



**FLANŞ BAĞLANTILI REAKTÖR BASINÇ KABININ YÜKSEK BASINÇ  
VE SICAKLIK ALTINDAKİ TERMO MEKANİK ANALİZİ**

**Mehmet Kemal ÖZTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2019**

Mehmet Kemal ÖZTAŞ tarafından hazırlanan “FLANŞ BAĞLANTILI REAKTÖR BASINÇ KABININ YÜKSEK BASINÇ VE SICAKLIK ALTINDAKİ TERMO MEKANİK ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

**Başkan:** Prof. Dr. Erol ARCAKLIOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

**Üye:** Doç. Dr. Tunç APATAY

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 16/12/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....  
Mehmet Kemal ÖZTAŞ  
16/12/2019

# FLANŞ BAĞLANTILI REAKTÖR BASINÇ KABININ YÜKSEK BASINÇ VE SICAKLIK ALTINDAKİ TERMO MEKANİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Kemal ÖZTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2019

## ÖZET

Enerji ihtiyacı sanayileşen ülkelerde her geçen gün artmaktadır. Enerji taleplerini karşılamak için farklı enerji üretim santral tiplerinden biri de yüksek teknoloji gerektiren nükleer güç santralleridir. Nükleer güç santrallerinin kalbi ise reaktör basınç kapları olarak tanımlanabilir. Reaktör basınç kapları işletim ömürleri boyunca sıcaklık, basınç, radyasyon, kimyasal aşınım vb. gibi birçok yıpratıcı faktörle karşılaşmaktadır. Tasarım aşamasında bu hususlar göz önüne alınarak güvenli bir reaktör basınç kabı üretmek hem işletme güvenliği, hem insan sağlığı, hem de doğa açısından büyük önem arz etmektedir. Nükleer güç santrallerinde kullanılan reaktör basınç kapları yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışmaktadırlar. Dünya üzerinde kullanılan reaktör basınç kapları için farklı ülkeler farklı malzemeler kullanabilmektedir. Bu tez çalışmasında, tasarlanan bir reaktör basınç kabı için farklı sıcaklık, basınç ve cıvata öngerilme yükü altındaki iki farklı malzeme grubu için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Modelleme ANSYS Spaceclaim ile gerçekleştirilmiş olup yapısal analiz ise ANSYS Workbench ile gerçekleştirilmiştir. Farklı malzemelerin farklı yükler altındaki davranışları ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme sınırının altında olup olmadığı incelenmiştir. İki malzeme grubunda da kapak, gövde ve somun için izin verilen gerilme sınırları aşılmazken, cıvatada iki malzeme için de farklı sıcaklık, basınç ve cıvata ön gerilme yükü altında sınırların aşıldığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile edilen sonuçlar, iki farklı malzeme grubu için reaktör basınç kabına ait bileşenlerin performansını ortaya koymuştur.

Bilim Kodu : 91433  
Anahtar Kelimeler : Reaktör Basınç Kabı, Yüksek Basınç ve Sıcaklık, Termo Mekanik Analiz  
Sayfa Adedi : 134  
Danışman : Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

THERMO MECHANICAL ANALYSIS OF FLANGED COUPLED REACTOR  
PRESSURE VESSEL UNDER HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Kemal ÖZTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2019

ABSTRACT

The need for energy is increasing day by day in industrialized countries. One of the different types of power plants to meet energy demands is nuclear power plants that require high technology. The heart of nuclear power plants can be defined as reactor pressure vessels. Reactor pressure vessels are exposed to many corrosive factors such as temperature, pressure, radiation, chemical corrosion etc. during their operating lifetime. Taking these issues into consideration during the design phase, producing a safe reactor pressure vessel is of great importance both for operational safety, human health and nature. The reactor pressure vessels used in nuclear power plants operation under high temperature and pressure. Different countries can use different materials for reactor pressure vessels around the world. In this thesis, finite element analysis was performed for two different material groups under different temperature, pressure and bolt prestress load for a designed reactor pressure vessel. Modeling was performed with ANSYS Spaceclaim and structural analysis was performed with ANSYS Workbench. The behavior of different materials under different loads was examined under ASME and PNAE G-7 codes. While the permissible stress limits for the upper cap, body and nut were not exceeded in both material groups, it was determined that the limits were exceeded for the bolt under different temperature, pressure and bolt pretension load for both materials. The results obtained by finite element analysis showed the performance of the components of the reactor pressure vessel for two different material groups.

Science Code : 91433

Key Words : Reactor Pressure Vessel, High Pressure and Temperature, Thermo Mechanical Analysis

Page Number : 134

Supervisor : Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında tecrübesiyle beni içtenlikle yönlendiren değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR'a, tez çalışmalarım için geçen süre zarfında bana gösterdikleri sabır ve yardımları için çalıştığım Kurum'a ve çalışma arkadaşlarıma, tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan hayatımın her alanında en büyük destekçim sevgili eşim Semra ÖZTAŞ'a, hayattaki yaşam sevincim neşe kaynaklarım kızlarım Azra Duru ÖZTAŞ ve Zeynep Ada ÖZTAŞ'a, bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli annem Müzeyyen ÖZTAŞ, babam Ahmet Nuri ÖZTAŞ ve ablam Gülseren ERDOĞAN'a sevgi ve saygılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                               | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                                                    | iv    |
| ABSTRACT.....                                                                                 | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                 | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                             | vii   |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                                                                     | x     |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                                                      | xii   |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                                                                      | xvi   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                                 | xvii  |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                 | 1     |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                                                | 5     |
| 3. BASINÇLI KAPLAR .....                                                                      | 17    |
| 3.1. Basınçlı Kap İmalat Yöntemleri.....                                                      | 18    |
| 3.2. Basınçlı Kap Türleri .....                                                               | 19    |
| 3.3. Basınçlı Kap Temel Bileşenleri .....                                                     | 20    |
| 3.4. Basınç Kaplarında Kullanılan Malzemeler .....                                            | 22    |
| 3.5. Reaktör Basınç Kapları .....                                                             | 23    |
| 3.6. İnce Cidarlı Basınç Kabındaki Gerilmeler .....                                           | 25    |
| 4. ASME ve PNAE G-7 KODLARININ KARŞILAŞTIRILMASI .....                                        | 29    |
| 4.1. Ekipman Sınıflandırması.....                                                             | 30    |
| 4.2. Dayanım Analizlerindeki İzin Verilen Gerilmeler.....                                     | 32    |
| 4.3. Reaktör Basınç Kapları İçin Malzeme Seçimi .....                                         | 34    |
| 4.4. Ekipmanların Boyutlandırılması, Gerilmelerin Sınıflandırılması ve Mekanik<br>Yükler..... | 36    |

**Sayfa**

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5. Genel Kıyaslama ve Değerlendirme .....                                    | 40  |
| 5. MODELLEME VE ANALİZ .....                                                   | 43  |
| 5.1. Reaktör Basınç Kabının Geometrisi.....                                    | 43  |
| 5.2. Mesh (Ağ) Oluşturulması.....                                              | 46  |
| 5.3. Analizde Kullanılan ANSYS Elemanları .....                                | 50  |
| 5.3.1. SOLID186 and SOLID187 üç boyutlu katı elemanlar.....                    | 50  |
| 5.3.2. CONTA174 ve TARGE170 üç boyutlu temas elemanları.....                   | 52  |
| 5.3.3. PRETS179 üç boyut ön gerilme elemanı .....                              | 54  |
| 5.3.4. SURF154 üç boyutlu yüzey elemanı .....                                  | 54  |
| 5.4. Modelde Oluşturulan Bağlantılar .....                                     | 55  |
| 5.5. Analiz Prosedürü .....                                                    | 58  |
| 5.6. Malzemeler ve Mekanik Özellikleri.....                                    | 60  |
| 5.7. Analizde Kullanılan Yükler .....                                          | 63  |
| 5.7.1. Cıvata öngerilmesi .....                                                | 65  |
| 5.8. Modelin Analizinin Gerçekleştirilmesi .....                               | 66  |
| 5.8.1. Isıl yük analizi .....                                                  | 66  |
| 5.8.2. Cıvata öngerilmesi + iç basınç + ısı yük analizi .....                  | 68  |
| 5.9. Değerlendirme .....                                                       | 106 |
| 6. ANALİTİK HESAPLAMA .....                                                    | 109 |
| 6.1. ASME Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Gövdesi Tasarımı.....      | 109 |
| 6.1.1. Çevresel gerilmeye bağlı cidar kalınlığı .....                          | 109 |
| 6.1.2. Boylamsal gerilmeye bağlı cidar kalınlığı .....                         | 110 |
| 6.2. ASME Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Tabanı Tasarımı .....      | 110 |
| 6.3. PNAE G-7 Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Gövdesi Tasarımı ..... | 110 |

**Sayfa**

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.4. PNAE G-7 Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Tabanı Tasarımı .....          | 111 |
| 6.5. İnce Cidarlı Basınç Kaplarındaki Gerilmeler.....                                  | 111 |
| 6.6. Analitik Sonuçların Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması ..... | 111 |
| 6.6.1. Cidar kalınlığı karşılaştırılması .....                                         | 111 |
| 6.6.2. Normal gerilme karşılaştırılması.....                                           | 114 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....                                                          | 117 |
| KAYNAKLAR.....                                                                         | 121 |
| EKLER .....                                                                            | 127 |
| EK-1. Kapak ağ görünümü .....                                                          | 128 |
| EK-2. Gövde ve destek ağ görünümü .....                                                | 129 |
| EK-3. Cıvata ve somun ağ görünümü .....                                                | 130 |
| EK-4. Kuvvet Yakınsama Grafiği.....                                                    | 131 |
| EK-5. Boylamsal gerilmeler, örnek noktalar (SA-508 Grade 3 Class 1, 17 MPa) .....      | 132 |
| EK-6. Çevresel (Hoop) gerilmeler, örnek noktalar (SA-508 Grade 3 Class 1, 17 MPa)...   | 133 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                          | 134 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Analitik hesabın ve SEA'nin karşılaştırılması .....                                     | 8     |
| Çizelge 2.2. Sonlu elamanlar analizi ile analitik hesabın karşılaştırılması .....                    | 10    |
| Çizelge 4.1. PNAE G-7 ile ASME kodlarının yaklaşık olarak eşleştirilmesi .....                       | 30    |
| Çizelge 4.2. İşletme koşulları sınıflandırması.....                                                  | 31    |
| Çizelge 4.3. İzin verilebilir nominal gerilmeler .....                                               | 32    |
| Çizelge 4.4. Cıvatalardaki izin verilen gerilmeler .....                                             | 33    |
| Çizelge 4.5. İzin verilen gerilme değerleri, MPa .....                                               | 33    |
| Çizelge 4.6. İzin verilen sismik gerilme .....                                                       | 34    |
| Çizelge 4.7. İzin verilen sismik gerilme değerleri, MPa .....                                        | 34    |
| Çizelge 4.8. ASME ve PNAE G-7'ye göre çeliklerin kimyasal kompozisyonu .....                         | 35    |
| Çizelge 4.9. Cidar kalınlığı belirlemek için kullanılan formüller .....                              | 36    |
| Çizelge 4.10. Gerilme sembollerinin karşılaştırılması .....                                          | 38    |
| Çizelge 4.11. Gerilme kategori gruplarının karşılaştırılması .....                                   | 38    |
| Çizelge 4.12. PNAE G-7'ye göre bileşenler, borular ve cıvatalar için mekanik gerilme sınırları ..... | 39    |
| Çizelge 4.13. ASME'ye göre bileşenler ve borular için mekanik gerilme sınırları .....                | 39    |
| Çizelge 4.14. ASME'ye göre cıvatalar için mekanik gerilme sınırları .....                            | 40    |
| Çizelge 5.1. Modelde kullanılan eleman boyutları (mm) .....                                          | 47    |
| Çizelge 5.2. Analizde kullanılan ANSYS elemanları .....                                              | 50    |
| Çizelge 5.3. Parçalara ait malzeme listesi.....                                                      | 60    |
| Çizelge 5.4. SA-508 Grade 3 Class 1 mekanik özellikleri .....                                        | 61    |
| Çizelge 5.5. SA-540 Grade B23 Class 3 mekanik özellikleri.....                                       | 61    |
| Çizelge 5.6. 15H2NMFA mekanik özellikleri.....                                                       | 62    |

