kalıpları için de bu analizler uygulanmıştır [44].

A.K. Toksoy ve arkadaşları; ince cidarlı silindirik alüminyum tüplerine polistren köpük doldurmanın dayanıma etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada deformasyon esnasında alüminyum tüplerin içine doldurulan polistren köpüklerin tüpün dayanımına olan etkisi gözlemlenmiştir [45].

A. S. Chen ve arkadaşları; karbon elyaf takviyeli alüminyum alaşımı tüplerin geliştirilmesi ve üretimi ile ilgili çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında kompozit tankların mekanik özellikleri belirlenmiş ve farklı yükleme koşullarında davranışları incelenmiştir [46].

Yannis P. Korkolis ve arkadaşları alüminyum tüplerin patlatılması ve infilakı ile

ilgili çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre Al-6260-T4 alaşımından üretilen tüp iç basınç altında yüklenmiştir. Yüklenmiş olan bu tüpün davranışları incelenmiştir [47].

H.J. Park ve arkadaşları; bakır kaplı alüminyum tüpün hidrostatik ekstrüzyonu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi ile deneysel çalışmadan yararlanılmıştır [48].

Masahiro Nishida ve arkadaşları; çelik küreler tarafından şekillendirilmiş içi su dolu olan alüminyum tüplerin çatlama ve perforasyonu için deneysel bir çalışma yapmışlardır [49].

Mehdi Imaninejad ve arkadaşları; alüminyum profillerin tüp hidro-şekillendirme esnasında bitirme durumunun etkileri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada AA6082-T4 tüplerinin hidro-şekillendirme proseslerinden yararlanılmıştır [50].

Lihui Lang ve arkadaşları alüminyum alaşımı tüplerin hidro-şekillendirmesinin nümerik simülasyonu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada LS-DYNA 2D yazılımından yararlanılmıştır. Çalışma neticesinde sonlu elemanlar analizinin iyi bir sonuç verdiği kanaatine varılmıştır [51].

E. Chu ve arkadaşları; otomotiv uygulamaları için alüminyum ekstrüzyon tüplerinin hidro-şekillendirmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada alüminyum tüplerin patlatma analizleri, buruşma ve burkulma gibi özellikleri incelenmiştir [52].

Yabo Guan ve arkadaşları; polikristal alüminyum alaşımı profillerin tüp hidro-şekillendirmesinin sonlu elemanlar analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. İç basınç altında zorlanma durumu incelenmiştir [53].

Y. Chen ve arkadaşları; ekstrüde AA6xxx ve AA7xxx serisi alüminyum alaşımlarının dinamik kırılması üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmada charpy çarpma testi ve fraktografisi incelenmiştir. Malzemeleri T6 ısıl işlemi

uygulanmıştır [54].

Jaroslav Mackerle; 1985-2003 yılları arasında kompozitlerin ve onların mekanik özelliklerinin üretim proseslerinin sonlu elemanlar analizleri ve simülasyonları ile ilgili bir bibliyografi çalışması yapmıştır [55].

Steffen Maus ve arkadaşları; sıkıştırılmış hidrojen tankları ile araçlara hidrojen doldurulması ile ilgili prosedürü vermişlerdir [56].

Scott W. Jorgensen; araçlar için hidrojen depolama tanklarını incelemiştir. Bu çalışmada son gelişmeler ve mevcut durum üzerinde durulmuştur [57].

Eustathios S. Kikkinides; ileri katı malzemeler kullanılan hidrojen depolama sistemlerinin dizyn ve optimizasyonu ile ilgili genel matematiksel çerçe ve son gelişmeler üzerine bir çalışma yapmıştır [58].

Steven G. Chalk ve arkadaşları; temiz enerji sistemleri için hidrojen depolama, yakıt pilleri ve bataryalardaki son gelişmeleri ve önemli zorlukları incelemiştir [59].

Tae-Kyung Hwang ve arkadaşları, filament sargılı basınçlı kapların dayanım ve deformasyon olasılıkları için tahminde bulunan bir çalışma yapmışlardır [60].

K.M. Rajan ve arkadaşları; flow forming yöntemi ile elde edilen ince cidarlı basınçlı kapların patlatma basıncı üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır [61].

P. Xu ve arkadaşları; kompozit hidrojen depolama tanklarının patlatma basıncının sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmişlerdir [62].

Abdelkader Hocine ve arkadaşları; sıkıştırılmış hidrojen depolama için hibrit bir çözümün davranışında intermetalik şişirme analizi yapmışlardır. Bu çalışma analitik modellemeye dayanmaktadır [63].

D. Mori ve arkadaşları; yakıt pilli araçlar için hidrojen depolama tekniklerinin son gelişmeleri ile ilgili bir çalışma yapmışlardır [64].

Robert Zalosh; CNG ve hidrojen araçlarının yakıt tanklarında meydana gelen hasar olaylarını ve önleyici tedbirleri incelemiştir [65].

Yapılan araştırmalarda liner üzerine sargı yapılmış kompozit hidrojen depolama tankları ile ilgili farklı çalışmalara rastlanmıştır [66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75].

Bu çalışmaların büyük kısmı kompozit yapıda meydana gelen hasarlar ile ilgilidir [76, 77, 78, 79]. Bir kısım çalışmada ise yüksek basınca dayanıklı tankların modellenmesi ve liner olarak adlandırılan alüminyum tankların malzeme özellikleri ve ısıl işlem durumları incelenmiştir [80,81].

1.2. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen enerjisinin gelişimi 16. YY' da bilim adamı Paracelsus' un hidrojen elementini bulması ile başlamış, dönem dönem çeşitli alanlarda kullanılarak bu güne kadar ulaşmıştır.

1.2.1. Hidrojen

Periyodik sistemin ilk elementi olan hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve orbitalinde bir elektron bulunur. Hidrojen evrende en çok bulunan ve çevreye en uygun elementtir ve doğada birleşik halinde çok yaygındır. Örneğin, su içinde hidrojen oksijen ile birleşik halindedir ve suyun %11,2' sini hidrojen oluşturmaktadır. Ayrıca hidrojen insan vücudunun yaklaşık %10' unu teşkil eder, kömür ve ham petrol içinde karbonla birleşmiş halde bulunur. Bunun yanında kil ve mineraller genellikle oksijenle birleşmiş halde önemli ölçüde hidrojen içerirler. Hatta bütün nebati ve hayvani maddeler bile karbon, azot, kükürt, oksijen gibi elementlerle birleşik halde bulunan hidrojeni bünyelerinde bulundurur. Bu açıklamalardan da görüldüğü üzere,

yaşam için oksijen kadar önemli olan hidrojenin tarihçesini sunmak gelecekte yapılacak çalışmalara zemin oluşturması bakımından yararlı olacaktır. Hidrojenin tarihsel gelişimi Tablo 1.1’ de kronolojik olarak sunulmuştur [82].

Tablo 1.1. Hidrojenin tarihsel gelişimi(16. YY-1974) [82]

Tarih	Bilimadamı	Yapılan Çalışma
16.yüzyıl	Paracelsus	Hidrojen gazının tabiatı ortaya çıkarılmıştır.
16.yüzyıl	Van Helmot	Hidrojen, havanın özel bir türü olarak tanımlanmıştır.
1671	Robert Boyle	Demir tozu + seyreltik asit reaksiyonunda hidrojene rastlanmıştır.
1766	Henry Cavandish	Hidrojen gazının özellikleri tanımlanmıştır.
1783	Lavoisier	Hidrojen gazının adı verilmiştir.
1820	Anonim	Hidrojenin yenilenebilir enerji olarak kullanılma fikri doğmuştur.
1911	Carl Bosh	Hidrojen gübre üretiminde kullanılmıştır.
1970	Enstitüler	Hidrojen, enerji taşıyıcısı olarak düşünülmüştür.
1974	T.Nejat Veziroğlu	Çağdaş boyutta hidrojen enerjisi kullanılmaya başlanmış ve ilk defa bilimsel arenada tartışılmıştır.

1.2.2. Hidrojen Gazı

Doğadaki en basit atom yapısına sahip hidrojen, günümüzde kabul gören evrenin oluşumu kuramında da belirtildiği gibi, bütün yıldızların ve gezegenlerin temel adresidir. Evrende %90’ dan fazla hidrojen bulunmaktadır. Güneş ve diğer yıldızların termonükleer tepkimeye vermiş olduğu ısının yakıtı da yine hidrojen olup, evrenin temel enerji kaynağıdır. Periyodik cetvelin en başında yer alan hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve çevresinde yalnız bir elektron bulunur. Ancak 5000 hidrojen atomundan birinin çekirdeğinde birde nötron bulunur. Bu durumdaki hidrojen atomuna "döteryum" adı verilir. Döteryum, hidrojenin önemli bir yeri olup, bu izotopun zenginleştirilmesi ve oksijenle birleştirilmesinden elde edilen suya “ağır su” denir. Ağır su, nükleer reaktörlerde, uranyumun parçalanması sırasında çıkan nötronların yavaşlatılması için ılımlayıcı olarak kullanılır. Hidrojenin çok daha

az bulunan bir başka izotopu da, çekirdeğinde iki nötron bulunan ve trityum adı verilen hidrojenidir. Radyoaktif olan trityum, hidrojen bombası yapımında kullanılır.

Normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksiz olan bu gaz (H_2) oksijenle birleştiğinde yaşam için en önemli madde, yani su elde edilmektedir. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14' ü, doğal gazın ise 1/9' u kadardır. Atmosfer basıncında $-253\text{ }^\circ\text{C}$ ' ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10' u kadar olmaktadır. Hidrojen gazının ısıl değeri metreküp başına yaklaşık 12 milyon jule olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısıl değeri ise metreküp başına 8400 milyon jule veya kg başına 120 milyon jule olarak bulunmuştur. Sıvı hidrojen ısı transferini ve kaynama olayını minimize eden süper izoleli dizayn edilmiş çift cidarlı kaplarda depolanır. Taşıtlar için gerekli yakıt hem sıvı hem de gaz fazdan çekilerek motora sevk edilir. Hidrojen gazının özellikleri Tablo 1.2' de verilmektedir.

Tablo 1.2. Hidrojenin genel özellikleri [83]

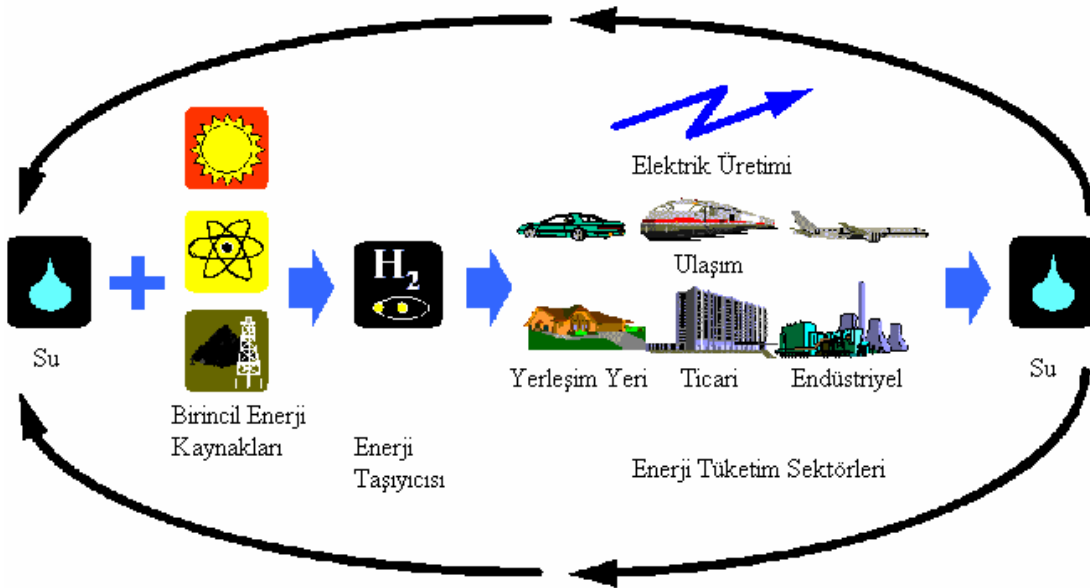
Özellik	Değer	Birim
Molekül Ağırlığı	2,016	kg/mol
Yoğunluğu	0,0838	kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141,9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11,89	MJ/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119,9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10,05	MJ/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20,3	K
Sıvı Yoğunluğu	70,8	kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32,94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12,84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31,40	kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% hacimsel
Havada Sitokiometrik Karışım	29,53	% hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	cm ² /s
Özgül Isısı	14,89	KJ/kg.K

Hidrojenin diğer yakıtlar ile karşılaştırılması Tablo 1.3' te verilmiştir.

Tablo 1.3. Hidrojenin diğer yakıtlar ile karşılaştırılması [83]

Özellik	Benzin	Metan	Hidrojen
Yoğunluk (kg/m^3)	4,4	0,65	0,0838
Hava içindeki difüzyonu ^a , (cm^2/s)	0,05	0,16	0,61
Sabit basınçtaki özgül ısısı ^a , (kJ/kg.K)	1,20	2,22	14,89
Havada ateşlenme sınırı, (% hacim)	1,0-7,6	5,3-15,0	4-75
Havada ateşlenme enerjisi, (mJ)	0,24	0,29	0,02
Ateşlenme sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)	228-471	540	585
Havada alev sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)	2197	1875	2045
Alev yayılması (emisivitesi), (%)	34-43	25-33	17-25
Isıl kapasitesi, (MJ/kg)	45,5	50	141,9
Isıl kapasitesi, (MJ/m^3)	38,65	23	11,89
Patlama enerjisi ^b , (gr TNT/kJ)	0,25	0,19	0,17
^a Normal basınç ve sıcaklıkta			
^b Maksimum teorik; gerçek, teoriğin % 10' u			

Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.1' de gösterilmiştir.

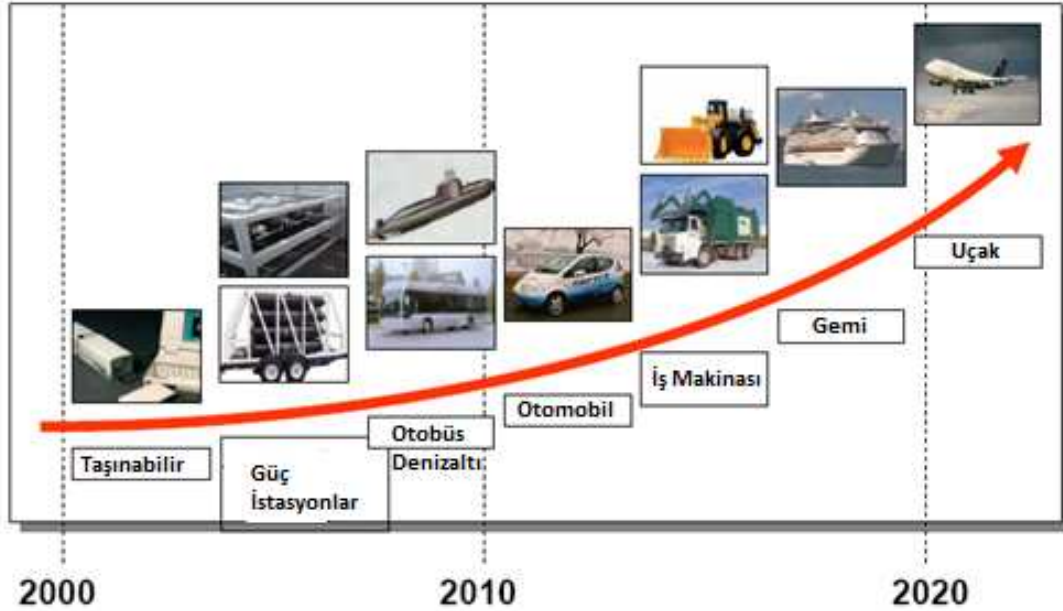


Şekil 1.1. Hidrojen enerji sisteminin şematik gösterimi [84]

1.2.3. Hidrojenin araçlarda kullanımı

Günümüzde enerji ihtiyacının artması, kaynakların azalması nihayetinde enerji maliyetlerinin yükselmesine neden olmuştur. Bu durum araştırmacıları, yatırımcı ve girişimcileri ucuz, temiz ve alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Alternatif enerji kaynaklarının kullanılabilirliğinin artmasına paralel olarak bu enerjilerin kullanılacağı makine ve sistemlerde de hızlı bir şekilde gelişmeler olmaktadır [85].

Son zamanlarda tüm dünya genelinde hidrojen ile çalışan hibrit araçların tasarım ve üretimi hız kazanmıştır. Hidrojenin ulaşımda kullanımı binek otomobiller ve toplu taşıma araçlarında daha hızlı gelişmektedir. Bu gelişim hızı yakıt pillerindeki gelişmeler ve hidrojen üretim-depolama maliyetlerinin azalmasına direkt bağlıdır. Şekil 1.2 ' de hidrojenin deniz, hava ve kara ulaşımında kullanımı için öngörüler bir şema olarak sunulmuştur [86,87].

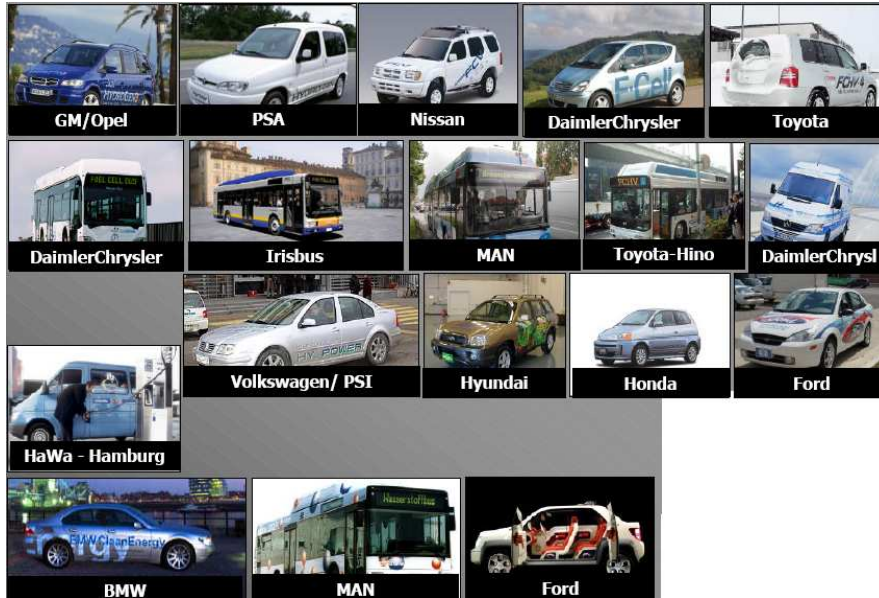


Şekil 1.2. Hidrojen enerjisinin kullanımının yıllara göre dağılımı ile ilgili öngörü [65,66].

Şekil 1.2' deki hedefler yıllara göre adım adım gerçekleştirilmektedir. Araçlarda yaygın olarak kullanımı 2010' dan sonrası için öngörülmesine rağmen hızlı

gelişmiştir. Hidrojenin kullanıldığı sistemler şekilde görülen ile sınırlı değildir. Bir çok alanda hidrojenin kullanımı için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar öncelikle yakıt pilleri, hidrojenin en ekonomik şekilde üretimi ve depolanması ile ilgilidir [88].

Şekil 1.3' te de görüleceği üzere birçok otomotiv firması hidrojen ile çalışan hibrit araçlarının prototiplerini yapmış ve bu prototipleri denemektedirler. Bu prototiplerde çoğunlukla içten yanmalı motor ile birlikte elektrik motoru kullanılmıştır. Kimi prototiplerde metal hidrit tanklar, kiminde ise yüksek basınçlı gaz formunda sıkıştırılan hidrojen tankları kullanılmıştır. Çoğunlukla prototiplerde 350 bar çalışma basıncında depo edilen hidrojen tankları görülmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ile bu basınç değeri iki katına çıkarılmış ve aynı hacimde daha fazla hidrojen depolanabilmektedir. Ülkemizde ilk kez bu tez kapsamında 700 bar kullanım basıncına sahip tüpler üretilmiştir. Bu çalışmaya paralel olarak yapılan diğer çalışmalar da tamamlandığında, ithal girdi olarak kullanılan hidrojen enerjisi ekipmanlarının maliyeti azalacak ve gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de bir çok alanda prototip çalışmaları hız kazanacaktır [88].



Şekil 1.3. Firmalar ve hidrojen ile çalışan hibrit araç prototipleri [86,87]

2000' li yılların başından bu yana dünyada hızla hidrojenin araçlarda kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda birçok prototip araç yapılmış ve

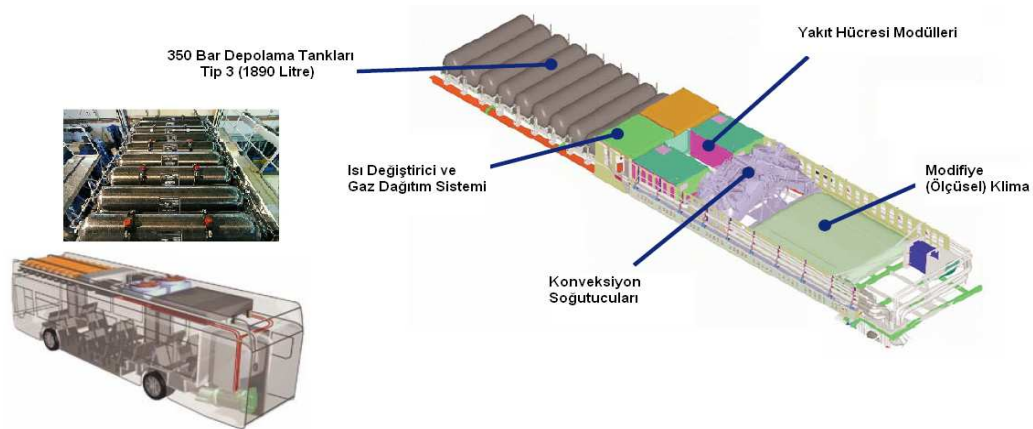
testleri tamamlandıktan sonra kullanıma sunulmuştur. Birçok ülkede hidrojen ikmal istasyonları da bulunmaktadır. Uygulamalar ile ilgili gösterimler Şekil 1.4, Şekil 1.5, Şekil 1.6, Şekil 1.7, Şekil 1.8 ve Şekil 1.9' de yapılmıştır.



Şekil 1.4. Bir kamyonet kasasında kompozit hidrojen tanklarının muhafaza edilmesi [89]



Şekil 1.5. Peugeot Partner' de yüksek basınçlı hidrojen tanklarının yerleşimi [90]



Şekil 1.6. Otobüslerde kompozit hidrojen tanklarının kullanımı (Chrysler) [91]



Şekil 1.7. Otobüslerde kompozit hidrojen tanklarının kullanımı (Mercedes) [86,87]



Şekil 1.8. Nissan Xterra model hibrit araç prototipi [88]



Şekil 1.9. Ford P2000 model hibrit araç prototipi [88]

Ülkemizde birçok üniversite ve özel kuruluşlarda hidrojen sistemleri ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar temel olarak alternatif ve düşük maliyetli hidrojen eldesi, depolanması ve yakıt pilleri ile ilgilidir. Bunun yanı sıra hidrojenin araçlarda kullanımını da denemeye başlamıştır. Ford, TÜBİTAK MAM' da ilk hidrojen ile çalışan aracının prototipini yaparak basına duyurmuştur. Geliştirilen hibrit araç Şekil 1.10' da gösterilmiştir [88].



Şekil 1.10. TÜBİTAK MAM ile Ford Otosan' ın birlikte tamamladığı hibrit araç [92]

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK MAM) Enerji Enstitüsü ile Ford Otosan' ın birlikte tamamladığı hibrit hafif ticari araç prototipi "Ford Transit" ile sıkıştırılmış hidrojen ile çalışan yakıt pilli "Ford Focus" tanıtılmıştır.

1.2.4. Hidrojen enerjisinin farklı alanlarda kullanımı

Ülkemizdeki Hidrojen ile ilgili çalışmalarını organize eden United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) ve International Centre for Hydrogen Energy Technologies (ICHET) tarafından gerçekleştirilen projeler şunlardır;

Yakıt pilli forklift prototipi,

Mobil hidrojen evi projesi,

Hidrojen ile çalışan golf aracı prototipi,

Engelliler için geliştirilen üç tekerlekli hibrit araç,

Bozcaada hidrojen adası projesi,

İstanbul Deniz Otobüsleri (İDO) yakıt pilli kesintisiz güç kaynağı [88].

Projelere ait görüntüler

Şekil 1.11, Şekil 1.12, Şekil 1.13, Şekil 1.14, Şekil 1.15 ve Şekil 1.16' te verilmiştir.



Şekil 1.11. Yakıt pilli forklift prototipi [93]



Şekil 1.12. Mobil hidrojen evi projesi [93]



Şekil 1.13. Hidrojen ile çalışan golf aracı prototipi [93]



Şekil 1.14. Engelliler için geliştirilen üç tekerlekli hibrit araç [93]



Şekil 1.15. Bozcaada hidrojen adası projesi [93]



Şekil 1.16. İstanbul Deniz Otobüsleri (İDO) yakıt pilli kesintisiz güç kaynağı [93]

TÜBİTAK, güneş enerjisinin yanı sıra, Türkiye’de hidrojen enerjisi konusunda da halkı bilinçlendirmek ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımına yönelik teknolojilerin Türkiye’de üretilmesinde gençlerin aktif rol oynamasını teşvik etmek amacıyla, üniversite öğrencilerine yönelik olarak 2007 yılında ilk kez “TÜBİTAK Hidromobil–Hidrojen Arabaları Yarışı” düzenlemiştir. 2007 yılı TÜBİTAK Hidromobil – Hidrojen Arabaları Yarışı da, TÜBİTAK Formula G Güneş Arabaları Yarışı ile birlikte, 29 Temmuz 2007 tarihinde Ankara’da Atatürk Kültür Merkezi’nde, 15 üniversiteden 20 aracın katılımıyla yapılmıştır. Yarışa 2008 yılında, yine 15 üniversiteden 20 araç katılmıştır. Hidromobil yarışına katılan

hidrojen ile çalışan prototip araçlar, prototipin yapıldığı üniversiteler ile birlikte Tablo 1.4' te verilmiştir [88].

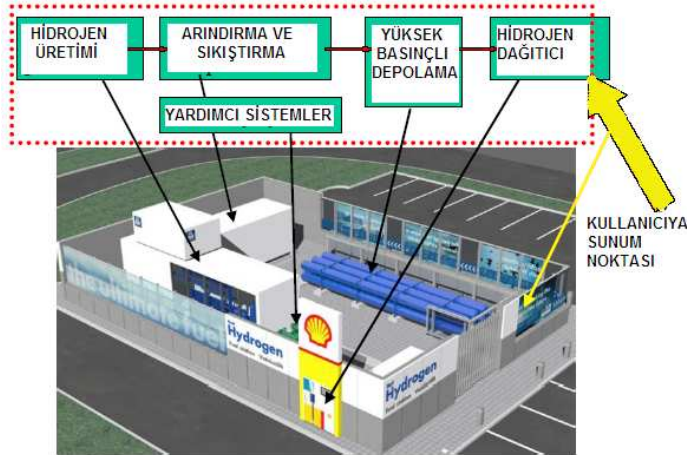
Tablo 1.4. Hidromobil yarışına katılan hidrojen ile çalışan prototip araçlar [94,95]

Okul Adı	Araç Adı
Anadolu Üniversitesi	Hidroana
Ankara Üniversitesi	Hidroket 1
Ankara Üniversitesi	Hidroket 2
Bilkent Üniversitesi	Ohara
Boğaziçi Üniversitesi	Buhar'08
Çukurova Üniversitesi	AYAG
Erciyes Üniversitesi	Katremobil
Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Hidrojet
İstanbul Teknik Üniversitesi	Hydrobee
İstanbul Teknik Üniversitesi	H2ydrobee
İstanbul Teknik Üniversitesi	Aşkar
Karadeniz Teknik Üniversitesi - Mekatronik K.	Ktüjen
KTU Makine Mühendisliği	HidroKTÜ
MMO Hidromobil Grubu	Poseidon II
Niğde Üniversitesi	Kapadokya
ODTÜ Hy-tech Racing	Atar
ODTÜ Robot Topluluğu	-
Sakarya Üniversitesi SETT	Hidrosett
Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi	Timsah H2
Yıldız Teknik Üniversitesi	Hyd-R II

Prototip araçların büyük bir kısmında yüksek basınç altında sıkıştırılan hidrojenin kullanıldığı görülmektedir.

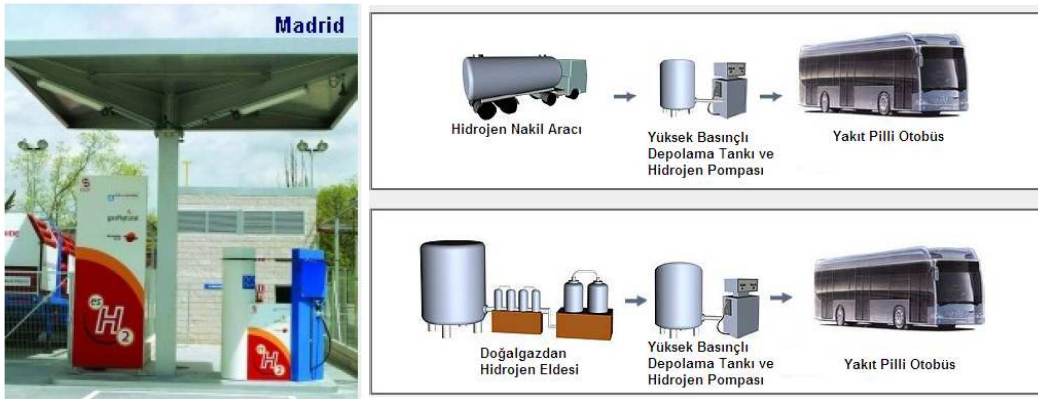
Rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinin yanında hızlı gelişim gösteren diğer bir alternatif enerji kaynağı hidrojenidir.

Hidrojenin alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmasında en yoğun çalışma otomotiv sektöründe yapılmaktadır. Bu kapsamda hemen hemen tüm otomotiv firmaları hidrojen ile çalışan hibrit araç prototipleri üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Hatta birçok ülkede hidrojen ile çalışan araçlar trafiğe çıkmış vaziyettedir. Bununla ilgili gerekli tüm yasal düzenlemeler yapılmış ve akaryakıt istasyonlarında hidrojen ikmal bölümleri bulunmaktadır. Bu araçların içinde toplu taşımada kullanılan otobüslerin çoğunlukta olması dikkat çekmektedir. Mercedes firmasının geliştirdiği hidrojen ile çalışan 27 adet otobüs, 9 Avrupa ülkesinde kullanılmaktadır. Bu otobüsün üzerine paralel olarak batarya şeklinde sabitlenmiş 9 adet tankın toplam hidrojen depolama kapasitesi 47 kg - 205 litredir. Tanklar, 350 bar çalışma basıncına sahip ve alüminyumdan imal edilen kompozit ürünlerdir. Şekil 1.17' de hidrojen ikmal istasyonu ile ilgili bir örnek sunulmuştur. Donanım olarak diğer yakıtların ikmal istasyonlarına göre yatırım maliyetleri yüksektir. İstasyonda sudan elektroliz ile hidrojen üretimi ve yüksek basınçta depolanması ile pompadan kullanıcıya iletimini içeren bir proses bulunmaktadır [85].



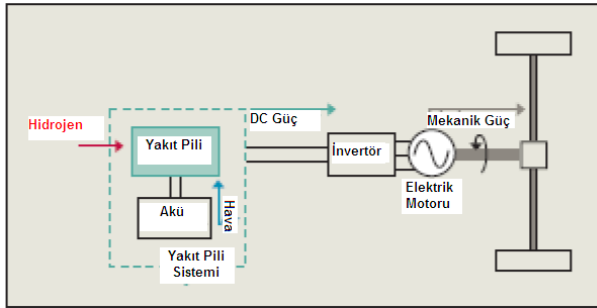
Şekil 1.17. Hidrojen ikmal istasyonu genel görünüşü [85]

Şekil 1.18' de Madrid' te kurulu bir ticari ikmal istasyonunun genel görünüşü verilmiştir.



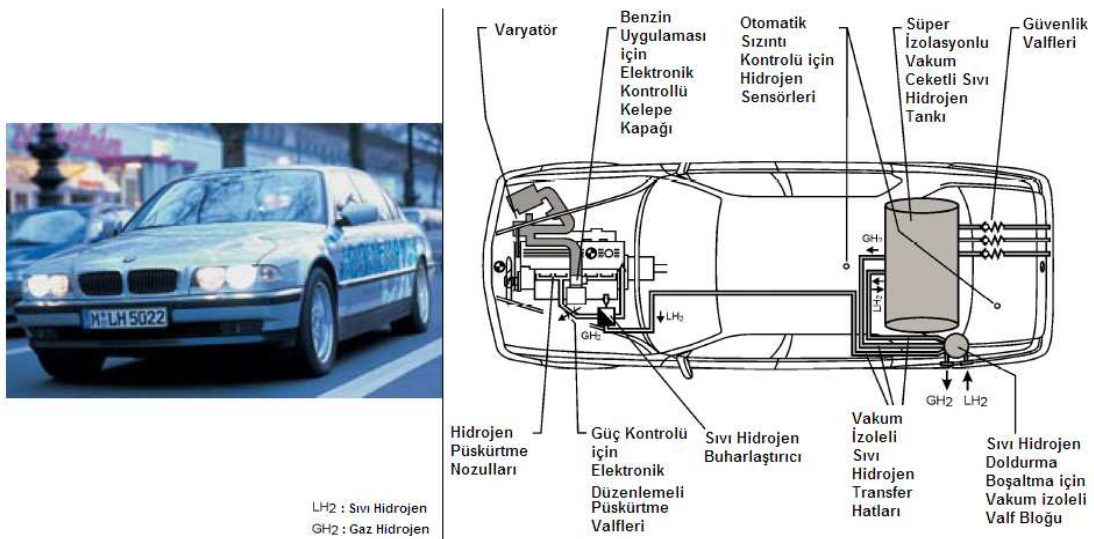
Şekil 1.18. Madrid’ te kurulu bir ticari ikmal istasyonunun genel görünüşü [85]

Şekil 1.19’ da prototip bir araçta yakıt pili sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



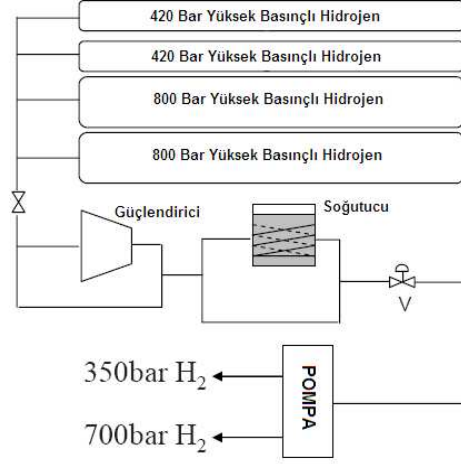
Şekil 1.19. Araçlarda yakıt pili sistemi [85]

Şekil 1.20’ de sıvı hidrojen ile çalışan bir araç ve araç yakıt sisteminin şematik görünüşü sunulmuştur.



Şekil 1.20. Sıvı hidrojen ile çalışan bir araç yakıt sisteminin şematik görünüşü [85]

Şekil 1.21’ de hem 350 bar hem de 700 bar pompası olan tam otomatik bir ikmal istasyonu görülmektedir.



Şekil 1.21. Tam otomatik çift basınçlı ikmal istasyonu [85]

Japon otomotiv firmaların örnek prototip araçları ve özellikleri Tablo 1.5’ te sunulmuştur.