| <b>Çizelge</b>                                                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 5.7. 38HN3MFA mekanik özellikleri.....                                                                              | 63           |
| Çizelge 5.8. Analizde kullanılan yük değerleri.....                                                                         | 64           |
| Çizelge 5.9. Analizde kullanılan cıvata öngerilme yükleri.....                                                              | 66           |
| Çizelge 5.10. Durum 1'e ait sonuçlar .....                                                                                  | 69           |
| Çizelge 5.11. Durum 2'ye ait sonuçlar .....                                                                                 | 72           |
| Çizelge 5.12. Durum 3'e ait sonuçlar .....                                                                                  | 74           |
| Çizelge 5.13. Durum 4'e ait sonuçlar .....                                                                                  | 76           |
| Çizelge 5.14. Durum 5'e ait sonuçlar .....                                                                                  | 78           |
| Çizelge 5.15. Durum 6'ya ait sonuçlar .....                                                                                 | 80           |
| Çizelge 5.16. Durum 7'ye ait sonuçlar .....                                                                                 | 82           |
| Çizelge 5.17. Durum 8'e ait sonuçlar .....                                                                                  | 84           |
| Çizelge 5.18. Durum 9'a ait sonuçlar .....                                                                                  | 86           |
| Çizelge 5.19. Durum 10'a ait sonuçlar .....                                                                                 | 88           |
| Çizelge 5.20. Durum 11'e ait sonuçlar .....                                                                                 | 90           |
| Çizelge 5.21. Durum 12'ye ait sonuçlar .....                                                                                | 92           |
| Çizelge 5.22. Durum 13'e ait sonuçlar .....                                                                                 | 94           |
| Çizelge 5.23. Durum 14'e ait sonuçlar .....                                                                                 | 96           |
| Çizelge 5.24. Durum 15'e ait sonuçlar .....                                                                                 | 98           |
| Çizelge 5.25. Durum 16'ya ait sonuçlar .....                                                                                | 100          |
| Çizelge 5.26. Durum 17'ye ait sonuçlar .....                                                                                | 102          |
| Çizelge 5.27. Durum 18'e ait sonuçlar .....                                                                                 | 104          |
| Çizelge 6.1. Cidar kalınlıklarının analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi<br>sonuçlarına göre karşılaştırılması..... | 112          |
| Çizelge 6.2. Normal gerilmelerin analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi<br>sonuçlarına göre karşılaştırılması.....   | 114          |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                           | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. (a) Kullanılan geometri (b) birleştirilmiş termal yük + basınç analizi .....                                                                                         | 5     |
| Şekil 2.2. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan model .....                                                                                                                    | 6     |
| Şekil 2.3. (a) Mogri tarafından oluşturulan geometri (b) analiz için yapılan sadeleştirme .....                                                                                 | 7     |
| Şekil 2.4. Basitleştirilmiş modelleme ve modeldeki sıcaklık dağılımı .....                                                                                                      | 9     |
| Şekil 2.5. Sonlu elemanlar modeli ve detaylı dış gösterimi .....                                                                                                                | 11    |
| Şekil 2.6. Radyal yer değiştirme için SEA ve analitik eşitlik karşılaştırma örneği .....                                                                                        | 13    |
| Şekil 2.7. Kalınlığa bağlı gerilme değişimi. ....                                                                                                                               | 15    |
| Şekil 3.1. Yüksek basınçlı kap imalat metotları .....                                                                                                                           | 18    |
| Şekil 3.2. Başlıklar (a) Elipsoidal (b) küresel dış bükey (c) yarım küre (ç) konik (d) torikonikal .....                                                                        | 21    |
| Şekil 3.3. (a) Basınç kabı üzerindeki nozul (b) nozulun yakın görünümü .....                                                                                                    | 22    |
| Şekil 3.4. (a) iki boyutlu gerilme durumu, gerilme karesi (b) normal gerilme işaretleri.....                                                                                    | 25    |
| Şekil 3.5. (a) Tasarlanan bir basınç kabı (b) normal gerilmeler (c) iç basınç (ç) basınç altında küredeki kuvvetler (d) dik direnç kuvvetleri (e) serbest cisim diyagramı ..... | 26    |
| Şekil 5.1. (a) Reaktör basınç kabının 1/50 oranında bölümlenmiş modeli (b) reaktör basınç kabının tam modeli .....                                                              | 44    |
| Şekil 5.2. Reaktör basınç kabı (a) kapağı (b) gövdesi .....                                                                                                                     | 45    |
| Şekil 5.3. Reaktör basınç kabında kullanılan (a) civata (b) somun .....                                                                                                         | 45    |
| Şekil 5.4. Modele ait ağ görünümü .....                                                                                                                                         | 46    |
| Şekil 5.5. Eleman boyu – En yüksek eş değer gerilme .....                                                                                                                       | 48    |
| Şekil 5.6. Eleman boyu – En yüksek eş değer gerilme .....                                                                                                                       | 48    |
| Şekil 5.7. Kuvvet yakınsaması grafiği .....                                                                                                                                     | 50    |

| Şekil                                                                                                                                                     | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.8. (a) SOLID186 elemanının geometrik şekilleri (b) SOLID187 elemanının geometrik şekli .....                                                      | 51    |
| Şekil 5.9. CONTA174 8 düğüm yüzeyden yüzeye bağlantı elemanı .....                                                                                        | 52    |
| Şekil 5.10. TARGE170 hedef segman elemanı .....                                                                                                           | 53    |
| Şekil 5.11. PRETS179 ön gerilme elemanı .....                                                                                                             | 54    |
| Şekil 5.12. SURF154 üç boyutlu yüzey elemanı .....                                                                                                        | 55    |
| Şekil 5.13. Cıvata-somun temas yüzeyleri.....                                                                                                             | 55    |
| Şekil 5.14. Somun-kapak temas yüzeyleri.....                                                                                                              | 56    |
| Şekil 5.15. Kapak-cıvata temas yüzeyleri.....                                                                                                             | 56    |
| Şekil 5.16. Kapak-gövde temas yüzeyleri.....                                                                                                              | 57    |
| Şekil 5.17. Gövde-cıvata temas yüzeyleri.....                                                                                                             | 57    |
| Şekil 5.18. Gövde-destek temas yüzeyleri.....                                                                                                             | 58    |
| Şekil 5.19. 15H2NMFA ve 38HN3MFA malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı (a) 300 °C (b) 350°C.....                                 | 67    |
| Şekil 5.20. SA-508 Grade 3 Class 1 ve SA-540 Grade B23 Class 3 malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı (a) 300 °C (b) 350 °C ..... | 67    |
| Şekil 5.21. Durum 1 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme – izin verilen gerilme .....                                     | 70    |
| Şekil 5.22. Durum 1 – Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....                                               | 71    |
| Şekil 5.23. Durum 2 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme – izin verilen gerilme .....                                     | 72    |
| Şekil 5.24. Durum 2 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....                                               | 73    |
| Şekil 5.25. Durum 3 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....                                     | 74    |
| Şekil 5.26. Durum 3 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....                                               | 75    |

| <b>Şekil</b>                                                                                                              | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.27. Durum 4 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 76           |
| Şekil 5.28. Durum 4 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....               | 77           |
| Şekil 5.29. Durum 5 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 78           |
| Şekil 5.30. Durum 5 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....               | 79           |
| Şekil 5.31. Durum 6 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 80           |
| Şekil 5.32. Durum 6 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede gerilme - izin (d)somunda ..... | 81           |
| Şekil 5.33. Durum 7 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 82           |
| Şekil 5.34. Durum 7 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c)gövdede (d) somunda .....                | 83           |
| Şekil 5.35. Durum 8 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 84           |
| Şekil 5.36. Durum 8 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....               | 85           |
| Şekil 5.37. Durum 9 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....     | 86           |
| Şekil 5.38. Durum 9 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....               | 87           |
| Şekil 5.39. Durum 10 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....    | 88           |
| Şekil 5.40. Durum 10 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....              | 89           |
| Şekil 5.41. Durum 11 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme .....    | 90           |
| Şekil 5.42. Durum 11 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....              | 91           |

| <b>Şekil</b>                                                                                                           | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 5.43. Durum 12 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 92           |
| Şekil 5.44. Durum 12 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 93           |
| Şekil 5.45. Durum 13 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 94           |
| Şekil 5.46. Durum 13 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 95           |
| Şekil 5.47. Durum 14 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 96           |
| Şekil 5.48. Durum 14 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 97           |
| Şekil 5.49. Durum 15 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 98           |
| Şekil 5.50. Durum 15 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 99           |
| Şekil 5.51. Durum 16 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 100          |
| Şekil 5.52. Durum 16 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 101          |
| Şekil 5.53. Durum 17 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 102          |
| Şekil 5.54. Durum 17 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 103          |
| Şekil 5.55. Durum 18 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme ..... | 104          |
| Şekil 5.56. Durum 18 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda .....           | 105          |
| Şekil 5.57. Kapak ve Gövde için Gerilme – Durumlar .....                                                               | 106          |
| Şekil 5.58. Cıvata ve Somun için Gerilme – Durumlar .....                                                              | 107          |

**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                                                                                  | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Resim 3.1. Reaktör basınç kabı örneği .....                                                                   | 17           |
| Resim 3.2. (a) Yatay silindirik basınç kabı (b) Dikey silindirik basınç kabı<br>(c) Küresel Basınç kabı ..... | 20           |
| Resim 3.3. Reaktör basınç kabı .....                                                                          | 23           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>                  | <b>Açıklamalar</b>                                                         |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>                         | Alan                                                                       |
| <b>°C</b>                        | Derece selsiyus                                                            |
| <b>D</b>                         | Nominal iç çap                                                             |
| <b>D<sub>a</sub></b>             | Nominal dış çap                                                            |
| <b>D<sub>0</sub></b>             | Dış çap                                                                    |
| <b>D<sub>R</sub></b>             | Dairesel düz kafa veya kapağın tasarım çapı                                |
| <b>E</b>                         | Young Modülü                                                               |
| <b>F</b>                         | En yüksek gerilme                                                          |
| <b>H</b>                         | Kapağın dışbükeyinin iç yüzeyine kadarki yüksekliği                        |
| <b>K<sub>4</sub></b>             | Tasarım faktörü                                                            |
| <b>L</b>                         | Boy                                                                        |
| <b>m²</b>                        | Metrekare                                                                  |
| <b>mm</b>                        | Milimetre                                                                  |
| <b>MPa</b>                       | Mega paskal                                                                |
| <b>N</b>                         | Newton                                                                     |
| <b>P</b>                         | Basınç                                                                     |
| <b>p</b>                         | Tasarım/İç basınç                                                          |
| <b>P<sub>b</sub></b>             | Genel eğilme gerilmesi                                                     |
| <b>P<sub>e</sub></b>             | Boruların serbest serbest uç yer değiştirmelerinden kaynaklanan gerilmeler |
| <b>P<sub>L</sub></b>             | Yerel membran gerilmesi                                                    |
| <b>P<sub>m</sub></b>             | Genel membran gerilmesi                                                    |
| <b>P<sub>ML</sub></b>            | Boylamsal membran gerilmesi                                                |
| <b>R</b>                         | İç çap                                                                     |
| <b>r</b>                         | Yarı çap                                                                   |
| <b>R<sub>m</sub><sup>T</sup></b> | Belirli sıcaklıktaki çekme mukavemetin minimal değeri                      |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                 |                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_{p0,2}^T$    | Belirli sıcaklıktaki akma mukavemetin minimal değeri                                                                                                                                                          |
| $R_y$           | Akma dayanımı ortalama sıcaklığa bağlı eğilim eğrisi değerinin oda sıcaklığındaki akma dayanımına oranı                                                                                                       |
| $S_m$           | İzin verilen tasarım gerilmesi                                                                                                                                                                                |
| $S_T$           | Oda sıcaklığındaki çekme mukavemetin minimal değeri                                                                                                                                                           |
| $S_T^T$         | Belirli sıcaklıktaki çekme mukavemetin minimal değeri                                                                                                                                                         |
| $S_Y$           | Belirli sıcaklıktaki akma mukavemetin minimal değeri                                                                                                                                                          |
| $S_Y^T$         | Belirli sıcaklıktaki akma mukavemetin minimal değeri                                                                                                                                                          |
| $t$             | Et (cidar) kalınlığı                                                                                                                                                                                          |
| $\pi$           | Pi sayısı                                                                                                                                                                                                     |
| $\alpha$        | Isıl genleşme katsayısı                                                                                                                                                                                       |
| $\nu$           | Poisson oranı                                                                                                                                                                                                 |
| $\sigma$        | Nominal izin verilen gerilme                                                                                                                                                                                  |
| $(\sigma)_1$    | İndirgenmiş genel membran gerilmesi                                                                                                                                                                           |
| $\sigma_m$      | Genel membran gerilmesi                                                                                                                                                                                       |
| $\sigma_{mL}$   | Yerel membran gerilmesi                                                                                                                                                                                       |
| $\sigma_b$      | Genel eğilme gerilmesi                                                                                                                                                                                        |
| $\sigma_{bL}$   | Yerel eğilme gerilmesi                                                                                                                                                                                        |
| $\sigma_T$      | Genel ısı gerilme                                                                                                                                                                                             |
| $\sigma_K$      | Boruların serbest serbest uç yer değiştirmelerinden kaynaklanan gerilmeler                                                                                                                                    |
| $(\sigma)_2$    | Genel membran gerilmesi veya lokal membran gerilmelerinin ve genel eğilme gerilmelerinin bileşenlerinin toplamı ile tanımlanacak indirgenmiş gerilme grubu                                                    |
| $(\sigma)_{3w}$ | Sıkma kuvveti dahil mekanik yüklerden ve sıcaklık etkilerinden kaynaklanan cıvata/saplama bölümü çekme gerilmeleri arasındaki ortalamanın toplamı olarak tanımlanacak indirgenmiş gerilme grubu               |
| $(\sigma)_{4w}$ | Cıvata/saplamalardaki çekme, bükülme ve burkulma gerilmeleri tarafından tanımlanacak olan bir sıkma kuvveti de dahil olmak üzere mekanik ve sıcaklık etkilerinin neden olduğu indirgenmiş gerilmeler grubudur |

**Simgeler****Açıklamalar**

|                                             |                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>(<math>\sigma</math>)<sub>RV</sub></b>   | Genel veya lokal membran gerilmelerinin, genel ve lokal eğilme gerilmelerinin, genel sıcaklık gerilmelerinin ve ekipmanın dengelenmesi için gerilmelerin toplamı ile tanımlanacak azami indirgenmiş gerilme aralığı |
| <b>(<math>\sigma_a</math>)<sub>F</sub></b>  | Konvansiyonel elastik gerilmelerin yoğunluk faktörü dikkate alınarak, geleneksel elastik indirgenmiş gerilmelerin genliği, MPa (kgf / mm <sup>2</sup> )                                                             |
| <b>(<math>\sigma_a</math>)<sub>F</sub>W</b> | Cıvata veya saplamalarda azaltılmış gerilmelerin genliği, MPa (kgf / mm <sup>2</sup> )                                                                                                                              |
| <b><math>\phi</math></b>                    | Tasarım gücü azaltma indeksi                                                                                                                                                                                        |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|                 |                                                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>ASME</b>     | The American Society of Mechanical Engineers                     |
| <b>DE</b>       | Design Earthquake                                                |
| <b>ES</b>       | Emergency Situation                                              |
| <b>LWR</b>      | Light Water Reactor                                              |
| <b>MDE</b>      | Maximum Design Earthquake                                        |
| <b>MDEP</b>     | The Multinational Design Evaluation Programme                    |
| <b>MRZ</b>      | Maximum Design Earthquake                                        |
| <b>NGS</b>      | Nükleer Güç Santrali                                             |
| <b>NOC</b>      | Normal Operation Conditions                                      |
| <b>PNAE G-7</b> | Federal Standards and Rules in the Field of Use of Atomic Energy |
| <b>SEA</b>      | Sonlu Elemanlar Analizi                                          |
| <b>SL</b>       | Sustained Load                                                   |
| <b>SSE</b>      | Safe Shutdown Earthquake                                         |
| <b>VNOC</b>     | Violation of Normal Operation Conditions                         |

## 1. GİRİŞ

Bir basınçlı kap, gazları veya sıvıları ortam basıncından büyük ölçüde farklı bir basınçta tutmak için tasarlanmış güvenlik açısından önemli parçalardır. Günümüzde basınçlı kaplar enerji, gıda, atık vs. gibi birçok alanda etkin olarak kullanılmaktadır. Bu ekipmanların öngörülen tüm işletme koşullarında ve yükler altında bütünlüklerini koruyarak işlevlerini yerine getirmeleri gerek insan gerekse çevre güvenliği üzerinde büyük öneme sahip olmaktadır. Basıncı kontrol altında tutma zorunluluğu 300 yıldan uzun bir süredir günümüze kadar ulaşmış büyük bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun nedeni, basınç farkının tehlikeli olmasıdır. Basınçlı kap geliştirme ve işletme süreci boyunca birçok ölümcül kaza meydana gelmiştir. Bu nedenlerle basınçlı kap tasarımı, üretimi ve işletilmesi, mevzuatla desteklenen mühendislik otoriteleri tarafından düzenlenir. Bir basınçlı kap tanımı ülkeden ülkeye değişmekte ve bu tanım genellikle maksimum güvenli çalışma basıncı ve sıcaklık gibi parametreleri içermektedir [1, 2].

Sanayi devrimi sırasında, esas olarak buharlı motorları çalıştırmak için gerekli olan buhar üretiminde kullanılan basınçlı kapların güvenliği, icadından bu yana ölümcül patlama risklerini en aza indirmede kritik bir rol oynamıştır. Günümüzde beklenmeyen kazalardan kaçınmak için bu ekipmanın önemi bilinmekle birlikte, endüstrinin her alanında kullanım alanları mevcut hale gelmiştir. Basınçlı kaplar, evsel sıcak su depolama tanklarına, yeniden sıkıştırma odalarına, damıtma kulelerine, madencilik işlemlerine, petrokimya tesislerine, nükleer reaktör gemilerine, nükleer reaktörlere, denizaltılara, uzay mekiklerine ve amonyak, klor, propan, bütan ve LPG gibi sıvılaştırılmış gazlar için depolama tanklarına kadar çeşitli uygulamalarda kullanılır [2].

Basınçlı kaplar hemen hemen her şekilde olabilir, ancak küre, silindir ve konilerden oluşan şekiller genellikle tercih edilir. Yaygın olan tasarım, başlık adı verilen uç tarafında kapak olan bir silindirdir. Başlık şekilleri en çok yuvarlak / dairesel veya çanak şeklindedir. Daha karmaşık geometriye sahip basınç kaplarının güvenli çalışma için analiz edilmesi ve imal edilmesi daha zordur. Küresel bir basınçlı kap, silindirik bir basınçlı kaba göre yaklaşık olarak iki kat fazla dayanım gücüne sahiptir. Bununla birlikte, küresel bir şeklin üretilmesi zordur ve bu nedenle daha da pahalı olmaktadır. Bu nedenle çoğu basınçlı kap, her iki ucunda yarı eliptik başlık veya ucunda kapağı ile üretilen silindirik bir gövdeden oluşmaktadır [2].

Literatür incelendiğinde bütün olarak basınçlı kaplar için çalışmalar mevcut olmakla beraber flanş bağlantılı ekipmanlar (boru ve basınç kabı) için çalışmalar da bulunmaktadır. Bununla beraber incelenen literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunun ASME kodları ile gerçekleştirildiği görülmüştür. Literatürde Rusya Federasyonu'nda ve eski Sovyet bloğu ülkelerinin bazılarında kullanılan PNAE G-7 koduna yönelik olarak araştırma çok az olmakla birlikte, ASME ve PNAE G-7 kodlarını karşılaştırmaya yönelik yapılan bir analize rastlanmamıştır.

Farklı ülkelerin farklı nükleer santral tasarımına sahip olmasından dolayı kod ve standartlarda değişiklik göstermektedir. Buckthorpe ve diğerleri tarafından gelecekteki işbirliği potansiyelini araştırmak ve kodlar arasındaki farkları ortaya çıkarmak için çalışma yapılmıştır [3].

Yapılan çalışmalarda farklı ülkelerdeki standart geliştirme ve kural koyucu kuruluşlar tarafından geliştirilen kod ve standartlar karşılaştırılmıştır. ASME tarafından uluslararası uzmanların katılımıyla MDEP için hazırlanan raporda, başlıca uluslararası nükleer kodlar ve 1. sınıf nükleer güvenlik sınıfına ait standartlar arasındaki farklar tanımlanmış ve özetlenmiştir. Çalışmanın sonuçlarının düzenleyici kurumlar, ekipman tasarımcıları ve üreticileri tarafından kullanılması amaçlanmıştır. ASME ve PNAE G-7 kodlarının karşılaştırılması ile temel amaçları aynı olan dokümanlara ait çok sayıda teknik farklılık tespit edilmiştir [4].

Faidy ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada basınç kaplarının ve boruların hatasız imal edildiği kabul edilerek, bunlar için geliştirilen kodlar üzerinde kıyaslama yoluna gidilmiştir. Hiçbir kodu referans almayıp her bir kodu ayrı ayrı değerlendirmişlerdir. Her bir koda ait olarak büyük hata modları, bozunma mekanizması ve yük çeşitleri dikkate alınmıştır. İncelenen kodların zayıf ve üstün noktaları değerlendirilerek karşılaştırmalı tablo hazırlamışlardır [5].

#### Problemin durumu/Araştırmanın amacı

Ülkemizde Akkuyu Nükleer Güç Santralının lisanslanması için Türk mevzuatının yanında Rus mevzuatı; Sinop Nükleer Güç Santralının lisanslanması için ise Türk mevzuatının yanında Amerikan mevzuatı lisanslamaya temel düzenlemeler olarak kullanılmaktadır.

Farklı standartlar aynı amaca hizmet etse bile farklı gereklilikler ya da teknik farklılıklar içerebilmektedir. Literatürde de kodlar kendi aralarında kıyaslanmakla birlikte akademik olarak bu alanda yapılan analizlere rastlanılmamıştır.