Tablo 1.5. Japon otomotiv firmalarının hidrojen ile çalışan prototip araçları ve özellikleri [85]

	Araç Marka - Model	Toyota FCHV
	Araç Tipi	Küçük Yolcu Aracı
	Uzunluk Genişlik Yükseklik	4735x1815x1685
	Yolcu Kapasitesi	5
	Maksimum Hız	155 km/h
	Menzil	300 km
	Motor (Max. Çıkış)	80 kW
	Yakıt Pili	Toyota FC Stack
	Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü	Polimer Elektrot (90 kW)
	Yakıt Cinsi	Saf Hidrojen
	Yakıt Depolama	350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar
	İkincil Batarya	Nikel Metal Hidrit
	Araç Fiyatı	1,200,000 JPY
		Araç Marka - Model
Araç Tipi		Küçük Yolcu Aracı
Uzunluk Genişlik Yükseklik		4465x1765x1790
Yolcu Kapasitesi		5
Maksimum Hız		125 km/h
Menzil		-
Motor (Max. Çıkış)		58 kW
Yakıt Pili		Katı Polimer Elektrotlu
Yakıt Depolama		350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar
Depolama Bataryası		Lityum-ion
		Araç Marka - Model
	Araç Tipi	Küçük Yolcu Aracı
	Uzunluk Genişlik Yükseklik	4165x1760x1645
	Ağırlığı	1680 kg
	Yolcu Kapasitesi	4
	Maksimum Hız	150 km/h
	Menzil	355 km
	Motor (Max. Çıkış)	60 kW
	Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü	Polimer Elektrot (78 kW)
	Yakıt Cinsi	Sıkıştırılmış Hidrojen
	Yakıt Depolama	350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar
	İkincil Batarya	Ultra Kapasitör
	Araç Maliyeti	800,000 JPY

Tablo 1.5. (Devamı)

	Araç Marka - Model	Daimler Chrysler – F-Cell
	Araç Tipi	Mercedes Benz A Sınıfı
	Uzunluk Genişlik Yükseklik	3785x1720x1590
	Maksimum Hız	140 km/h
	Menzil	150 km
	Motor (Max. Çıkış)	65 kW
	Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü	68,5 kW
	Yakıt Depolama	350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar
	İkincil Batarya	Nikel Metal Hidrit
		Araç Marka - Model
Araç Tipi		K Sınıfı
Uzunluk Genişlik Yükseklik		3395x1475x1705
Yolcu Kapasitesi		4
Maksimum Hız		105 km/h
Menzil		120 km
Motor (Max. Çıkış)		32 kW
Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü		Polimer Elektrot 30 kW
Yakıt Depolama		Yüksek Basıncılı Tanklar
Yakıt		Sıkıştırılmış Hidrojen Gazı
	Araç Marka - Model	Suzuki – wagonR-FCV
	Araç Tipi	K Sınıfı Yolcu Aracı
	Uzunluk Genişlik Yükseklik	3395x1475x1680
	Maksimum Hız	110 km/h
	Menzil	130 km
	Motor (Max. Çıkış)	33 kW
	Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü	FEFC 50 kW
	Yakıt Depolama	350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar
	Yakıt Tipi	Sıkıştırılmış Hidrojen Gazı
		Araç Marka - Model
Uzunluk Genişlik Yükseklik		3395x1475x1680
Maksimum Hız		140 km/h
Menzil		150 km
Yakıt Pili		PEFC
Yakıt Pili Max. Çıkış Gücü		68 kW
Yakıt Cinsi		Sıkıştırılmış Hidrojen
Yakıt Depolama		350 Bar Yüksek Basıncılı Tanklar

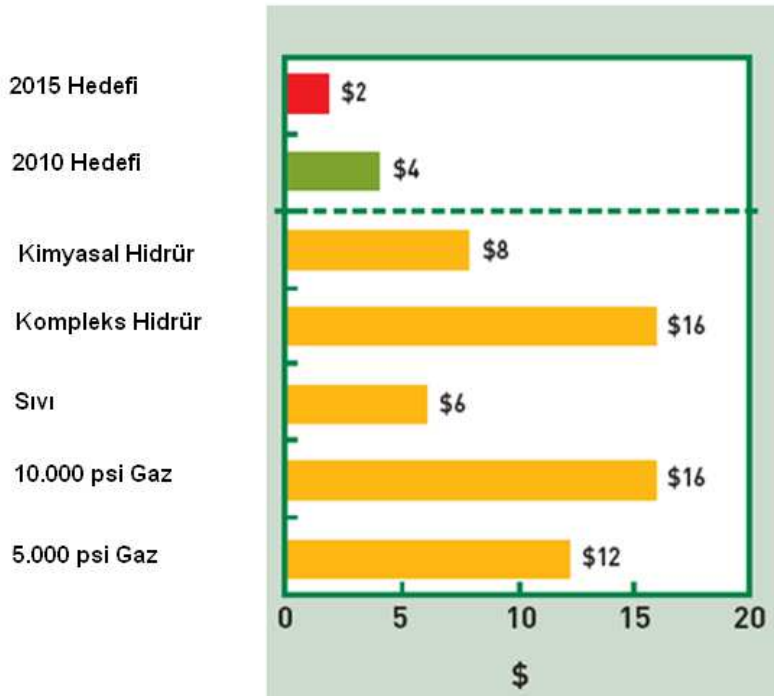
1.2.5. Hidrojen depolama metotları

Günümüzde bilinen hidrojen depolama yöntemleri şunlardır;

- Yüksek basınçlı gaz tankları,
- Kriyojenik tanklarda sıvı hidrojen (21 K' de),
- Malzemelerin özel geniş alanlarına hidrojen emdirme (100K' den düşük sıcaklıklarda),
- Metalin atomları arasındaki boşluklara emdirme (ortam basıncı ve sıcaklığında),
- İyonik ve kovalent bileşiklerde kimyasal bağlanma (ortam basıncında),
- Su ile Li, Na, Mg, Al, Zn gibi reaktif metallerin oksidasyonudur.

Bu hidrojen depolama tekniklerinin birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri olmasına rağmen en önemli belirleyici kriter ise hidrojen enerjinin elde edilme maliyetidir. Tablo 1.6' da belirli yöntemler ile hidrojen depolamanın maliyetleri gösterilmektedir.

Tablo 1.6. Her bir kWh için maliyet (\$/kWh) [90]

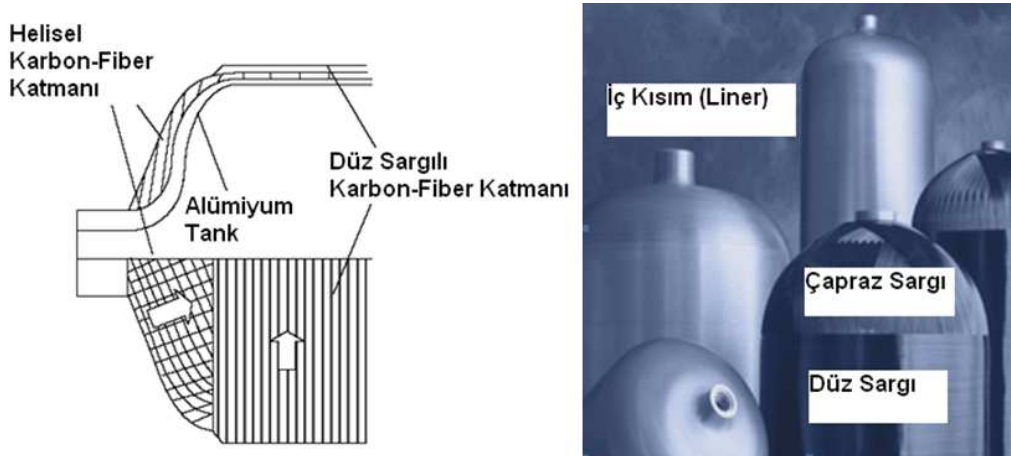


1.2.6. Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankları

Yüksek basınca dayanıklı hidrojen tanklarının genel olarak yapıları iç bir metalsel malzeme ve üzerinde düz veya helisel tipte çoğunlukla karbon elyaf takviye tabakalarından oluşmaktadır.

Kompozit hidrojen tanklarının sargı malzemeleri ve iç kısmı oluşturan metalsel kısmın malzemeleri ve tankın formu farklılıklar göstermektedir. Genellikle liner olarak 6000 serisi alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. Bu tez ve Santez-123 projesi kapsamında çalışma basıncı 700 bar olan yüksek basınçlı kompozit hidrojen tüpü geliştirilmiştir.

Hidrojenin 350-700 bar altında depolandığı tankların imalatı oldukça güçtür. Ülkemizde ilk kez bu tez ve Santez-123 projesi kapsamında geliştirilen yüksek basınca dayanıklı hidrojen tanklarının genel olarak yapıları; iç bir metal malzeme ve üzerinde düz veya helisel tipte çoğunlukla karbon elyaf takviye tabakalarından oluşmaktadır. Gaz formunda yüksek basınç altında hidrojenin depolandığı tankların genel görünüşleri Şekil 1.22' de gösterilmiştir.



Şekil 1.22. Yüksek basınca dayanıklı kompozit hidrojen tankının genel görünümü [96,97]

Yüksek basınçlı tanklar dört kategoriye ayrılmıştır;

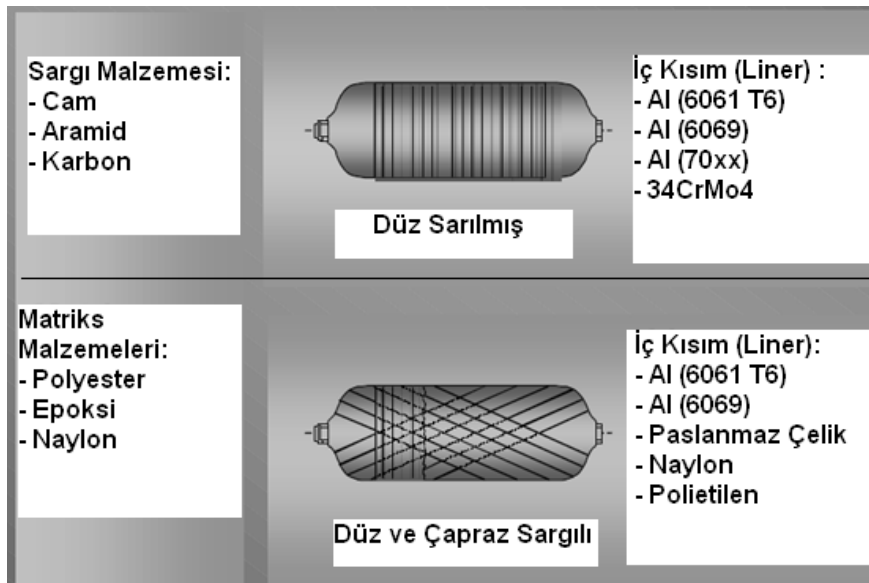
Tip 1 : Tamamen metalsel tanklar,

Tip 2 : Genellikle cam yünü sargılı metalsel tanklar,

Tip 3 : Başlangıçta cam elyaf daha sonra karbon lifinden oluşan kompozit malzemeli metalsel bir i kısma sahip tanklar,

Tip 4 : Temel olarak karbon lifli kompozit tanklardır (iç kısmı çoğunlukla termoplastik polimerlerden oluşmaktadır).

Kompozit tanklarda birçok farklı yöntem ile ‐liner‐ olarak adlandırılan iç kısım elde edilmektedir. Bu i kısmın üretilmesinde derin çekme, ekstrüzyon, presleme, flow-forming yöntemleri temel olarak kullanılmaktadır. Yöntem seçimi tankın formuna bağlıdır. Tank elde edildikten sonra üzerine karbon lifi/elyaf glass takviye sargı katmanı uygulanmaktadır. Böylece tankın mukavemeti artırılmaktadır. Kompozit hidrojen depolama tanklarında kullanılan malzemeler ve sargı Şekilleri Şekil 1.23' te ve Şekil 1.24' te gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Kompozit hidrojen tanklarında genel olarak kullanılan malzemeler [86]



Şekil 1.24. Alüminyum tank üzerine karbon lifi takviyesinin sarılması [91]

1.3. Tezin amacı ve kapsamı

Tezin temel amacı, dikişsiz hidrojen depolama tankı prototipinin üretimini yapmak, mekanik özelliklerini belirlemek ve bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi ile modellemektir. Bu tezin bir kısım çalışmalarında tankın imalatı ile ilgili farklı alüminyum serilerinin (AA6061, AA6063, AA6082) denenmesi, sonlu elemanlar analizi (ANSYS) yardımı ile elde edilen formun basınç testleri, mekanik ve tahribatsız deneyler (NDT) gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, tankların imalatında kullanılan 6000 serisi Al Mg Si alaşımı olan 6061, 6063 ve 6082 malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar destekli olarak (ANSYS) yüksek basınç altındaki davranışları incelenmiştir. Her bir alaşım için üretilen prototiplerin hidrostatik basınç testleri yapılmış ve elde edilen ANSYS sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada öncelikle 3 farklı alaşım türü için 3 farklı ısıl işlem durumunun incelenmesi amacıyla 9 adet farklı prototip tüp üretilmiştir. Bu tüplerin bilgisayar ortamında modellemeleri yapılarak analizlere tabi tutulmuştur. Üretilen bu numuneler daha sonra hidrostatik basınç testlerine tabi tutularak patlatılmıştır. Elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan sonlu elemanlar analizi için tanklardan çekme numuneleri çıkarılmış ve şekillendirilmiş tüpün kesitindeki akma eğrileri elde edilmiş ve

programa bu veriler girilmiştir. Çalışmanın amacı, en ideal alaşım türü ve ısıl işlem durumunu tespit etmektir.

1.3.1. Kullanılan yöntemler

Bu çalışmada öncelikle liner olarak 3 farklı 6000 serisi alüminyum malzeme için numune tanklar üretilmiştir. Bu numuneler ısıl işlemsiz, T4 ısıl işlemlili ve T6 ısıl işlemlili olarak 9 farklı şekilde oluşturularak, her bir numuneden 3 farklı çekme numunesi çıkarılmıştır. Toplam 27 çekme deneyi ile elde edilen mekanik özellikler bilgisayar ortamında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Liner tanklar hidrostatik basınç testine tabi tutulmuş ve sonuçları ANSYS ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar özetle şu şekildedir;

- 3 farklı alaşım ve 3 farklı ısıl işlem durumuna göre prototiplerin üretilmesi (Elimsan – Kocaeli),
- Çekme deneylerinin yapılması (SAÜ Metalurji Malzeme Müh. Lab.),
- Mikro sertlik ölçümlerinin yapılması (Vickers - SAÜ Metalurji Malzeme Müh. Lab.),
- Mikroyapıların incelenmesi (Optik Mikroskop) (TÜBİTAK - SAÜ Metalurji Malzeme Müh. Lab.),
- XRD analizlerinin yapılması (SAÜ Metalurji Malzeme Müh. Lab.),
- ANSYS analizlerinin yapılması,
- Hidrostatik Basınç testlerinin yapılması (Aygaz – Gebze Tesisleri),
- Kesitteki et kalınlığı dağılımı koordinat ölçüm cihazı ile tespit edilmesi (Anadolu Rulman-Bolu),
- Sıvı Penetrant testlerinin yapılması (Deka Test – İstanbul),
- X-Ray ile radyografik muayeneler yapılması (Deka Test – İstanbul),
- Brinell sertlik ölçümlerinin yapılması (Deka Test – İstanbul),
- Boyuna doğrultuda ultrasonik kalınlık ölçümleri yapılması (Deka Test – İstanbul),
- Yüzeydeki derin hataların incelenmesi (Elimsan – Kocaeli),
- Matematiksel modelleme.

1.3.2. Beklenen ve elde edilen sonuçlar

Temel enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, petrol ve günümüzde ağırlıklı olarak kullanılan doğalgaz gibi fosil yakıtların rezervleri azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların çevreye verdikleri zarar sebebiyle, hidrojen enerjisi fosil yakıtlara alternatif olarak düşünülmektedir. Hidrojenin üretimi, depolanması ve elektrik enerjisine çevrilmesinin zorlukları mevcuttur. Bugün aşılammış teknolojik sorunlar, hidrojenin yaygın olarak kullanımını geciktirmektedir. Hidrojenin depolanması Hidrojen enerjisi teknolojilerinin gelişimde önemli bir konudur. Hidrojen hacimce enerji yoğunluğu düşük bir yakıttır. Hidrojen enerjisinin günümüz teknolojilerinin ihtiyaç duyduğu enerji miktarını karşılayabilmesi ve fosil yakıtların karşısında ekonomik ve fiziksel açıdan kabul edilebilir performanslara erişmesi için depolama teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Depolama yöntemlerinden günümüzde en yaygın olarak kullanılanı yüksek basınçlı tanklarda hidrojenin depolanmasıdır. Gaz ve sıvı fazlarda hidrojen depolanmaktadır. Hidrojen enerjisinin fosil yakıtlar karşısında avantajlı duruma gelebilmesi için 1500-1600 bar patlatma basıncına (kullanım basıncı 700 bar) dayanıklı, güvenlik standartlarına uygun, ideal boyutlarda ve ağırlıkta, ekonomik tanklara ihtiyaç vardır. Bu basınçlara erişebilmek için kompozit tankların geliştirilmesi hidrojen depolama açısından çok önemlidir.

Güvenlik standartlarına uygun, düşük ağırlıkta ve yüksek hidrojen taşıma kapasitesine sahip kompozit malzemelerden oluşan hidrojen depolama tanklarının geliştirilmesi ve ekonomik şekilde üretilmesi önem kazanmıştır. Araştırmaların bu yönde geliştirilmesi ile hidrojen gazının sıvı fazda depolanmasının, iletilmesinin ve ekonomik olarak kullanılmasının yarar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu amaçlara ulaşabilmek için hidrojen gazının depolanmasıyla ilgili teknolojinin dünya çapında geliştirilmesi önem kazanmıştır. Bu tez ile, ileri teknoloji, yüksek basınca dayanıklı hidrojen depolama tanklarının Türkiye’de üretilmesi amaçlanmıştır.

Hidrojenli araç tasarımı konusunda dünyada ileri teknoloji uygulayan ve geliştiren ülkelerde projeler tamamlanmış ve pilot uygulamalar Japonya, Almanya Federal Cumhuriyeti (AFC) ve ABD’de başlatılmıştır. Fosil yakıtların rezerv miktarlarının

azalması ve fiyatlarının yükselmesi nedeniyle önümüzdeki yıllarda hidrojen yakıtlı araçların piyasaya sürülmesi planlanmıştır. Bugün, Kanada, ABD ve Avrupa'daki firmalar, üretiminde özel metotların ve ileri teknolojilerin uygulandığı hidrojen yakıt tanklarının imalatına başlamışlardır. Hidrojen enerjisine verilen önem nedeniyle Türkiye'de de önemli hidrojen enerjisi uygulamalarının başırlacağı değerlendirilmektedir. Bunun yanında, otomotiv endüstrisinde, soğutmada, hastanelerde ve hibrit teknoloji uygulamalarında kullanılmak üzere 1600 bar'a kadar dayanıklı metal ve kompozit malzeme kullanımıyla ileri teknoloji kompozit tüp kullanımının, yararlı olacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, hidrojen enerjisinde geri kalmamak için İstanbul, Ankara, Eskişehir ve muhtelif belediyelerde başlatılmış olan doğalgazlı araç projelerinde kullanılmak üzere ar-ge destekli endüstriyel ileri teknoloji kompozit tüplerin geliştirilmesi zorunlu görülmektedir. Doğalgazın meyilli yollarda araç performanslarında yeterli olamadığı bilinmektedir. Bu amaçla sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) ve hidrojen gaz karışımı bir sistemin araçlarda kullanılması düşünülmektedir. Bunun yanısıra sıkıştırılmış hidrojenin kullanıldığı hibrit araçlar yakın bir gelecekte yüksek miktarda hidrojen tüplerine olan ihtiyacı arttıracaklardır.

Türkiye'de yenilenebilir enerjilerin elde edilmesi ve geliştirilmesi teşvik edilmektedir. Gelecek yıllarda rüzgar ve hidrolik enerjilerde üretim sağlanacak, fakat bu enerjilerin depolanmasında güçlük çekilecektir. Bu tüpler yardımı ile arz fazlası enerjinin depolanması ve bu enerjinin yurt dışına satışı mümkün olabilecektir. Şu anda Türkiye'de enerjinin depolanması ve ekonomik olarak kullanımı mümkün olmamaktadır. Bu proje ile imal edilecek ürünler sayesinde bu mümkün olabilecektir.

Hidrojen depolanma amacıyla kullanılacak olan bu tüpler aynı zamanda evlerde ve araçlarda kullanılacak yakıt hücrelerinin (fuel cell) ayrılmaz bir parçası olacaktır. İleri teknoloji gerektiren uydu ve uzay uygulamalarında kullanılan yakıt hücreleri için de ileri teknoloji kompozit hidrojen tankları kullanılmaktadır.

Denizaltılarda deniz üzerine çıkıp hava-oksijen alma (şinorkel) zamanının uzatılması, kullanılacak olan yakıt hücrelerine ve hidrojen yakıt tüplerine bağlıdır. Dünyada ileri

teknoloji ürünü tüm denizaltılarda yakıt hücresi sistemine geçilmektedir. Ülkemizde de bu önemli bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Yerli üretim yakıt hücrelerinin modernizasyon projelerinde kullanılması planlanmaktadır.

Türkiye’de ve bölgemizde hidrojen gazının kullanıldığı tüm uygulamalarda yüksek basınçlı ileri teknoloji kompozit tüplere ihtiyaç vardır.

Gelecekte enerji depolanması, yüksek basınca dayanıklı, ileri teknoloji kompozit hidrojen tüpleri sayesinde mümkün olacaktır. Hem Türkiye’de hem de dünyada bu tüplere büyük bir ihtiyaç vardır.

Çalışmanın Ar-Ge niteliği ve teknolojik yönüne ilişkin değerlendirmeler:

- 1600 bar patlatma basıncına dayanıklı hidrojen tankı üretimi Türkiye’de mevcut değildir. Alüminyum tüp imalatı ve kompozit sargı takviyesi ile söz konusu 700 bar kullanma ve 1600 bar patlatma basıncına dayanıklı hidrojen tanklarının üretimi Ar-Ge çalışmasıyla sağlanmıştır.

- Çalışmanın önemli bir adımı, sızdırmazlığı sağlayan alüminyum tüpün yüksek mukavemet özelliklerinde ve kullandıkça mukavemeti artan bir malzemeden seçilmesidir. Türkiye’de ilk defa hidrojen tüpü imalatında alüminyum alaşımı malzeme kullanılmıştır.

- Yüksek mukavemetli alüminyum malzemenin standart üretiminde ve bu malzemenin yüksek basınçta dövülmesinde ve şekillendirilmesinde sanayide problemlerle karşılaşmaktadır. Kalıp ve dövme malzemesi çelik ve alüminyum, dövme esnasında uyumlu ve uzun ömürlü olmamaktadır. Yüksek sıcaklıkta dövme, plastik deformasyon ve sıvama işlemi özel çalışma, inceleme ve araştırma gerektirmektedir. Bu çalışma ile söz konusu endüstride karşılaşılan teknik sorunlara da çözüm bulunabilmiştir.

- Hali hazırda yüksek basınç tüpler çelik malzemeden yapılmaktadır. 12 mm'ye kadar dikiş kaynaklı çelik tüpler ile 250 bar basınca dayanıklı çelik LPG ve CNG depolama amaçlı tüpler üretilmektedir. Bu çalışma 1600 bar patlatma basıncına dayanıklı hafif tüpler yapılmıştır.

- Binek araçlarda kullanılacak tüp standartları incelenmiştir. Tüp tasarımı kompozit olarak yapılmıştır. Tüpteki maksimum ve minimum gerilme analizi hesaplamaları yapılmıştır. Emniyetli prototip dizayn edilmiştir. Prototip tüpün imalat aşamaları modellenmiştir. Prototip üretilmiş ve basınç deneyleri çalışma basıncı testi, patlatma testi yapılmıştır.

- 1600 bar patlatma basıncına dayanıklı hidrojen depolama tüpü üretimine ilişkin Türkiye'de bir patent müracatı olmadığı değerlendirilmektedir. Bu proje 1600 bar patlatma basınçlarında hidrojen tüpü, vanası, bağlantıları üretmek üzere yeni patentler alınmasını sağlamıştır.

- Bu tez kapsamında enerji sistemlerinin geleceği olarak görülen hidrojen enerjisine dayalı sistemler incelenmiştir. Sistemlerin gelişmesiyle ülkeler bu sistemlere yaptıkları yatırımları arttırmışlar, bu sayede verimli sistemlerle dünya hidrojen enerjisi ekonomisinden pay almak için hızla girişimlere başlamışlardır.

- Gerçekleşen tez çıktısının ulusal pazarda örneği bulunmamaktadır. Uluslararası pazarlarda üretilen benzerleri ile üretim yöntemi ve teknolojiler açısından uyum mevcuttur.

- Bu tez hidrojenin depolanması için geliştirilen prototip tank üretimine ilişkin bir çalışmadır. Hidrojen tüplerine olan ihtiyacın fazlalığı nedeniyle, dünya pazarında ve Türkiye'de artan bir pazar talebiyle karşılaşılması beklenmektedir.

- Taşıma sistemlerinde enerjinin depolanmasının önemi dolayısıyla depolama sistemleri içinde kompozit tankların yeri önem kazanmaktadır. Ülkemiz hidrojen enerjisinin taşınması ve depolanmasında standartların belirlenmesinde söz sahibi

olacak, hidrojen enerjisinin alüminyum ve petrol ürünü kompozit tanklarda depolanması konusunda bu teknolojiye sahip dünyadaki sayılı ülkeler arasındaki yerini alacaktır. Bu projenin gerçekleştirilmesiyle Ortadoğu ve Avrupa'daki büyük pazarlarda söz sahibi olunacak ve bu proje ürünlerinin getirisi ülkemizin en önemli katma değerlerinden biri olacaktır.

- Türkiye'de 2007 yılı içinde on milyon kayıtlı araç sayısına ulaşılabacaktır. Bunun iki milyonu İstanbul'da trafiğe çıkmaktadır. Bu araçlarda kullanılan benzin yakıtının miktarının ve fiyatının artması ve fosil yakıt miktarının azalması sonucunda bunların maliyetlerindeki yükseliş nedeni ile LPG, CNG ve Hidrojen gibi alternatif yakıtlara yönelim artmaktadır. Türkiye'de her yıl 1.000.000 araç üretilmektedir. Bunların %5'inde alternatif yakıt kullanılması durumunda, ve her araçta 3 küçük tüp (çap 100 mm., boy 700 mm.) kullanıldığında her sene 150.000 tüpe gereksinim olacaktır. Japonya'daki, Brezilya'daki, ABD'deki otomotiv sanayiilerinde senede birkaç milyon hidrojen tüpüne ihtiyaç olduğu yönünde projeksiyonlar yapılmaktadır. Dünyada sınırlı sayıda üretici, bu ihtiyaçlara cevap verecek kapasiteye sahip olup yüksek fiyat ile ürünlerini pazara sunmuşlardır. Bu çalışmalar ile ülkemizde mevcut teknolojik altyapılar daha ileri seviyelere taşınacak, bunu yaparken de ulusal ve uluslararası pazara ürünler sunulacaktır. Hidrojen kullanımı ile temiz yakıt kullanımına da katkı sağlanacağı ve CO₂ emisyonunun azaltılacağı değerlendirilmektedir.

- Bu konudaki bilginin artması ve üretim teknolojilerinin geliştirilmesi önemli olacaktır. Üretim sorunlarına bulunacak çözümlerle ülkemizde yapılan çalışmalara teknolojik ve ekonomik katkı sağlanmış, bu alanda bilimsel, teknolojik katma değer oluşturulmuştur.

- Prototip tüplerin üretimi gerçekleştirilmiş, kullanım yerlerinde denenmesi ise 2 yıl içerisinde gerçekleştirilecektir. Ürünün mevcut pazarı her geçen gün büyümektedir. 2 yıl sonra ürünle ilgili hem Türkiye'de, hem de dünyada talep artışı olacağı değerlendirilmektedir.

- Hibrit araçların 2009 yılında %5, 2010 yılında %10 iç ve dış otomotiv pazarında pay alacağı; Türkiye’de 2009 yılında (1000000 araç 3 tüp %5) 150.000 hidrojen tüpüne ihtiyaç olacağı, sektörün, Türkiye pazarında 75.000.000 TL., dünya pazarındaki ise 75.000.000.000 TL. ciroya ulaşacağı değerlendirilmektedir.

- Otomotiv sanayisinde kullanılan tüplerin dünya pazarlarında tanesi 500 TL.’den pazar bulduğu görülmüştür. Türkiye’de yılda 150.000 adet hidrojen tüpü üretildiğinde dünya pazarlarında verimlilik ve rekabet gücüne erişilebilecektir. Yılda 150.000 hidrojen tüpü üretimi, ülkede bu sektörde 500 kişilik bir istihdam yaratabilecektir.

- Bu çalışma ile Büyükşehir Belediyeleri’nde kullanılan CNG ve LPG tüplerinin ileri teknoloji ile üretimi sağlanabilecektir. Bu proje ile beraber söz konusu CNG ve LPG projelerinde de tüplerin daha hafif üretilmeleri için Ar-Ge çalışmaları başlatılacaktır.

- Ulusal kaynaklardan elde edilen 6000, 7000 serisi alüminyum üretimine katkı sağlanmıştır.

- Üretim ve Ticari Tahminler:

(1) 2009 yılında Türkiye’de 50.000 adet binek aracının 150000 adet hidrojen tüpüne ihtiyaç olacağı düşünülmektedir. 2010 yılı için Türkiye’de 300000 adet hidrojen tüpüne ihtiyaç olacağı değerlendirilmektedir.

(2) Pazar payında her yıl artış beklenmektedir.

(3) Bu proje ile beraber yılda 75.000.000 TL. ithal ikame sağlanmış olacaktır [1].

BÖLÜM 2. PROTOTİP İMALATI

2.1. Giriş

Hidrojenin depolanmasında alüminyum iç kısma sahip kompozit sargılı tüpler kullanılmaktadır. Yüksek basınca dayanıklı bu tüplerin imalatında alüminyum iç kısmın dikişsiz olarak üretilmesi mukavemet açısından son derece önemlidir. Dikişsiz bu tüplerin 6000 serisi alüminyum alaşımından 3 farklı ısıl işlem durumuna göre üretilmesi gerekmektedir. Tezin amacı bu prototip tanklar ile ilgili en uygun alaşım ve ısıl işlem türünü seçmektir. Dikişsiz tüp üretimi 3 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Uluslar arası uygulamalarda tüpün üretimi için flow-forming ve necking-in yöntemleri kullanılmaktadır. Öncelikle flow forming ile malzemenin boyuna uzaması esnasında yönlendirilmiş kristal yapı sayesinde mukavemetinin artırılması sağlanmakta, necking-in yöntemi ile de tüpün boyun kısmı şekillendirilmektedir. Tez kapsamında farklı bir yöntem ile dikişsiz tüplerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde prototip imalatı aşamaları detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2. Prototip İmalatı

Yüksek basınca dayanıklı hidrojen tankları seri imalatta flow-forming yöntemi ile üretilmektedir. Fakat bu çalışmada makine yatırım maliyetinin yüksek oluşundan dolayı prototip tank elde etmek için sıvama, ekstrüzyon ve kalıplar arasında pres yardımı ile uç kapama işlemlerinde oluşan imalat tekniği kullanılmıştır. Öncelikle içi dolu silindir şeklindeki malzeme tavlama fırınında bekletilerek şekillendirme sıcaklığına getirilmektedir. Daha sonra Şekil 2.1' de görüldüğü gibi kalıplar arasında ilk şekil verilerek içi boş bir silindir şeklinde form oluşturulmaktadır. Bu aşamada

takoz dişi kalıp içerisine yerleştirilmekte ve erkek kalıp strok boyunca aşağıya doğru hareket ermeye başlamaktadır.



Şekil 2.1. Hidrolik pres yardımıyla içi dolu silindirden içi boş kap şeklinde silindir elde edilmesi [98]

Dişi kalıp içerisindeki malzeme erkek kalıbın baskı kuvveti ile erkek kalıp üzerine sıvanmaktadır. İlk aşamada pres yardımı ile dolu malzemedeki içi boş bir taslak silindir malzeme elde edilmektedir. Bundan sonraki aşamada Şekil 2.2’ de görüldüğü gibi boy uzatma işlemi ile cidar kalınlığı azaltılarak tankın boyu uzatılmaktadır.



Şekil 2.2. Boy uzatma işleminin görünüşü

Bu aşamada tank dış kesitten bir miktar daha düşük ölçüdeki matristen geçmeye zorlanmaktadır. Kuvvet etkisi ile malzeme geriye doğru akmaya (indirek flow-

forming) başlamaktadır. Böylece malzeme kesiti azalmasına karşın tankın boyu uzamaktadır. Şekil 2.3' te görüleceği üzere ilk şekillendirme (preste) ile ikinci şekillendirme (indirek flow-forming) işleminden sonra malzemenin cidar kalınlığı azalmakta fakat boyu ise yaklaşık olarak iki kat artmaktadır. Ayrıca malzemede yönlendirilmiş kristal yapı ve daha homojen hale gelmiş bir iç yapı elde edilmektedir.



Şekil 2.3. İlk şekillendirme ile ikinci şekillendirme işleminin karşılaştırılması

Son olarak boyu uzatılmış tankın kalıplar içerisinde pres yardımı ile uç kısmı büzülmemektedir. Bu büzme işlemi şekillendirme tamamlandı ve son bitirme işlemlerinin başladığı aşamadır. Şekil 2.4' de görüldüğü gibi kafa büzme işlemi esnasında malzemede kısmen buruşma görülmektedir.



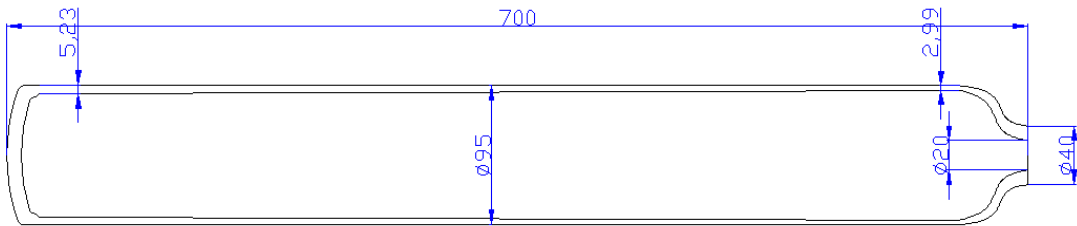
Şekil 2.4. Alüminyum hidrojen tankın uç kısmını büzme işlemi

Bu işlem aşamalarında bazı hatalar meydana gelmektedir. Özetle bu hatalar şu şekildedir;

Matriste boyu uzatılmaya başlanmadan önce tank, ilk şekillendirmeden sonra kalibre edilmektedir. Buna rağmen gerek malzemedeki heterojen yapıdan (kalıntılar, boşluklar, mekaniksel özelliklerdeki değişim v.b.) kaynaklanan gerekse matris ile erkek kalıp arasındaki boşluğun düzensiz olmasından dolayı malzeme uç kısmında farklı malzeme yığılmaları görülmektedir (Şekil 2.5). Uç formun fiziksel görünümü bize tankın tüm kesitindeki dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Prototip tankın teknik resimleri Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.5. Matristen çıkan malzemenin homojen akamamasının görünüşü



Şekil 2.6. Prototip teknik resimleri

Malzemenin ilk şekillendirilmesi esnasında tüm iç boşluklar ve kalıntılar tankın dip kısmında toplanmaktadır. Bu boşluklar 2. şekillendirme işlemi olan boy uzatmada

kendini daha belirgin olarak göstermektedir (Şekil 2.7). Bu hatayı önlemenin yolu ise daha saf bir hammadde ile çalışmaktır.