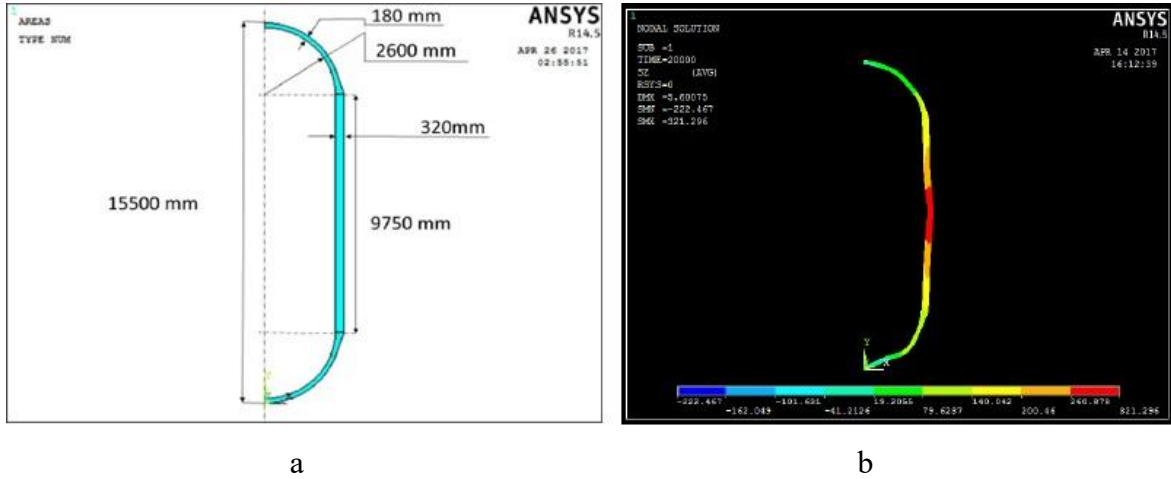
Bu tezin amacı açık kaynaklardan faydalanılarak [6-11] tasarlanan reaktör basınç kabı modelinin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre belirli sıcaklıkta, iç basınç ve cıvata ön gerilmesi altındaki davranışlarının incelenmesidir. Oluşturulan geometride bazı kabuller yapılarak sadeleştirilmeye gidilmiştir. Çözümler zamandan bağımsız olarak yapılmış olup, elde edilen sonuçlar izin verilen gerilme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda belirlenen sınır/işletme koşulları için ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre seçilen malzemelerin dayanımlarının anlaşılması amaçlanmıştır. Analizlerde “ANSYS” yazılımı kullanılmıştır.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde doğrudan cıvata bağlantılı basınçlı kaplar üzerine yapılmış araştırma sınırlı olmakla birlikte araştırmalar basınçlı kaplar veya cıvata bağlantılı flanşlı parçaların termomekanik olarak incelenmesi şeklinde yoğunlaşmaktadır. Bu tezin konusunu oluşturan çalışma için literatürdeki araştırmalar incelenerek ilgili tez, makale ve yayınlardan faydalanılmıştır.

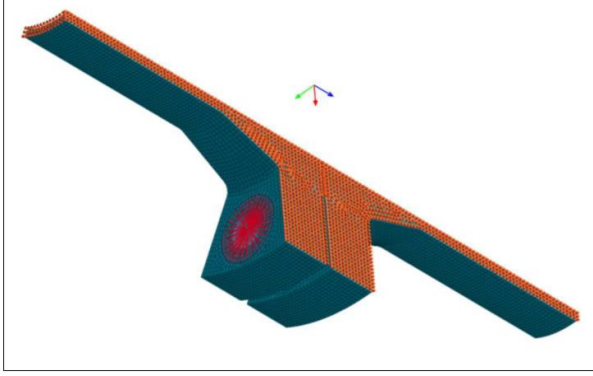
Krishnamoorthy, Shukla, Taneja, ve Bhardwaj çalışmalarında basınçlı bir tankın yorulma analizini ANSYS yazılımı kullanarak ASME koduna göre yapmışlardır. İlk olarak basınç analizi ardından termal analiz (Şekil 2.1) gerçekleştirerek birikimli kullanım faktörünü (parçanın tükenen ömrüne ait oranı ifade eder, örneğin kullanım faktörü 0,40 olan bir parçanın ömrünün %40'nın tükendiği söylenebilir) hesaplamışlardır. Yorulmadaki birikimli kullanım faktörü basınç kabının uygunluğunu doğrulamak için Miner yasası kullanılarak belirlenmiştir. Geliştirdikleri yöntem ile diğer geçici döngülerin aynı yolla hesaplanabileceğini ve gerilme faktörünün yorulma hesabında en önemli etken olduğunu vurgulamışlardır [12].



Şekil 2.1. (a) Kullanılan geometri (b) birleştirilmiş termal yük + basınç analizi [12]

Towarnicki ve Grzejda çalışmalarında yüksek sıcaklık altındaki cıvata bağlantılı flanşlı bir parçanın analizini analitik yöntemler ve Midas NFX 2017 programı üzerinden sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda cıvata için basitleştirilmiş bir model kullanılmış ve elde edilen veriler cıvatanın dayanım değerleri

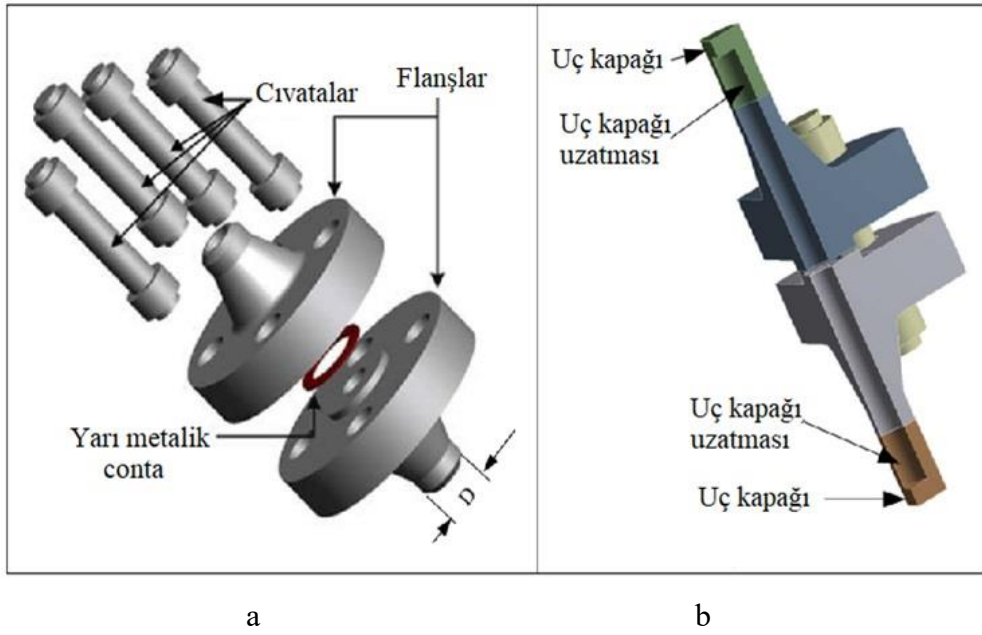
ile kontrol edilmiştir. Araştırmacılar yapılacak SEA analizleri için kullanılacak modellemelerde basitleştirilmiş cıvata ve bağlantı elemanlarının kullanımını tavsiye etmişlerdir. Analizlerinde iç basınç, sıcaklık ve cıvata ön gerilmelerini yük olarak hesaba katmışlardır [13].



Şekil 2.2. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan model [13]

Q. Zhang ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, termo-elastikiyet teorisine dayanan, bir iç akışkan basıncına ve bir termal yüke maruz bırakılan çok katmanlı bir kompozit basınç kabının gerilme dağılımını belirlemek için bir analitik sonuç elde edilmiştir. Analitik çözümü doğrulamak için, basınç kabının gerilme dağılımını aynı zamanda sonlu elemanlar (SE) yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Önerdikleri analitik çözümün termal yük ve akışkan basıncı içeren çok katmanlı kompozit basınç kabı tasarlamak için kesin bir yöntem sağladığını ifade etmişlerdir [14].

Mogri çalışmasında cıvatalı flanş bağlantı ile Graylock kelepçe konnektörünün sızdırmazlığını ve yapısal bütünlüğünü sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirmiştir. Cıvata bağlantılı flanşlı parça cıvata önyüklemelerine (55,000 N), iç basınca (27 MPa) ve termal yüklemelere (260 °C) maruz bırakılmıştır. Kelepçe konnektörü ise cıvata önyüklemelerine (6,000 N), iç basınca (27 MPa) ve termal yüklemelere (600 °C) maruz bırakılmıştır. Kullanılan modeller oluşturulduktan sonra analiz aşaması için model sadeleştirilmiştir (Şekil 2.3). Her bir analiz sonucu elde edilen veriler ASME 2010b ve 2010d kodları ile kıyaslanmıştır [15].



Şekil 2.3. (a) Mogri tarafından oluşturulan geometri (b) analiz için yapılan sadeleştirme [15]

Satyanarayana ve Praveena çalışmalarında yüksek basınç ve sıcaklık altında çalışan basınç kabını ASME kodları gereğince CATIA V5R20 programı ile tasarlanmış, ANSYS Workbench ile termal analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarındaki esas amaç yapısal çelik ve alüminyum alaşımlı malzeme için toplam sıcaklık ve ısı akısının karşılaştırılması üzerine kurulmuştur. Çalışmaları sonucunda basınç kabı bileşenlerinde yapılacak küçük bir değişikliğin tasarımdaki analizde istenenden tamamen farklı sonuçlar ortaya çıkarabileceği vurgulanmıştır. Basıncılı kapların tasarım yaklaşımında ASME kodları ve SEA yöntemi ile modelleme ve analiz yapmanın kolay olduğu ve optimum parametreler elde edilebileceği ifade edilmiştir [16].

Niyamat ve Bicha çalışmalarında termal yüke ve iç basınca maruz kalan sıvı metal soğutmalı reaktör basınç kabını analitik olarak ve ANSYS kullanarak sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Kendi literatür araştırmalarında bu tür basınç kapları için az sayıda termal yük analizinin yapıldığı ve bu nedenle çalışmalarında bu alanda termo-mekanik analiz yaptıklarını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada gerçekleştirilen analitik analizi ASME Bölüm III'e göre; sonlu elemanlar analizini ise kurala göre tasarım metoduna (*design by rule method*) göre yaptıklarını belirtmişlerdir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda ortaya çıkan değerleri birbiri ile karşılaştırmışlardır (Çizelge 2.1). Bunun yanı sıra basınç kabının diğer tip başlık tasarımları ile analizini; basınç kabı bileşenleri ile tasarlama ve analizini; basınç

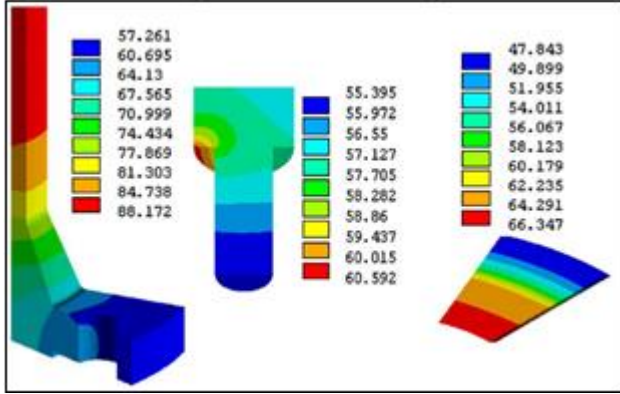
kabının diğer aksesuarları için birleşik alan analizini gelecekte yapılabilecek çalışmalar arasında göstermişlerdir [17].

Çizelge 2.1. Analitik hesabın ve SEA'nin karşılaştırılması [17]

| Gövde                                           | Analitik (MPa) | ANSYS (MPa) | Hata Yüzdesi |
|-------------------------------------------------|----------------|-------------|--------------|
| Isıl yük sonucu oluşan gerilmeler               | 20,7           | 17,59       | 15%          |
| Basınç yükü sonucu oluşan gerilmeler            | 93,7           | 93,7        | 0%           |
| Isıl yük + Basınç Yükü sonucu oluşan gerilmeler | NA             | 103,07      | NA           |

Sanyasinaidu ve Chandanarao tarafından yapılan çalışmada ASME kodlarına göre bir basınç silindiri tasarlanmış ve ANSYS programı ile tasarlanan basınç kabı üzerine termal analizler gerçekleştirilmiştir. Yekpare bir silindir ile çok katmanlı bir silindir analiz edilerek sonuçları karşılaştırılmıştır [18].

Abid çalışmasında mevcut tasarım kodlarının ve tasarım çözümlerinin iç basınç, cıvata ön gerilmesi ve termal yüklemelerde sızdırmazlık ve bütünlük konusunda problemleri çözmediğini belirterek contaflı flanş bağlantısının dayanımını ve sızdırmazlık kabiliyetini ANSYS programı üzerinden SEA ile araştırmıştır. Çalışmada sabit sıcaklıkta farklı iç basınçlara maruz bırakılarak güvenli çalışma şartları belirlenmiştir. Modeldeki simetri nedeniyle sadeleştirmeye gidilerek analiz edilen flanşın 22.5°'lik bir kısmı analiz için kullanılmıştır. Benzer şekilde simetri nedeniyle conta ve cıvatanın da bir kısmı modellenmiştir (Şekil 2.4). Gerçekleştirilen termal analiz sonucunda borudan gerçekleşen ısı transferi miktarının flanş halkasından gerçekleşen ısı transferi miktarına göre daha düşük olduğu ortaya çıkarılmıştır [19].



Şekil 2.4. Basitleştirilmiş modelleme ve modeldeki sıcaklık dağılımı [19]

Abdel-Ghany, Ebeid and Salama paralel olmayan flanş bağlantısı için termo-mekanik analizleri 3D (üç boyutlu) olarak sonlu elemanlar modeli altında incelemiştir. Çalışmalarında farklı iç basınç ve sıcaklık değerleri altında farklı flanş kalınlıklarını 25 işletme durumu için denemiştir. Sonlu elemanlar analizi için ABAQUS 6.10 kullanılmış ve malzeme özellikleri için ASME kodlarından faydalanılmıştır [20].

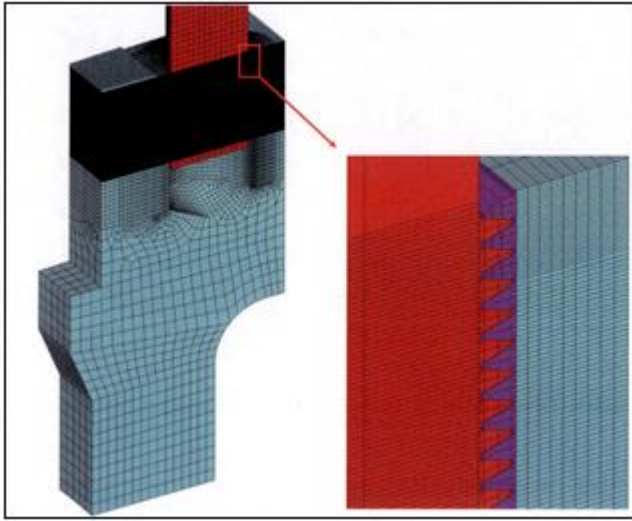
Mhetre tezinde geleneksel malzemelerden üretilen ve kompozit malzemelerden üretilen basınçlı kapları yüksek basınç ve sıcaklık altındaki performanslarını sonlu elemanlar modeli ile çalışmıştır. Çalışmasında kullanılan sınır şartları 6.89 MPa iç basınç, 280 °C işletme sıcaklığı ve basınç kabının boş ağırlığı olarak belirtilmiştir. Karbon çelik modeli (SA 516 Gr 70), Polyimide / E-glass ile kaplanmış 40 mm karbon çeliği ve Polyimide / E-glass, Polyimide / S-glass ve Polyimide / carbon fiber kombinasyonu ile kaplanmış 30 mm karbon çeliği olmak üzere üç farklı model üzerinde çalışmıştır. Sonlu elemanlar modeli üzerinde yapılan çalışma daha sonra ASME kodları ile analitik olarak yapılan hesaplar ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.2’de birinci duruma ait olarak verilen karşılaştırma görülmektedir. Mhetre yaptığı tez çalışması sonucunda reaktör basınçlı kabının ömrünü belirlemek için yorulma analizi; termal stresin etkisini belirlemek için termal döngü dikkate alınarak geçici durum termal analizi yapılabileceğini ifade etmiştir [21].

Çizelge 2.2. Sonlu elamanlar analizi ile analitik hesabın karşılaştırılması [21]

| Bileşen   | İç Basınç (MPa) | Kalınlık (mm) | ASME'ye göre gerilme | Analitik (MPa) |           | SEA (MPa) |           |
|-----------|-----------------|---------------|----------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|           |                 |               |                      | Çevresel       | Boylamsal | Çevresel  | Boylamsal |
| Üst bükey | 6,89            | 75            | 67,58                | 73,94          | 36,97     | 110,3     | 77,05     |
| Gövde     | 7,00            | 63            | 88,92                | 88,37          | 44,18     | 84,03     | 73,3      |
| Alt Bükey | 7,02            | 75            | 68,92                | 75,65          | 37,82     | 94,71     | 54,8      |

Mann, Hilsabeck ve Mckoon sürünmenin cıvata yükleri üzerindeki etkisini tahmin etmek için geçerli bir SEA simülasyon yaklaşımı geliştirmek ve sürünme sıcaklığında contanın cıvata yükü üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla testler ve analizler yapmışlardır. Bu testler için cıvatalı flanş bağlantısı 1100 °F ısıtılmıştır. SEA için NPS12 sınıf 300 vanası seçilmiş ve basitleştirmeye gidilerek cıvatanın dörtte biri modellenmiştir [22].

Moody, Chesworth ve Reagan reaktör basınç kapları flanş bağlantılarındaki cıvata dış kontrollerinin güvenlikten ödün vermeden yürürlükten kaldırılması için bir çalışma yapmışlardır. Şekil 2.5’de görülebileceği üzere analiz için reaktör basınç kabının bir bölümü ve cıvatanın yarısı modellenmiştir. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi ANSYS programı ile gerçekleştirilmiş olup işletme basıncı (2500 psi), cıvata ön gerilmesi (42,339 psi) ve sıcaklık (600 °F) yükleri tasarlanan modele uygulanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda belirtilen yükler altında reaktör basınç kabında 80 yıl boyunca izin verilen çatlak boyutu çapına yaklaşmadığı, bu nedenle tasarımların güvenliğinden ötürü bakım sırasında bu parçalara denetimlerin yapılmamasının güvenliğe her hangi olumsuz bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir [23].



Şekil 2.5. Sonlu elamanlar modeli ve detaylı diş gösterimi [23]

Gorla ve Tanawade flanşlı bağlantılar hakkında yapılmış araştırmaların genelde iç basınç yüklemesi üzerine yoğunlaştığını belirterek kararlı durum altında civara ön gerilmesi, iç basınç ve yüksek sıcaklık ile verilen sınır koşulları altında maksimum gerilme alanlarını elde etmek için flanş üzerinde termal ve yapısal sonlu elemanlar analizi (deterministik analiz) yapılmıştır. Yapılan bu analiz ile elde edilen sonuçlar tasarımı optimize etmek için olasılıklı olarak değerlendirilmiştir [24]. Yapılan bu çalışma, Abid ve Nash [25] tarafından gerçekleştirilen çalışmada elde edilen veriler temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Gorla ve Tanawade deterministik analizini ALGOR, olasılıklı analizini ise NESSUS yazılımları ile gerçekleştirmişlerdir [24].

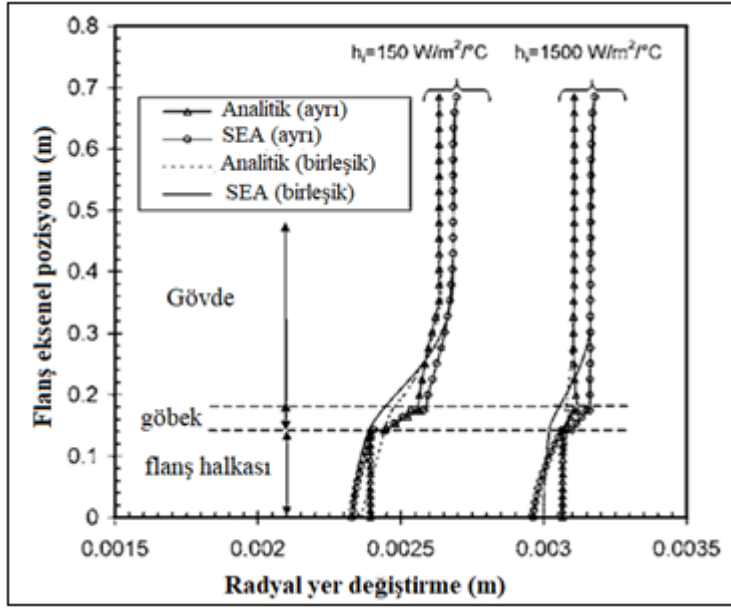
Omiya ve Sawa civata ön gerilmesi, iç basınç ve periyodik termal yüklerin, flanşlı boru bağlantısının sızdırmazlık performansı ve mekanik karakteristikleri üzerindeki etkisini, büyük ve küçük çaplar için sonlu elemanlar analizi ile küçük çap için ise deneyler ile bulmaya çalışmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda termal gerilmelerin daha büyük çaplı boru flanş bağlantılarında contanın dış kısmında meydana geldiğini görmüşlerdir. Küçük ve büyük çaplarda conta gerilme dağılımında farklı eğilimler tespit ettikleri için büyük çaplar için yapılacak olan tasarımlarda ısı yüküne bağlı flanş deformasyonunun dikkate alınması tavsiyesinde bulunmuşlardır [26].

Ting ve diğerleri çalışmalarında reaktör basınç kabında bulunan civata ve dişlerin ısı ve yorulma analizlerini ANSYS ile 40'tan fazla sıcaklık ve basınç durumu için gerçekleştirmişlerdir. Analizin karmaşıklığını azaltmak için reaktör basınç kabına ait olan

bazı bileşenleri ihmal etmişler ve hesaplamada reaktör basınç kabı üst kapağı, reaktör basınç kabı gövdesi ve civataları dikkate almışlardır. Malzemelere ait verileri RCC-M kodundan almışlardır. Modeli basitleştirme yoluna gidip bir takım ölçüsel, yapısal ve fiziksel durumu ihmal etmişlerdir. Cıvata ve dişe ait kullanım faktörünü hesaplamak için etkili bir yöntem bulmaya çalışırken, cıvata ön gerilmesi ve cıvata ile diş arasındaki teması göz önüne almışlardır. Kullanım faktörünü hesaplamak için “rain flow” ve “Miner” metodlarını kullanmışlardır [27].

Mohanty, Soppet, Majumdar ve Natesan elektrik şebekesindeki değişen yükler altında çalışan nükleer güç santrallerinin bu değişimlere uyum sağlayıp sağlayamayacağını belirlemek için çalışmışlardır. Bu tarz yapılan çalışmaların mevcutta çalışmakta olan nükleer güç santrallerinin ömrünü 40 yıldan 80 yıllara uzatmak için önem taşıdığı vurgulanmıştır. Reaktör ısınma-soğuma, ve şebeke yükü izleme koşullarında reaktör basınç kabında ve nozullarında meydana gelen termo-mekanik gerilme analizleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada sonlu elemanlar analizi için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Çalışmalarında gerilme-gerinim durumunun çatlak oluşan olaylarda çatlak bulunmayan olaylara göre önemli ölçüde yüksek olduğu belirtilmiştir. Mohanty ve diğerleri, bu sonlu elemanlar modeli sonuçlarından, yakıt döngüsü içinde plastik gerilmenin, izlenen şebeke yüküyle ilişkili çatlak ve gerilme-gerinim varyasyonlarının varlığına bağlı olarak büyüdüğü bulunmuştur. Plastik gerilme birikimi döngüsü, hızlandırılmış birincil devre çatlağına yol açabileceği ifade edilmiştir [28].