Şekil 2.7. Çatlak-iç boşlukların görünüşü

Kalıplarda ağızları büzülen tanklarda istenilen formun yakalanması oldukça güçtür. Isıtma yetersiz ve baskı kuvveti çok olursa tankın tamamında buruşma ve katlanmalar oluşmaktadır. Uç formun yeterli konikliğe sahip olmaması ve şekillendirme parametrelerinin uygun olmaması durumunda uç kısmın yırtıldığı ve düzensiz olarak kapandığı görülmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Yırtılma ve kapanma probleminin görünüşü

Prototip çalışmaları tamamlanmış AA6061, AA6063, AA6082 malzemelerden oluşturulmuş prototipler farklı ısıl işlemlerden geçirilerek mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Bu prototipler hidrostatik basınç testlerinde, mekanik testlerde,

tahribatsız deney yöntemlerinde ve mikroyapı incelemelerinde kullanılmıştır. Hazırlanan prototiplere ait görünüş Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Hazırlanan numunelere ait görünüş [99]

2.2.1. Tez kapsamında üretilen tüplerde depolanabilecek hidrojen miktarı

Artan basınç karşısında tüm gazlar sıkıştırılabilme özelliklerini kaybetme eğilimindedirler. Yüksek basınç altında sıkıştırılabilme zorluğu daha belirgin hale gelmektedir. Bu yüzden sıkıştırılabilme etkisini de göz önünde bulunduran hal denklemi iyi bir sonuç verir. Bu denklem;

$$P \cdot V_{\text{gaz}} = z \cdot R \cdot T \quad (3.1)$$

Burada;

P : Basınç

V_{gaz} : Belirli bir gaz hacmi

z : Sıkıştırılabilirlik faktörü

R : Gaz sabiti (hidrojen için: 4124.18 Nm/kg K)

T : Sıcaklık (Kelvin)' dir.

Ayrıca karakteristik gaz eşitliğine göre belirli bir hacimde, belirli bir sıcaklık ve basınç altında depolanabilecek bir gazın kütesinin hesaplanmasında aşağıdaki formülden yararlanılmaktadır;

$$P \cdot v = m \cdot R \cdot T \quad (3.2)$$

Denklem 3.2' ye göre;

P = Mutlak Basınç (Pa)

v = Hacim (m³)

m = Kütle (kg)

R = Gaz sabitesi (J/kg°K)

T = Sıcaklık (°K)

Hidrojen gaz sabitesi : R_{h2} = 4157 J/kg°K

Denklem 3.2' ye göre bu tez kapsamında üretilen prototip tankların içerisinde maksimum basınç (700 bar) değerinde aşağıdaki miktarda hidrojen depolanabilecektir.

P= 700x10⁵ (Pa)

Tank Çapı (D) = 0,09 m

Tank Boyu (L)= 0,7 m

v= 0,004451 m³

T= 296 °K

R_{h2} = 4157 J/kg°K

$$m = \frac{P \times v}{R \times T}$$

$$m = \frac{70.000.000 \times 0,004451}{4157 \times 296} = 0,25 \text{ kg}$$

Tez kapsamında üretilen prototip tankların her birinde 250 gram hidrojen depolanabilmektedir.

Bu tezin ana hedefini oluşturan hidrojen depolama tüplerinin üretiminde alüminyum malzeme üzerine yoğunlaşmıştır. Malzeme olarak daha hafif olan alüminyumda daha fazla miktarlarda hidrojen depolayabilmek amaçlanmıştır. Maliyet açısından son derece önemli olan gravimetrik yoğunluk açısından incelendiğinde alüminyum tüpün gravimetrik yoğunluğu çelik tüplere göre en az 2 kat daha fazladır. Tez kapsamında üretilen tüplerin sargı sonrası toplam ağırlığı 3,5 kg civarındadır. Buna göre 0,25 kg depo edilebilen bu tüpün gravimetrik yoğunluğu %7,14' tür. Mevcut teknolojiler için kabul edilebilecek ekonomik bir değere ulaşılmıştır. Çelik tüplerde bu değer %4-5 seviyelerinde sınırlı kalmaktadır.

Alüminyum tüpler ile elde edilen gravimetrik yoğunluk özelliğinin yanısıra başka iyi bir özellik ise malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetinin nispeten çeliğe göre daha fazla olmasıdır. Araçlarda kullanılması planlanan bu tüplerin çarpışma esnasında daha fazla enerji absorbe etmesi güvenlik açısından son derece önemlidir. Bu nedenle çalışma kapsamında tüp üretiminde alüminyum malzeme seçilmiştir.

2.2.2. Kullanılan alüminyum alaşımları

Alüminyumun fiziksel özellikleri çok az miktarda da olsa diğer elementlerin ilavesinden büyük ölçüde etkilenir.

Tablo 2.1'de % 99,995 saflıktaki alüminyumun özellikleri verilmiştir [100].

Tablo 2.1. Saf alüminyum özellikleri [100]

Özellik	Değer
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik (YMK)
Yoğunluğu	2,7 gr/cm ³
Ergime noktası	660 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150 °C – 300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 ³ MPa
Poisson oranı	0,33
Kayma modülü	27x10 ³ MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	%30-40

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi olan mekanik işlem (dövme) alüminyum alaşımlarını belirlemek için kullanılır. Dört basamaklı sayısal simgenin ilk rakamı alaşımın hangi temel alaşım elementini içerdiğini gösterir. Tablo 2.2’de gösterildiği gibi 1xxx serisi saf alüminyumunu ifade eder. Son iki basamak alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunu veya impurite sınırlarını gösterir. Mekanik işlem (dövme) alüminyum alaşım grupları Tablo 2.2’de verilmiştir [100].

Tablo 2.2. Mekanik işlem (dövme) alaşımlarının kodlama sistemi [100].

Alaşım Grubu	İçerik	Yaşlandırılabilme Kabiliyeti
1XXX	%99 veya daha fazla Al içerir.	Yaşlandırılmaz.
2XXX	Cu ana alaşım elementidir.	Yaşlandırılabilir.
3XXX	Mn ana alaşım elementidir.	Yaşlandırılmaz.
4XXX	Si ve Cu veya Mg ana alaşım elementidir.	Eğer Mg var ise yaşlandırılabilir.
5XXX	Mg ana alaşım elementidir.	Yaşlandırılmaz.
6XXX	Mg ve Si ana alaşım elementidir.	Yaşlandırılabilir.
7XXX	Zn ana alaşım elementidir.	Yaşlandırılabilir.
8XXX	Diğer elementler	-
9XXX	Yaygın olarak kullanılmayan seri	-

Alüminyum 6XXX alaşımlar, belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içermesi nedeni ile Mg_2Si çökeltisi oluşturur. İyi derecede dayanım ve korozyon direncine sahiptir. AA 6061 alaşımı ise, düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma dayanımına sahip, en yaygın kullanılan alaşımlardan biridir [100].

6XXX serisi son yıllarda kullanım alanı gittikçe artan alüminyum alaşımlarındandır. Yaşlanabilen alüminyum alaşımlarından olan AA6063 alüminyum alaşımı, şekillendirilme kabiliyeti yüksek, kaplanabilme özelliği ve ısı işlem ile mekanik değerleri önemli ölçüde iyidir.

Ayrıca bu alaşım genel olarak Al-Mg-Si alaşımıdır. AA6063 malzemesinin kullanım alanları, inşaat/mimari (cephe kaplama, pencereler, kapılar, dekorasyon, mobilya), otomotiv (iç ve dış gövde panelleri tampon takviyeleri, koltuk kızıakları), elektrik/elektronik ve makine imalat sektörleridir. Alüminyum 6063 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 2.3' te verilmiştir [100].

Tablo 2.3. AA 6063 malzemesinin kimyasal kompozisyonu [100]

Element	Miktar (%)
Si	0,20-0,60
Mg	0,45-0,90
Fe	0,35 maksimum
Ti	0,10 maksimum
Cr	0,10 maksimum
Cu	0,10 maksimum
Mn	0,10 maksimum
Diğer	Her biri %0,05, toplam 0,15 maksimum

Alüminyum alaşımlarının sembolleştirilmesi

Alüminyum alaşımlarının sembolleştirilmesi, alaşım elementlendirme sisteminden daima bir harf ilavesiyle ayırt edilir. Bundan başka bazı işaretler sadece dövme mamüllere, bazıları yalnız dökme mamüllere, bazıları da her ikisine tatbik edilmiş

olduğunu gösterir. Alüminyum alaşımlarına mekanik veya ısı işlemlerin ya da her ikisinin uygulanması, alaşımın temper durumunu belirtir. Temper durumunun gösterilişi döküm ve mekanik işlem (dövme) alaşımları için aynıdır. Temper simgesi alaşım kodundan sonra gelir ve birbirinden (-) ile ayrılır. Değişik temper işlemleri varsa temperi ifade eden ana harf yazıldıktan sonra, temper işlemleri yapılış sırasına göre yazılır. Temper işlemleri F, O, H, W ve T harfleri ile ifade edilir [100].

Temel temper tasarımları

F, Üretildiği şekilde; üzerinde hiçbir işlem yapılmamış işlem ve dökümleri için kullanılır.

O, Tavlanmış ve yeniden kristalleştirilmiş; en düşük dayanım ve en yüksek sünekliğe sahip döküm ürünler için kullanılır.

H, Soğuk işlem ile sertleştirilmiş (yalnız işlem alaşımları için); soğuk işlemle deformasyon işlemine tabi tutulmuş alaşımı ifade eder [100].

Soğuk işlem ile sertleştirilmiş alt bölümler

Soğuk işlem ile sertleştirme aşağıdaki harf ve rakamlar ile ifade edilmektedir;

H1 : Sadece soğuk işlem ile sertleştirilmiş.

H2 : Soğuk işlem ile sertleştirilmiş ve kısmen tavlanmış.

H3 : Soğuk işlemle sertleştirilmiş ve kararlı yapılmış [100].

Isıl işlem uygulanmış alt bölümler

Isıl işlem uygulanmış alaşımların harf ile gösterimleri aşağıdaki gibidir.

W, solüsyona alma ısı işlemi görmüş kararsız bir temper işlemidir. Yalnızca solüsyona alma ısı işleminden sonra oda sıcaklığında kendi kendilerine yaşlanabilen alaşımlar için kullanılır. T, kararlı bir temper elde etmek için alaşıma F, O veya H işleminden başka uygulanan temper işlemini gösterir. Kararlı temperi ifade eden T harfinden sonra 1'den 10'a kadar rakam kullanılır.

- T1 : Sıcak işlenmiş, fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T2 : Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş, soğuk işlenmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T3 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış soğuk işlenmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış (işlem (dövme) alaşımları için).
- T4 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T5 : Fabrikasyon sıcaklığında soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmıştır.
- T6 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırma uygulanmıştır.
- T7 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış ve dengeli duruma getirilmiş (döküm alaşımları için).
- T8 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırma uygulanmıştır (işlem alaşımları için).
- T9 : Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlandırma uygulanmıştır.
- T10 : Yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş (işlem alaşımları için) [100].

2.2.3. Isıl işlemler

Isıl işlem, metallerde istenilen özellikleri geliştiren bir ısıtma işlemi veya işlemler zinciri olarak bilinmektedir. Bir diğer ifadeyle metallerin ısıtılmasını ve soğutulmasını gerektiren durumlarda ve kimyasal bileşiminde herhangi bir değişim yapmadan sadece mekanik özelliklerinin istenilen şekilde olmasını sağlayan işlemler olarak tarif edilebilir. Alüminyum alaşımlarına ilave edilen alaşım elementlerinin ısıtma işlemi uygulanması neticesinde dayanımı arttırdığı gibi bazı alaşım elementlerinin ilavesiyle de ısıtma işlemi tabii tutulmasına engel olmaktadır. Bu sebepten dolayı, ısıtma işlemi karşı gösterdikleri hassasiyete göre dövme veya dökme alüminyum alaşımları, ısıtma işlemi uygulanabilen veya ısıtma işlemi uygulanamayan alaşımlar olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Isıl işlem yapılabilen alaşımların içinde bulunan elementler, yüksek sıcaklıklarda büyük ölçüde katı halde erime özelliklerine sahip olmakla beraber, düşük sıcaklıklarda katı halde eriyebilme özellikleri sınırlı kalmaktadır. Bu önemli neden alaşımın ısıl işlem yapılabilmesine imkân sağlamaktadır.

Dövme alaşımları arasında ısıl işleme tabi tutulabilenler grubuna dâhil olanlar: 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileridir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan sertleştirme amaçlı ısıl işlemle sertlik artışı, ikinci faz çökeltilerinin ince ve homojen olarak matris içinde çökmesiyle sağlanır. Bu nedenle sertleştirme yöntemi “çökeltme sertleşmesi” olarak adlandırılmıştır. Demir dışı metallerin mukavemetini arttırmada kullanılan en önemli yöntemlerden birisi de çökeltme sertleşmesidir. Özellikle uçak sanayisinde kullanılan hafif alüminyum alaşımları çökeltme sertleşmesi ile sertleştirilmektedir. Bu işlem malzemenin sadece mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda manyetik ve iletkenlik özelliklerini de etkilemektedir. Bu nedenle yaşlandırma ısıl işlemi, elektronik malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla da uygulanmaktadır.

Yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulabilen önemli alaşımlardan biri olan AA 2024, sıcak ekstrüzyon ve haddeleme ile imal edilirler. Alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek sertliğe sahip alaşımdır. Elastisite modülü ve dayanımı alaşımlar içerisinde en yükseğidir.

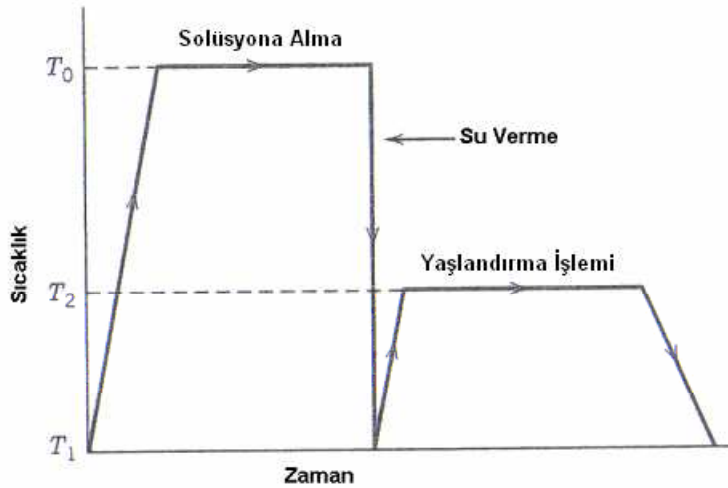
Çökeltme ile sertleşebilen alüminyum alaşımlarında mekanik özellikleri arttıran çökeltiler farklı alaşımlarda ve farklı bileşiklerden oluşmaktadır. Bunları aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- a) Al-Cu alaşımları, CuAl_2 bileşiği ile dayanım kazanır.
- b) Al-Cu-Mg alaşımları, Mg' nin yoğun olarak bulunduğu bileşiklerle dayanım kazanır.
- c) Al-Mg-Si alaşımları, Mg_2Si bileşiği ile dayanım kazanır [100].

Yaşlanma ısı işlemi

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarında yaşlanma ısı işlemi, üç ana safhadan oluşmaktadır. Plastik şekil değiştirmesine ihtiyaç duyulmaksızın ve üretimi sırasındaki istenen bir kademede malzemenin sertleştirilmesi, çökelme sertleşmesi yönteminin üstünlükleri olarak özetlenebilir. Çökelme sertleşmesi, ancak denge diyagramlarında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda oluşur.

Çökelme sertleşmesinin aşamalarından birincisi öncelikle solüsyona alma işlemi, ikincisi su verme (soğutma), üçüncü olarak yaşlandırma işlemi olarak bilinmektedir. Şekil 2.10' da yaşlandırma ısı işleminin aşamaları gösterilmektedir [100].



Şekil 2.10. Yaşlandırma ısı işlemi sıcaklık-zaman faz diyagramı [100]

Solüsyona Alma

Çökelme sertleşmesi ile malzemenin dayanımının artırılmasında ilk aşama solüsyona alma işlemidir. Solüsyona alma da amaç mukavemet artırıcı alaşım elementlerinden maksimum miktarını katı ergiyik içine almaktır. Bu nedenle alaşım, artan alaşım elementi miktarıyla yükselen tek fazlı bölgeye girme sıcaklığına ulaşıldığına emin olunan sıcaklığın yani solvüs sıcaklığının birkaç derece üzerine kadar ısıtılmalıdır. Bu aşamada alaşım ötektik ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklığa kadar ısıtılmalıdır.

Isıl işlem uygulanabilen alaşımlarda solvüs sıcaklığı artan alaşım elementi miktarıyla birlikte daha yukarı sıcaklıklara yükselmektedir. Bundan dolayı ısı işlem uygulanacak malzemenin kimyasal bileşimini tespit ederek çözelti ısı işlem sıcaklığının belirlenmesi büyük faydalar sağlamaktadır [100].

Su verme (soğutma)

Yaşlanma ısı işleminin en önemli aşaması su verme işlemi olarak düşünülebilir. Su vermede amaç solüsyona alma işlemiyle oluşturulan aşırı doymuş katı eriyiğin hızlı soğuma ile toparlanmasına fırsat vermeden oda sıcaklığına soğutularak korunmasıdır. Su verilmezse katı ergiyikler tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde çökerek şekil değiştirme kabiliyetini azaltır. Taneler arası korozyon mukavemeti düşer. Bu şekilde ani olarak su verme işlemi yapılır.

Çözeltiye alınan alaşımın su verilmesiyle oluşan aşırı boşluk konsantrasyonu beklenen denge difüzyonundan daha hızlı difüzyon oluşması ile çözünen atomlar toparlanarak GP (Guiner-Preston) bölgelerinin oluşmasına neden olurlar. Su verme esnasında çökme olması için fırın ile su ortamı sırasındaki zaman az olmalı ve su verme ortamının ısı absorbe etme katsayısı çok düşük olmalıdır. Pratikte su verme işlemi normal olarak azami su verme gecikmesi ve azami su sıcaklığı ile kontrol edilir.

Malzemeler fırında su verme ortamına ister mekanik olarak isterse de otomatik olarak gönderilsin; bu süre azami su verme gecikmesini aşmamalıdır. Standart su verme gecikmesi, fırın kapısının açılmaya başlaması ile malzemenin su verme ortamına dalmasıyla biten süredir. Su verme aralığı, 10 ila 20 saniyelik gibi sürelerde olmalıdır. İzin verilen maksimum zaman sıcaklık ve oda sıcaklığındaki havanın hızına ve parçaların kesitlerine bağlıdır.

Genel kural olarak en iyi maksimum dayanım ve tokluk hızlı soğuma ile elde edilir. Daha hızlı su verme, çözündürme işleminin kalıcılığını daha fazla arttıracak, bu da

daha sonra çökelme sertleşmesinin daha etkin olarak yapılmasını sağlayacaktır. Ulaşılabilecek en yüksek dayanıma en hızlı su verme hızıyla erişilebilir.

Dayanımı artırma işlemlerinde kırılmalardan sakınmak için, dayanımı artırma işlemi mümkün olduğu kadar su vermeden hemen sonra olmalıdır. Bu işlem genellikle 24 saat içinde yapılmalıdır [100].

Yaşlanma işlemi

Aşırı doymuş katı eriyiğin çözeltiye alınması ve su vermeden sonra oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya denge solvüs eğrisinin altında (suni yaşlanma) bir sıcaklıkta çökelmeye alınması olayı yaşlandırma veya çökelti ısıl işlemi olarak bilinir. Bir diğer ifadeyle aşırı doymuş bir katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisiyle yeni bir fazın oluşmasına çökelme sertleşmesi (yaşlanma) adı verilir. Solüsyona alma işleminden sonra su verme ve sonucunda yaşlandırma yapılmaktadır. Yaşlandırma işleminin yapılabilmesi için alaşımın hangi sıcaklıklarda yaşlandırılması gerektiği bilinmelidir.

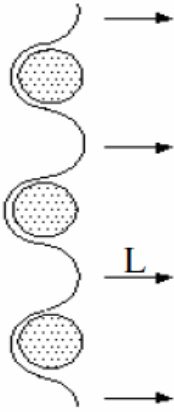
Katı eriyiğe alma ısıl işleminden sonra uygulanan su verme sonucu alüminyum alaşımları, tam olarak uygun bir sertlik ve mukavemete ulaşamazlar. Bu alaşımlarda maksimum sertlik ve mukavemeti elde etmek için alaşım yaşlandırılır [100].

Çökelme sertleşmesi ile dayanım artışı

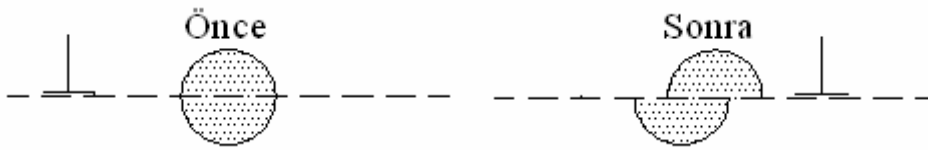
Çökelen partiküller dislokasyon hareketine engel oldukları zaman malzemenin sertliği artar. Çökelti partikülleri genellikle matrizen daha serttir ve deformasyon esnasında dislokasyon hareketini engeller. Bu durumda çökelti arasında kalan dislokasyon parçası çökelti partiküllerini aşmak için uygulanan gerilime bağlı olarak hareket eder ve partiküllerin çevresini sarar. Dislokasyonlar her yönde hareket ettiği için çökelti etrafındaki halka sayısı artar ve malzemedeki dislokasyon yoğunluğunun artışına sebep olur. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’ de dislokasyon hareketleri gösterilmiştir.

İnce çökelti fazı içeren malzemede dayanım veya sertliğin artmasının başlıca sebepleri;

- Dislokasyon yoğunluğunun artması.
- Dislokasyon hareketlerinin zor olması [100].



Şekil 2.11 Çökeltiler arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar [100]



Şekil 2.12 Aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi [100]

Dislokasyon hareketi için gerilme miktarı teorik olarak 3.3' te verilen eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\tau a = \frac{2Gb}{L} \quad (3.3)$$

Burada;

τa : Kayma gerilmesi

b: Burgers vektörü

L: Çökeltiler arası mesafe

G: Kayma modülü

Bu bağıntıya göre çökelti mesafe azaldıkça dislokasyon hareketini engelleyici etkileri artmakta ve buna bağlı olarak da malzemenin mukavemetinde artış olmaktadır.

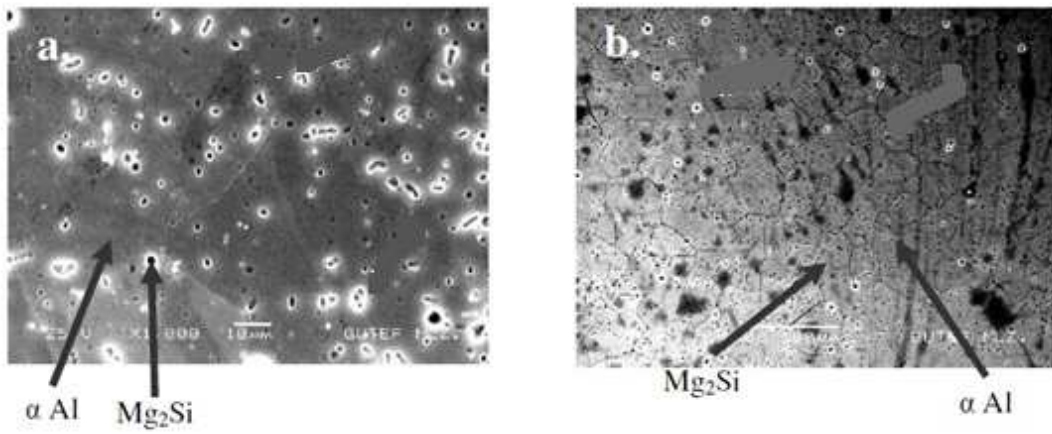
Aşırı yaşlanma bölgesindeki Denklem 3.3 bağıntısı geçerlidir. Çünkü çözelti ile matriks ara yüzeyindeki dislokasyonlar öncelikle hareket ederler ve bu da mukavemetin düşmesine sebep olur. Eğer çözelti aşırı derecede büyük ise dislokasyonlar çökeltiyi keserek mukavemetin düşmesine sebep olur [100].

Aşırı yaşlanma

Çökelen partiküllerin birbirleriyle birleşmeleri ve büyümeleri sonucu, dislokasyon hareketine engel olmazlar. Ancak mekanik özelliklerde düşme görülür. Buna aşırı yaşlanma denir. Bu durumda dislokasyonlar taneler arasından kıvrılarak geçerler. Bu kıvrılma esnasında eğrilik yarıçapı ne kadar büyük olursa elastisite limiti de o kadar küçük olur.

Eritme ısıl işlemine tabi tutulmuş malzemeyi düşük sıcaklıklarda (-6 ila -10 °C arasında) depolamak suretiyle yaşlanma sertleşmesi geciktirilebilir veya durdurulabilir. Bu özellikten pratik yönden aşağıda bahsedilen şekilde istifade edilir. Yaşlanma sertleşmesi sünekliği azaltır ve bu sebepten ötürü herhangi bir soğuk işlemin tatbiki ile yürütülecek imalat metalin hâla yumuşak olduğu bir zaman içinde yapılmalı ve 2 ila 3 saat zarfında (yaşlanma sertleşmesi önemli bir alana yayılmadan önce) tamamlanmalıdır. Böyle bir işlem mümkün olmayabilir. Bu şekilde alaşımın imalat safhasında dar boğazların (sıkışmaların) meydana gelmesine sebebiyet verebilir. Eritme ısıl işlemine tabi tutulmuş alüminyum alaşımını, sıfırın altındaki sıcaklıklarda depolamak suretiyle, donmadan dolayı yaşlanmaya mani olmuş (geciktirilmiş) olur. Daha sonra malzeme ihtiyaç duyulduğu zaman depodan alınabilir ve kolaylıkla işlenebilme şartlarında imal edilebilir.

Yaşlandırma ısısal işleminin başlamasıyla birlikte yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin artmasıyla beraber yapı içerisinde ve tane sınırlarında çökeltilerin oluştuğu fark edilmektedir. Yaşlandırma sıcaklığının ve süresinin artmasıyla beraber yapı içerisindeki çökeltilerin miktarının ve boyutunun biraz daha arttığı daha fazla belirginleştiği ve boyutunun arttığı görülmektedir. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin artmasıyla beraber yapı içerisindeki çökeltilerin büyümesi neticesinde dislokasyonların etkisiyle malzemenin dayanımında azalma olup, aşırı yaşlanma sürecine girmesine sebep olmaktadır.



Şekil 2.13. AA 6063 alaşımlı numunelerin Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri;
a. 140 °C'de 10 saat yaşlandırılmış, b. 180 °C'de 10 saat yaşlandırılmış [100]

Yapay yaşlandırma ısısal işlemi yapılan AA 6063 alaşımları için yaşlandırmanın sıcaklığa ve süreye bağlı olarak yapı içerisinde EDS ve XRD analizleriyle Mg_2Si , $AlFeSi$ ve $CuAl_2$ çökeltileri oluştuğu araştırmalar sonucu tespit edilmiştir.

Daha önce yapılmış SEM ve EDS analizleri sonucunda, AA 6063 alaşımının mikro yapı içerisinde oluşan çökeltilerin yaşlandırma ısısal işlem sonrası sıcaklığa ve süreye bağlı olarak oluştuğunu ve bu çökeltilerin boyutunun ve miktarının önemli derecede değiştiği görülmüştür [100].

Deneylerde kullanılan numunelere uygulanan ısı işlemler

Deneylerde kullanılan numuneler için 3 farklı ısı işlem durumu söz konusudur;

F: Fabrikasyondan sonraki hali (üretildiği gibi)

Bu hal; Mukavemet veya sertliğini değiştirmek amacıyla hiçbir ilave işlem yapılmaksızın, imâl edildikten sonraki fiziksel yapısını belirtmektedir.

T4: Solüsyona alma ısı işleminden geçirilir, doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir. (500-525 °C – 5 saat – hızlı bir şekilde suda soğutma)

T6: Solüsyona alma ısı işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (Termik ısı işlemi) (170-175 °C – 12 saat– hızlı bir şekilde suda soğutma)

BÖLÜM 3 .DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Deneylerde kullanılmak üzere AA6061, AA6063, AA6082 alüminyum alaşımlarından prototip tanklar üretilmiştir. Üretilen bu tanklar F, T4 ve T6 kondüsyonunda mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, mekanik testler ve tahribatsız testlere tabi tutulmuştur.

3.2. Deneylerde kullanılan tüplerin malzeme özellikleri

Deneylerde kullanılmak üzere hazırlanan 6XXX serisi alüminyum alaşımının primer üretim sonrası mekanik ve metalürjik özellikleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’ de sunulmuştur.

Tablo 3.1’ de 5 adet alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimleri [101]

Alaşım tipi AA ¹⁾ liste gösterimi	İşaretleme kod referansı		Kimyasal bileşim – kütle %														Diğerleri		Alüminyum
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Pb	Tek	Toplam				
			En az	En fazla	En az	En fazla	En az	En fazla	En az	En fazla	En az	En fazla	En az	En fazla	En az	En fazla			
5283 A	5283	En az En fazla	- 0,30	- 0,03	0,03	0,50 1,0	4,5 5,1	- 0,05	- 0,30	- 0,10	- 0,03	- 0,05	- 0,0030	- 0,05	- 0,15	Kalan			
6061 A	6061	En az En fazla	0,40 0,8	- 0,7	0,15 1,40	- 0,15	0,8 1,2	0,04 0,35	- -	- 0,25	- 0,15	- -	- 0,0030	- 0,05	- 0,15	Kalan			
6082 A	6082	En az En fazla	0,7 1,3	- 0,50	- 0,1	0,40 1,0	0,60 1,2	- 0,25	- -	- 0,20	- 0,10	- -	- 0,0030	- 0,05	- 0,15	Kalan			
6351 A	6351	En az En fazla	0,7 1,3	- 0,50	- 0,1	0,40 0,8	0,40 0,8	- -	- -	- 0,20	- 0,20	- -	- 0,0030	- 0,05	- 0,15	Kalan			
7060	7060	En az En fazla	- 0,15	- 0,20	1,8 2,6	- 0,20	1,3 2,1	0,15 0,25	- -	6,1 7,5	- 0,05	- 0,05	- 0,0030	- 0,05	- 0,15	Kalan			

¹⁾ AA, Aluminum Association Inc., 900 19th Street N.W., Washington D.C., 20006-2168, ABD
Not – Eriyik, hurda veya yeniden kullanılabilir diğer bir malzeme ihtiva ettiğinde, bizmut muhtevası % 0,0030’u aşmamalıdır.

6XXX serisi (AlMgSi) alaşımları içinde en çok kullanılanlar AA6060, AA6063 (EN ve yeni TS notasyonunda) ve AlMgSi_{0,5} (DIN ve eski TS notasyonunda) alaşımlarıdır. Bunların kimyasal bileşimleri genelde aynı olup, alt ve üst limitlerde nüans farklılıkları gösterirler. Tablo 3.2’ de Alüminyum ekstrüzyon profilleri mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Alüminyum ekstrüzyon profilleri mekanik özellikleri (EN 755-2) [102]

EN AW 6063 (AlMg0,7Si)							
Temper	Boyutlar, e (mm)	Rm (Mpa)		Rp0,2 (Mpa)		A (%) Min.	A50mm (%) Min
		Min	Max	Min.	Max.		
T4	=<25	130	-	65	-	14	12
T5	=<3 10<e=<25	175	-	130	-	8	6
		160	-	110	-	7	5
T6	=<10 10<e=<25	215	-	170	-	8	6
		195	-	160	-	8	6
T64	=<15	180	-	120	-	12	10
T66	=<10 10<e=<25	245	-	200	-	8	6
		225	-	180	-	10	8
EN AW 6060 (AlMgSi)							
Temper	Boyutlar, e (mm)	Rm (Mpa)		Rp0,2 (Mpa)		A (%) Min	A50mm (%) Min
		Min	Max	Min	Max.		
T4	=<25	120	-	60	-	16	14
T5	=<5 5<e=<25	160	-	120	-	8	6
		140	-	100	-	8	6
T6	=<3 3<e=<25	190	-	150	-	8	6
		170	-	140	-	8	6
T64	=<15	180	-	120	-	12	10
T66	=<3 3<e=<25	215	-	160	-	8	6
		195	-	150	-	8	6

Tablo 3.2. (Devamı)

R _m : Kopma dayanımı R _{p0,2} : Akma dayanımı kg/mm ² = 10 Mpa							
EN AW 6082 (AlSi1MgMn)							
Temper	Boyutlar, e (mm)	R _m (Mpa)		R _{p0,2} (Mpa)		A (%)	A50mm (%) Min
		Min	Max	Min.	Max.	Min.	
0, H111	Et kalınlıklarının Tümü	-	160	-	110	14	12
T4	≤25	205	-	110	-	14	12
(Açık Profil) T5	≤5	270	-	230	--	8	6
T6	≤5	290	-	250	-	8	6
	5<e≤25	310	-	260	-	10	8
İçi boş profil T5	≤5	270	-	230	-	8	6
T6	≤5	290	-	250	-	8	6
	5<e≤25	310	-	260	-	10	8

Literatürdeki araştırmalarımız göstermiştir ki; tank imalatında gerek mekanik özellikleri gerekse hafifliği nedeniyle 6000 serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. AA6061 alaşımına ait mekanik özellikler Tablo 3.3' te sunulmuştur.

Tablo 3.3. AA6061 alaşımına ait mekanik zellikler [103]

Tipik Fiziksel zellikler	Değer	Diğer Karakteristikleri	
Yoğunluk	2.70 gr/cm ³	Korozyon direnci:	İyi (T4 ısıl işlem durumunda)
Elastisite modülü	69.000 N/mm ²		
Rijidite Modülü	26.000 N/mm ²	Eloksal:	İyi
Erime Sıcaklığı	580-650 C	Kaynak Kabiliyeti:	İyi
zısı 0-100C arasında	0.92 J/g.K	Lehimlenebilme:	İyi
		şekillendirilebilirlik:	İyi (ısıl işlemsiz ve T4 ısıl işlem durumunda)
Lineer genleşme katsayısı 20-100C arasında	24x10 ⁻⁶ /K		
Isıl iletkenlik 25C' de (T6 kondisyonunda)	1.67 W/cm.K		
Elektriksel direnç 20C' de (T6 kondisyonunda)	0.040  mm ² /m		

Tez kapsamında 6000 serisi AA6061, AA6063 ve AA6082 alüminyum alaşımlarının ısıl işlemsiz, T4 ısıl işlemli ve T6 ısıl işlemli olmak üzere toplam 9 adet numune üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu numuneler kalıplanarak zımparalama ve parlatma işlemleri ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 9 adet tank NDT testlerine tabi tutulmuştur.