Bouzid ve Nechache civatalı flanş bağlantılarında sıcaklığa dayalı yük dağılımı için önemli ölçüde sonlu elemanlar analiz modeli bulunduğunu ve analitik eşitliklerin yetersiz olduğunu ifade etmişlerdir. Boylamsal ve radyal genleşme farklılıklarını, flanş içindeki cıvata ve conta yükü değişikliklerini değerlendirmek için analitik sonuçlar elde etmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçları ise sonlu elemanlar analizinde, tasarladıkları dört model ile kıyaslayarak doğrulamışlardır. Karşılaştırmalarında en yüksek % 5 fark olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.6) [29].



Şekil 2.6. Radyal yer değiştirme için SEA ve analitik eşitlik karşılaştırma örneği [29]

Abid, Iqbal ve Khushnood contalı flanşlı bağlantıların dayanımını, özelliklerini ve iç basınç & termal yük altındaki sızdırmazlık kapasitelerini ANSYS kullanarak iki boyutlu modelde SEA ile gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar modelini ise klasik teoriler ile doğrulamışlardır. Flanşta ortaya çıkan akma nedeniyle bağlantı dayanımında ve sızdırmazlıkta azalma meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Flanşın dönmesinin, civata eğilmesinin ve bağlantıdaki gevşemenin contalı bağlantılarda yorulmaya ve dinamik davranışlara neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu eğilimin daha çok yüksek sıcaklıklarda olduğu ifade edilmiştir. Kararlı durum ve geçici termal sonuçlar karşılaştırıldığında geçici termal modelin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir [30].

Sirajuddin ve Afzal civata ön gerilmesinin bir gaz türbini muhafazası üzerindeki yorulma ömrü etkisini incelemişlerdir. Tasarladıkları modeli civata öngerilmesi, basınç ve termal sınır koşulları altında ANSYS programı ile analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda ilk tasarladıkları modeli değiştirdikleri zaman, yeni modelin ömrünün 16533 döngü daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [31].

Heng ve diğerleri çalışmalarında basınç kabının önemli bileşenleri SEA (Midas NFX) ile tasarlamış ve analiz etmişlerdir. İç basınç ve termal yük altında gerçekleştirdikleri analiz sonucunda elde ettikleri gerilme değerlerini ASME kodları ile karşılaştırmışlardır.

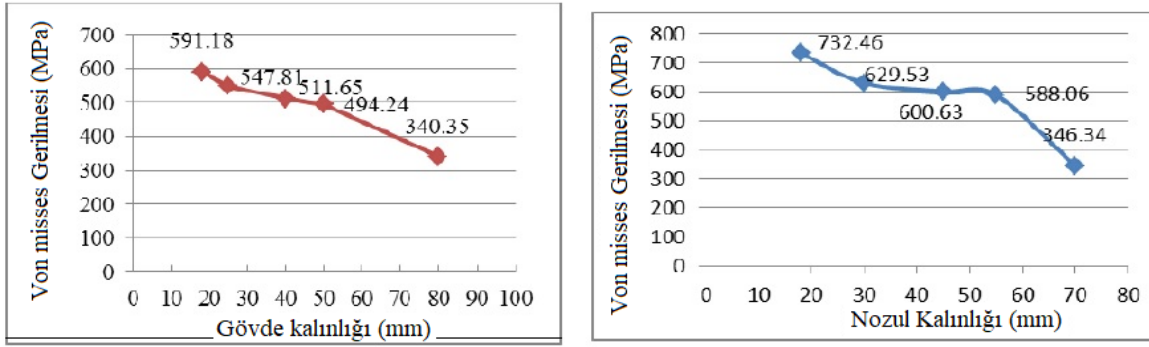
Yaptıkları modelin belirtilen sınır şartları altında, seçilen malzeme için gerekli dayanım özelliklerini gösterdiğini tespit etmişlerdir [32].

Losak, Letal, Buzik ve Nad, EN 13445-3 Annex G standardına uygun olarak tasarlanan bir flanşlı bağlantıyı ve işletme şartlarının bu bağlantıdaki conta üzerinde oluşturduğu etkiyi araştırmışlardır. Çalışmalarında odaklandıkları temel nokta sızdırmazlık yüzeylerinde yetersiz temas basıncı nedeniyle gerçekleşen sızıntı üzerine olmuştur. Cıvata ön gerilmesi, basınç ve sıcaklık altındaki karmaşık yapısal davranışları sonlu elemanlar metodu ile çalışmışlardır. Sonlu eleman modeline ait analizler, eşit olmayan bir sıcaklık dağılımının conta temas basıncında bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Belirlenen sınır şartlarına ulaşıldığında yaklaşık olarak %6 lık bir cıvata ön gerilme azalması tespit etmişlerdir. Ancak conta temas basıncındaki bu azalmaya rağmen analiz edilen flanş bağlantısının sızıntısının ana nedeni olmayabileceği belirtilmiştir [33].

Naser ve Gupta çalışmalarında bir basınç kabı için Pro-E yazılımı ile modelleme ve ANSYS-14.5 ile analiz yapmışlardır. Basınç kabının boyutlarını ASME standartlarına göre analitik hesaplamalar yaparak elde etmişlerdir. Basınç kabı, ısı yükleri, basınç yükleri ve bu iki yükün birleşimi altında analiz edilmiş, ayrıca gerilmelerin ve sıcaklıkların kontrol edilen değerler dahilinde olduğunu göstermek için analiz yapmışlardır [1].

Guruchannabasavaiah, Shanmugam ve Arun bir basınç kabı/ basınçlı boru sistemindeki iç basıncı ve doğrusal olmayan sıcaklık dağılımının conta sızdırmazlığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bunun yanı sıra sıcaklık ve basınç altındaki basınç kabında contanın sızdırmazlığını sağlamak için gerekli olan cıvata ön gerilmesini de ele almışlardır. Çalışmalarında ayrıca contanın davranışını analitik olarak da hesaplamışlar, elde ettikleri verileri ise sonlu elemanlar analizindeki sonuçlar ile kıyaslamışlardır [34].

Dubal ve Gajjal iki destek ayağı üzerindeki silindirik basınçlı kabı sonlu elemanlar aracı kullanılarak farklı sınır koşulları altında (9 farklı yükleme) statik yapısal analiz hesabı yapmışlardır. Çalışmalarında belirlenen yüklere dayanabilecek cidar kalınlığını hesaplamaya çalışmışlardır. Bileşenlerin kalınlığı arttıkça, maksimum gerilmenin belirli sınırlar içinde azaldığını tespit etmişlerdir (Şekil 2.7) [35].



Şekil 2.7. Kalınlığa bağlı gerilme değişimi [35]

Chaudhry ve diğerleri çalışmalarında Tarapur Nükleer Güç Santrali 1. ve 2. Ünitesine ait reaktör basınç kabındaki termo-mekanik gerilmeleri zamana bağlı olarak incelemişlerdir. Bu analizlerinin sonucunda en çok gerilme olan bölgenin kaplama ile basınç kabı cidarı arayüzü; en kritik geçiş modu ise acil durum kapatma durumu olarak tespit edilmiştir [36].

Wei, Xuwei ve Peiyong reaktör basınç kabının nozul bölgesindeki plastik davranışı gerçek malzeme girdileri kullanarak ANSYS programı ile modellemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda gerilme yoğunluğunun reaktör basınç kabı cidarı ile nozulların kesişim bölgesinde olduğu ve Von Mises gerilmesinin mesafe ile orantılı olarak belirgin biçimde azaldığını belirtmişlerdir [37].

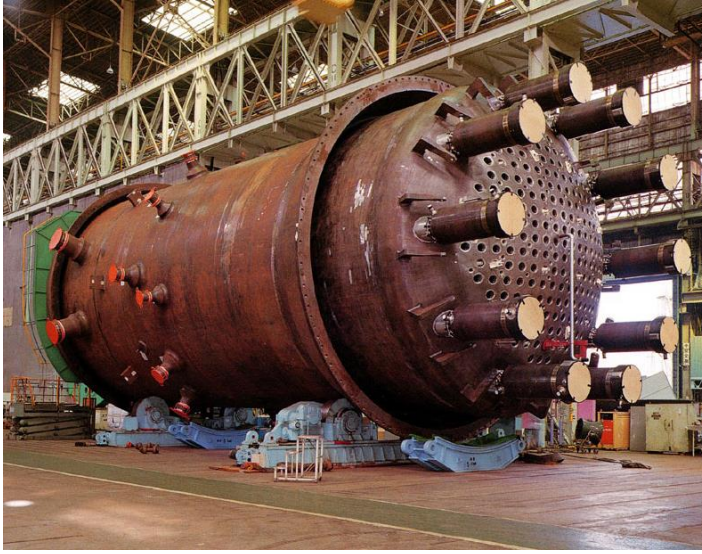
Raju ve Maddaiah çalışmalarında belirledikleri sınır koşulları çerçevesinde tasarladıkları reaktör basınç kabında karbon çeliği, Al – 6061, SS-316 ve SS-304 malzemeleri kullanarak sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu analizlerinin sonucunda söz konusu yükler altında gerilme dayanımlarını da dikkate alarak farklı et kalınlıkları için fayda-fiyat oranı en yüksek olan malzemeyi belirlemeye çalışmışlardır [38].

Lin, Li, Long ve Ou çalışmalarında reaktör basınç kabının cıvata flanş bağlantısındaki sızdırmazlık davranışını belirleyerek reaktör basınç kabı tasarımının güvenilirliğini arttırmaya çalışmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda tasarımlarında iyileştirmeye gitmişlerdir. Buldukları sonuçları deneysel ölçümlerle kıyaslamışlar sonuçların örtüştüğünü ifade etmişlerdir. Elde ettikleri modelin yer değiştirme, gerilme ve sıcaklık açısından reaktör basınç kaplarında tasarım iyileştirmelerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [39].



### 3. BASINÇLI KAPLAR

Bir basınçlı kap, iç ve dış ortam arasında belirli bir basınç farkına sahip bir kaptır; genellikle iç basınç, dış basınçtan daha yüksektir. Bu kaplar endüstride reaktör (Resim 3.1), ısı değiştiricileri, tanklar vb. şeklinde yaygın olarak çok çeşitli işlemlerde kullanılmaktadır. Genellikle, bu işlemlerde yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilir ve çoğu zaman ortama sızması istenmeyen sıvılar veya gazlar kullanılmaktadır [40].



Resim 3.1. Reaktör basınç kabı örneği [41]

Basınçlı kapların tasarımı temel olarak yüksek sıcaklık ve basınç altında patlamaya veya büyük güvenlik tehditlerine sebebiyet verebilecek yırtılmalara ya da burkulmalara odaklanır. Basınçlı kapların genel tasarımının birçok yönü vardır ve bunlardan en önemli iki tanesi analitik tasarım ve nümerik tasarımıdır [40].

Basınçlı kaplar, güvenlik ve bakım için çok sayıda özelliğe sahip ve kullanım kolaylığı için tasarlanmış olup, kabın tasarlandığı en yüksek basınçtan daha düşük basınç değerlerinde çalışacak basınç tahliye cihazları ile donatılmıştır. Bunun yanı sıra bu kapların bakım ve muayeneleri sırasında iç kısımlarındaki korozyonu ya da iç bileşenlerini kontrol edebilmek için gerekli oluk/kapaklar bulunacak şekilde tasarlanmışlardır [42].