Bu kapsamda aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır;

Mikroyapı:

- Optik mikroskop ile tane yapısı incelemeleri,
- Mikrosertlik lmleri, (Makrosertlik lmleri yapılarak karşılaştırılmıştır.)
- XRD cihazı ile faz değişiminin incelenmesi

Tahribatsız Deneyleler:

- 9 adet farklı tüpün her birinin ayrı ayrı %100 Radyografik muayenesi
- Sıvı Penetrant ile %100 çatlak ve hasar tespiti,
- Ultrasonik kalınlık ölçümü,

Mekanik Testler:

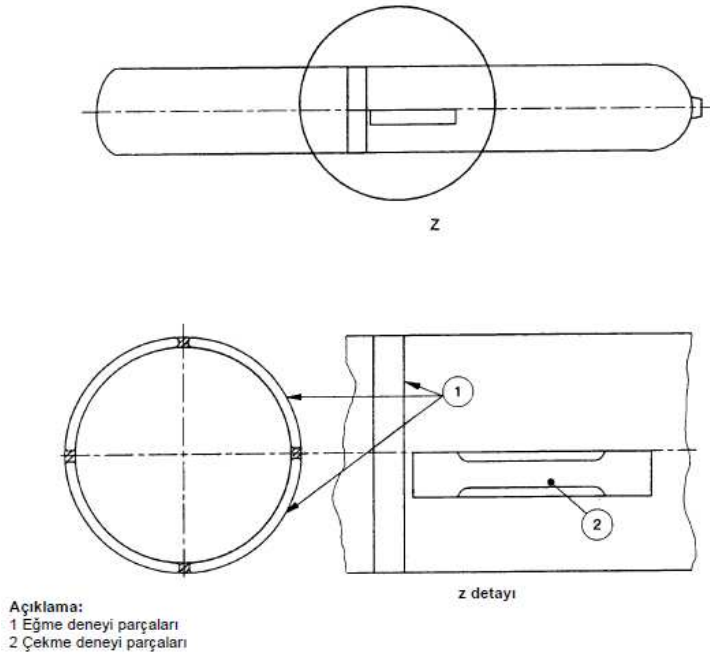
- Çekme deneyi
- Hidrostatik basınç testi

Bu testlerden elde edilen veriler irdelenmiş ve numunelerin alaşım türü değişimine ve sertlik değişimine bağlı olarak mekanik özellikleri ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur. Isıl işleme bağlı olarak aynı tür tankların dış yüzeyinde, iç kısmında, kesitinde ve boyun kısmındaki tane yapıları ve sertlikleri incelenmiştir.

Tahribatsız deneylerde tüplerin dip kısımlarında hammaddeden kaynaklanan çatlaklar tespit edilmiştir. Radyografik muayenede tankların gövdesinde proseten veya primer üretimden kaynaklanan herhangi bir iç boşluk, çatlak v.b. hataya rastlanmamıştır.

3.3. Çekme deneyi

Su kapasitesi 0,5 litreden 150 litreye kadar olan taşınabilir gaz tüplerinin (yeniden doldurulabilir-dikişsiz- alüminyum ve alüminyum alaşımlı) tasarım ve imalât özellikleri TS EN 1975 standartında verilmiştir. Deneysel çalışmalarda bu standarta uygun işlem gerçekleştirilmiştir. Bu standarta göre çekme deneyi parçalarının tüp üzerindeki yerleşimi Şekil 3.1' de gösterilmiştir.



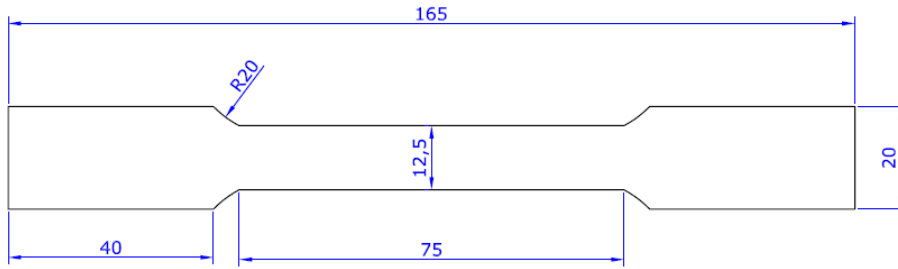
Şekil 3.1. Deney parçalarının tank üzerindeki yeri [101]

Sonlu elemanlar analizi (ANSYS) yapılabilmesi ve farklı ısı işlemleri/alaşım oranına göre mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için tanklardan çekme numuneleri hazırlanarak, çekme eğrileri elde edilmiştir. Numuneler tel erozyon tezgâhında hazırlanmıştır. Bir tank yüzeyinden boyuna doğrultuda 3 adet numune çıkarılarak ortalamaları alınmıştır. Çekme testi Şekil 3.2’ de görülen Zwick/Roell marka 5 tonluk çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz

Çekme testleri için numuneler TS 138 EN 10002-1' e göre (Deney parçası tipi: 1) hazırlanmıştır. Numune ölçüleri Şekil 3.3' te gösterilmiştir.

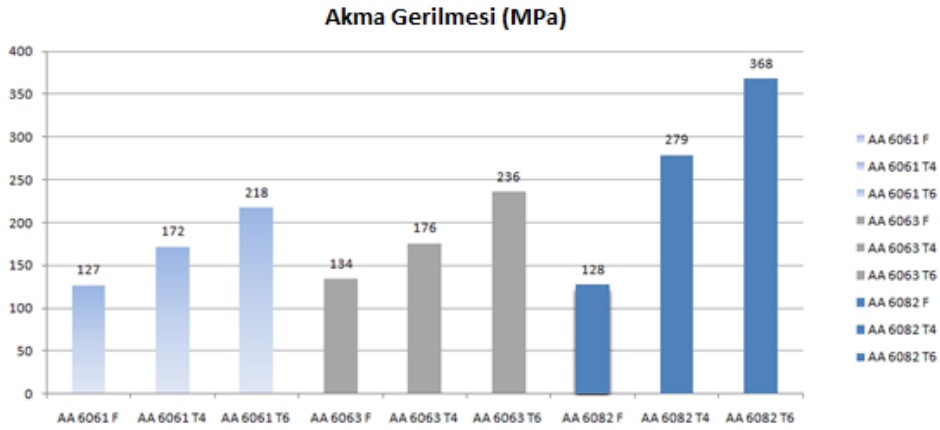


Şekil 3.3. TS 138 EN 10002-1' e göre borudan çıkarılan çekme numunesinin ölçüleri

Çekme testleri için numunelerin çıkarıldığı tüp kesiti Şekil 3.4' te gösterilmiştir. Çekme testi sonuçları Şekil 3.5' te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çekme testleri için numunelerin çıkarıldığı tüp kesiti



Şekil 3.5. AA6061 AA6063 AA6082 Alaşımları için elde edilen çekme deneyi akma gerilmesi sonuçları (MPa)

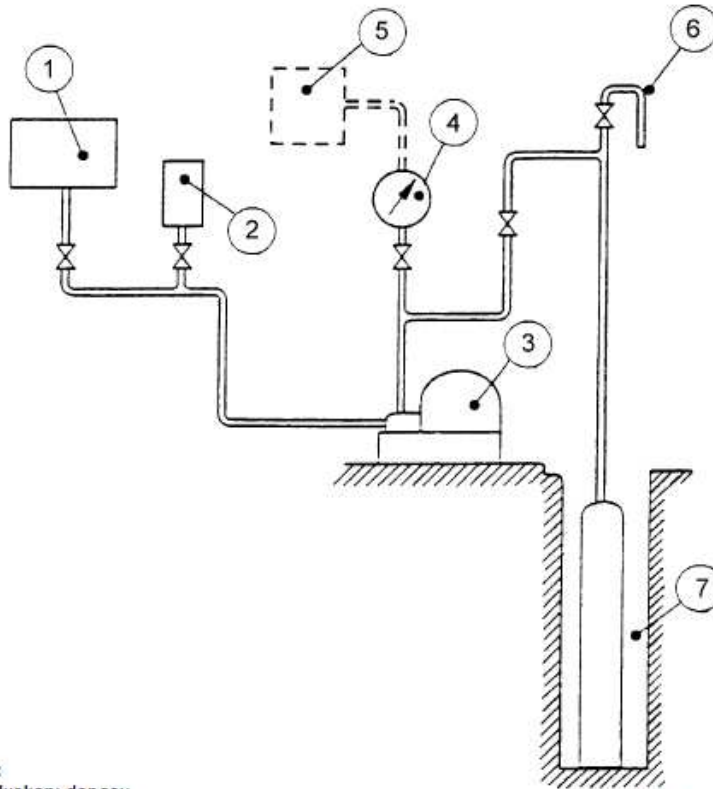
Çekme testinin gerçekleştirildiği numuneye ait bir örnek Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Çekme işlemi tamamlanmış test numunesi

3.4. Hidrostatik Basınç Testleri (Patlatma Deneyi)

TS EN 1975 standartında hidrostatik patlatma test düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Hidrostatik basınç testlerinde bu standarta bağlı kalınmıştır. Standarta göre test düzeneği şematik olarak Şekil 3.7' de verilmiştir.



Açıklama:

- 1 Deney akışkanı deposu
- 2 Deney akışkanının ölçülmesi için tank (Besleme tankı, bir ölçme tankı olarak kullanılabilir)
- 3 Pompa
- 4 Basınç ölçer
- 5 Basınç/hacimsel genişleme eğri kaydedicisi
- 6 Hava borusu veya hava tahliye vanası
- 7 Deney çukuru

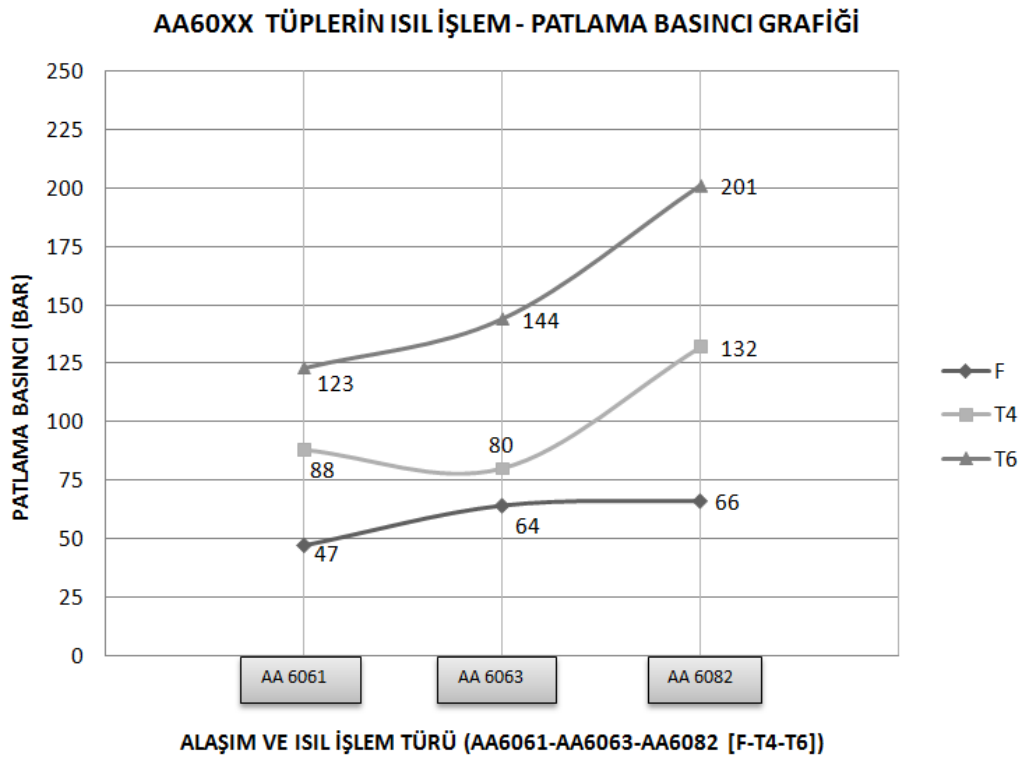
Şekil 3.7. Tipik hidrolik patlama deney düzeneği [101]

Hazırlanan numuneler için hidrostatik basınç testleri Aygaz Gebze tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde elde edilen yırtılma sonuçlarına örnek bir

uygulama Şekil 3.8' de gösterilmiştir. Tüm numunelerin ortalamalarına ait patlama basıncı değerleri Şekil 3.9' da verilmiştir.



Şekil 3.8. AA6061 T6 prototipinin hidrostatik basınç testinden sonraki görünümü



Şekil 3.9. AA6000 serisi alüminyum alaşımları için ısıtım – alaşım türü – patlatma basıncı grafiği

3.4.1. Patlama deneyinin değerlendirilmesi

Patlama deneyi sonucunda oluşan hasarın TS EN 1975 standartına göre değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu inceleme aşağıdaki konuları kapsamaktadır;

- Patlama basıncı (p_b) ve deney sırasında uygulanan akma basıncının (p_y) değerlendirilmesi,
- Yırtık ve bu yırtık kenarlarının şeklinin muayenesi,
- İçbükey bir tabana sahip tüplerin olması durumunda, tüpün tabanının dışbükey olmadığına doğrulanması [101].

TS EN 1975 standartına göre;

Ölçülen patlama basıncı (p_b): $p_b \geq 1,6 \times p_h$

Gözlenen akma basıncı (p_y): $p_y \geq 1/F \times p_h$

olmalıdır. Yapılan ölçümlerde patlama ve akma basıncının standarta uygun olduğu anlaşılmıştır.

TS EN 1975 standartına göre patlama deneyi, tüpün parçalanmasına neden olmamalıdır. Ayrıca ana yırtık, kırılğan bir tipte olmamalı, diğer bir deyişle, çatlağın kenarları dairesel olmayıp, çap düzlemi ile eğimli olmalı ve daralan alanı göstermelidir [101].

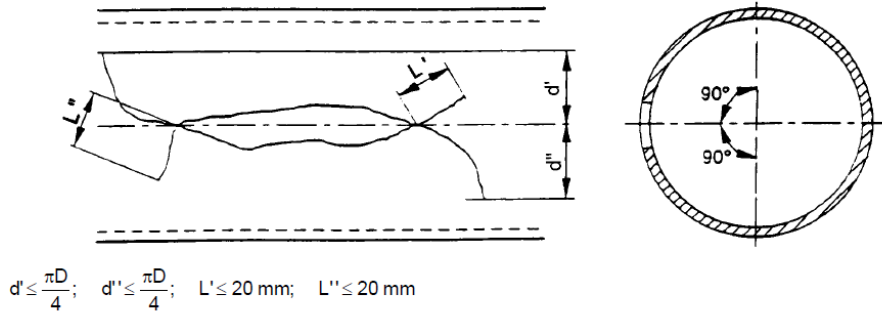
Çatlak, sadece aşağıdaki tariflerden birine uyarsa kabul edilebilir.

a) Gerçek cidar kalınlığı 13 mm veya daha az olan tüpler için;

- Çatlağın büyük bölümü, uzunluğun dış çapa oranının 3:1' den daha az olduğu durumlar dışında, açıkça görülür şekilde boylamasına olmalıdır.
- Çatlağın iki ucunda, bu uçlardaki kısa olan çatlağın 20 mm'den daha kısa olmasının sağlanması şartıyla, iki ayrı yan çatlaktan fazlasının olmasına, izin verilmez.
- Çatlak, ana bölümün her bir kenarı üzerindeki çember etrafında 90°'den daha fazla ilerlememelidir.
- Çatlak, kalınlığı tüpün ortasında ölçülen en fazla kalınlığın 1,5 katından fazla olan tüpün parçaları içine ilerlememelidir. Dışbükey tabanlı tüpler için, çatlak, tüp tabanının ortasına kadar ilerlememelidir.

b) Gerçek cidar kalınlığı 13 mm'nin üzerinde olan tüpler için, çatlağın büyük bölümü boylamasına olmalıdır [101].

Yırtık, metalde herhangi bir belirgin kusura yol açmamalıdır. Çatlağın çevresel gelişiminin ve dallanmasının gösterimi Şekil 3.10' da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Çatlağın çevresel gelişiminin ve dallanmasının gösterimi [101]

Deneysel çalışmalar sonucunda yapılan incelemelerde tüplerin patlatma sonucu davranışının standarta uygun olduğu anlaşılmıştır.

3.5. Mikrosertlik Ölçümleri

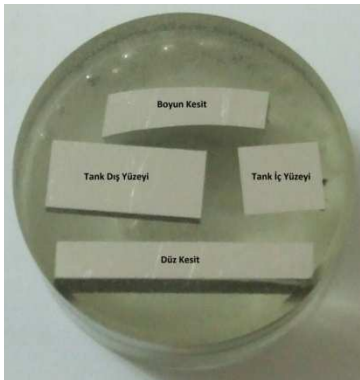
SAÜ Laboratuvarlarında 2 farklı Mikrosertlik cihazında yapılan sertlik ölçümleri dışarıda farklı bir laboratuvarda yaptırılan Makrosertlik sonuçları ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri için her tankın dış yüzeyi, iç yüzeyi, boyuna doğrultuda düz kesiti ve boyun kısmındaki kesit olmak üzere 4 bölgesinden numune alınarak soğuk olarak kalıplanmıştır. Kalıplanmış numunelere ait görüntü Şekil 3.11' de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler

Parçaların kalıp içerisindeki dağılımı standart olarak Şekil 3.12’ deki gibi sıralanmıştır.



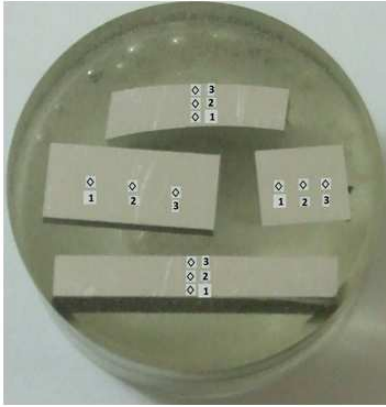
Şekil 3.12. Numunelerin kalıp içerisindeki yerleşimi

Hazırlanan 9 adet farklı alaşım ve ısıl işlem durumundan oluşan numunenin mikro sertlik değerleri Future-Tech marka FM-700 model Mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. Vickers cinsinden ölçülen bu sertliklerde malzemenin özellikle kesitindeki tank dışından içine doğru olan yöndeki sertlik dağılımını görmek üzere sıra sertlik alınmıştır. Her bir kesit ve yüzeyden 5 farklı ölçüm alınmış, Standart sapma değeri yüksek ve düşük olan ölçümler dikkate alınmamış ve diğer 3 ölçüm sonucuna göre tankın dış yüzeyinde, iç yüzeyinde, düz kesitinde ve boyun kısmındaki kesitte sertlik dağılımı elde edilmiştir. Bu testte en ideal batıcı uç izi 1 gf ve 10 saniyelik yükleme değerlerinde elde edilmiş ve tüm ölçümlerde bu değere sadık kalınmıştır. Tablo 4.4’ te ölçüm sonuçları ve standart sapma değerleri

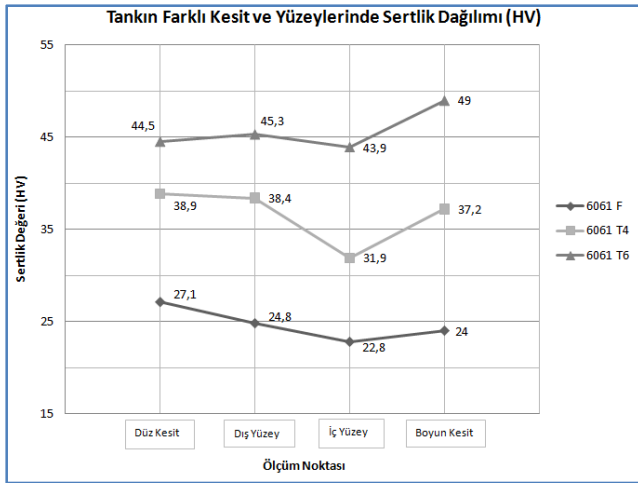
gösterilmiştir. Bu tabloda yer alan değerlerin numuneler üzerindeki karşılıkları ise Şekil 3.13’ da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 ‘ da gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Mikrosertlik ölçüm sonuçları (Vickers)

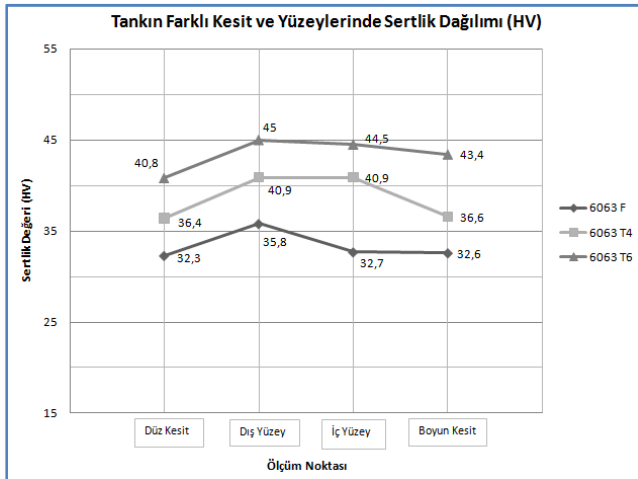
	DÜZ KESİT (HV)			ORT.	DIŞ YÜZEY (HV)			ORT.	İÇ YÜZEY (HV)			ORT.	BOYUN KESİT (HV)			ORT.
	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
6061 F	27,1	27,5	26,8	27,1	25,1	24,6	24,6	24,8	22,9	22,5	22,9	22,8	24,0	24,2	23,9	24,0
STD	0,1	1,3	1,2		1,3	0,7	0,7		0,6	1,2	0,6		0,1	0,7	0,6	
6061 T4	39,0	38,7	39,1	38,9	37,9	38,2	39,0	38,4	32,3	31,5	32,0	31,9	36,9	37,4	37,2	37,2
STD	0,2	0,6	0,4		1,2	0,4	1,6		1,1	1,4	0,2		0,7	0,6	0,1	
6061 T6	43,8	45,3	44,3	44,5	46,0	45,0	44,9	45,3	43,7	44,2	43,8	43,9	48,7	49,1	49,3	49,0
STD	1,5	1,8	0,4		1,5	0,7	0,9		0,5	0,7	0,2		0,7	0,1	0,5	
6063 F	32,0	32,9	31,9	32,3	36,0	35,8	35,6	35,8	32,9	32,2	33,0	32,7	32,0	32,7	33,0	32,6
STD	0,8	1,9	1,1		0,6	0,0	0,6		0,6	1,6	0,9		1,8	0,4	1,3	
6063 T4	36,8	36,3	36,0	36,4	41,3	40,9	40,6	40,9	40,8	40,8	41,0	40,9	36,5	37,1	36,3	36,6
STD	1,2	0,2	1,0		0,9	0,1	0,8		0,2	0,2	0,3		0,4	1,3	0,9	
6063 T6	41,3	40,8	40,3	40,8	44,9	45,1	44,9	45,0	44,0	44,7	44,9	44,5	43,8	43,0	43,4	43,4
STD	1,2	0,0	1,2		0,1	0,3	0,1		1,2	0,4	0,8		0,9	0,9	0,0	
6082 F	25,0	25,1	24,9	25,0	24,0	24,3	24,6	24,3	23,2	23,4	23,9	23,5	23,4	23,0	22,8	23,1
STD	0,0	0,4	0,4		1,3	0,0	1,2		1,3	0,4	1,7		1,4	0,3	1,2	
6082 T4	41,3	41,8	41,0	41,4	36,0	35,8	36,5	36,1	40,0	39,9	39,1	39,7	45,0	45,3	46,0	45,4
STD	0,2	1,0	0,9		0,3	0,8	1,1		0,8	0,6	1,4		1,0	0,3	1,2	
6082 T6	51,9	52,0	52,8	52,2	48,6	48,9	50,0	49,2	50,0	50,9	49,6	50,2	56,5	56,4	57,0	56,6
STD	0,6	0,4	1,1		1,2	0,5	1,7		0,3	1,4	1,1		0,2	0,4	0,6	



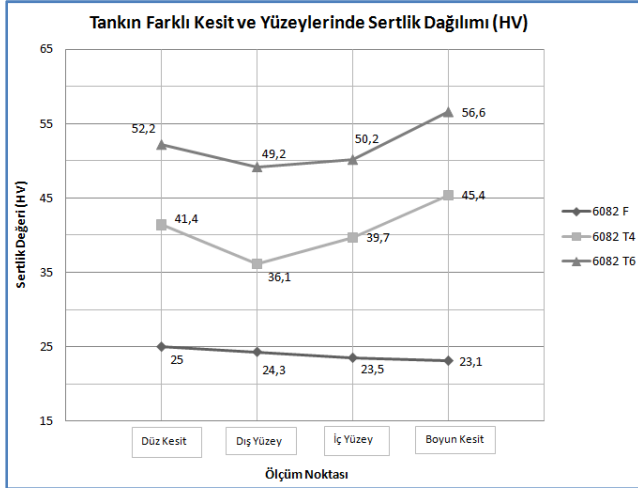
Şekil 3.13. Vickers sertliğinin sıralı bir şekilde ölçüldüğü noktalar



Şekil 3.14. AA6061 alüminyum alaşımı tankının farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı

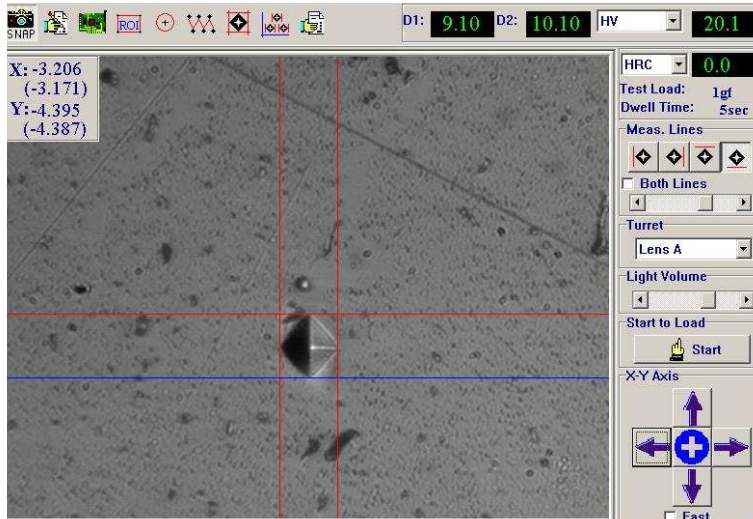


Şekil 3.15. AA6063 alüminyum alaşımı tankının farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı



Şekil 3.16. AA6082 alüminyum alaşımı tankın farklı kesitlerdeki sertlik dağılımı

Ölçümlerin gerçekleştirildiği cihaza ait ekran görüntüsü Şekil 3.17' de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Ölçümlerin gerçekleştirildiği cihaza ait ekran görüntüsü

Mikrosertlik sonuçlarına göre ortalama olarak sertliğin dış yüzeyden tankın iç yüzeyine doğru azaldığı anlaşılmıştır. Bunun sebebi ise malzemenin proseste sıcak ve soğuk şekillendirme esnasında akışına bağlı olarak tanelerin malzeme akışı yönüne paralel olarak yönlendirilmiş olmasıdır. Yüzeyde malzeme akışı malafa ile temas eden iç yüzeye göre daha fazla olduğundan, yüzeyde pekleşme daha fazla olmakta, bu da sertliği artırmaktadır.

Boyun kısmında daha fazla malzeme akışı ve 2. kez soğuk deformasyon (kafa büzme işlemi) gerçekleştiğinden buradaki kesitin sertlik dağılımı düz kesitteki göre daha fazladır.

3.6. Optik Mikroskop İncelemeleri

Hazırlanan numunelerin mikroyapıları Şekil 318' de gösterilen optik mikroskopta incelenmiştir. Bu incelemede tane irileşmesi, yönlendirilmiş tane yapıları ve oluşan farklı fazlar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.18. Optik mikroskop görüntüsü

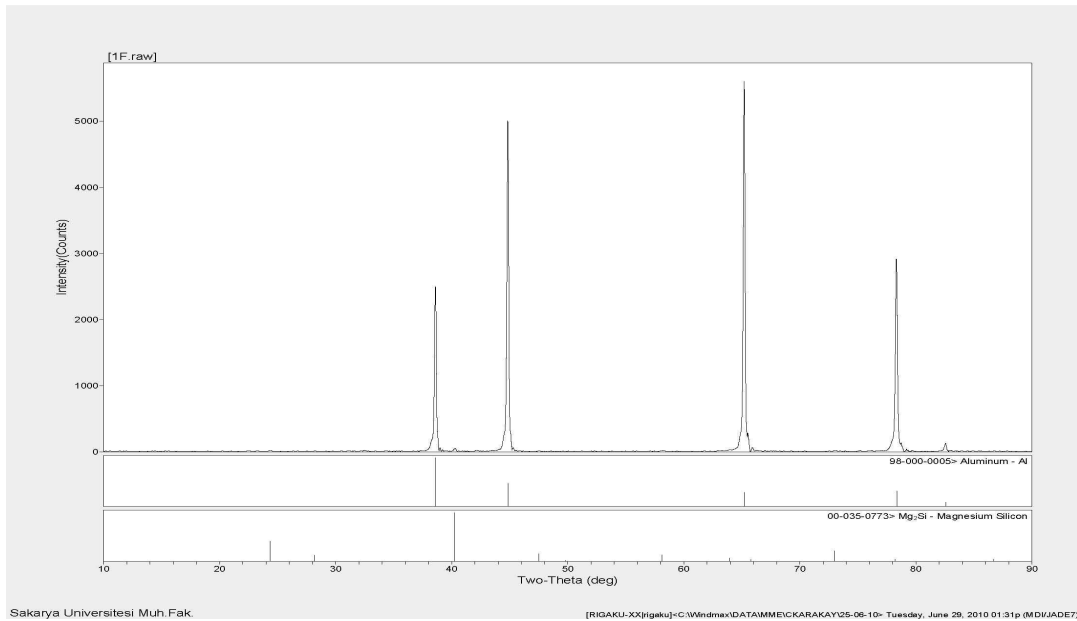
AA6063 alaşımından imal edilmiş, ısıl işlem uygulanmamış, yalnızca sıcak-soğuk deformasyona tabi tutulmuş tankın 200 büyütme ile çekilmiş mikroyapı fotoğrafı Şekil 3.19' te verilmiştir.



Şekil 3.19. AA6063 ısılsız işlemsiz tankın kesitine ait mikroyapı fotoğrafı (200X)

3.7. X-Ray Diffraction (XRD) Analizleri

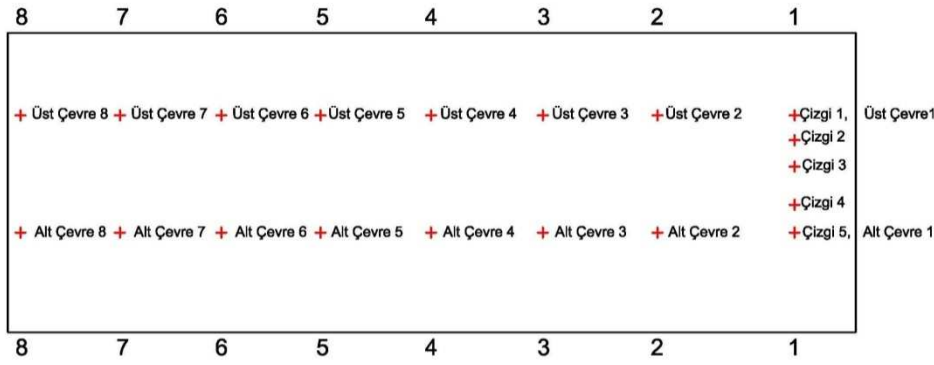
Hazırlanan 9 adet farklı alaşım ve ısılsız işlem durumuna sahip numunelerde oluşan fazların tespiti için XRD analizi yapılmıştır. Bu analizlerde aynı tür alaşımların farklı ısılsız işlem durumlarında farklı fazların oluşmadığı görülmüştür. ısılsız işlem durumuna bağlı önemli değişim olmamasına karşılık 6XXX serisi tankların tamamında Alüminyum (Al), Magnezyum Silisyum (Mg₂Si), fazlarının oluştuğu görülmüştür. XRD analizine ait görünüş Şekil 3.20' de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. AA6061 F numunesinin XRD analizi sonucu

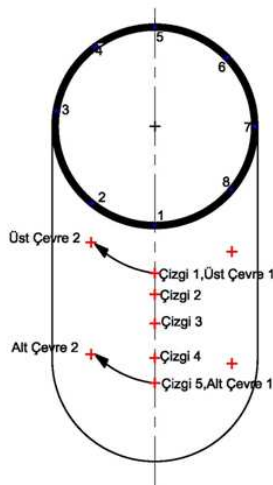
3.8. Kesitteki Cidar Kalınlığı Dağılımı

Numunelerin kalınlık dağılımları üç boyutlu koordinat ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Ölçüm yapılan noktaların tankın açılımı üzerindeki yerleri Şekil 3.21’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Ölçüm yapılan noktaların tankın açılımı üzerindeki yerleri

Silindir marker kalem ile 8 eşit parçaya bölünmüştür. Şekil 3.21’ de görüldüğü gibi parça üzerinde artı (+) ile gösterilen ve yanlarında alınan noktaları belirtmek için kullanılan isimler şekildeki gibidir. 1 nolu kesit alanından şekilde görüldüğü gibi 5 adet kalınlık alınmıştır. Diğer noktalardan alt ve üst olmak üzere ikişer adet kalınlık ölçümü yapılmıştır. Çizgi 1 ile üst çevre 1 aslında aynı noktalardır. Parça üzerinde alınan noktalar marker kalem ile silindirin etrafında şekildeki gibi çizildiği için üst çevre ve alt çevre isimleri kullanılmıştır. Ölçüm noktalarının dairesel kesit üzerinde görünüşü Şekil 3.22’ de verilmiştir.

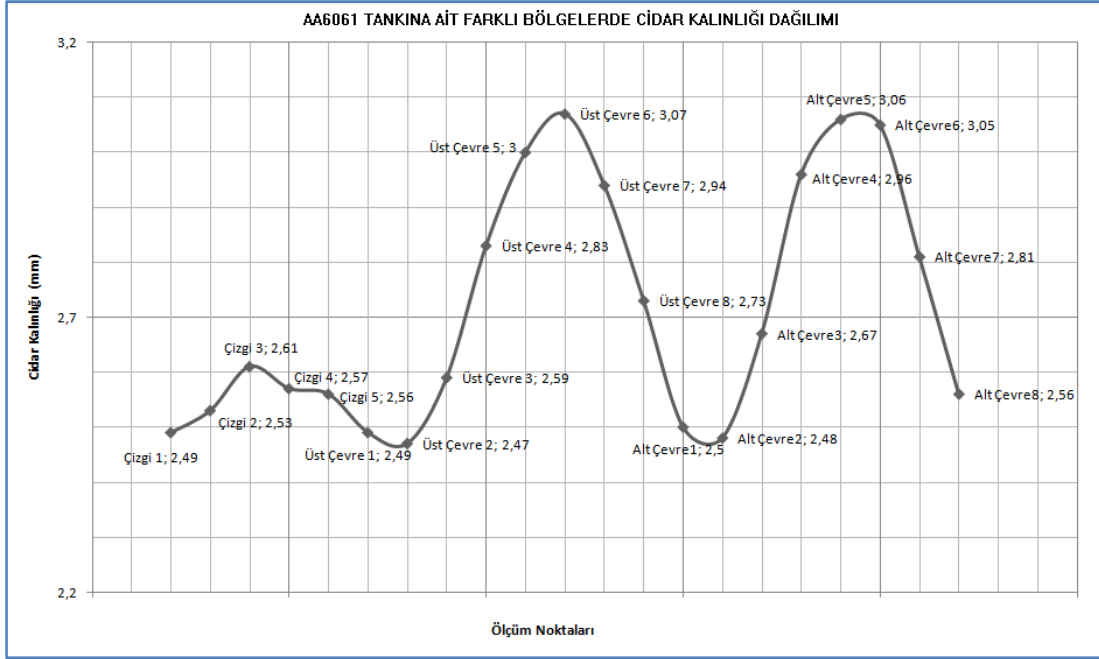


Şekil 3.22. Ölçüm noktalarının dairesel kesit üzerinde görünüşü

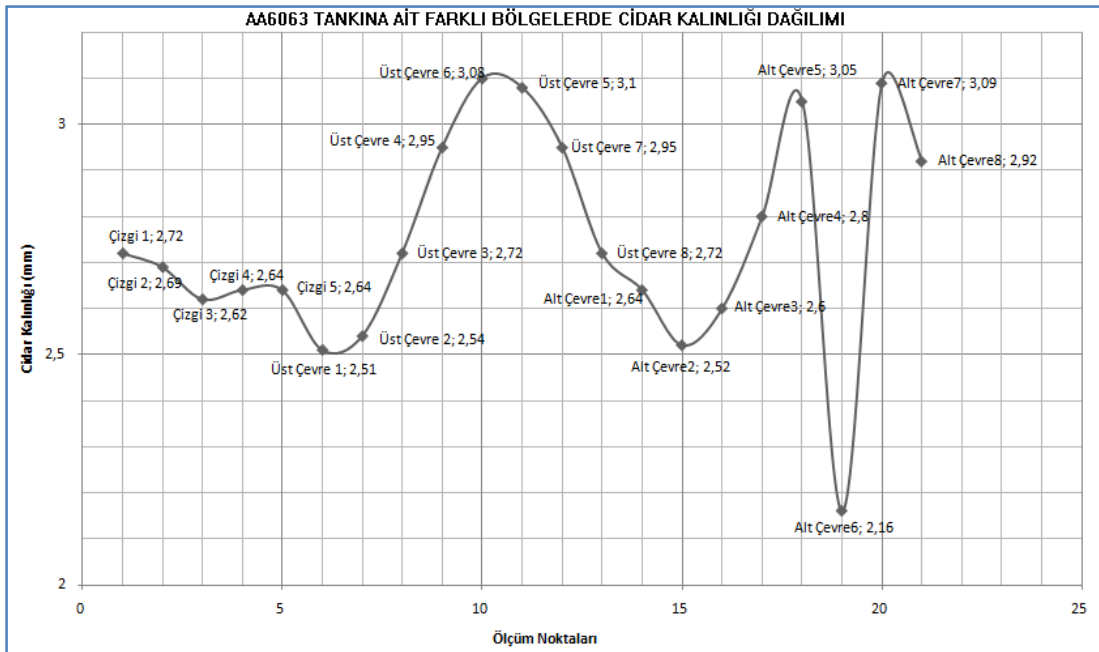
3 farklı alaşım türünden imal edilen tüplerin ölçüm sonuçları Tablo 3.5 ile Şekil 3.23, Şekil 3.24 ve Şekil 3.25' te sunulmuştur.

Tablo 3.5. Kalınlık ölçüm sonuçları tablosu

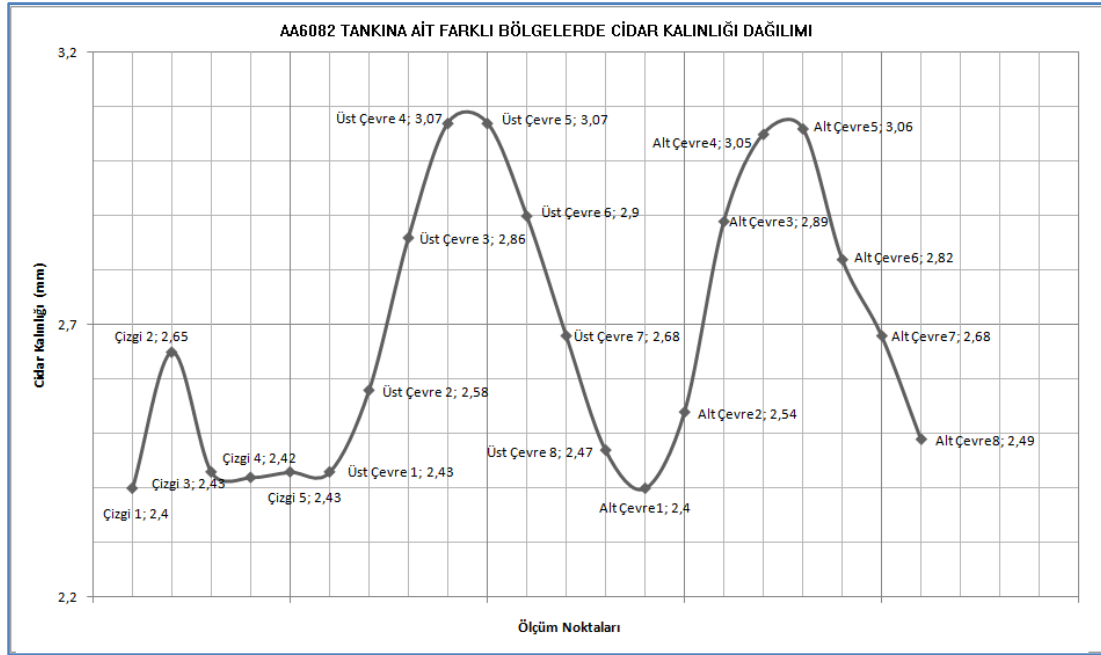
Ölçüm Noktaları	Ölçüm Sonuçları (mm)		
	AA6061	AA6063	AA6082
Çizgi 1	2,49	2,72	2,40
Çizgi 2	2,53	2,69	2,65
Çizgi 3	2,61	2,62	2,43
Çizgi 4	2,57	2,64	2,42
Çizgi 5	2,56	2,64	2,43
ÜstÇevre 1	2,49	2,51	2,43
ÜstÇevre 2	2,47	2,54	2,58
ÜstÇevre 3	2,59	2,72	2,86
ÜstÇevre 4	2,83	2,95	3,07
ÜstÇevre 5	3,00	3,10	3,07
ÜstÇevre 6	3,07	3,08	2,90
ÜstÇevre 7	2,94	2,95	2,68
ÜstÇevre 8	2,73	2,72	2,47
AltÇevre1	2,50	2,64	2,40
AltÇevre2	2,48	2,52	2,54
AltÇevre3	2,67	2,60	2,89
AltÇevre4	2,96	2,80	3,05
AltÇevre5	3,06	3,05	3,06
AltÇevre6	3,05	2,16	2,82
AltÇevre7	2,81	3,09	2,68
AltÇevre8	2,56	2,92	2,49



Şekil 3.23. AA 6061 tankına ait farklı bölgelerde cidar kalınlığı dağılımı



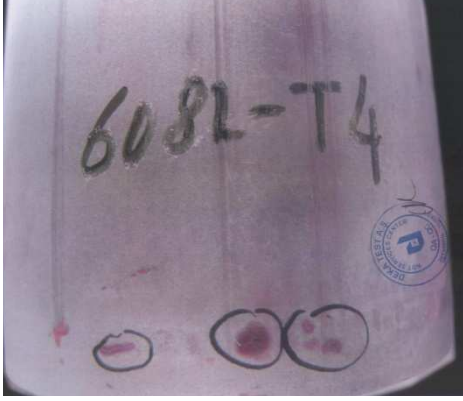
Şekil 3.24. AA 6063 tankına ait farklı bölgelerde cidar kalınlığı dağılımı



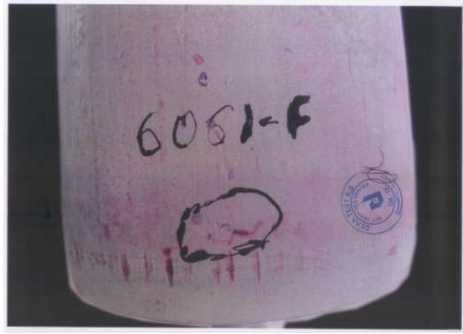
Şekil 3.25. AA 6082 tankına ait farklı bölgelerde cıdar kalınlığı dağılımı

3.9. Sıvı Penetrant Testleri

6061, 6063 ve Al 6082 alaşımlarından ısıl işlemsiz, T4 ve T6 ısıl işlemlili numuneler için tankın yüzeylerinde derin nüfuziyetli çatlakların, hataların olup olmadığını belirlemek amacıyla %100 oranında sıvı penetrant testi yapılmıştır. Bu tanklardan bazılarında (6061 F, 6063 F, 6063 T6, 6082 F, 6082 T4) önemli hatalara rastlanmıştır. Hata bölgeleri tespit edildikten sonra taşlanarak hata derinliği belirlenmiştir. 4 farklı tür hata görülmüştür. Bunlar; derin çizikler, malzeme ayrılması (hammadde kaynaklı), gözenek, katmer tipinde hatalardır. Hataların çoğunluğunun gerek impact forging, gerekse yatay ekstrüzyon esnasındaki koç/malafa-kalıp/matris sürtünmesinden kaynaklı derin çizikler olduğu anlaşılmıştır. AA6082 T4 tankına ait penetrant testi görünüşü Şekil 3.26' de, AA6061 F tankına ait penetrant testi görünüşü Şekil 3.27' de, AA6061 T6 - AA6063 T6 - AA6082 T6 tanklarına ait penetrant testleri görünüşleri ise Şekil 3.28' de verilmiştir.



Şekil 3.26. AA6082 T4 tankına ait penetrant testi görünüşü



Şekil 3.27. AA6061 F tankına ait penetrant testi görünüşü



Şekil 3.28. AA6061 T6 - AA6063 T6 – AA6082 T6 tanklarına ait penetrant testleri görünüşleri

Sıvı penetran deneylerinde ortaya çıkan ve tüplerin boyuna doğrultuda derin çiziklerinin bulunduğu bölgelerde hassas kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm yapılan bu bölgelerde yırtılma noktalarındaki minimum 2,7 mm olan et kalınlığının altına inilmediği, bu derin çiziklerin bulunduğu yerdeki et kalınlığının en düşük değerinin 2,81 mm olduğu görülmüştür. Bu nedenle şekillendirme esnasında matris ile tüp yüzeyinin teması sonucu ortaya çıkan çiziklerin deformasyona olumsuz etkilerinin olmadığı kanaatine varılmıştır. Tüplerde derin çiziklere ait görünüş Şekil 3.29' da sunulmuştur.



Şekil 3.29. Tüplerde derin çiziklere ait görünüş

Testler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

AA6061F : Dip kısmında 15 mm uzunluğunda derin çizik tespit edilmiştir. Hata bölgesinde hataların giderilme çalışmaları yapılmış olup, hata öncesi kalınlık ile hata sonrası kalınlık arasındaki oluşan fark incelenmiştir. Hata öncesi kalınlık 3,43 mm iken hata derinliği 0,4 mm olarak ölçülmüştür. Kritik cidar kalınlığı olan 2,5 mm seviyelerine düşülmediği için bu bölgelerde meydana gelen çiziklerin kısmen çentik etkisi yapsa da mukamet açısından olumsuz bir etkisi olmadığı kanaatine varılmıştır. İncelme oranı: % 11,66

AA6061T4 : Kayda değer bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

AA6061T6 : Kayda değer bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

AA6063F : Dip kısmında 10 mm uzunluğunda malzeme ayrılması(çatlak özelliğinde) tespit edilmiştir.

AA6063T4 : Kayda değer bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

AA6063T6 : Yüzeyde boyuna çizikler

AA6082F : Yüzeyde boyuna çizikler ve üst ağız kısmında çizikler görülmüştür.

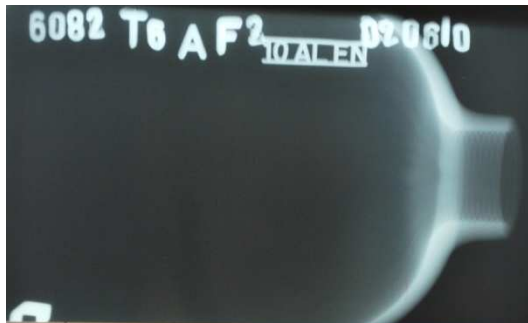
AA6082T4 : Dip kısmında 4 cm² içinde 1 adet 7 mm uzunluğunda süreksizlik, 1 adet 6 mm² gözenek, 1 cm² içinde gözenek topluluğu görülmüştür. Yapılan detaylı incelemelerde incelme miktarının 0,6 mm olduğu, incelme oranının %18,40 olduğu tespit edilmiştir. Fakat kritik cidar kalınlığının üzerinde kalındığı için herhangi bir risk içermemektedir.

AA6082T6 : Kayda değer bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

Tüm prototiplerde yapılan incelemelerde hataların çoğunlukla nispeten cidar kalınlığının orta kısma göre yüksek olduğu uç ve dip kısma yakın bölgelerde meydana geldiği görülmüştür. Hataların meydana geldiği hiç bir yerde tüplerin yırtıldığı kritik cidar kalınlığının altına düşmediği görülmüştür.

3.10. X-Ray ile Radyografik Muayeneler

6061, 6063 ve Al 6082 alaşımlarından F, T4 ve T6 ısıl işlemler için %100 radyografik muayene yapılmıştır. Bu deneyin amacı iç boşluklar, kalıntılar, çatlaklar ve süreksizliklerin tespit edilmesidir. Tankın tüm çevresi 3 eşit parçaya bölünmüş, boyuna doğrultuda 10x48 cm ve 10x16 cm boyutlarında filmler ile çekim gerçekleştirilmiştir. 1 tank için 6 adet film çekimi yapılmıştır. Filmler değerlendirilmiş ve prototip tanklarda herhangi bir hataya rastlanmamıştır. Çekilen röntgen filmlerine ait örnek Şekil 3.30' da verilmiştir.



Şekil 3.30. Çekilen röntgen filmine ait örnek bir görüntü

3.11. Ultrasonik Kalınlık Ölçümleri

6061, 6063 ve Al 6082 alaşımlarından F, T4 ve T6 ısıl işlemlili numuneler için özellikle cidar kalınlığının hassas bir şekilde dağılımını belirlemek üzere ultrasonik kalınlık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler tankların hidrostatik basınç testlerinde her seferinde yırtıldığı bölgede yoğunlaştırılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre tankın cidar kalınlığının en düşük olduğu bölgenin yırtılma bölgesi olduğu anlaşılmıştır. Bunun nedeni ise impact forging işleminden sonra yatay ekstrüzyon işlemi sırasında tankların iç kısmına giren malafanın konik yapılmış olmasıdır. Konik malafa sabit bir matristen geçen tankın dış yüzeyi ile iç yüzeyindeki akışın farklı olmasına ve boyuna yakın bölgede kesitin incelmesine neden olmuştur. Kesitte ultrasonik kalınlık ölçüm sonuçları Şekil 3.31’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Kesitte ultrasonik kalınlık ölçüm sonuçları

Ultrasonik kalınlık ölçüm sonuçlarına göre boyuna yakın olan ve hidrostatik basınç testinde yırtılan bölgede tank cidar kalınlığının en düşük değere ulaştığı anlaşılmıştır.

Bunun sebebi ise tankın yatay ekstrüzyon işlemi tamamlandığında malafadan sıyrılabilmesi için malafanın konik yapılmış olmasıdır. Bu nedenle 30' un üzerinde gerçekleştirilen hidrostatik basınç testlerinde yırtılma sürekli olarak aynı bölgede meydana gelmiştir. Ultrasonik kalınlık ölçümünde bu bölge 3. ölçüm noktası olarak tanımlanmıştır.

BÖLÜM 4. MODELLEME VE ANALİZLER

4.1. Giriş

Bu bölümde, tez kapsamında üretilen AA6061, AA 6063, AA6082 alüminyum tüplerin, bilgisayar ortamında modeli hazırlanmıştır. Bilgisayar destekli (CAD) modelleri yardımıyla sonlu eleman modelleri (FEM) oluşturulmuştur. Modeller hidrostatik basınç analizlerine tabi tutulmuştur. Sonuçta, tüpler içinden en yüksek dayanıma sahip olan bir alaşım türü ve ısıl işlem modeline karar verilmiştir. Bu modellere, tüpün ön görülen basınç dayanımları baz alınarak bir miktar altında ve üstünde değerler ile yükleme yapılmıştır. Bu biçimde yapılan basınç analizlerinde en iyi sonucu veren prototip seçilmiştir.

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik problemlerinin çözümünde, çoğunlukla analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Herhangi bir problem analitik olarak çözülebilirse, o problem için analitik yöntem en iyi yoldur. Ancak mühendislik problemlerinin birçoğunun analitik yöntemlerle çözülmesi mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda sonlu elemanlar metodu alternatif çözüm olarak kullanılmaktadır [104].

Ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yaklaşık sonuçlar elde edilebilir. Bu sonuçların doğruluk oranı ise kullanılan eleman tipi ve mesh yapısı ile doğrudan alakalıdır. Doğru eleman tipi kullanarak ve uygun bir mesh yapısı ile gerçek sonuca çok yakın sonuçlar elde edilebilir. Bu da modelin kurulması esnasında kullanılan dataların doğruluğu ile sağlanabilir [104].

CAD/CAM/CAE (bilgisayar destekli tasarım, imalat ve mühendislik uygulamaları) programlarıyla özellikleri bilinen tüm malzemelerin tel kafes, katı ve yüzey modeli oluşturulabilir ya da endüstriyel tasarım uygulamaları yapılabilmektedir [104].

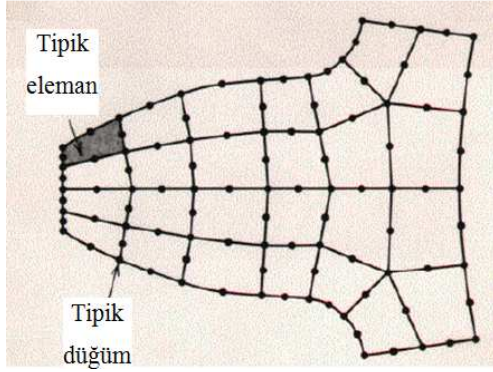
Yapılan katı modele bağımlı imalat resimleri, üretim sürecindeki değişiklikleri kolaylaştırması açısından çok önemlidir. Katı modelleme programlarından direk olarak alınabilen modeller ise sonlu elemanlar metodunda zamandan tasarruf ve daha detaylı modelleme imkânları sunmaktadır. Böylece sonlu eleman modelinin uygun bir şekilde elde edilme süreci kolaylaşmaktadır [104].

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi, her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır [104].

Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem

takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir. Şekil 4.1’de bir dişli parçasının tipik düğüm ve elemanlardan oluşmuş sonlu eleman modeli görülmektedir.



Şekil 4.1. Dişli parçasının sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşım çözüm metodu, izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır:

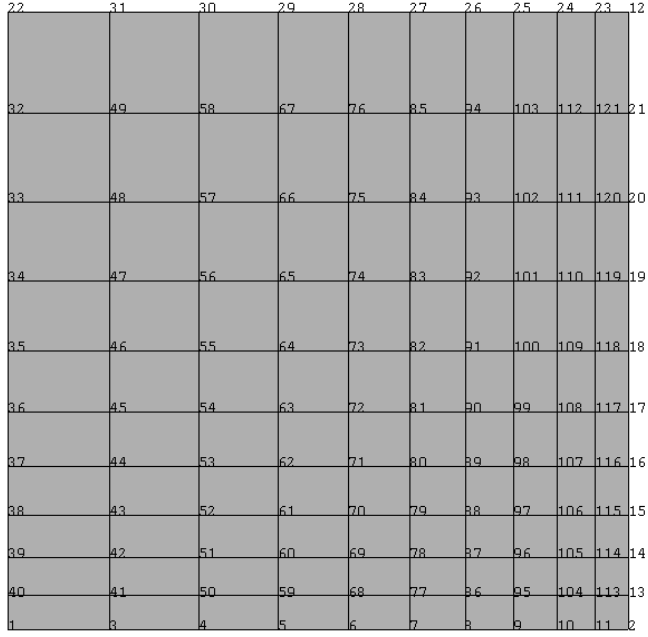
1. Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
2. İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
3. Eleman rijitlik matrisinin teşkili,
4. Sistem rijitlik matrisinin hesaplanması,
5. Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
6. Sınır şartlarının belirlenmesi,
7. Sistem denklemlerinin çözümü.

Sonlu elemanlar metodunda analizi yapılacak olan cismin sonlu boyutta çok küçük elemanlara bölüdüğü varsayılır. Bir boyutlu cisimler düğüm noktalarıyla, iki boyutlu cisimler sınır çizgileriyle, üç boyutlu cisimler ise alanlarla bir birinden ayrılırlar. Bu ayırım biçimleri Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Şekillerde düğüm noktaları numaralarla temsil edilmektedir. İki ve üç boyutlu cisimlerde eleman boyutları ya da eleman şekilleri bir birinden farklı olabilir. Düğüm noktaları ise sınır çizgilerinin kesişim noktalarında alınmaktadır. Bu ayırma işlemi

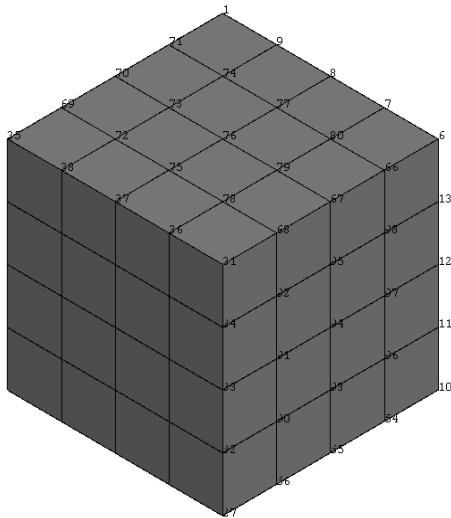
sonucunda cisim, sonlu sayıda elemandan ve bunları bir birine bağlayan düğümlerden oluşan bir yapıya dönüşecektir [105,106,107].

2 ————— 7 ————— 6 ————— 5 ————— 4 ————— 3 ————— 1

Şekil 4.2. Doğrusal sonlu elemanlara ayrılmış 1 boyutlu cisim



Şekil 4.3. Dörtgen sonlu elemanlara ayrılmış 2 boyutlu cisim

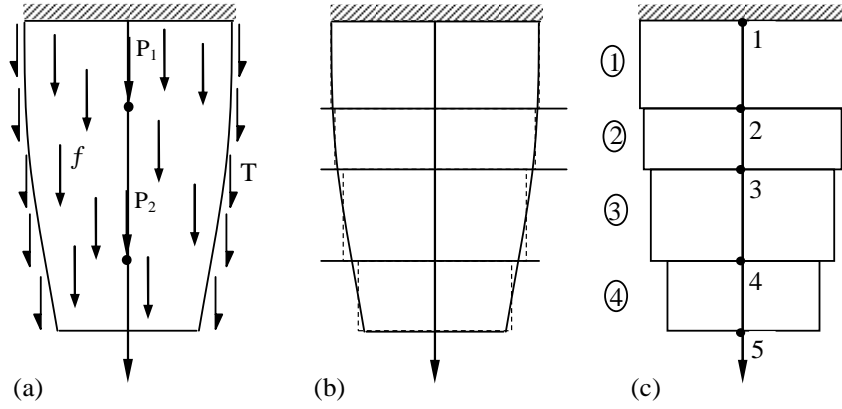


Şekil 4.4. Dikdörtgen prizma elemanlara ayrılmış 3 boyutlu cisim

Yukarıda belirtilen elemanlara bölünme durumu sonlu elemanların temelini teşkil etmektedir. Şekil 4.5-a' daki kademeli elemanın sonlu eleman modellemesinde, çubuk belirli sayıda sabit kesitli elemanlardan meydana gelmiş kademeli çubuk olarak ele alınmaktadır. Burada çubuk dört eleman kullanarak modellenmektedir. Çubuk, Şekil 4.5-b' deki gibi dört bölgeye ayrılmaktadır. Bundan sonra her bir bölgenin ortalama kesit alanı bulunarak eleman tanımlamalarında bu değer kullanılmaktadır.

Çubuğun dört eleman ve beş düğümden oluşan sonlu eleman modeli, Şekil 4.5-c' de gösterilmektedir. Şekil 4.5-c' de eleman numaraları, düğüm numaralarından ayırt edilmesi için yuvarlak içine alınmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, kesit alanı, yüzey kuvveti ve kütle kuvvetleri her eleman için sabit olmaktadır. Doğal olarak kesit alanları ve kuvvetler şiddetleri bakımından elemandan elemana değişebilmektedir.

Yapılan analizin durumuna göre, eleman sayıları artırılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Tekil yüklerin uygulanmış olduğu noktaların, düğüm noktası olarak seçilmesi gerekmektedir. Cisme etkiyen diğer kuvvetler de yalnızca düğüm noktalarından etki ediyormuş gibi ele alınmaktadırlar [104]. Düğümleri, elemanları birbirine bağlayan ve onları bir arada tutan, somun – cıvata bağlantısı gibi düşünmek mümkündür. Düğümlerin kaldırılması durumunda bütün elemanlar bir birlerinden ayrılırlar. Bu durumda komşu elemanlar arasında fiziksel bir süreksizlik meydana gelmektedir [105].



Şekil 4.5. Kütle kuvvetleri, yüzey kuvvetleri ve tekil kuvvetler altındaki çubuğun sonlu elemanlar modeli

Tipik bir elemanın davranışını incelerken üniform bir kesite sahip katı modelin deformasyonunu incelemek gerekmektedir. Bu elemanın kesiti A , uzunluğu l ve maruz kaldığı kuvvet F olmaktadır. Bu durumda parçadaki ortalama gerilme σ aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = F/A \quad (4.1)$$

Parçanın ortalama normal zorlanması ε , boydaki değişimin (Δl) orijinal boya (l) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon = \Delta l/l \quad (4.2)$$

Elastik bölgede gerilme-zorlanma durumu ise Hooke kanunu ile belirlenmektedir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.3)$$

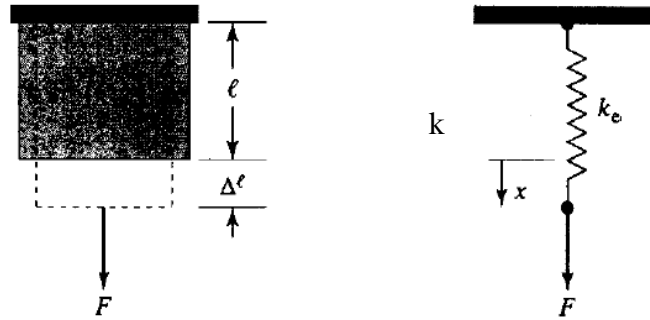
Bu denklemde belirtilen E malzemenin elastisite modülü olmaktadır. (4.1), (4.2) ve (4.3) denklemlerinde aşağıdaki denklem elde edilmektedir [108,109].

$$F = \left(\frac{A \cdot E}{l} \right) \Delta l \quad (4.4)$$

Denklem (4.4), lineer yay denkleminde benzerdir ($F = k \cdot x$). Üniform bir kesite sahip katı model, (k) sabiti olan yay şeklinde modellenenmektedir [104].

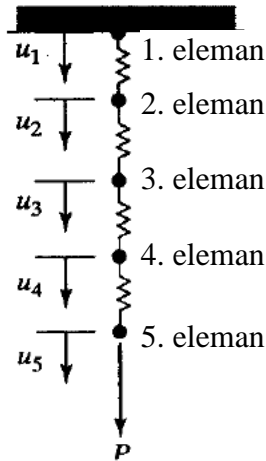
$$k = \frac{A.E}{l} \quad (4.5)$$

Aşağıdaki şekilde üniform kesite sahip katı eleman üzerine F kuvvetinin uygulanışı ve bu durumun yay olarak nasıl belirtildiği gösterilmektedir.



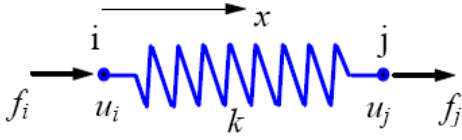
Şekil 4.6. Üniform kesite sahip katı eleman üzerine F kuvvetinin uygulanışı

Şekil 4.6' daki uygulamayı, benzer biçimde Şekil 4.5'e uyguladığımız takdirde Şekil 4.7' deki gibi bir durum elde edilmektedir.



Şekil 4.7. Şekil 4.5'deki modelin yay modeline dönüştürülmesi

Yay haline dönüştürülen elemanlar sonlu elemanlar metodu yardımı ile denklem sistemlerine dönüştürülürler. Aşağıdaki şekilde yay haline dönüştürülmüş bir eleman görülmektedir [104].



Şekil 4.8. Yay elemanı [104]

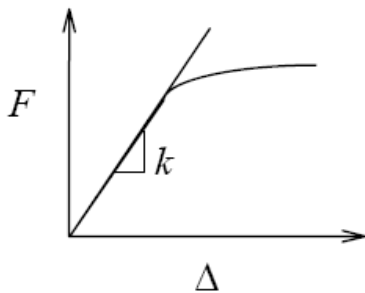
İki düğüm noktası	: i, j
Düğümelerin yer değiştirmeleri	: u_i, u_j
Düğümelerdeki kuvvetler	: f_i, f_j
Yay sabiti (rijitliği)	: k

Yayın kuvvet-yer değiştirme ilişkisi aşağıda verilmektedir.

$$F = k \cdot \Delta \quad (4.6)$$

$$\Delta = u_j - u_i \quad (4.7)$$

Şekil 4.9' da lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi gösterilmektedir [104].



Şekil 4.9. Lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi [104]

Aşağıda birim uzama oluşturması gereken kuvvet durumu verilmektedir [104].

$$k = \frac{F}{\Delta} > 0 \quad (4.8)$$

Yay için kuvvetlerin dengesi değerlendirildiğinde (i) düğümünde [104],

$$f_i = -F = -k(u_j - u_i) = ku_i - ku_j \quad (4.9)$$

(j) düğümünde,

$$f_j = F = k(u_j - u_i) = -ku_i + ku_j \quad (4.10)$$

olmaktadır. Bu denklemler matris formunda yazıldığında ise [104],

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

elde edilmektedir.

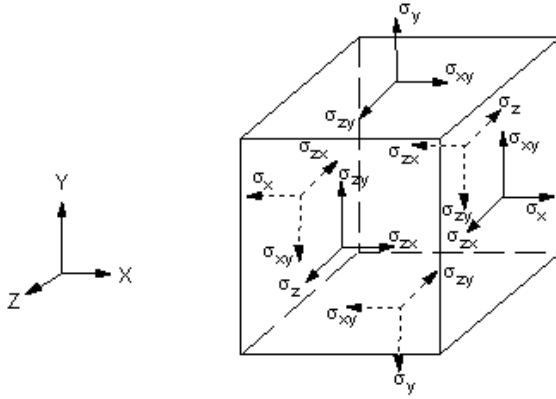
Metodun çözümlenmesinde yukarıda belirtildiği gibi, cisim oluşturan elemanların her birinin eleman rijitlik matrisini ifade etmektir. Daha sonra bu matrisler toplanarak cisme ait tümel rijitlik matrisini meydana getirirler. Bu toplama işleminde cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve deformasyonların sürekliliği sağlanmalıdır. Denklem sisteminin genel tanımlaması ise, aşağıdaki matris denklemi şeklinde olmaktadır:

$$[K] \{u\} = \{F\} \quad (4.12)$$

Belirtilen denklem yardımıyla, yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Yer değiştirmelerden ise, zorlanmalar ve gerilmeler hesaplanabilmektedir [104].

Cisimlerin birim alanlarına etkiyen yüzey kuvvetleri, koordinat eksenlerine paralel olarak üç bileşene (X, Y, Z) ayrılmaktadır. Bu kuvvetler neticesinde ise normal ve

kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Aşağıda eleman yüzeylerindeki gerilme durumunu veren şekil gösterilmektedir [104].



Şekil 4.10. Yüzeylerdeki gerilme durumu

Şekil 4.10'da belirtildiği gibi sürekli bir ortamda, bir noktadaki gerilme hali, dokuz bileşenli bir tansörle ifade edilmektedir. Bu tansör simetrik olup gerçekte altı bileşeni mevcuttur[104]. Aşağıda bu tansör verilmektedir.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Normal gerilmeler

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: Kayma gerilmeleri

Bu tansörler matris hesabında aşağıdaki gerilme vektörü ile ifade edilmektedirler [104].

$$\{\sigma^T\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}] \quad (4.14)$$

Sürekli bir ortamda, bir noktanın deformasyon hali, dokuz bileşenli bir tansörle ifade edilmektedir [104].

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{xy} & 1/2\gamma_{xz} \\ 1/2\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 1/2\gamma_{yz} \\ 1/2\gamma_{zx} & 1/2\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: Normal deformasyonlar (zorlanmalar)

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$: Kayma deformasyonları (zorlanmaları)

Normal zorlanma bileşenleri, sonsuz küçük mertebede çizgisel bir elemanın birim boyu başına düşen uzunluk değişimi olarak; kayma zorlanma bileşenleri ise, başlangıçta birbirine dik olan iki çizgisel elemanın arasındaki açı değişimi olarak tanımlanmaktadır. Zorlanma tansörü de gerilme tansörü gibi simetriktir ve altı bağımsız bileşeni aşağıdaki zorlanma vektörü ile gösterilmektedir [104].

$$\{\varepsilon^T\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, 1/2\gamma_{xy}, 1/2\gamma_{yz}, 1/2\gamma_{zx}] \quad (4.16)$$

En basit gerilme-zorlanma bağıntısı ‘‘Hooke Kanunu’’ dur ve gerilme bileşenlerinin zorlanma bileşenleri ile orantılı olduğunu ifade eder. Bu kanun bir boyutlu çubuklar için[110];

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.17)$$

Eşitliği ifade edilmektedir. Burada E ‘‘elastisite modülüdür’’. ‘‘Hooke Kanunu’’ üç boyutlu ortam için aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir [104].

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4.18)$$

Burada [D] ‘‘malzeme matrisi’’ dir. ‘‘Hooke Kanunu’’ matris biçiminde ifade edilirse aşağıdaki durum ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & \dots & D_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{61} & \dots & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

Verilen denklem sistemlerinin geliştirilmesi ile sonlu elemanlar metodunun temeli oluşturulmaktadır.

4.3. Sonlu Eleman Analizleri

Temel sonlu elemanlar teorisi farklı durumlar için uyarlanarak birçok konuda analiz yapılabilmektedir. Bazı ana başlıkları belirtmek gerekirse;

1. Yapısal analiz
2. Termal analiz
3. Akış analizi
4. Manyetik analiz
5. Elektrik analizi

Bu ana başlıklar kendi aralarında daha detaylı alt gruplara ayrılmaktadır [104]. Bu çalışmada dikişsiz alüminyum tüplerin hidrostatik basınç dayanımları incelenmektedir. Tüpler farklı alaşım ve ısıl işlem durumuna göre modellenmiş ve içlerinden mukavemeti yüksek olanı seçilmiştir. Dayanım bilgisayar destekli analiz (ANSYS) ile belirlenmiştir.

Günümüz genel amaçlı sonlu eleman yazılımları ile malzeme modellemek ve analiz yapmak mümkündür. Bu yazılımlar genellikle, maksimum gerilme, maksimum şekil değiştirme, Tsai-Wu, Hoffman gibi hasar kriterlerini kullanmaktadırlar. Dolayısıyla analizlerde bu kriterler kullanılarak kompozit yapının uygulanan kuvvet altında hasara uğrayıp uğramadığı belirlenir. Özellikle Tsai-Wu ve Hoffman kriterleri birçok tasarımcı tarafından kullanılan hasar kriterleridir. Bu kriterler hasarın şeklini tespit edemezler. Uygulanan kuvvete karşılık elde edilen gerilme değerleri kriterlerde yerine konularak malzemenin hasara uğrayıp uğramadığı belirlenir [106].

Sonlu elemanlar metodu, mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan sayısal bir metottur. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak, örnek olarak bir yapıda kuvvet

altında meydana gelen gerilme dağılımı, deformasyon vb. hesaplanabilir. Bu metot kullanılarak ayrıca ısı transferi, dinamik, titreşim analizi gibi analizler de yapılabilir.

Sonlu elemanlar metodunda analiz edilen yapı belirli sayıda elemanlara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir eleman birbirine düğüm noktaları ile bağlanır. Analiz şekline ve incelenen yapının geometrisine göre farklı eleman tipleri seçilebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık, v.b. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki bu bilgilerin ortalamaları alınarak elemana ait bilgiler elde edilir.

Elastisite teorisine göre bir cisimdeki gerilme durumu aşağıda belirtilen denge denklemlerini sağlamak zorundadır:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + b_x = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + b_y = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z = 0 \quad (4.22)$$

Burada b_x , b_y ve b_z birim hacimdeki cisim kuvvetlerini (yerçekimi kuvveti gibi) ifade etmektedir. Doğrusal (lineer) elastik ve izotropik malzemeler için üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde belirtilmektedir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (4.23)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (4.24)$$

Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı aşağıdaki gibi belirtilmektedir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial yz} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (4.25)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\delta\} \quad (4.26)$$

İki boyutlu, düzlemsel gerilme durumunda; $\partial z = \partial z x = \partial y z = 0$. Bu durumda, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.27)$$

şekil değiştirme-deplasman bağıntısı ise:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (4.28)$$

şeklinde ifade edilir.