Basınçlı kaplar minimum gerilme noktasıyla tasarlanır, bu ise gerilmelerin daha dengeli bir şekilde dağıldığı dairesel gövde yapısı ile elde edilir. Basınçlı kapların ana bileşenlerinden

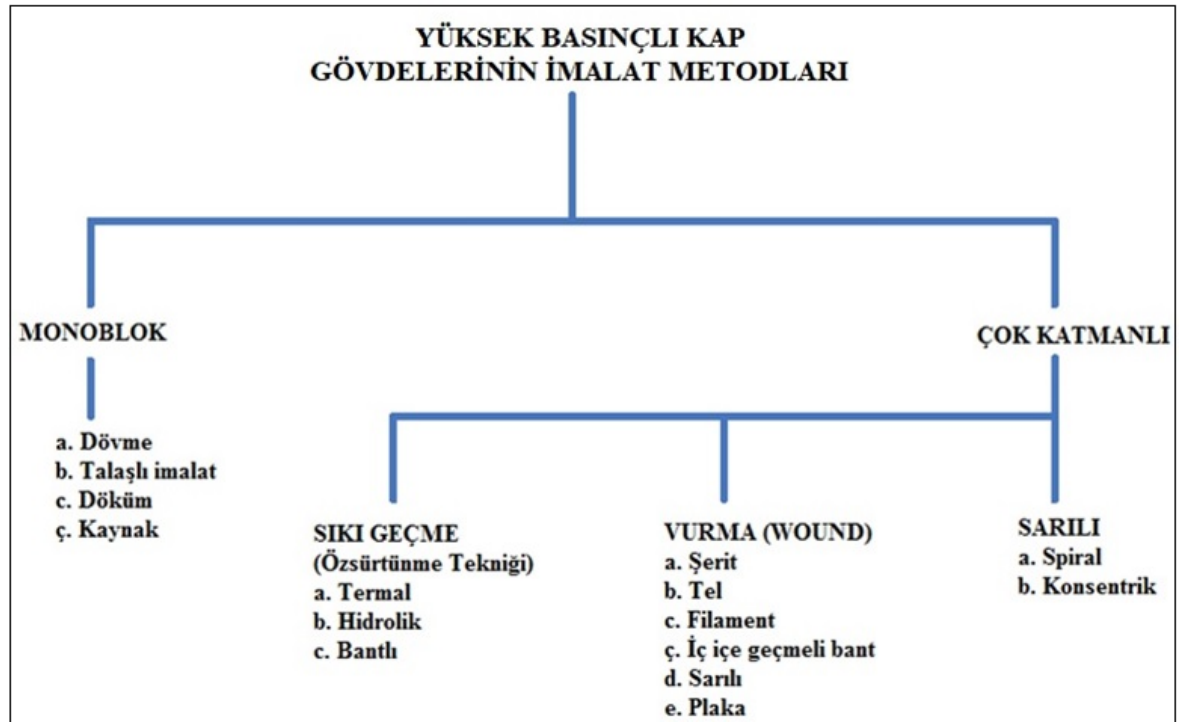
biri silindirik bölüm olan gövdedir. Diğer ana parçalar genellikle kapak/başlıklardır ve mükemmel bir yarım küreden, flanşlı bir diske kadar çeşitli şekillerde olabilir [43].

Basınç kaplarının içi ve dışı arasındaki basınç farkı, kabın duvarlarında (cidarında) gerilme yaratır. Tasarım süreci, oluşan gerilme ile güvenli bir şekilde çalışabileceği bir yapı oluşturmayı amaçlar. Bu yapıyı elde etmek için basınç, gerilme ve cidar kalınlığı ile ilgili formüller kullanılabilir [44].

Basınçlı kaplar tasarlanırken yüksek basıncın ne olduğu sorusu ilk akla gelen sorudur. Bu hususta net bir tanım olmamakla birlikte yüksek basıncın 3000 psi civarında başladığı söylenebilir [45]. Ayrıca R/t oranı 10'dan büyük olan basınçlı kaplar ince cidarlı olarak kabul edilir [46].

### 3.1. Basınçlı Kap İmalat Yöntemleri

Basınçlı kaplar imal usullerine göre temel olarak monoblok ve çok katmanlı olarak iki grupta incelenebilir (Şekil 3.1) [45].



Şekil 3.1. Yüksek basınçlı kap imalat metotları [45]

Monoblok: dövme ya da haddeleme yoluyla üretilmiş yekpare gövdeli kapları ifade eder [45].

Çok katmanlı: yaklaşık olarak yarım inç kalınlığında bir katmanla başlar ve her bir katman bir birinin üstüne kaynatılır ancak kaynaklar üst üste getirilmez [45].

Çok kabuklu,  $1^{1/2}$  inç ila 2 inç kalınlığında bir çekirdek ile başlar. Aynı kalınlıktaki dış tabakalar ardışık olarak merkez üzerine daralır. Bu, merkezde basınçlanma sırasında gevşetilen baskılayıcı gerilme yaratır. Katmanları sıkıştırma işlemine “öz sürtünme” denilen Fransızcadan gelen “autofrettage” denir [45].

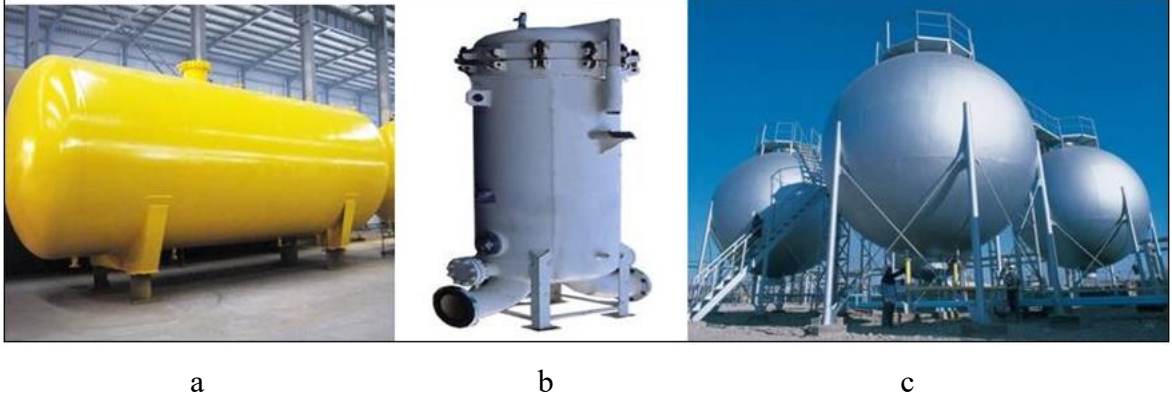
Çok katmanlı özsürtünme: yaklaşık yarım inç kalınlığında bir katmanla başlar. Dövme veya kaynaklı halka bantları merkez üzerinde kaydırılır ve ardından merkez hidrolik ile genişletilir. Dış bantlarda kalan elastik deformasyon, merkezdeki basınç gevşetici baskı gerilmesine neden olur [45].

Tel sarılmış kaplar: İç basınç için gerekenden çok daha düşük bir kalınlıkla başlanır. Merkezi istenen kalınlığa ulaşılan kadar gergin çelik kablolarla sarılır [45].

Bobin sargılı kaplar: İstenilen kalınlığa ulaşana kadar ince çelik sac ile sarılmış bir çekirdekle başlanır. Biri sacı merkeze tutturan, diğeri de son kapatma kaynağı olan iki adet uzunlamasına kaynak kullanılır. Bu şekilde 5 ila 6 feet çapındaki ve 5.000 psi'ye kadar olan basınçlı kaplar yapılmıştır [45].

### 3.2. Basınçlı Kap Türleri

Basınç kapları farklı başlık kombinasyonları ile birlikte genel olarak silindirik (yatay ve dikey) ve küresel (Resim 3.2 [47]) olmak üzere iki tür olarak imal edilirler. Yüksek basınçlı sıvıların depolanması için gösterildiği gibi küresel basınçlı kap tercih edilir. Küresel bir basınç kabı, aynı cidar kalınlığına sahip olan bir silindirik basınç kabının yaklaşık olarak iki katı mukavemete sahiptir. Küresel bir basınç kabı çok güçlü bir yapıdır. Kürenin yüzeylerinde gerilmelerin hem iç hem de dış olarak dağılımı eşittir. Bununla birlikte küre basınç kabı imalatı silindirik kaplara göre çok daha maliyetlidir. Küresel depolama, birim hacim başına diğer herhangi bir basınç kabının şeklinden daha küçük bir yüzey alanına sahiptir. Bu, daha sıcak bir ortamdan küresel basınç kabından sıvıya aktarılan ısı miktarının, silindirik depolama kaplarından daha düşük olacağı anlamına gelir [46].

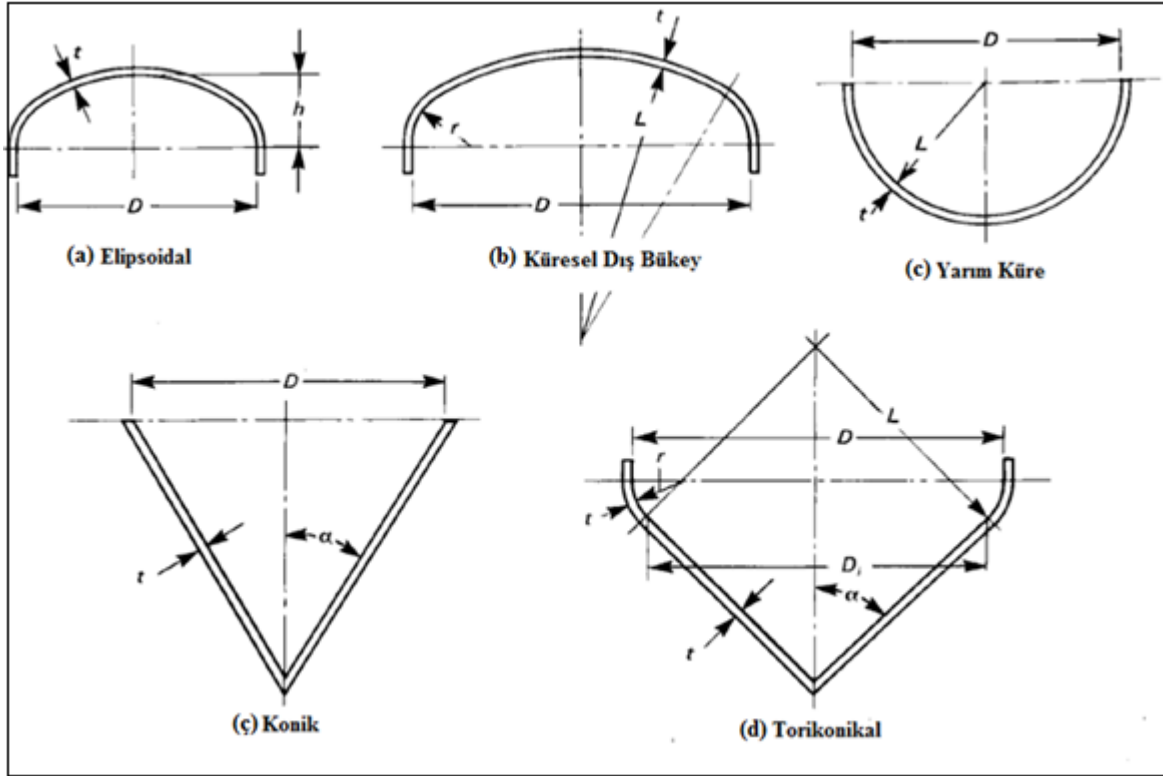


Resim 3.2. (a) Yatay silindirik basınç kabı (b) Dikey silindirik basınç kabı (c) Küresel Basınç kabı [47]

### 3.3. Basınçlı Kap Temel Bileşenleri

Basınçlı kaplar genel olarak gövde, başlık, nozul ve destek bileşenlerine sahiptir. Bu bileşenlerin her biri ayrı ayrı oluşturulur ve çeşitli tasarımlara sahip olabilir. Bu bileşenler daha sonra farklı kaynak yöntemleri ile bir araya getirilir. Basınç kabının dört parçası arasında gövde, basınç dağılımının, küresel olmayan basınç kaplarında olduğu gibi aynı olmadığı durumlarda en yüksek basınca maruz kalan bileşendir. Yüksek basınca dayanabilmek için basınç kabı gövdelerinin genellikle ortak bir dönme eksenine sahip bir yapı oluşturacak şekilde kaynak yapıldığına dikkat edilmelidir [48].