Minimum potansiyel enerji teorisine göre, elastik bir cismin potansiyel enerjisi şu şekilde belirtilmektedir:

$$\Pi = U - W \quad (4.29)$$

U; şekil değiştirme enerjisini, W ise dış kuvvetlerin cisim üzerinde yapmış olduğu işi tanımlamaktadır.

Minimum potansiyel enerji teorisine göre bir cismin dengede olabilmesi için potansiyel enerjisinin minimum olması gerekir. O halde,

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (4.30)$$

olmalıdır.

Doğrusal ve elastik bir cisim için şekil değiştirme enerjisi şu şekilde ifade edilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_v \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dv = \frac{1}{2} \int_v \{\varepsilon\}^T [E] \{\varepsilon\} dv \quad (4.31)$$

Bir cisme dışarıdan etkiyen yükler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; yayılı yükler (basınç vb.), cisim kuvvetleri ve noktasal yüklerdir. Dış yüklemelerin cisim üzerinde yapmış oldukları iş şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = \int_v \{\delta\}^T \{b\} dv - \int_{S_1} \{\delta\}^T \{T\} dS_1 + \sum_{i=1}^l \{\delta_i\}^T \{P_i\} \quad (4.32)$$

Deplasman vektörü, şekil fonksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N]\{q\} \quad (4.33)$$

şekil değiştirme vektörü, düğüm noktalarının yer değiştirmesine $\{q\}$ bağlı olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [d][N]\{q\} = [B]\{q\} \quad (4.34)$$

Gerilme vektörünün düğüm noktalarının fonksiyonu olarak gösterimi ise;

$$\{\sigma\} = [D]\{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}\} = [D][B]\{q\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (4.35)$$

Burada, $\varepsilon_0 = \{\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0\}^T$, α ; ısıl genleşme katsayısı, ΔT ; sıcaklık farkıdır.

Bu durumda bir elemana ait şekil değiştirme enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] [B] \{q\} dv - \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dv \\ & - \int_{V^e} \{q\}^T [N]^T \{b\} dv - \int_{S_1^e} \{q\}^T [N]^T \{T\} dS_1 \end{aligned} \quad (4.36)$$

Yapıya ait toplam potansiyel enerji, her bir elemanın enerjisinin toplamıdır.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_C\} \quad (4.37)$$

Burada, $\{Q\}$, yapının yer değiştirme vektörü tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[\int_V [B]^T [D] [B] dv \right] \{Q\} \\ & - \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left\{ \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dv + \int_V [N]^T \{b\} dv \right. \\ & \left. + \int_S [N]^T \{T\} dS \right\} - \{Q\}^T \{F_C\} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Yukarıdaki ifadede;

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B]dv \quad : \text{elemanın katılık matrisi}$$

$$\{f_i\} = \int_V [B]^T [D][\varepsilon_0]dv \quad : \text{elemanın sıcaklık kuvvet vektörü}$$

$$\{f_b\} = \int_V [N]^T \{b\}dv \quad : \text{eleman cisim kuvvet vektörü}$$

$$\{f_s\} = \int_S [N]^T \{T\}dS \quad : \text{eleman yüzey kuvvet vektörü}$$

Minimum potansiyel enerji teorisi yukarıda ifade edilen eşitliklerden sonra kısaca şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = \{0\} \quad (4.39)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak,

$$[K]\{Q\} = \{F\} \quad (4.40)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak elemanların düğüm noktalarındaki deplasman değerleri ve reaksiyon kuvvetler elde edilir. İki boyutlu, üç düğüm noktasına sahip üçgen eleman için şekil fonksiyonu aşağıda belirtildiği gibidir. u, v deplasmanlarının eleman içerisinde lineer fonksiyon oldukları varsayımı ile şöyle ifade edilebilir:

$$u = b_1 + b_2x + b_3y, v = b_4 + b_5x + b_6y \quad (4.41)$$

b_i ($i = 1,2, \dots, 6$) sabittir.

Her bir düğüm noktasına ait deplasman şu şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned}
u_1 &= b_1 + b_2x_1 + b_3y_1 \\
u_2 &= b_1 + b_2x_2 + b_3y_2 \\
u_3 &= b_1 + b_2x_3 + b_3y_3 \\
v_1 &= b_4 + b_5x_1 + b_6y_1 \\
v_2 &= b_4 + b_5x_2 + b_6y_2 \\
v_3 &= b_4 + b_5x_3 + b_6y_3
\end{aligned} \tag{4.42}$$

Yukarıda tanımlanan eşitlikler yeniden düzenlenerek aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \tag{4.43}$$

şekil fonksiyonları, N_i , x ve y 'nin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
N_1 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y\} \\
N_2 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\} \\
N_3 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\}
\end{aligned} \tag{4.44}$$

A ; üçgenin alanını ifade etmektedir.

şekil değiştirme-deplasman bağıntısı;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B]\{q\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \tag{4.45}$$

Yukarıda belirtilen şekil fonksiyonları başka bir biçimde de tanımlanabilir. Üçgen eleman üzerinde doğal koordinatlar tanımlanabilir ve şekil fonksiyonları bu koordinat sistemine göre yeniden ifade edilebilir.

$$N_1 = \xi, N_2 = \eta, N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (4.46)$$

Yukarıdaki ifadenin tanımlanmasında $N_1 + N_2 + N_3 = 1$ özelliğinden faydalanılmıştır.

$$\begin{aligned} x &= x_{13}\xi + x_{23}\eta + x_3 \\ y &= y_{13}\xi + y_{23}\eta + y_3 \end{aligned} \quad (4.47)$$

Burada $x_{ij} = x_i - x_j$ ve $y_{ij} = y_i - y_j$ ($i, j = 1, 2, 3$)

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.48)$$

Yukarıdaki ifadede J, Jacobian matrisidir [111,112].

4.3.1. Kompozit malzemelerde sonlu elemanlar analizi

Yapıların mukavemetlerinin belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir. Genelleştirilmiş Hooke kanunu üç boyutlu bir cisim için şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.49)$$

Yukarıda matris şeklinde belirtilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\sigma_k = C_{kj} \varepsilon_j (k, j = 1, 2, \dots, 6) \quad (4.50)$$

Burada C_{kj} elastiklik katsayılarıdır.

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluk fonksiyonu U_o aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$U_o = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i \quad (4.51)$$

Denklem 4.50' deki ifade yukarıda yerine konur ve integral alınır;

$$U_o = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad (4.52)$$

ifadesi elde edilir.

$$\sigma_k = \frac{1}{2} (C_{kj} + C_{jk}) \varepsilon_j \quad (5.53)$$

Denklem 4.50 ile Denklem 4.53 karşılaştırıldığında, $C_{kj} = C_{jk}$ olduğu görülür.

Denklem 4.49'da belirtilen ilişki anizotropik malzemeler için geçerlidir ve Hooke kanununun en genel halidir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyafların birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç ekseninde simetrik malzeme özelliği mevcuttur. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & C_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Yukarıdaki ilişkide $[C]$ katılık matrisini ifade etmektedir. Katılık matrisinin elemanları mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3}, C_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2} \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{\Delta E_1 E_2}, C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_3} \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_2} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2}, C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta E_1 E_2} \\ C_{44} &= G_{23}, C_{55} = G_{13}, C_{66} = G_{12} \\ \Delta &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bir başka şekilde aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.56)$$

$[S]$ uygunluk matrisi olarak isimlendirilmektedir ve $[C]$ katılık matrisinin tersidir. Ortotropik malzemeler için uygunluk matrisi $[S]$ mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{32}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda eğer düzlem dışında kuvvet uygulanmıyorsa, düzlemsel gerilme durumu söz konusudur. Bu durumda;

$$\sigma_3 = 0, \tau_{31} = 0, \tau_{23} = 0 \quad (4.58)$$

Düzlemsel gerilme durumu için Hooke Kanunu şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (4.59)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

Laminatlar genellikle farklı açılı tabakalardan meydana gelir. Bunun sebebi farklı yönlerde de yüksek mekanik özellikler elde etmektir.

Tabakalarda kullanılan koordinat sistemi 1-2 olarak isimlendirilir. 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü belirtir. 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı laminalarda çakışmaz.

Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır.

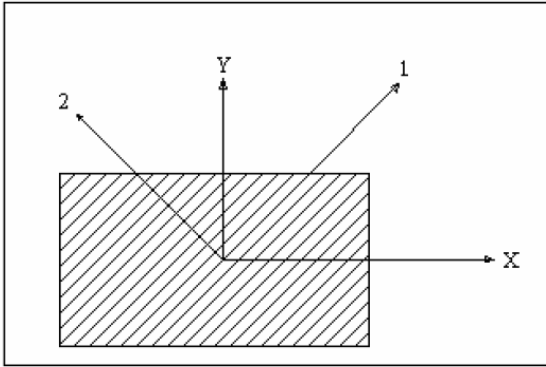
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

[T] dönüşüm matrisi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

$$c = \cos(\theta), \quad s = \sin(\theta)$$



Şekil 4.11. Eksen takımları

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{bmatrix}$$

[R] Reuter matrisidir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.63)$$

x-y koordinat eksen takımında gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

Gerilme Analizleri:

İzotropik malzemeden imal edilmiş prizmatik bir kirişi ele alalım. Çekme kuvvetine maruz kalan kiriş için herhangi bir kesitteki normal gerilme şu şekilde hesaplanır. Bu durumda elastik bölgede normal birim şekil değiştirme ise

$$\varepsilon_x = \frac{P}{AE} \quad (4.65)$$

Burada E; elastik modülü, P; uygulanan kuvveti, A; kesit alanını ifade etmektedir. Eger kiriş sadece eğilme momentine maruz kalırsa bu durumda,

$$\varepsilon_x = \frac{Z}{\rho} \quad (4.66)$$

z; merkezden olan uzaklık, ρ; kirişin eğilme yarıçapı.

$$\sigma_x = \frac{EZ}{\rho}, \sigma_x = \frac{MZ}{I} \quad (4.67)$$

Burada $I = \int_A z^2 dA$ olup, alan eylemsizlik momentidir.

Eger kiriş hem çekme kuvvetine hem de eğilme momentine maruz kalır ise bu durumda, birim şekil değiştirme şu şekilde ifade edilebilir;

$$\varepsilon_x = \frac{1}{AE}P + \left(\frac{z}{IE}\right)M$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 + \frac{z}{\rho} \quad (4.68)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 + z\kappa$$

ε_0 ; $z = 0$ bölgesindeki şekil değiştirmeyi, κ ; ise kirişin eğimini ifade etmektedir.

$$u = u_0 - z\alpha \quad (4.69)$$

burada,

$$\alpha = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.70)$$

x-ekseninde u ise,

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (4.71)$$

benzer şekilde y-eksenindeki yer değiştirme ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (4.72)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

Tabakalardaki şekil değiştirme, matris şeklinde şu şekilde tanımlanabilir,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon^0_x \\ \varepsilon^0_y \\ \gamma^0_{xy} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.73)$$

Gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntı ise şu şekilde tanımlanabilir,

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + Z \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

n tabakadan oluşan bir kompozit levha ele alınsın. Her bir tabaka kalınlığı t_k olsun. Levhanın toplam kalınlığı h ile ifade edilsin. Bu durumda levha kalınlığı şu şekilde de ifade edilebilir:

$$h = \sum_{k=1}^n t_k \quad (4.75)$$

Birinci tabakanın z -eksenindeki konumu:

$$h_0 = -\frac{h}{2} \quad (\text{üst düzey})$$

$$h_1 = -\frac{h}{2} + t_1 \quad (\text{alt düzey}) \quad (4.76)$$

tabaka k ($k=2,3,\dots,n-2, n-1$) için:

$$h_{k-1} = -\frac{h}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} t_i \quad (\text{üst düzey})$$

$$h_k = -\frac{h}{2} + \sum_{i=1}^k t_i \quad (\text{alt düzey}) \quad (5.77)$$

tabaka n için:

$$h_{n-1} = \frac{h}{2} - t_n \quad (\text{üst düzey})$$

$$h_n = -\frac{h}{2} \quad (\text{alt düzey}) \quad (4.78)$$

Her bir tabaka için global gerilmelerin integrali alındığında, x - y düzleminde, birim uzunlukta bileşke kuvvet şu şekilde ifade edilebilir:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz$$

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (4.79)$$

$$N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz$$

Benzer şekilde, Her bir tabaka için global gerilmelerin integrali alındığında, x-y düzleminde, birim uzunlukta bileşke moment şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \\ M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \\ M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz \end{aligned} \quad (4.80)$$

Bileşke kuvvet ve momentler matris şeklinde şu şekilde belirtilebilir:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \\ \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz \end{aligned} \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z dz \\ \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} z^2 dz \\ \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} &= \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} &= \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right\} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \left\{ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right\} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.82)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0_x \\ \varepsilon^0_y \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0_x \\ \varepsilon^0_y \\ \gamma^0_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Burada

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i = 1,2,3; j = 1,2,3 \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h^2_k - h^2_{k-1}), \quad i = 1,2,3; j = 1,2,3 \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\overline{Q}_{ij})]_k (h^3_k - h^3_{k-1}), \quad i = 1,2,3; j = 1,2,3 \end{aligned} \quad (4.84)$$

Kompozit Malzemeler için Hasar Kriterleri:

Tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin mukavemet özellikleri 1-2-3 eksenleri doğrultusunda verilir. Bir başka deyişle, tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin takviye elemanı doğrultusundaki mukavemeti ve takviye elemanına dik doğrultudaki mukavemeti çekme/basma testleri ile belirlenir.

Kompozit malzeme 1-2-3 ekseninde maksimum kopma ve şekil değiştirme şu şekilde isimlendirilmektedir:

X^C : 1 yönündeki maksimum basma dayanımı

X^T : 1 yönündeki maksimum çekme dayanımı

Y^C : 2 yönündeki maksimum basma dayanımı

Y^T : 2 yönündeki maksimum çekme dayanımı

Z^C : 3 yönündeki maksimum basma dayanımı

- Z^T : 3 yönündeki maksimum çekme dayanımı
 S_{12} : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
 S_{23} : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
 S_{13} : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma dayanımı
 e_1^C : 1 yönündeki maksimum basma birim uzaması
 e_1^T : 1 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
 e_2^C : 2 yönündeki maksimum basma birim uzaması
 e_2^T : 2 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
 e_3^C : 3 yönündeki maksimum basma birim uzaması
 e_3^T : 3 yönündeki maksimum çekme birim uzaması
 g_{12}^F : 1-2 düzlemindeki maksimum kayma açısı
 g_{23}^F : 2-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı
 g_{13}^F : 1-3 düzlemindeki maksimum kayma açısı

Maksimum gerilme teorisi:

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma gerilmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar meydana gelmez.

$$\begin{aligned}
 -X^C < \sigma_1 < X^T \\
 -Y^C < \sigma_2 < Y^T \\
 -Z^C < \sigma_3 < Z^T \\
 -S_{12} < \tau_{12} < S_{12} \\
 -S_{23} < \tau_{23} < S_{23} \\
 -S_{13} < \tau_{13} < S_{13}
 \end{aligned} \tag{4.85}$$

Maksimum şekil değiştirme teorisi:

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma şekil değiştirmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar oluşmaz.

$$\begin{aligned}
-\varepsilon_1^C &< \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\
-\varepsilon_2^C &< \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\
-\varepsilon_3^C &< \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\
-\gamma_{12}^F &< \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\
-\gamma_{23}^F &< \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\
-\gamma_{13}^F &< \gamma_{13} < \gamma_{13}^F
\end{aligned} \tag{4.86}$$

Tsai-Hill hasar teorisi:

Tsai-Hill Hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış şeklidir. Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki formülasyonu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$\begin{aligned}
&(G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 \\
&\quad - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1 \\
G_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\sigma_2^T]^2} - \frac{1}{[\sigma_1^T]^2} \right) \\
G_2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\sigma_1^T]^2} \right) \\
G_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\sigma_1^T]^2} \right) \\
G_6 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{[\tau_{12}^F]^2} \right)
\end{aligned} \tag{4.87}$$

Hoffman hasar kriteri:

Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki durumu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z^T Z^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{X^T X^C} \right) \tag{4.88}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^c} + \frac{1}{Z^T Z^c} - \frac{1}{Y^T Y^c} \right)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^c} + \frac{1}{Y^T Y^c} - \frac{1}{Z^T Z^c} \right)$$

$$C_4 = \frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^c}$$

$$C_5 = \frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^c}$$

$$C_6 = \frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^c}$$

$$C_7 = \frac{1}{S_{23}^2}$$

$$C_8 = \frac{1}{S_{13}^2}$$

$$C_9 = \frac{1}{S_{12}^2}$$

$$[C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{13}^2 + C_9\tau_{12}^2]/F < 1$$

Tsai-Wu hasar teorisi:

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Bu teoriye göre aşağıdaki formülasyon sağlandığında yapıda hasar meydana gelmez.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6$$

$$\left[\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^c} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^c} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^c} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^c} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^c} + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^c} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 \right] < 1 \quad (4.89)$$

$$F_{12}^2 = \frac{1}{X^T X^c} \frac{1}{Y^T Y^c}$$

$$F_{23}^2 = \frac{1}{Y^T Y^c} \frac{1}{Z^T Z^c}$$

$$F_{13}^2 = \frac{1}{X^T X^c} \frac{1}{Z^T Z^c}$$

Hashin hasar teorisi:

Hashin hasar teorisi hasarın şeklini ayırt edebilmektedir. Bu teoriye göre matris yapıda veya elyafta bir hasarın olup olmadığı tespit edilebilmektedir [113,114]. Matris çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_2 > 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_2}{\gamma^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (4.90)$$

Matris basma hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_2 < 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_2}{\gamma^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 > 1 \quad (4.91)$$

Elyaf-matris arasındaki kayma hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_1 < 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (4.92)$$

Elyaf çekme hasarı aşağıdaki durum sağlandığı takdirde meydana gelir.

$\sigma_1 > 0$ için;

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 > 1 \quad (4.93)$$

$\sigma_1 < 0$ için;

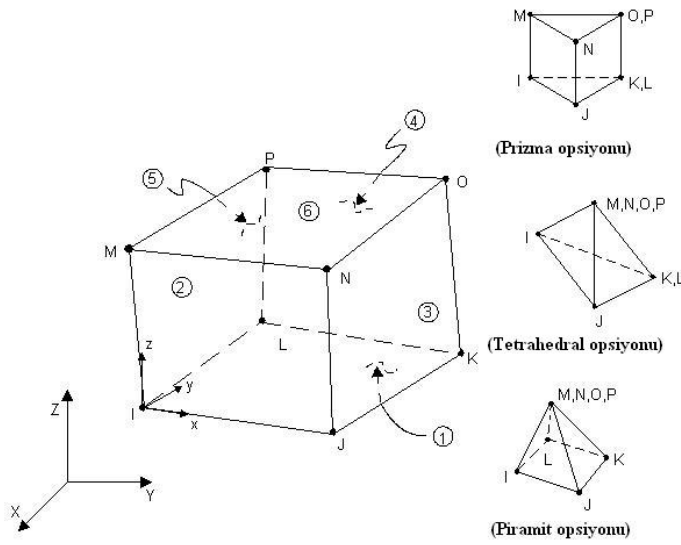
$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 > 1 \quad (4.94)$$

Yukarıda, kompozit malzemeler için önemli olduğu düşünülen hasar teorilerine yer verilmiştir. Maksimum gerilme teorisi, maksimum şekil değiştirme teorisi ve Hashin hasar teorileri hasar şekillerini ayırt edebilmektedirler. Diğer teorilerde hasar şekilleri ayırt edilmemiştir. Maksimum gerilme teorisi ve maksimum şekil değiştirme teorisinde kayma gerilmesinin normal gerilme ile etkileşimi yer almamaktadır. Dolayısıyla bu teoriler konservatif teorilerdir. Hashin hasar teorilerinde ise kayma gerilmesinin normal gerilmeler ile etkileşimine yer verilmiştir. Hasar şekillerini de ayırt ettiği için Hashin hasar teorileri sonlu eleman analizleri için en uygun teorilerdir.

Analizlerde kullanılan eleman tipi:

Ansysis programında, kabul edilebilir hata sınırları içerisinde bir çözüm yapabilmek için eleman tipinin doğru seçilmesi gerekmektedir. ANSYS eleman havuzunda farklı problemler için kullanılan, birçok eleman mevcut olup, her eleman ve her problem için uygun değildir [104].

Bu çalışmada, üç boyutlu bir modelleme yapıldığı için ve Pro-Engineer tasarım programından, ANSYS analiz programına direk katı aktarımı çok kolay olduğundan, solid eleman kullanılmıştır. Kullanılan bu eleman tipi solid-164 olarak isimlendirilmektedir. Solid-164 eleman tipi Şekil 4.12' de gösterilmektedir [104].



Şekil 4.12. Solid 164 eleman tipi [104,112]

Malzeme modelleri:

Sonlu elemanlar analizinde elde edilecek sonuçlar, seçilen malzeme modeline bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Kullanılan malzeme modeline bağlı olarak, kullanılan formülasyon ve sonuçta elde edilen deformasyon değerleri değişmektedir. Bunun nedeni ise değişik malzeme modellerinin farklı parametreleri dikkate alması ve bazı faktörleri ise ihmal etmesidir. Bu nedenle ihmal edilecek faktörlerin ve ağırlık derecelerinin kullanıcı tarafından doğru olarak belirlenmesi ve buna bağlı olarak uygun malzeme modelinin kullanılması gerekmektedir [104,105].

Analizlerde her malzeme kendi özellik ve davranışına göre farklı malzeme modelini kullanmaktadır. Çelik, lastik, köpük, beton, polimer, kompozit vb. malzemeler farklı yapıda oldukları için verecekleri tepkilerde değişik olmaktadır. Her malzemenin deformasyon şekli, hem yapısına hem de analiz tipine (statik, dinamik, çarpma, termal, manyetik vb.) göre değişiklikler göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı malzeme modeli en önemli kısımlardan birini oluşturmaktadır. Analiz için öncelikle çalışmanın hangi aralıkta olacağı tespit edilmelidir (elastik, plastik deformasyon bölgesi). Bu aşamadan sonra malzemeyi en iyi tanımlayan malzeme modeli seçilmelidir. Bu çalışmadaki alüminyum tüplerin hidrostatik basınç testi sürecinde,

tüpte kullanılan alüminyum malzemede, küçük deformasyonlar oluşacağı bilindiğine göre lineer ve elastik malzeme modellerinden uygun olanının kullanılması gerekmektedir.

İzotropik pekleşme modeli:

İzotropik malzeme, bir malzemenin tüm yönlerde tüm özelliklerinin aynı olduğu durumu ifade etmektedir. İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin boyutu büyümekte ve genişlemektedir; ama düzlemdeki merkezi aynı kalmaktadır. Bu malzeme modelinde malzemenin gerilme-zorlanma davranışını tanımlamak için elastik ve plastik olmak üzere iki eğri mevcuttur. Bu malzeme modeli zorlanma parametrelerinden bağımsız olmaktadır.

Genelde sac metal şekillendirmesinde tüm form verme zamanının uzun olduğu koşullarda kullanılmaktadır. Aşağıdaki Bilineer İzotropik (BISO) malzeme modellerinde sıcaklığa bağımlılık durumuna göre sınıflandırma yapılmıştır.

1. Bilineer İzotropik(BISO) Model: Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν) ve Yoğunluk (ρ) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Akma Gerilme Değeri (σ_a) ve Tanjant Modülü (E_t) değerleri de girilebilmektedir.
2. Sıcaklığa Bağlı Bilineer İzotropik Model: Gerilme-zorlanma davranışı, altı farklı sıcaklığa kadar belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν), Yoğunluk (ρ) ve Isıl Genleşme Katsayısı (α) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Akma Gerilme Değeri (σ_a) ve Tanjant Modülü (E_t) değerleri de girilebilmektedir. Eğer bir sıcaklığa bağlı davranış belirlenirse Bilineer İzotropik model kabul edilmektedir.

Anizotropik pekleşme modeli:

Anizotropik malzeme, bir malzemenin değişik yönlerde değişik özelliklerinin olduğu durumu ifade etmektedir. İki boyutlu elemanlar için uygun olmaktadır.

1. Anizotropik Pekleşme Modeli: Bu model, kabuk ve iki boyutlu elemanlar için kullanılmaktadır. Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν), Yoğunluk (ρ), Akma Gerilme Değeri (σ_a), Tanjant Modülü (E_t) ve Anizotropik Pekleşme Parametresi (R) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak efektif akma gerilmesi ile efektif plastik zorlanmaya bağlı Yükleme Eğri Numarası (ID) girilmektedir.
2. Anizotropik -şekillendirme Sınır Diyagramı(FLD)- Pekleşme Modeli: Bu model, anizotropik malzemelerin sac-metal simülasyonları için kullanılmaktadır. Bu modelde gerilme akışının bağımlılığı ile efektif plastik zorlanma, tanımlanmış yük eğrisi ile modellenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν), Yoğunluk (ρ), Akma Gerilme Değeri (σ_a), Tanjant Modülü (E_t) ve Anizotropik Pekleşme Parametresi (R) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak efektif gerilmeye bağlı Yükleme Eğrisi ve şekillendirme Sınır Diyagramı -(FLD) girilmektedir.

Kinematik pekleşme modeli:

Bu malzeme modelinde malzemenin gerilme-zorlanma davranışını tanımlamak için elastik ve plastik olmak üzere iki eğri mevcuttur.

1. Bilineer Kinematik (BKIN) Model: Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Bu malzeme modeli zorlanma parametrelerinden bağımsız olmaktadır. Bu model de akma yüzeyinin ebadı sabit kalmakta, fakat merkezi, düzlem üzerinde yer değiştirmektedir[80]. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν) ve Yoğunluk (ρ) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Akma Gerilme Değeri (σ_a) ve Tanjant Modülü (E_t) değerleri de girilebilmektedir.
2. Plastik Kinematik Model: Bu malzeme modeli, izotropik ve kinematik pekleşme modellerinin karışımıdır. Yani hem akma yüzeyinin ebadı, değişmekte; hem de merkezi, düzlemde yer değiştirmektedir. İzotropik ve kinematik dağılımlar Pekleşme Parametresinin (β), 0 (kinematik pekleşme) ile 1 (izotropik pekleşme)

arasında ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir. Zorlanma oranı, gerilmeyi zorlanma oranına bağımlı faktör (σ_a) ile ölçeklendiren Cowper—Symonds Modeliyle belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı (ν), Yoğunluk (ρ), Akma Gerilme Değeri (σ_a) ve Tanjant Modülü (E_t) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Pekleşme Parametresi (β), Cowper-Symonds Zorlanma Oranı Parametreleri (C, P) ve Zorlanma Hasarı değerleri de girilmektedir. Bu modelde de gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir.

İfade edilen modellerin haricinde daha pek çok malzeme modeli mevcuttur. Çalışmanın kapsamına göre bu modeller yeterli olmaktadır. Bu çalışma, kolaylık ve uygunluk bakımından katı model olarak meydana getirilmiştir.

Modeller değerlendirildiğinde; Anizotropik Pekleşme Modelleri kabuk ve iki boyutlu elemanlarda uygun olmaktadır. Bilineer İzotropik (BISO) Pekleşme Modeli için akma yüzeyinin boyutu büyümekte ve genişlemektedir; ama düzlemdeki merkezi aynı kalmaktadır. Bilineer Kinematik (BKIN) Modelin de ise, akma yüzeyinin ebadı sabit kalmakta, fakat merkezi, düzlem üzerinde yer değiştirmektedir. Plastik Kinematik Model ise hem akma yüzeyinin ebadı, değişmekte; hem de merkezi, düzlemde yer değiştirmektedir. Tüm bu değişkenler göz önüne alındığında bu çalışma, için en uygun malzeme modeli “Plastik Kinematik Pekleşme Modeli” olmaktadır.

Plastik kinematik pekleşme modeli:

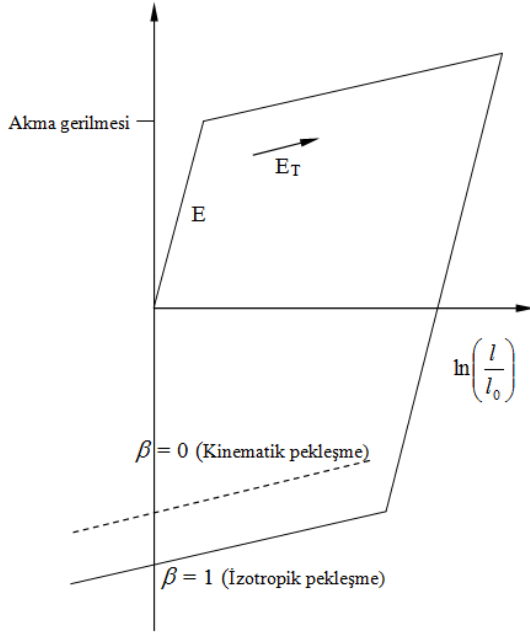
Plastik kinematik pekleşme modeli, kinematik ve izotropik olmak üzere iki ayrı şekilde ifade edilebilmektedir. İzotropik pekleşme modelinde malzemenin çekme diyagramındaki maksimum gerilme dikkate alınmaktadır. Akma yüzeyinin boyutu büyür, genişler (yarıçap plastik zorlanmaya bağlıdır) ama akma yüzeyinin merkezi sabit kalır. Kinematik pekleşme modelinde ise kriter olarak akma gerilmesi alınır. Akma yüzeyinin yarıçapı sabit kalır, fakat merkezi plastik zorlanma yönünde yer değiştirir. Bu değişimler Ansys programında β sembolü ile ifade edilmektedir. β

değerinin 0 olması durumunda kinematik pekleşme modeli, 1 olması durumunda ise izotropik pekleşme modeli geçerli olur.

Bu modelde şekil değişim hızı (deformasyon oranı), Cowper-Symonds modeli kullanılarak belirlenmektedir. Cowper-Symonds modeli, akma gerilmesini, şekil değişimi hızına bağlı bir faktör yardımıyla hesaplamaktadır.

$$\sigma_a = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p) \quad (4.95)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada C ve P Cowper –Symonds parametrelerini belirtmektedir. $\dot{\epsilon}$ ise şekil değişimi hızını göstermektedir. Şekil 4.13’ te kinematik ve izotropik pekleşme modelleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Kinematik ve izotropik pekleşme modellerinde elastik-plastik davranış (l_0 deforme olmamış boy, l deforme olmuş boy) [104]

Akma yüzeyinin o andaki yarıçapı (σ_a), başlangıçtaki akma gerilmesi (σ_0) ile büyüme miktarının ($\beta E_p \epsilon_{eff}^p$) toplamına eşittir. $\beta E_p \epsilon_{eff}^p$ ifadesinde E_p plastik pekleşme modülüdür. E_t tanjant modülü ve E elastisite modülü olup aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (4.96)$$

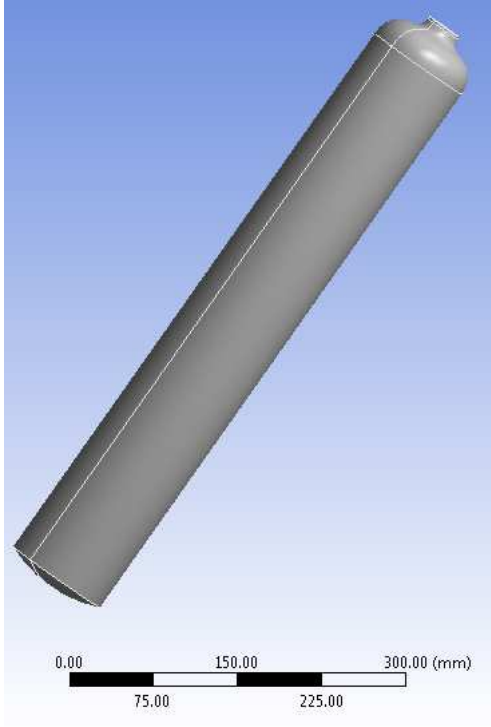
Verilen ifadeye ϵ_{eff}^p efektif plastik zorlanma (plastik şekil değişim hızı), toplam ve elastik şekil değiştirme hızları arasındaki fark kadardır:

$$\epsilon_{eff}^p = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^e \quad (4.97)$$

Bu malzeme modelinin uygulanmasında saptırıcı gerilmeler elastik olarak yenilenmektedir [104,105].

4.4.CAD Modellerinin Oluşturulması

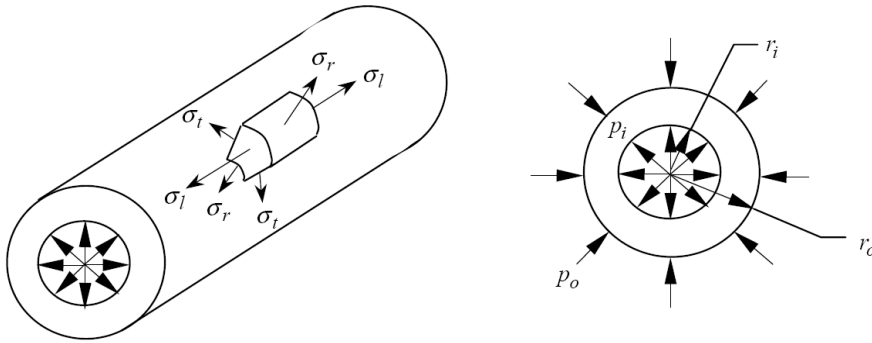
Modellemenin yapılabilmesi amacıyla prototip üretimi ile elde edilen tank ölçüleri referans olarak seçilmiştir. Tanklar bire bir gerçeğe uygun olarak modellenmiştir. Tasarım programı olarak Pro-Engineer' dan faydalanılmıştır. Şekil 4.14' te ilk oluşturulan tank katı modeli görülmektedir.



Şekil 4.14. Tank CAD modeli

4.4.1. Hidrojen Depolama Tanklarının Matematiksel Modellemesi

Prototipleri üretilen hidrojen depolama tanklarının liner kısımlarının matematiksel modellemesi aşağıdaki gibidir. Tankın maruz kaldığı basınç altındaki ve 1 adet birim eleman üzerinde gerilmelerin durumu Şekil 4.15’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. İç ve dış basınca maruz ince cidarlı silindirlere gerilme dağılımı [107].

İnce Cidar Teorisi

Teoriye göre;

$$\frac{t}{r} \leq \frac{1}{20} \text{ ise ince cidar teorisi geçerli olmaktadır.}$$

Pratikte bu oran;

$$\frac{t}{r} \leq \frac{1}{10} \text{ olarak alınmaktadır.}$$

Prototipleri üretilen tanklar bu oranları sağladığından ince cidarlı silindir davranışı göstermektedir. Bu teoriye göre dış basınç ihmal edilirse tankta iç basınç altında aşağıdaki gerilmeler oluşmaktadır:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{pd_i}{2t} \\ \sigma_r &= 0 \\ \sigma_l &= \frac{pd_0}{4t} = \frac{\sigma_t}{2} \end{aligned} \quad (4.98)$$

Burada;

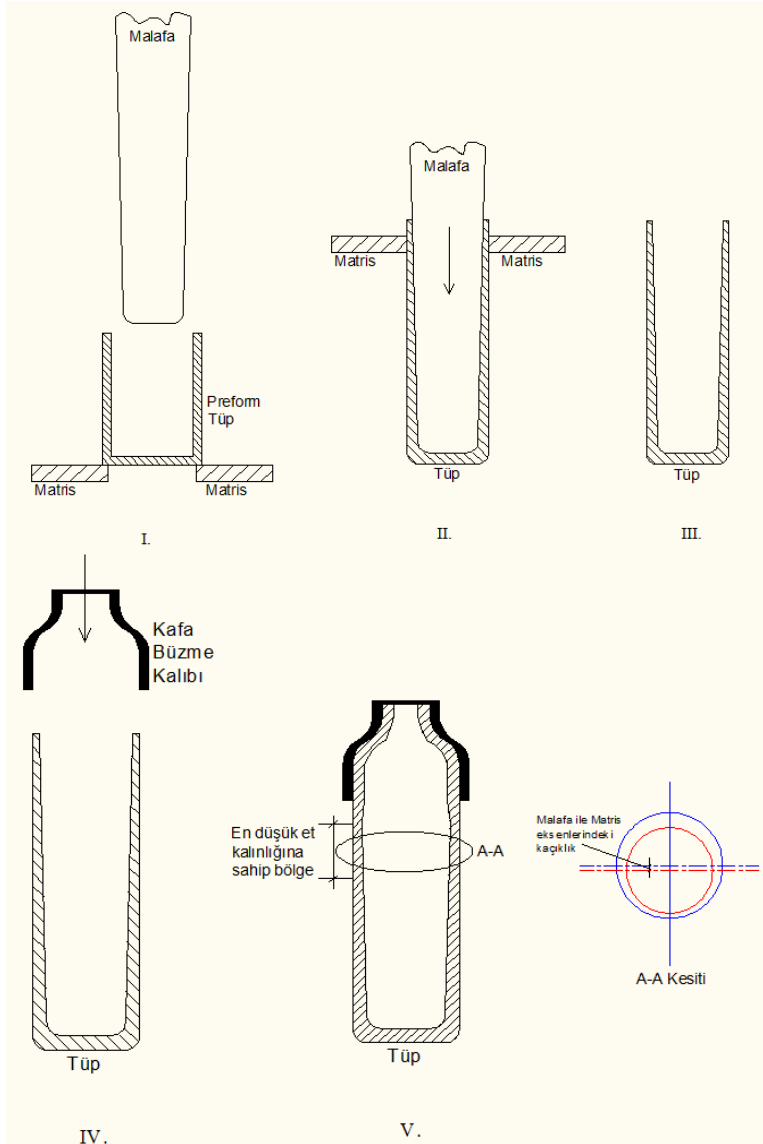
σ_t : Teğetsel gerilme

σ_r : Radyal gerilme

σ_l : Boyuna gerilme

4.4.2. Bilgisayar destekli tasarım ve analiz çalışmalarının gerçek modele uygun hale getirilmesi

Bu çalışmanın başında gerçekleştirilen ANSYS analizlerinde model ideal kabul edilmişti. Hidrostatik basınç testlerinde tankın hemen hemen tüm testlerde aynı bölgeden yırtılması üzerine kapsamlı inceleme başlatılmıştır. Tanktaki hidrostatik basınç testlerinin sonuçlarına göre, deformasyon bölgeleri hassas olarak incelendiğinde ve gerçekleştirilen hassas kalınlık ölçümlerinden, yırtılma bölgelerinde farklı kesitlerin olduğu anlaşılmıştır. Tankın çevresel kesit farklılığının açıklaması Şekil 4.16' da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Tankın çevresel kesit farklılığının açıklaması

Malzemenin yatay ekstrüzyondan geçerken (Şekil 4. 16' da I. II. ve III.) konik malafa nedeni ile cidar kalınlığı uç kısma doğru incelmektedir. Bunun yanı sıra son ağız kapama işleminde ise uç kısımda yığılmadan dolayı bir miktar cidar kalınlığı artışı olmaktadır Şekil 4. 16' da IV. V. ve VI.). Genellikle tüm hidrostatik basınç testlerinde uç kısımda 10 cm ile 20 cm arasında yırtılma meydana gelmesinin nedeni, boyuna doğrultuda cidar kalınlığı en ince bölgenin burada bulunmasındandır.

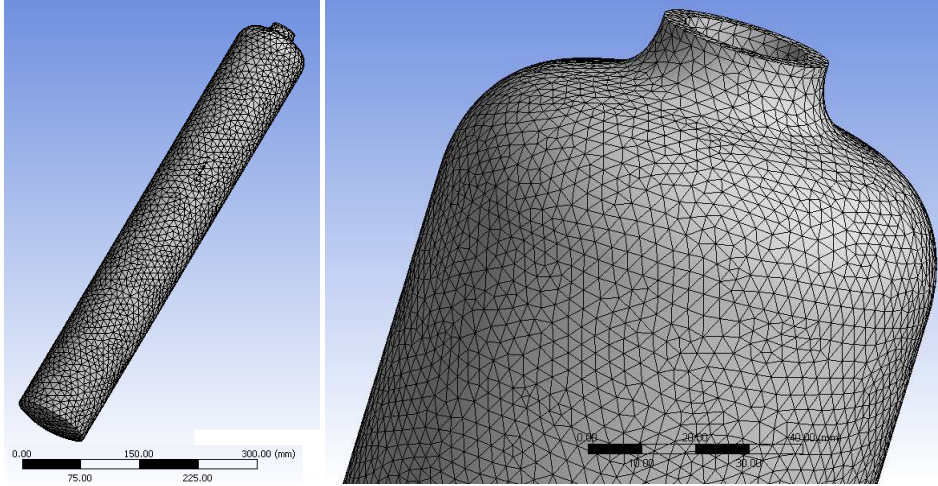
Ayrıca malafa ile matris eksenlerindeki kaçıklıktan dolayı tank çapında çevrede kalınlık farklılıkları bulunmaktadır. Gerek boyuna gerekse çevresel olarak en ince kesitin kesiştiği noktada deformasyon/yırtılma meydana gelmektedir.

4.5. Alüminyum Tüp Sonlu Eleman Analiz Modellerinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar analizinde mümkün olduğu kadar düzgün bir mesh yapısı olmalıdır. Bazı durumlarda serbest mesh yapısı ile de uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Yalnız serbest mesh yapısı basit analizler haricinde fazla tercih edilmemektedir. Bununla birlikte mesh yapısının eleman tipiyle yakın bir ilişkisi mevcuttur. Mesh yapılacak modelin geometrik yapısının, eleman tipinin mesh ile alabileceği geometrik opsiyonları ile uyumlu olması gerekmektedir. Örneğin katı modelin köşeleri, kenarları ve bağlantı noktaları geometrik elemanlara fazla şekil değişimi olmadan bölünebilmelidirler [104].

Bu çalışmada kullanılmış olan “solid-164” eleman tipi, en uygun sonucu, hegzagonal (altı yüzlü) şekilde (süpürme) sweep mesh yapılarak verebilmektedir. Bundan dolayı da, tank katı modeli, çok paçanın birleştirilmesiyle ve solid-164 eleman tipine uygun olarak (genelde hegzagonal elemanlara bölünebilecek şekilde) meydana getirilmişlerdir. ANSYS de ise bu ayrı parçalar birbirlerine yapıştırılmıştır. Birleştirilmiş sonlu eleman modelindeki tüm katı parçalar, girilen malzeme özellikleri ve eleman tipine göre sırayla ve düzgün bir şekilde mesh yapılmıştır. Mesh’den sonra meydana gelen tüm düğüm noktalarına, basınç değeri girilerek tankın analizi gerçekleştirilmiştir [104].

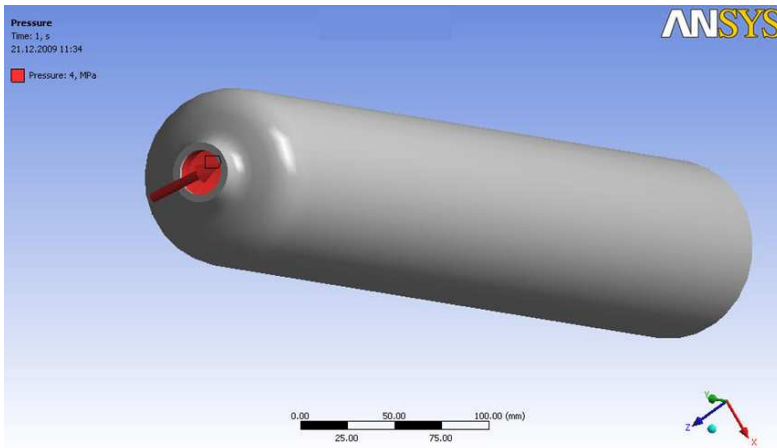
Şekil 4.17’ de mesh yapılmış tankın sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 4.17 Mesh yapılmış tankın FEA modeli

4.5.1. Basınç Testi Koşulları

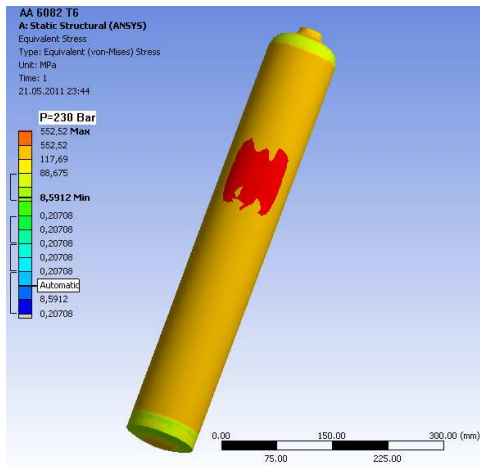
Bilgisayar ortamında basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Malzemenin akma gerilmesinin bir miktar altında ve bir miktar üstünde olmak üzere 6 adet farklı basınç değerinde toplam 9 adet farklı model analize tabi tutulmuştur. Bu kapsamda 54 adet analiz gerçekleştirilmiştir. ANSYS sonuçları ile, çekme deneyinden ve hidrostatik basınç testinden elde edilen patlatma basınçları baz alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Tankın içerisine uygulanan basıncın görünümü Şekil 4.18’ de verilmiştir.



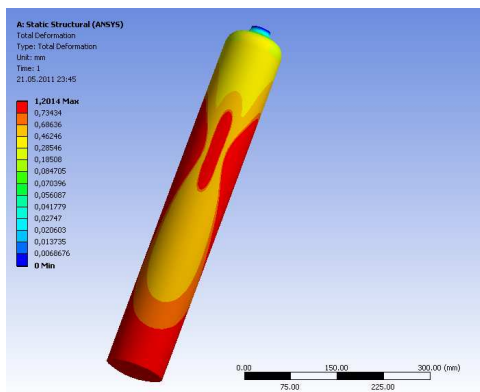
Şekil 4.18. Tankın içerisine uygulanan basıncın görünümü

4.5.2. Sonlu eleman analiz (ANSYS) sonuçları

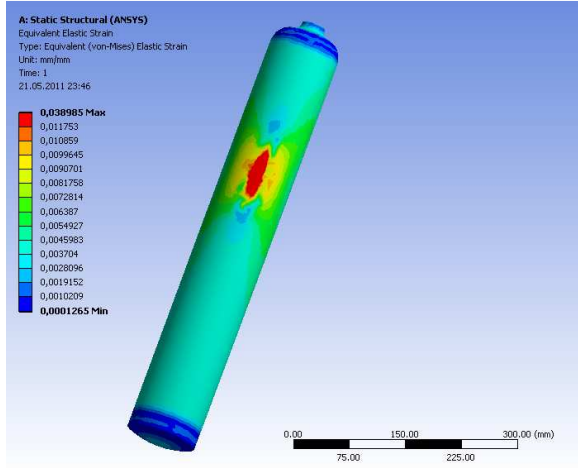
AA6061, AA6063, AA6082 malzemelerden modellenen tankların ısılsız (F), T4 ısılsız işlemlili ve T6 ısılsız işlemlili olmak üzere toplam 9 farklı tankın 6 farklı basınç değerleri için bilgisayar ortamında analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde von-Mises eşdeğer gerilmesi, toplam deformasyon miktarı ve von-Mises eşdeğer zorlanmasına ait sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar daha önceki meknaik testler sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. 230 bar hidrostatik basınç altında AA 6082 T6 malzemesinden üretilen tüplerin von-Mises eşdeğer gerilme analizi örnek olarak Şekil 4.19' de, toplam deformasyon analizi Şekil 4.20' de ve von-Mises eşdeğer zorlanma analizi ise Şekil 4.21' de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında von-Mises eşdeğer gerilme (Mpa)



Şekil 4.20. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında toplam deformasyon (mm)

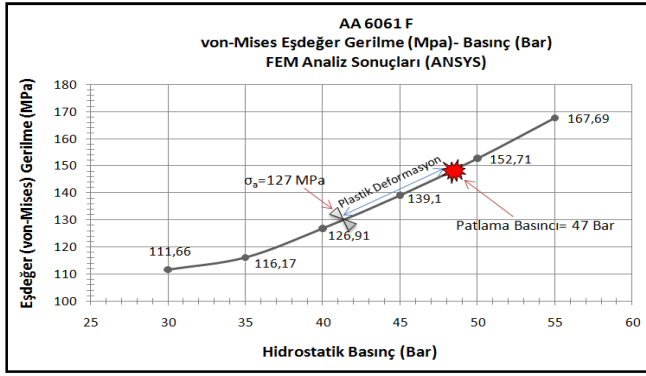


Şekil 4.21. AA 6082 T6 230 bar hidrostatik basınç altında von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ)

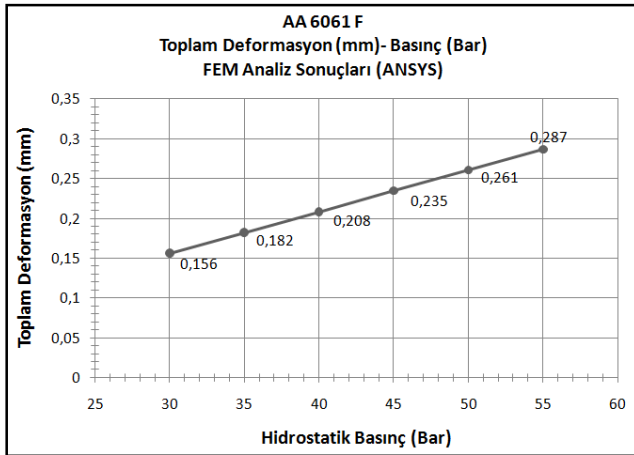
4.5.3. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Analizler sonucunda elde edilen veriler tüp üzerinden çıkarılan çekme numuneleri sonucu belirlenen akma gerilmesi (MPa), eşdeğer von-Mises Gerilmesi (MPa) ve hidrostatik basınç testi sonucu elde edilen patlama basıncı belirtilecek şekilde irdelenmiştir. Buradan elde edilen bilgiler ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu grafiklerden daha önce bilinmeyen malzemenin hangi basınç değerinde akma gerilmesini aştığı, patlama anında hangi gerilme değerine ulaştığı gibi çıkarımlarda bulunulmuştur. Bu çıkarımlar sonucunda malzemenin plastik bölgede ki davranışı belirlenmiştir.

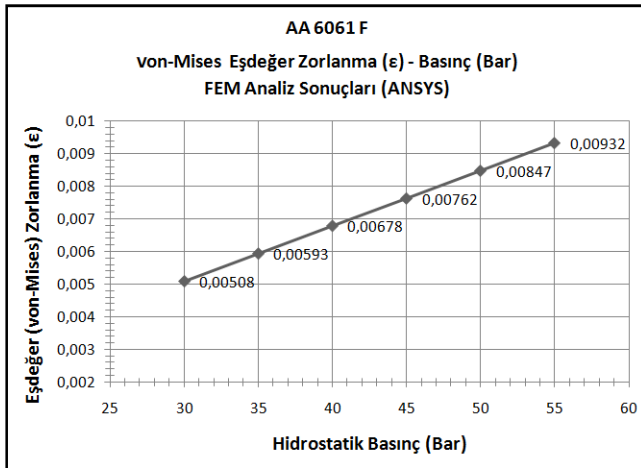
AA6061 F alaşımının 30-55 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.22 ' de gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.23' te gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.24' te verilmiştir.



Şekil 4.22. AA 6061 F hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

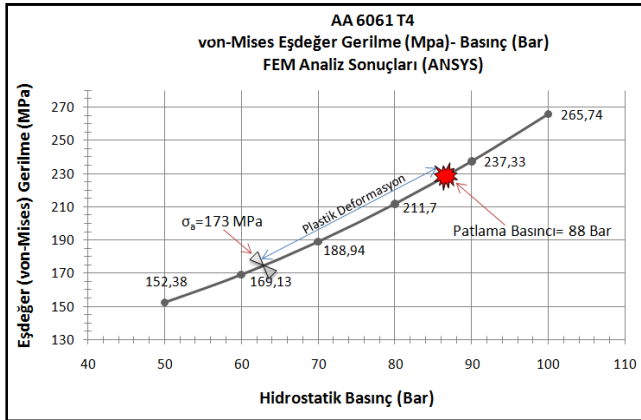


Şekil 4.23. AA 6061 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

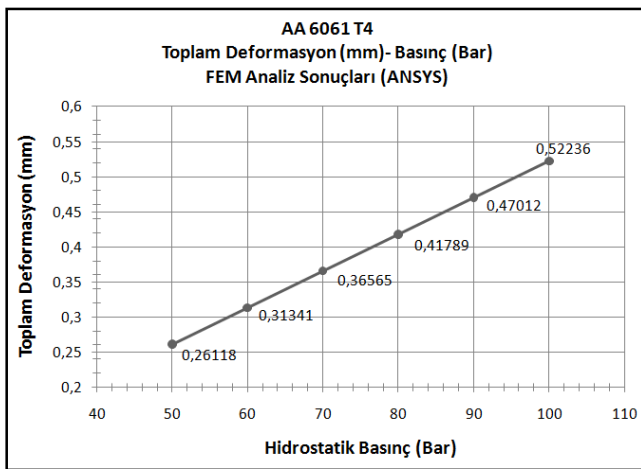


Şekil 4.24. AA 6061 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

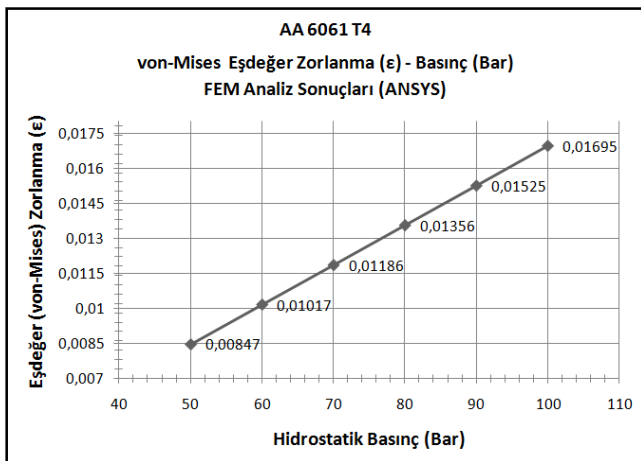
AA6061 T4 alaşımının 50-100 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.25' te gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.26' da gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.27' de verilmiştir.



Şekil 4.25. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği



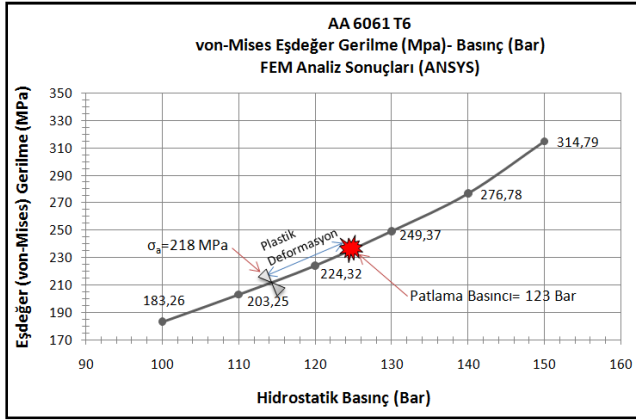
Şekil 4.26. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği



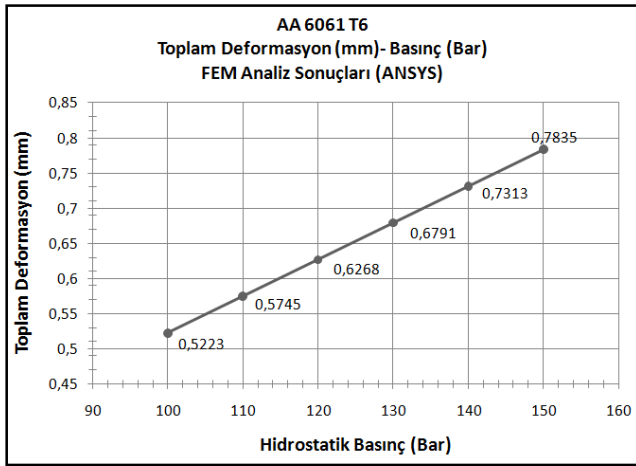
Şekil 4.27. AA 6061 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

AA6061 T6 alaşımının 100-150 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.28' de gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam

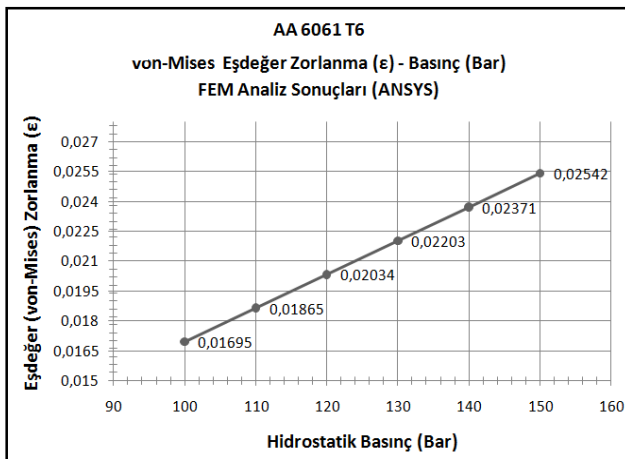
deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.29’ da gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.30’ da verilmiştir.



Şekil 4.28. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği



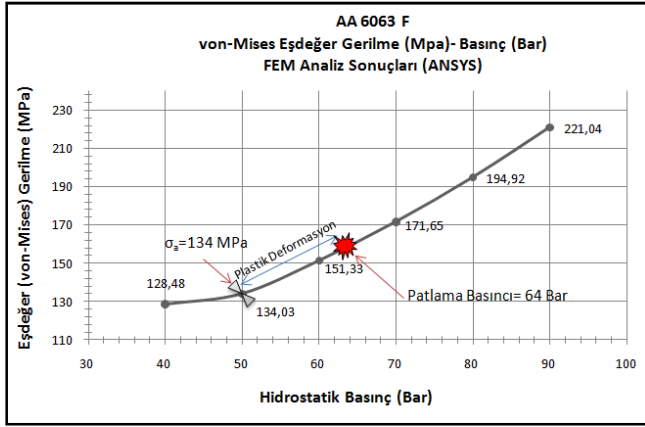
Şekil 4.29. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği



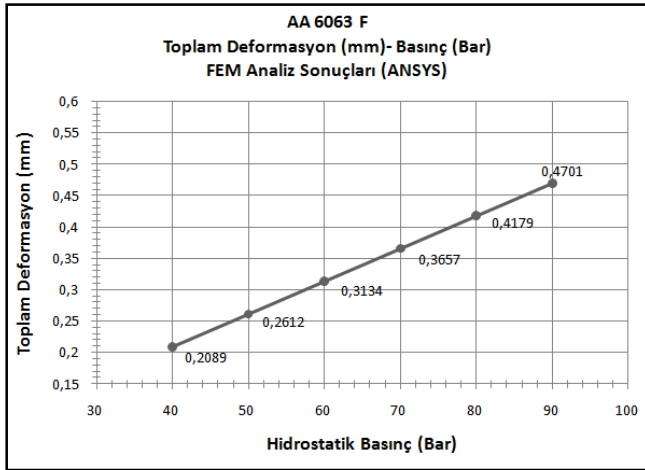
Şekil 4.30. AA 6061 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

AA6063 F alaşımının 40-90 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.31’ de gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon

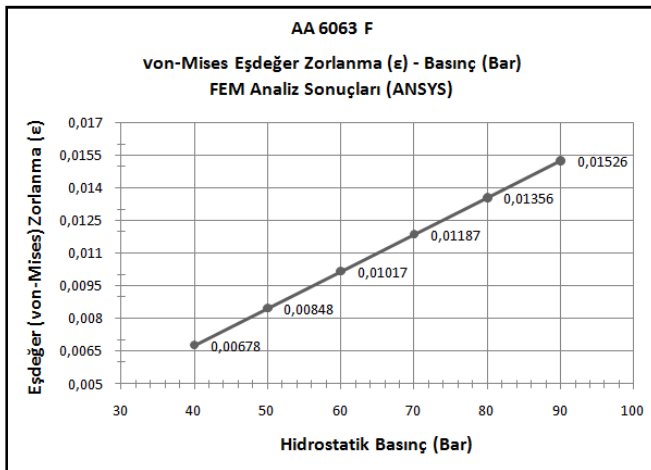
miktarı (mm) Şekil 4.32' de gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.33' te verilmiştir.



Şekil 4.31. AA 6063 F hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

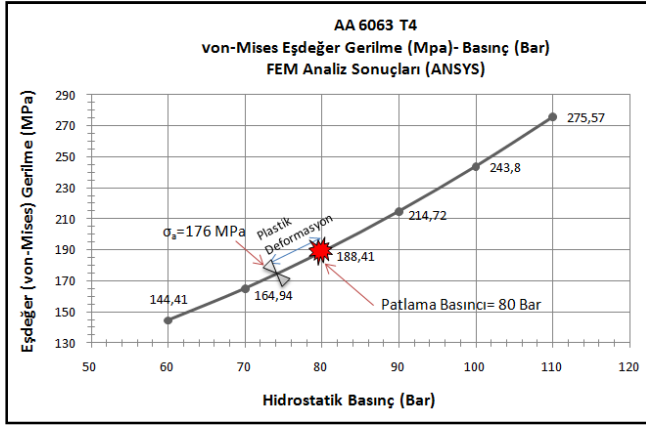


Şekil 4.32. AA 6063 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

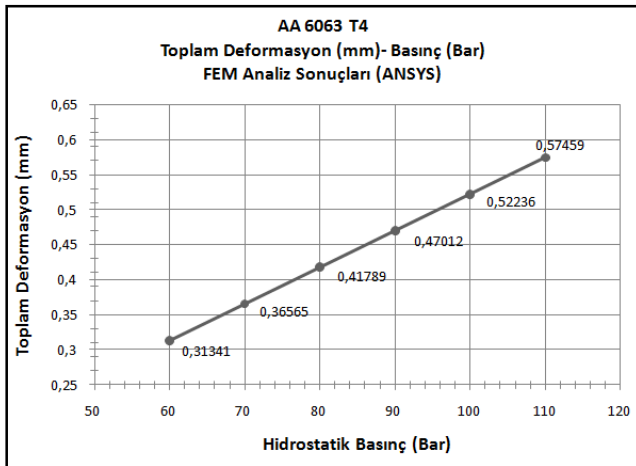


Şekil 4.33. AA 6063 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

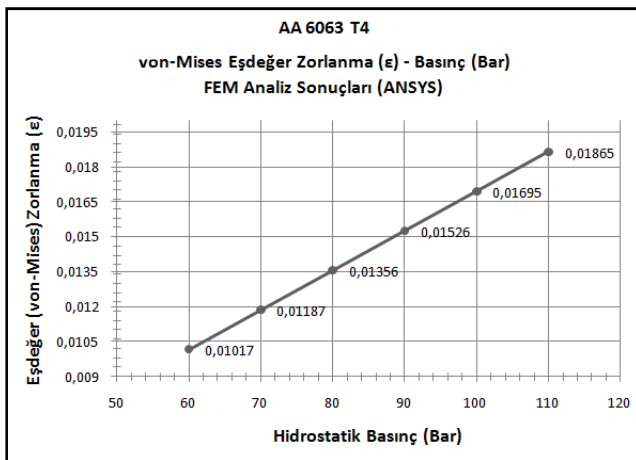
AA6063 T4 alaşımının 60-110 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.34' te gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.35' te gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.36' da verilmiştir.



Şekil 4.34. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

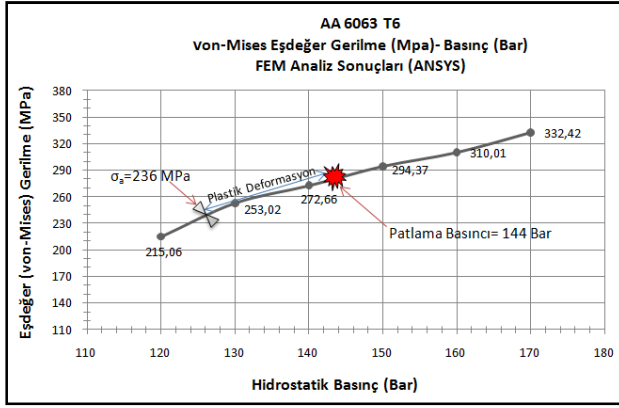


Şekil 4.35. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

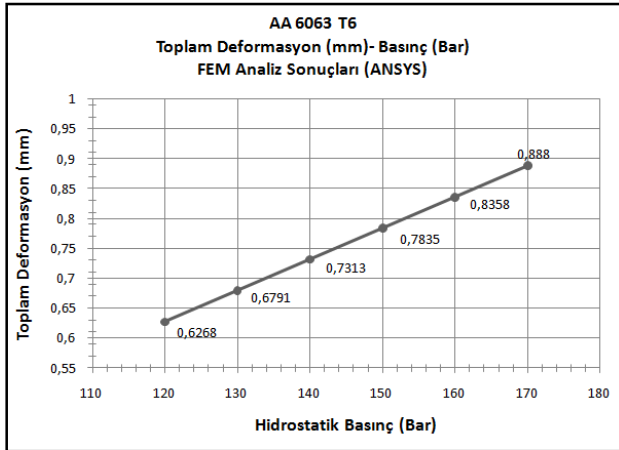


Şekil 4.36. AA 6063 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

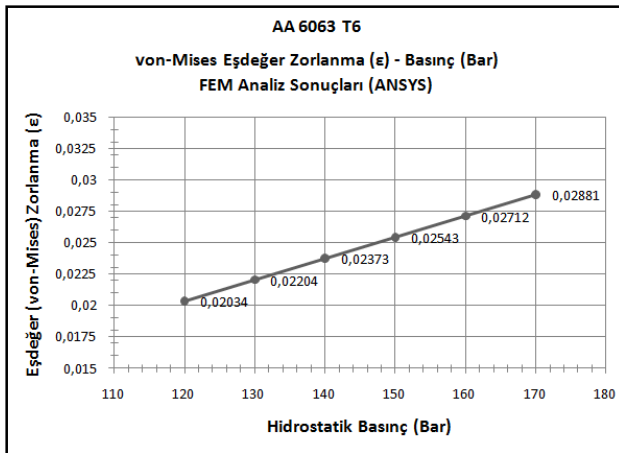
AA6063 T6 alaşımının 120-170 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.37' de gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.38' de gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.39' da verilmiştir.



Şekil 4.37. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

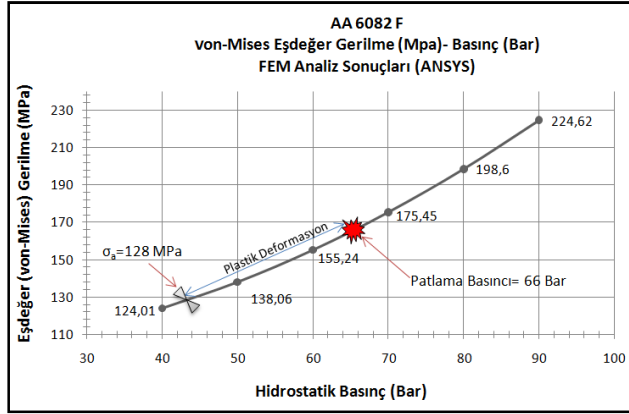


Şekil 4.38. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

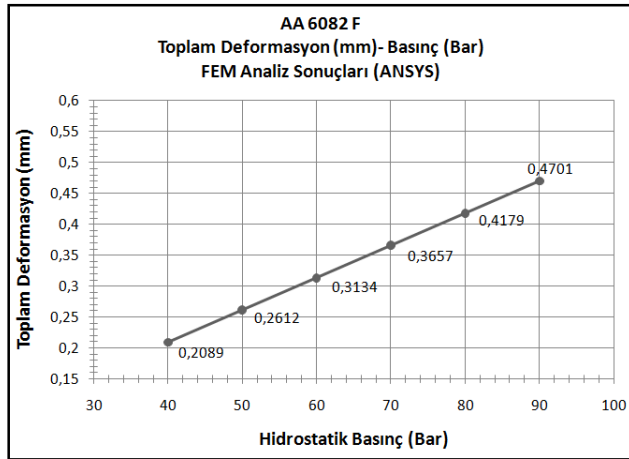


Şekil 4.39. AA 6063 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

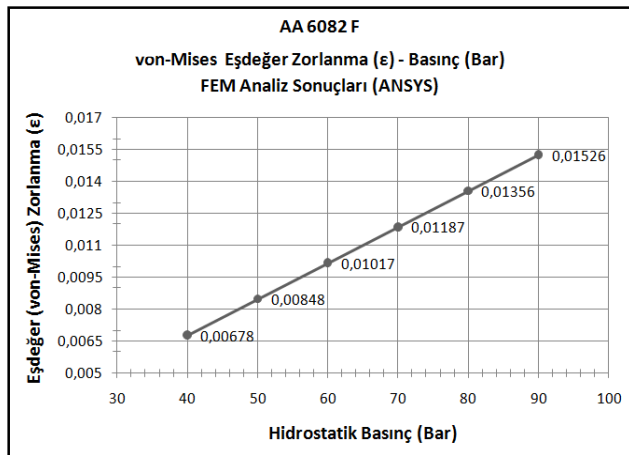
AA6082 F alaşımının 40-90 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.40 ' ta gsterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.41' de gsterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil. 4.42' de verilmiştir.



Şekil 4.40. AA 6082 F hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

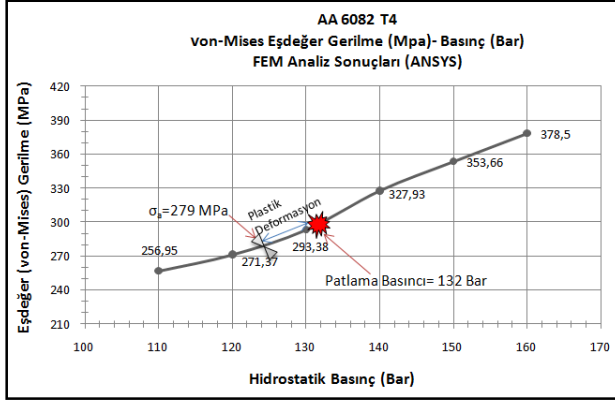


Şekil 4.41. AA 6082 F hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

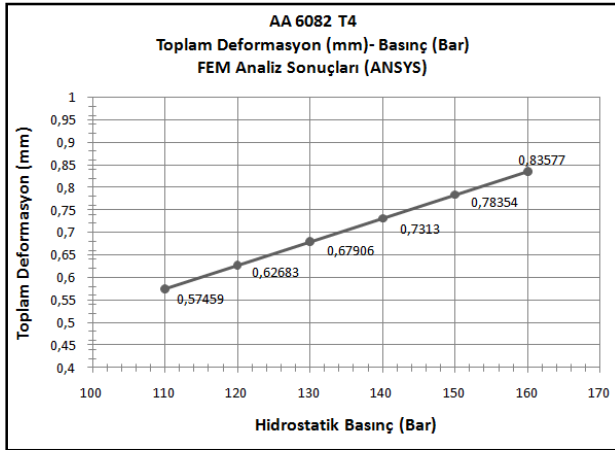


Şekil 4.42. AA 6082 F hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

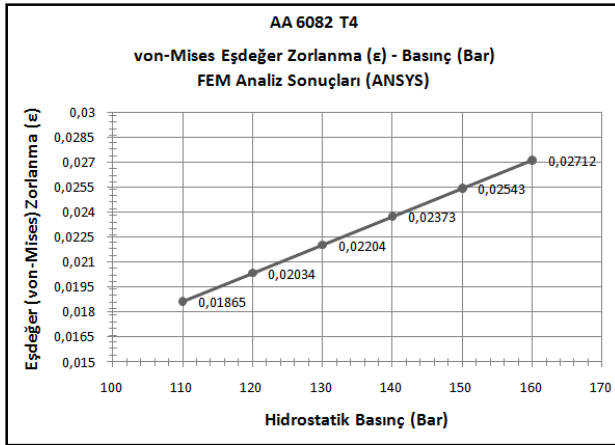
AA6082 T4 alaşımının 110-160 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.43' de gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.44' te gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.45' te verilmiştir.



Şekil 4.43. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği

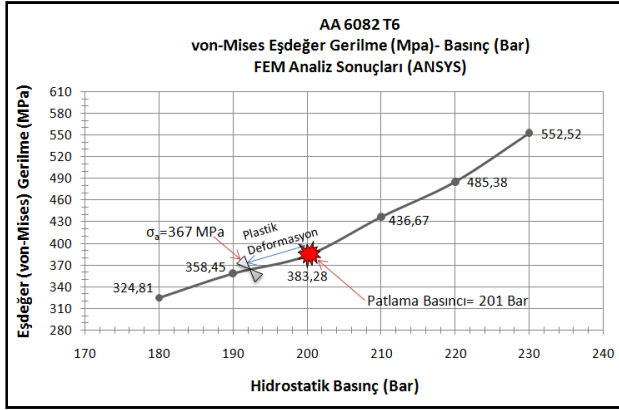


Şekil 4.44. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği

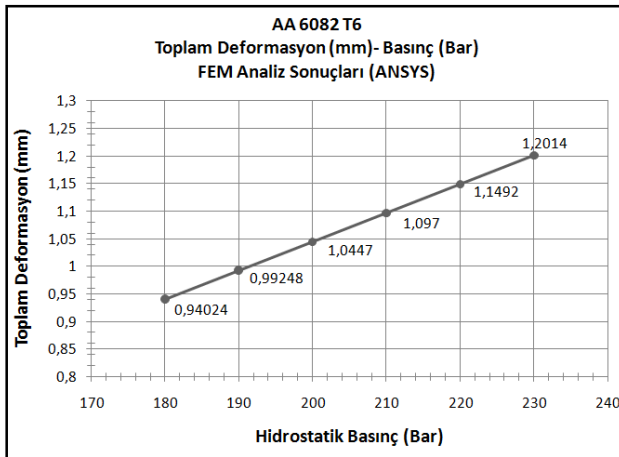


Şekil 4.45. AA 6082 T4 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

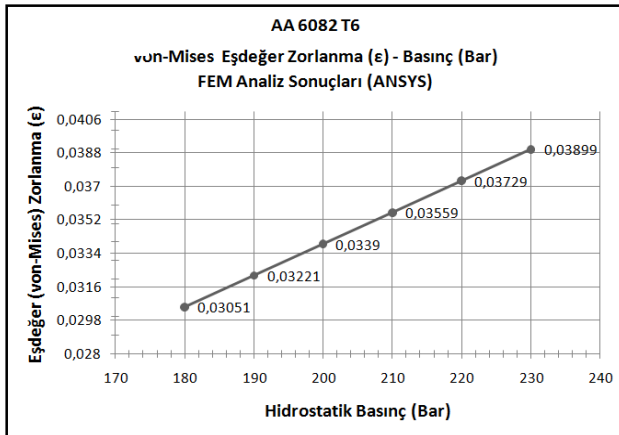
AA6082 T6 alaşımının 180-230 bar basınç değerleri arasındaki gerilme (MPa) değişimi Şekil 4.46' da gösterilmiştir. Tüpün bu basınç değerleri altında toplam deformasyon miktarı (mm) Şekil 4.47' de gösterilmiştir. Aynı basınç aralığında tankta oluşan von-Mises eşdeğer zorlanma (ϵ) grafiği ise Şekil 4.48' de verilmiştir.



Şekil 4.46. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – von Mises eşdeğer gerilme grafiği



Şekil 4.47. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – toplam deformasyon grafiği



Şekil 4.48. AA 6082 T6 hidrostatik basınç – von-Mises eşdeğer zorlanma grafiği

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında yapılan tüm çalışmaların sonuçları ve öneriler gruplandırılarak aşağıda sunulmuştur.

5.1. Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

Mikroyapılar incelendiğinde ısıtılma işlem durumuna bağlı olarak malzeme içinde önemli faz değişimlerinin oluşmadığı fakat şekillendirmeye bağlı olarak tane yapılarında kısmen farklılığın olduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirmesi

Üretilen prototip tankların sonlu elemanlar analizlerini gerçekleştirmek, ısıtılma işlem durumuna göre tanklardaki mukavemet değişimlerini incelemek üzere çekme numuneleri hazırlanarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı numuneler için sertlik değişimleri de incelenmiştir.

5.2.1. Çekme Testi Sonuçları

Sonlu elemanlar analizi ile (ANSYS) mukavemet analizinin yapılabilmesi ve farklı ısıtılma işlem/alaşım oranına göre mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için tanklardan çekme numuneleri hazırlanarak, çekme eğrileri elde edilmiştir. Numuneler tel erozyon tezgâhında hazırlanmıştır. Bir tank yüzeyinden boyuna doğrultuda 3 adet numune çıkarılarak ortalamaları alınmıştır. Testler TS EN 1975 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Standarta göre numunelerin tüpün orta kısmından çıkarılması gerekmektedir. Fakat bu çalışma kapsamında tüpün sürekli olarak yırtıldığı bölgenin cidar kalınlığının düşük olması sebebiyle numuneler bu zayıf bölgeden (orta

kısımında uç kısma daha yakın mesafede) alınmış ve çekme eğrisi ANSYS programına girilerek analiz çalışmaları yapılmıştır.Çekme testinde en iyi mukavemet değerini AA6082 T6 numunesi vermiştir.

5.2.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Mikrosertlik sonuçlarına göre ortalama olarak sertliğin dış yüzeyden tankın iç yüzeyine doğru azaldığı anlaşılmıştır. Bunun sebebi ise malzemenin prostele sıcak ve soğuk şekillendirme esnasında akışına bağlı olarak tanelerin malzeme akışı yönüne paralel olarak yönlendirilmiş olmasıdır. Yüzeyde malzeme akışı malafa ile temas eden iç yüzeye göre daha fazla olduğundan, yüzeyde pekleşme daha fazla olmakta, bu da sertliği artırmaktadır.

Boyun kısmında daha fazla malzeme akışı ve 2. kez soğuk deformasyon (kafa büzme işlemi) gerçekleştiğinden buradaki kesitin sertlik dağılımı düz kesittekine göre daha fazladır.

En yüksek sertlik değerleri 6082 T6 numunesinde elde edilmiştir. Hidrostatik basınç testinde de en yüksek dayanımı 6082 T6 numunesi sağlamıştır.

5.3. Tahribatsız Deney Sonuçları (NDT)

3 farklı alaşım ve 3 farklı ısıl işlem durumuna ait 9 adet farklı tank %100 muayeneye tabi tutulmuştur. Bu testler ultrasonik kalınlık ölçümleri, radyografik muayene ve sıvı penetrant testleridir.

5.3.1. Ultrasonik Kalınlık Ölçümleri Sonuçları

Ultrasonik kalınlık ölçüm sonuçlarına göre boyuna yakın olan ve hidrostatik basınç testinde yırtılan bölgede tank cidar kalınlığının en düşük değere ulaştığı anlaşılmıştır. Bunun sebebi ise tankın yatay ekstrüzyon işlemi tamamlandığında malafadan sıyrılabilmesi için malafanın konik yapılmış olmasıdır. Bu nedenle 30' un üzerinde

gerçekleştirilen hidrostatik basınç testlerinde yırtılma sürekli olarak aynı bölgede meydana gelmiştir. Ultrasonik kalınlık ölçümünde bu bölge 3. ölçüm noktası olarak tanımlanmıştır.

5.3.2. Radyografik Muayene Sonuçları

6061, 6063 ve Al 6082 alaşımlarından F, T4 ve T6 ısıl işlemlili numuneler için %100 radyografik muayene yapılmıştır. Bu deneyin amacı iç boşluklar, kalıntılar, çatlakların ve süreksizliklerin tespit edilmesidir. Tankın tüm çevresi 3 eşit parçaya bölünmüş, boyuna doğrultuda 10x48 cm ve 10x16 cm boyutlarında filmler ile çekim gerçekleştirilmiştir. 1 tank için 6 adet film çekimi yapılmıştır. Filmler değerlendirilmiş ve prototip tanklarda herhangi bir hataya rastlanmamıştır.

5.3.3. Sıvı Penetrant Testi Sonuçları

6061, 6063 ve Al 6082 alaşımlarından ısıl işlemsiz, T4 ve T6 ısıl işlemlili numuneler için tankın yüzeylerinde derin nüfuziyetli çatlakların, hataların olup olmadığını belirlemek amacıyla %100 oranında sıvı penetrant testi yapılmıştır. Bu tanklardan bazılarında (6061 F, 6063 F, 6063 T6, 6082 F, 6082 T4) önemli hatalara rastlanmıştır. Hata bölgeleri tespit edildikten sonra taşlanarak hata derinliği tespit edilmiştir. 4 farklı tür hata görülmüştür. Bunlar; derin çizikler, malzeme ayrılması (hammadde kaynaklı), gözenek, katmer tipinde hatalardır. Hataların çoğunluğunun gerek impact forging, gerekse yatay ekstrüzyon esnasındaki koç/malafa-kalıp/matris sürtünmesinden kaynaklı derin çizikler olduğu anlaşılmıştır. Ortaya çıkan hataların hiçbirinde kritik cidar kalınlığının altına inilmediğinden risk görülmemiştir.

5.4. XRD Analizi Sonuçları

XRD analizlerine göre temel olarak tüm alaşım ve ısıl işlem durumlarında Al ve Mg₂Si fazlarının oluştuğu, kayda değer farklı fazların ise oluşmadığı görülmüştür.

5.5. Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Analizler sonucunda elde edilen veriler tüp üzerinden çıkarılan çekme numuneleri ile belirlenen akma gerilmesi (MPa), eşdeğer von-Mises Gerilmesi (MPa) ve hidrostatik basınç testi sonucu elde edilen patlama basıncı belirtilecek şekilde irdelenmiştir. Buradan elde edilen bilgiler ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu grafiklerden daha önce bilinmeyen malzemenin hangi basınç değerinde akma gerilmesini aştığı, patlama anında hangi gerilme değerine ulaştığı gibi çıkarımlarda bulunulmuştur. Bu çıkarımlar sonucunda malzemenin plastik bölgede ki davranışı belirlenmiştir.

5.6. Hidrostatik Basınç Testi Sonuçları

Hidrostatik basınç testi sonuçları her bir numuneden birden fazla yapılan test sonuçlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının sağlıklı olması açısından her bir tür için 2 basınç testi gerçekleştirilmiştir. Gerek ısıtılmış, gerekse T4 ve T6 ısıtılmış işlem durumlarında en yüksek mukavemet özelliklerini AA 6082 T6 Alüminyum alaşımı sağlamıştır.

Alüminyum tüplerin hidrostatik basınç testlerinde 200 bar dayanım seviyelerine kadar ulaşılmıştır.

Hidrostatik basınç testi sonuçları her bir numuneden birden fazla yapılan test sonuçlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Deney sonuçlarının sağlıklı olması açısından her bir tür için 2 basınç testi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan değerler ortalama değerlerdir.

5.7. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Bu tezin ana hedefini oluşturan hidrojen depolama tüplerinin üretiminde alüminyum malzeme üzerine yoğunlaşmıştır. Malzeme olarak daha hafif olan alüminyumda daha fazla miktarlarda hidrojen depolayabilmek amaçlanmıştır. Maliyet açısından son derece önemli olan gravimetrik yoğunluk açısından incelendiğinde alüminyum

tüpün gravimetrik yoğunluğu çelik tüplere göre en az 2 kat daha fazladır. Tez kapsamında üretilen tüplerin sargı sonrası toplam ağırlığı 3,5 kg civarındadır. Buna göre 0,25 kg depo edilebilen bu tüpün gravimetrik yoğunluğu %7,14' tür. Mevcut teknolojiler için kabul edilebilecek ekonomik bir değere ulaşılmıştır. Çelik tüplerde bu değer %4-5 seviyelerinde sınırlı kalmaktadır.

Alüminyum tüpler ile elde edilen gravimetrik yoğunluk özelliğinin yanısıra başka iyi bir özellik ise malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetinin nispeten çeliğe göre daha fazla olmasıdır. Araçlarda kullanılması planlanan bu tüplerin çarpışma esnasında daha fazla enerji absorbe etmesi güvenlik açısından son derece önemlidir. Bu nedenle çalışma kapsamında tüp üretiminde alüminyum malzeme seçilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda üç farklı 6000 serisi alüminyum ile farklı boyutlarda alüminyum tanklar elde edilmiştir. İmalat aşamasında yaşanan birçok zorluğa rağmen elde edilen prototipler hidrostatik basınç testine tabi tutulmuştur. Prototipler ile ilgili yapılan sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Malzeme alternatifleri ve ısıl işlem durumları değiştirilerek deneysel çalışmalara devam edilmelidir.

Türkiye' de ilk kez bu çalışma kapsamında imal edilen tüpler hidrojen depolanmasında kullanım şansı bulmasa bile, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) depolanmasında şans bulacaktır.

Çoğunlukla prototiplerde 350 bar çalışma basıncında depo edilen hidrojen tankları görülmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ile bu basınç değeri iki katına çıkarılmış ve aynı hacimde daha fazla hidrojen depolanabilmektedir. Ülkemizde ilk kez Sanayi Bakanlığı tarafından desteklenen Santez-123 projesi kapsamında 700 bar'lık tüpler üretilmiştir. Şu an standartlara uygunluğu ve ticarileştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaya paralel olarak yapılan diğer çalışmalar da tamamlandığında, ithal girdi olarak kullanılan hidrojen enerjisi ekipmanlarının maliyeti azalacak ve gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de bir çok alanda üretim çalışmaları hız kazanacaktır.

Yapılan çalışmalar sonucunda; ANSYS, çekme deneyi ve hidrostatik basınç testleri sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Alüminyum 6082 alaşımı, bu maksada en uygun malzeme olarak tespit edilmiştir. Mukavemet özellikleri ise T6 ısıl işlemi ile en uygun ve emniyetli değerlere yükseltilmiştir.

TS EN 1975 standartında tüpün hidrostatik basınç testi esnasında akma sınırı ile kopma sınırı arasında bir oran verilmiştir. Bu oran tüpün plastik bölgedeki davranışını nitelendirmektedir. Plastik deformasyon alanının geniş olması istenmektedir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada kısmen bu oran yakalanamamıştır. Bu nedenle tankın plastik deformasyon bölgesindeki davranışlarının iyileştirilmesi için yeni çalışmalar başlatılmalıdır.

Bu araştırma ile yüksek basınca dayanıklı, ince cidarlı silindirik alüminyum alaşımı tüplerin mukavemet özelliklerinin 20 MPa. mertebesinde sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Kompozit sargı kalınlıklarını ayarlanmak suretiyle söz konusu tüplerin 1000+ atmosfer basıncına dayanıklı hale getirilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ALNIAK M. O., Sanayi ve Ticaret Bakanlığı San-Tez Destek Programı Proje No: 000123.STZ.2007-1, 2007-2009
- [2] OğUR A., ERTÜRK M., KARAKAYA Ç. ALNIAK M. O., San-Tez Projelerinin Üniversite-Sanayi İşbirliğine Katkısı ve Destek Süreci 2. Üniversite-Sanayi İşbirliği Sempozyumu, 10-11 Haziran 2009, Kocaeli
- [3] ZÜTTEL A., Hydrogen Storage Methods And Materials, University Of Fribourg, Physics Department, Pérolles, CH-1700 Fribourg, Switzerland
- [4] SANDROCK G., Øystein Ullebergand Preben J.S. Vie Trygve Riis, " Hydrogen Storage" Gaps And Priorities Riis Et Al. 2005
- [5] FILIOU C., PETEVES S.D. And J.-B. Veyret E. Tzimas, Hydrogen Storage:State-Of-The-Art And Future Perspective, Petten, The Netherlands
- [6] ZÜTTEL A., "Materials For Hydrogen Storage, Materials Today, September 2003
- [7] ANDREW H. W., And BLAKE M., FRED M., Vehicular Hydrogen Storage Using Lightweight Tanks, Proceedings Of The 2000 U.S. DOE Hydrogen Program
- [8] SİROSH N., Proceedings Of The 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Hydrogen Composite Tank Program
- [9] NEWELL K., Bradley Geving, And Walter Dubno Ko, Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage, DOE Hydrogen Program Quantum Fuel Systems Technologies World Wide Inc. FY 2005 Progress Report
- [10] LUNGU P., and M. LUCACI, S. GAVRİLİU, E. ENESCU, Development Of Composite Materials For Hydrogen Storage in Incdie ICPE-CA 1st Meeting Of Romanian Hydrogen And Fuel Cell Technology Platform, Calımanesti-Caculata, Valcea, October 13, 2005

- [11] HOTTINEN T., Technical Review And Economic Aspects Of Hydrogen Storage Technologies
- [12] ABELEARB A. R., Quantum Hydrogen Storage Systems, ZEV Technology Symposium Sacramento, CA September 25-27, 2006.
- [13] NEWELL, K., B. Geving, And Wa. Dubno, J. Ko, Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage, DOE Hydrogen Program FY 2005 Progress Report
- [14] SENOH, H., T. YOKOTA, H. TSURUTA, K. HAMADA, H. T. TAKESHITA, H. TANAKA, T. KIYOBAYASHI, T. TAKANO, N. K. N. TAKEICHI, Hybrid hydrogen storage vessel, a novel high-pressure hydrogen storage vessel combined with hydrogen storage material” International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) 1121 – 1129
- [15] PERREUX, D., CHAPELLE, D, "Optimal design of a Type 3 hydrogen vessel. Part I:Analytic modelling of the cylindrical section.", International Journal of Hydrogen Energy, no. 31, 2006.
- [16] KANG, JH, HONG, CS, et al. Kim, CU, Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm, Composite Structures, no. 67, pp. 443–452, 2005
- [17] KANG, JH, HONG, CS, et al. KIM, CU, Optimal design of filament wound type 3 tanks under internal pressure using a modified genetic algorithm, Composite Structures, no. 71, pp. 16-25, 2005
- [18] TAKAYANAGI, M, TAKAYANAGI, H. XIA, M, Analysis of filament-wound fiberreinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading, Composite Structures, no. 51, pp. 273-283, 2001
- [19] KATIRCI, N., PARNAS, L., Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions, Composite Structures 58 (2002) 83–95
- [20] LANGELLA, A., CAPRINO, G., IACCARINO, P., A simplified model to predict the tensile and shear stress–strain behaviour of fibreglass/aluminium laminates, Compos Sci Technol, no. 67, pp. 1784–1793., 2007

- [21] WAAS, A.M., et al. BASU, S., Prediction of progressive failure in multidirectional composite laminated panels, *Int J Solid Struct*, no. 44, pp. 2648–2676, 2007
- [22] TSAI, S.W., LIU, K.S., A progressive quadratic failure criterion for a laminate, *Compos Sci Technol*, no. 58, pp. 1023–1032, 1998
- [23] LIU, Y.W., LEE, F.T., KAM, T.Y., First-ply failure strength of laminated composite pressure vessels, *Compos Struct*, no. 38, pp. 65–70, 1997
- [24] COHEN, D., Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength, *Compos Pt A*, no. 28, pp. 1035–1047, 1997
- [25] MANTELL, S.C., ZHAO, L.Y., COHEN, D., The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength, *Compos Pt B*, no. 32, pp. 413–429, 2001
- [26] HONG, C.S., KIM, C.G., HWANG, T.K., Size effect on the fiber strength of composite pressure vessels, *Compos Struct*, no. 59, pp. 489–498, 2003
- [27] LIU, P.F., ZHENG, J.Y., Elasto-plastic stress analysis and burst strength evaluation of Al–carbon fiber/epoxy composite cylindrical laminates, *Comput Mater Sci*, no. 42, pp. 453–461, 2008
- [28] ZHENG, J.Y., LIU, P.F., Progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite laminates using continuum damage mechanics, *Mater Sci Eng A*, no. 485, pp. 711–717, 2008
- [29] HINTON, M.J., KADDOUR, A.S., SODEN, P.D., A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, *Compos Sci Technol*, no. 58, pp. 1225–1254, 1998
- [30] MICHPOULOS, J.G., On the reducibility of failure theories for composite materials, *Compos Struct*, no. 86, pp. 165–176, 2008
- [31] SOUTIS, C., LEE, J., A study on the compressive strength of thick carbon fibre–epoxy laminates, *Compos Sci Technol*, no. 67, pp. 2015–2026, 2007
- [32] TAKAYANAGI, M., XIA, M., Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures*, no. 53, pp. 483–491, 2001

- [33] HOPPEL, C.P.R., HARIK, V.M., et al. BOGETTI, T.A., Predicting the nonlinear response and progressive failure of composite laminates, *Compos Sci Technol*, no. 64, pp. 329–342, 2004
- [34] AHLUWALIA, R.K., PENG, J.K., KROMER, M., LASHER, S., MCKENNEY, K., LAW K., SINHA, J., HUA, T.Q., Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 3037 - 3049
- [35] CIPITI, F., Cacciola, G., FRENI, A., Finite element-based simulation of a metal hydride-based hydrogen storage tank, *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009) 8574 – 8582
- [36] BIE, H., XU, P., CHEN, H., LIU, P., XIANG L., ZHENG, Y. L. J., Experimental and numerical studies on the bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010) 8191 – 8198
- [37] SAYMAN, O., DOGAN T., TARAKCIOGLU, N., ONDER, A., Burst failure load of composite pressure vessels, *Composite Structures* 89 (2009) 159–166
- [38] CHAPELLE, D., BOUBAKAR, M.L., BENAMAR, A., BEZAZI, A., HOCINE A., Experimental and analytical investigation of the cylindrical part of a metallic vessel reinforced by filament winding while submitted to internal pressure, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 86 (2009) 649–655
- [39] BUNSELL, A.R., THIONNET, A., ALLEN, D.H., CAMARA, S., Determination of lifetime probabilities of carbon fibre composite plates and pressure vessels for hydrogen storage, *International Journal of Hydrogen Energy* (2011) 1-8
- [40] FARIA, H., FRAZÃO, O., VIEIRA, P., MARQUES, A.T., FRIAS, C., Manufacturing and testing composite overwrapped pressure vessels with embedded sensors, *Materials and Design* 31 (2010) 4016–4022
- [41] ZHENG, J.Y., LIU, P.F., Progressive failure analysis of carbon fiber/epoxy composite laminates using continuum damage mechanics, *Materials Science and Engineering A* 485 (2008) 711–717

- [42] NUNES, J.P., ANTUNES, P.J., SILVA J.F., MARQUES, A.T., VELOSA, J.C. Development of a new generation of filament wound composite pressure cylinders, *Composites Science and Technology* 69 (2009) 1348–1353
- [43] LI X., LIU P., LIU Y., XU, P., BiE H., Fatigue life evaluation of high pressure Hydrogen storage vessel, *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (2010) 2633 – 2636
- [44] LIMA, de C. E. C., Gilmar Ferreira Batalha Jorge Paiva Abrantes, Numerical simulation of an aluminum alloy tube hydroforming, *Journal of Materials Processing Technology* 179 (2006) 67–73
- [45] GÜDEN, M., TOKSOY, A.K., The strengthening effect of polystyrene foam filling in aluminum thin-walled cylindrical tubes, *Thin-Walled Structures* 43 (2005) 333–350
- [46] SCOTT, V.D. and BUSHBY, R.S., Chen, A.S., Manufacture and evaluation of hoop-wound fibre-reinforced aluminium alloy tube, *Composites Part A* 29A (1998) 671-679
- [47] STELIOS, K., KORKOLIS, Y.P., Inflation and burst of aluminum tubes. Part II: An advanced yield function including deformation-induced anisotropy *International Journal of Plasticity* 24 (2008) 1625–1637
- [48] NA, K.H., CHO, N.S., LEE, Y.S., KIM, S.W., PARK, H.J., A study of the hydrostatic extrusion of copper-clad aluminium tube, *Journal of Materials Processing Technology* 67 (1997) 24-28
- [49] KOÏCHÏ T., MASAHIRO N., Experimental study of perforation and cracking of water-filled aluminum tubes impacted by steel spheres, *International Journal of Impact Engineering* 32 (2006) 2000–2016
- [50] SUBHASH, G., LOUKUS, A., IMANINEJAD, M., “Influence of end-conditions during tube hydroforming of aluminum extrusions” *International Journal of Mechanical Sciences* 46 (2004) 1195–1212.
- [51] YUAN, S., Wang, X., WANG, Z.R., FU Z., DANCKERT, J., NIELSEN K.B. LANG L., A study on numerical simulation of hydroforming of aluminum alloy tube, *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 377–388

- [52] CHU, Y. X. E., Hydroforming of aluminum extrusion tubes for automotive applications. Part I: buckling, wrinkling and bursting analyses of aluminum tubes, *International Journal of Mechanical Sciences* 46 (2004) 263–283
- [53] POURBOGHRAT, F., Guan, F. B. Y., Finite element modeling of tube hydroforming of polycrystalline aluminum alloy extrusions, *International Journal of Plasticity* 22 (2006) 2366–2393
- [54] PEDERSEN, K.O., CLAUSEN A.H., HOPPERSTAD O.S., Chen, Y., An experimental study on the dynamic fracture of extruded AA6xxx and AA7xxx aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A* 523 (2009) 253–262
- [55] MACKERLE, J., Finite element analyses and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985-2003)
- [56] HAPKE, J., RANONG Na C., WÜCHNER E., FRIEDLMEIER G., MAUS, D. W. S., Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks, *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008) 4612 – 4621
- [57] JORGENSEN, S.W., Hydrogen storage tanks for vehicles: Recent progress and current status, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 15 (2011) 39–43
- [58] KIKKINIDES E. S., Design and optimization of hydrogen storage units using advanced solid materials: General mathematical framework and recent developments, *Computers and Chemical Engineering* (2011), Article in Press
- [59] JAMES F., MILLER S., CHALK G., Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems, *Journal of Power Sources* 159 (2006) 73–80
- [60] HONG, C., KIM, C., HWANG, T., Probabilistic deformation and strength prediction for a filament wound pressure vessel, *Composites: Part B* 34 (2003) 481–497
- [61] DESHPANDE, P.U., NARASIMHAN, K., RAJAN K.M., Experimental studies on bursting pressure of thin-walled flow formed pressure vessels

- [62] ZHENG, J.Y., LIU P.F., XU, P., Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels, *Materials and Design*, no. 30, pp. 2295–2301, 2009
- [63] CHAPELLE, D., Boubakar, L.M., Benamar, A., Hocine, A.B.A., Analysis of intermetallic swelling on the behavior of a hybrid solution for compressed hydrogen storage – Part I: Analytical modeling, *Materials and Design* 31 (2010) 2435–2443
- [64] HIROSE, K., MORI, D., Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009) 4569 – 4574
- [65] ZALOSH R., CNG and Hydrogen Vehicle Fuel Tank Failure Incidents, Testing, and Preventive Measures, Firexplo Wellesley, MA
- [66] CAMANHO P.P., ROSE C.A. DAVILA C.G., Failure criteria for FRP laminates, *J Compos Mater*, no. 39, pp. 323–345, 2005
- [67] SLEIGHT DW., Progressive failure analysis methodology for laminated composite structures, 1999
- [68] KELEŞ İ., Dinamik İç Basınç Altındaki FDM ve Anizotropik Kalın Cidarlı Basıncılı Tankların Elastik Davranışı, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi Adana, 2007
- [69] TAN, E., The Effect of Hot-Deformation On Mechanical Properties, 2006
- [70] DAYAH H., LIFSHITZ, J.M., Filament-wound pressure vessel with thick metal liner, *Compos Struct*, no. 32, pp. 313–323, 1995
- [71] MURTY K., AV. Naik GN, "A failure mechanism-based approach for design of composite laminates.", *Compos Struct*, no. 45, pp. 71–80, 1999.
- [72] ADELMAN, H.M., NARAYANASWAMI, R., Evaluation of the tensor polynomial and Hoffman strength theories for composite materials, *J Compos Mater*, no. 11, pp. 366–377, 1977
- [73] SAYMAN, O., DOGAN, T., TARAKÇIOĞLU, N., ONDER, A., Burst failure load of composite pressure vessels, *Compos Struct*, 2008
- [74] KATIRCI, N., PARNAS, L., Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions, *Compos Struct*, no. 58, pp. 83–95,

2002

- [75] HEOCARIS, P.S., Weighing failure tensor polynomial criteria for composites, *Int J Damage Mech*, no. 1, pp. 4-46, 1992
- [76] WU, E.M., TSAI, S.W., A general theory of strength for anisotropic materials, *J Compos Mater*, no. 5, pp. 58-80, 1971
- [77] STACHURSKI Z., WU, R.Y., Evaluation of the normal stress interaction parameter in the tensor polynomial strength theory for anisotropic materials, *J Compos Mater*, no. 18, pp. 456-463, 1984
- [78] SUN, LX, FAN, XQ. XU, XW, Stress concentration of finite composite laminates with elliptical hole, *Comput Struct*, no. 57, pp. 29-34, 1995
- [79] LIU, G., TAN, V.B.C., SUN, X.S., PHAM, D.C., TAY, T.E., Progressive failure analysis of composites, *J Compos Mater*, no. 42, pp. 1921-1966, 2008
- [80] BABAOĞLU, F., Yüksek Basıncılı Silindirik Tankların Tasarımı, Kırıkkale Üniversitesi
- [81] DEMİR E., Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi Aralık, 2008 İzmir
- [82] ŞENAKTAŞ, B., Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Denizli: Danışman: Prof. Dr. Rasim KARABACAK, Ekim 2005
- [83] ÇELİK, V., ORAL, E., Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi
- [84] ÜN, Ü.T. Hidrojen Enerjisi: Depolanması, Güvenliği, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu, *Mühendis ve Makina Dergisi*, Sayı 525, 2003
- [85] OĞUR, A., ERTÜRK, M., KARAKAYA Ç. ALNIAK M. O., Araçlarda Hidrojen Kullanımı, Uluslararası Katılımlı Nükleer&Yenilenebilir Enerji Kaynakları Konferansı, 28-29 Eylül 2009, Gazi Üniversitesi Gölbaşı Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara
- [86] RASCHE, C. Berlin, 18 Nov. 200 (2003) "Moderne Composite Flaschen und die Anforderungen für deren sicheren Betrieb aus Sicht der Speicherhersteller" Dynetek Europe GmbH
- [87] <http://www.dynetek.com> (Tank üreticisi firma web sitesi) Erişim Yılı:2009.

- [88] OĞUR A., ERTÜRK M., KARAKAYA Ç. ALNIAK M. O., Hidrojen Enerjisi ile Çalışan Hibrit Araçların Tasarım ve İmalatındaki Gelişmeler,Türkiye 11. Enerji Kongresi, 21-23 Ekim 2009, Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi, İzmir
- [89] FRANCFORT J., Hydrogen Fuel Pilot Plant and Hydrogen ICE Vehicle Testing, March 2005
- [90] CLEFS CEA – No.50/51 – Winter 2004-2005 The Hydrogen Pathway (2004-2005)
- [91] COLOM, J.S. (2006) Session 2.4: Pressure Storage Systems II, 25th – 29th September 2006 Ingolstadt Dr. S. Rau
- [92] <http://www.cnnturk.com.tr> (Ford-Tübitak MAM işbirliği haberi) Erişim Yılı: 2009.
- [93] <http://www.unido-ichet.org> (UNIDO-ICHET Resmi web sitesi) Erişim Yılı:2009.
- [94] <http://www.biltek.tubitak.gov.tr> (TÜBİTAK Hidromobil web sitesi) Erişim Yılı:2009.
- [95] <http://www.tubitak.gov.tr> (TÜBİTAK Resmi Web Sitesii) Erişim Yılı : 2009.
- [96] H. Senoh, N. Kuriyama N. Takeichi, ""Application of hydrogen storage alloy at high pressure over 30MPa",".
- [97] R (2006) "Storing Energy's Future" Dynetek Industries Ltd. January, 2006 Thompson,.
- [98] OĞUR A., ERTÜRK M., KARAKAYA Ç., GÜNEŞ İ. ALNIAK M. O., Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tankı İmalatının İncelenmesi VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008 17-19 Aralık 2008, İstanbul
- [99] OĞUR A., ERTÜRK M., ŞENEL F., KARAKAYA Ç., Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tanlarının İmalatı, Sanayi Bakanlığı Santez Proje Sergisi, WOW Otel, Aralık 2009, İstanbul
- [100] MEYVECİ A., Yaşlandırılmış 2xxx Ve 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Bilim Uzmanlığı Tezi, Eylül 2007

- [101] 5 Litreden 150 Litreye Kadar – Tasarım ve İmalat Özellikleri” Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Nisan 2006 TS EN 1975 (2006) “ Taşınabilir Gaz Tüpleri – Yeniden Doldurulabilir – Dikişsiz – Alüminyum ve Alüminyum Alaşımli – Su Kapasitesi 0,.
- [102] www.aluminyumsanayi.com/aluminyumprofilgenel.htm.
- [103] ALCAN, S.A. Zurich – Suisse Ürün Kataloğu.
- [104] YILMAZÇOBAN, İ.K., Engelli Araçlarının Sonlu Elemanlar Metodu Yardımı ile Çevresel Şartlara Uygunluğunun İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2009
- [105] İYİBİLGİN, O., Bilgisayar Destekli Yüksek Hızlarda Çarpma Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2004
- [106] DURSUN, T., Cıvata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2006,
- [107] MISCHKE, C. and RICHARD G., BUDYNAS, J., EDWARD S., Mechanical Engineering Design, 7th edition The McGraw-Hill Companies srl, 2004.
- [108] GÜL, E., YAVAŞLIOL, İ., (2006) Hidrojenin İçten Yanmalı Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılması ve Performansa Etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2006, İstanbul
- [109] PEHLİVAN, H., Dikey Borulu Buharlaştırıcılarda Düşme Yüksekliğinin Isı Geçişiyle Olan İlişkisinin Deneysel Araştırılması,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2008.
- [110] DÖKMECİ, S., Yamuk Kesitli Kanallın Giriş Bölgesinde Akış ve Isı Transferinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006

ÖZGEÇMİŞ

Çetin KARAKAYA, 1978 yılında Gebze' de doğdu. İlk, orta ve endüstri meslek lisesi öğrenimini 1995 yılında Gebze' de tamamladı. 1990-1995 yılları arasında Gebze' de orta ölçekli işletmelerde çalıştı. 1995-1998 yılları arasında Süperlas Süperlastik Kauçuk ve Plastik San. ve Tic. A.Ş. firmasında mekanik bakımcı ve elektrikçi olarak görev yaptı.

1998 yılında Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü' nü kazandı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi' ne yatay geçiş yaptı. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü' nü birincilikle ve 2,5 yılda bitirdi. Mezun olduğu dönem, Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kaynak Bilim Dalı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Bir yıl sonrada yine aynı üniversiteye Araştırma Görevlisi olarak atandı.

2005 Ocak ayında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl doktora öğrenimine başladı. 2009 yılında Karasu Meslek Yüksek Okulu Makine Programı' na Öğretim Görevlisi olarak atandı. Birçok sanayi Ar-Ge projesinde, SAÜ Teknokent' inde ki Ar-Ge firmalarında, Sakarya Ticaret ve Sanayi Odası Ar-Ge Projeleri Birimi' nde danışmanlıklarda bulundu. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı destekli San-Tez 123 "Yüksek Basınca Dayanıklı Kompozit Hidrojen Tanklarının İmalatı" adlı projede doktora tezi kapsamında görev aldı. Halen aynı üniversitede görevine devam etmektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.