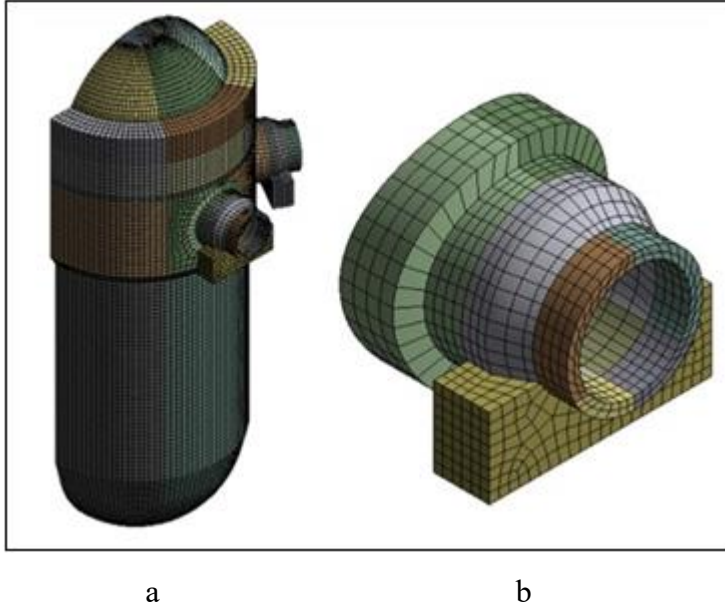
Basınçlı kapların başlıkları örtü görevi görür ve basınçlı kapların ağzının uçlarını kapatır. Genel olarak, basınç kabı başlıkları düz değil kavisli olarak oluşturulur. Bunun arkasındaki temel neden kavisli yapıların gerilmelere karşı daha dirençli olmalarıdır. Çünkü uygulanan kuvvete maruz kalan daha büyük bir yüzey alanına sahiptirler. Ayrıca, kavisli olan basınç kabı başlıkları genellikle daha ince ve daha hafiftir, bu da basınç kabının geri kalanı ile birleştirilmelerini kolaylaştırır. Ayrıca düz basınçlı kap başlıklarına kıyasla daha ucuzdurlar [48]. Basınçlı kap başlıkları genel olarak elpsoidal, küresel dış bükey, yarım küre, konik ve torikonikal şekillerde üretilirler (Şekil 3.2) [49].



Şekil 3.2. Başlıklar (a) Elipsoidal (b) küresel dış bükey (c) yarım küre (ç) konik (d) torikonikal [49]

Nozullar basınçlı kapların silindirik bileşenidir. Bu bileşen, gövdede veya basınçlı kapların başlıklarında bulunurlar. Nozul uçları genellikle flanşlıdır ve bu, gereken bağlantıyı sağlayarak kolay montaj ve bakım erişimine olanak tanır. Nozullar: basınç tankının içindeki veya dışındaki akışkanlar için boruların bağlanabileceği bir alan sağlamak; sıcaklık sensörleri, pH sensörleri, basınç göstergeleri ve diğerleri gibi farklı ölçüm ekipmanlarını bağlamak için bir alan sağlamak, basınç kabının iç kısmına erişim için olanak sağlamak; ve diğer basınçlı kaplara ve ekipmanlara doğrudan bağlantı sağlamak için kullanılırlar [48].

Nozullar, birincil membran gerilimi ve en yüksek gerilme olmak üzere iki faktör için tasarlanır. Bu tasarıma göre, basınçlı kap içindeki birincil membran gerilmesi, kullanılan malzemenin izin verilen gerilmesini aşmamalı ve en yüksek gerilme yeterli bir yorulma ömrünün sağlanması için kabul edilebilir sınırlar içinde tutulmalıdır [48]. Şekil 3.3’de nozul örneği görülmektedir [8].



Şekil 3.3. (a) Basınç kabı üzerindeki nozul (b) nozulun yakın görünümü [8]

### 3.4. Basınç Kaplarında Kullanılan Malzemeler

Basınçlı kaplar çeşitli endüstriyel kullanım alanlarında genellikle 200 – 550 °C ile 15 – 30 MPa basınçta tasarım ömürlerince maruz kalırlar. SS316, SS304, A516, A508 vb. dahil olmak üzere ticari olarak temin edilebilen birkaç çelik, reaktör basınçlı kaplarındaki uygulamalar için incelenmiştir. Her ne kadar bu çalışmalar kaynaklı bağlantıların mikro yapılarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuş olsa da, gözlenen mikro yapıların oluşumunun uzun süreli kullanım ömrü üzerindeki mekanik tepkileriyle ilişkilendirilmesi konusunda sınırlı bilgi mevcuttur. Benzer işletme ortamında çalışan kalın duvarlı kaplarda, düşük karbonlu çeliklere östenitik çelik dolgu kaynağı uygulamak yaygınlaşmıştır. Bu sayede paslanmaz çeliğin üstün korozyon direncinden ve baz metalin yüksek mukavemetinden ve düşük maliyetinden faydalanmak mümkün olmaktadır. Basınç kabındaki düşük karbonlu çelik ve kaynaklı paslanmaz çelik kaplama, kaynaklı alanlarda farklı mikro yapılara neden olmaktadır [50].

Hidrojene bağlı olarak oluşan basınçlı kap çeliğindeki çatlaklar, uygulanan gerilimin varlığında veya yokluğunda kimyasal olarak zararlı durumlarda ortaya çıkabilir. Hidrojene bağlı çatlama ağırlıklı olarak 560 MPa'ın (80 ksi) altında akma dayanımı olan düşük dayanımlı çeliklerde meydana gelir. Emilen hidrojene ve ısıtılma yaşlanmaya maruz kalma, kırılma çatlakların oluşumu ve yayılması dahil zararlı etkilere neden olabilir. Hidrojen

gevrekleşmesi, yüksek mukavemetli çeliklerde en ciddi problemlerden biridir. Ayrıca, birçok yapısal çelik için hidrojen ortamında yorulma çatlak büyümesi davranışı artmaktadır [50].

Elektrik üretimi, nükleer veya kimyasal reaksiyonlar, endüstriyel işleme ve depolama için sürekli ve uzun süreli basınçlı kapların kullanılması, bunların ciddi basınç, sıcaklık korozyon, nötron ışıması, hidrojen gevrekleşmesi vb. ortam koşullarına dayanmalarını gerektirir. İşletme sırasında, basınçlı kap çelikleri, özellikle 2.25Cr – 1Mo çelik, temper gevrekleşmesine ve/veya hidrojen hasarına karşı hassastır. Hidrojen gevrekleşmesi ve hidrojen saldırısı gibi çeşitli hidrojen hasarı türleri, basınçlı kap malzemesinde sıklıkla meydana gelir. Bazı basınçlı kaplar aşındırıcı olmayan sıvıları taşımak için tasarlanmışken, diğerleri sert aşındırıcı ve yüksek oranda radyoaktif maddelere dayanacak şekilde tasarlanmış olabilir [50].

### 3.5. Reaktör Basınç Kapları

Nükleer enerji santrallerinde nükleer yakıt demetini belirli bir sıcaklık, basınç ve nötron akısı altında tutmak için tasarlanmış basınç kaplarına reaktör basınç kabı denir (Resim 3.3).



Resim 3.3. Reaktör basınç kabı [51]

Reaktör basınç kapları 12 metre uzunluğa ve 5 m iç çapa kadar imal edilebilirler. Hafif sulu reaktörler (LWR) yaklaşık olarak 300 - 350°C'ye kadar olan sıcaklıklarda ve kabaca 7-20MPa arasında değişen iç basınçlarda suyu güvenli bir şekilde muhafaza eder. Gövdede ve kapakta temel malzeme yaklaşık 15-20 santimetre kalınlığında düşük alaşımlı ferritik çelik iken korozyona karşı korumak için kabın iç yüzeyi genellikle bir santimetreden daha az kalınlıkta, östenitik paslanmaz çelik ile kaynaklama yöntemiyle kaplanır. Reaktör basınç kaplarının üretim sürecindeki zorlukların büyüklüğü göz önüne alındığında, birçok basınç kabı devreye alındıkları günden itibaren göreceli olarak yüksek sayıda iç ve dış yüzey kusurları içerir. Bu kusurlar, bir reaktörün çalışma ömrünün erken aşamalarında kabın temel materyalleri yumuşak ve kalın olduğu için genellikle sorun teşkil etmez. Ancak, reaktör çalışırken nükleer yakıttan salınan nötronlar reaktör basınç kabı çeliğini bombalar. Uzun yıllar süren çalışmalar sonucunda yüksek seviyelerde ısılanmaya maruz kalan malzemenin davranışının sünekten kırılganlığa doğru değişmeye başladığı görülmüştür [52].

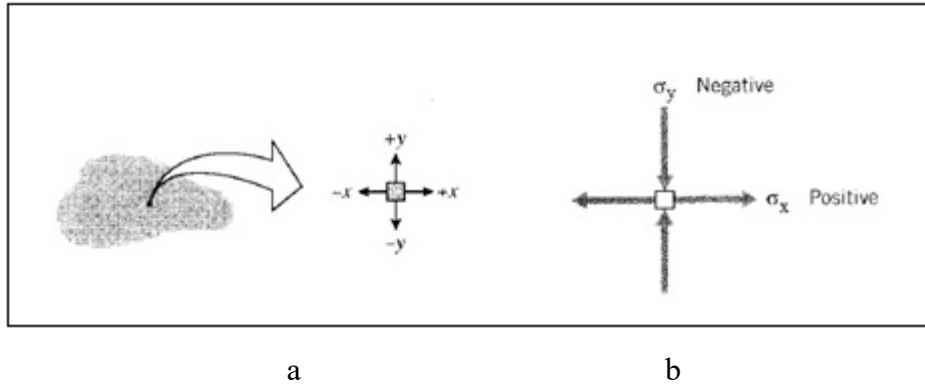
Reaktör basınç kabı içindeki basıncın ve termal koşulların döngüsel ve öngörülemeyen doğası ile birleştiğinde malzemenin yaşlanması ve gevrekleşmesi basınç kabında çatlakların oluşmasına ve büyümesine neden olur. Uzun yıllar süren normal işletme koşullarında bile reaktör basınç kabının cidarları çatlamaya karşı savunmasız hale gelebilir ve buradaki hatalar sıcaklık ve basınç salınımları nedeniyle yorulma koşullarına maruz kalır. Bu nedenle, bu yapıların güvenli ömrünü değerlendirmek, malzemenin hasar toleransına büyük ölçüde bağlıdır [52].

Reaktör basınç kapları hasara toleranslı sistemler olarak tasarlansa bile güvenli çalışma sürelerinin sonunda olduğu düşünülen noktaya ulaşırken fazladan dikkat edilmesi gerekir. Düzenli ve sık yapılan denetimler, küçük veya büyük bir kusurun varlığının tespit edilmesine yardımcı olabilir. Ancak söz konusu basınç kabının işletme için yetersiz olduğu tespit edildiğinde söz konusu reaktörün işletmeden çıkarılması çok maliyetlidir. Daha da önemlisi, denetimler kusurlu bir reaktör basınç kabının anormal bir olaya nasıl tepki verebileceği konusunda küçük bir fikir vermekle birlikte, büyük olasılıkla sistemin arıza riskini azaltmak için tutucu işletme süresi tahminleri gerektirecektir. Bu nedenle, simülasyon temelli çalışmalar, reaktörlerin devam eden işletme ömürleriyle ilişkili risklerin değerlendirilmesinde esastır [52].

### 3.6. İnce Cidarlı Basınç Kabındaki Gerilmeler

Şekil 3.4’de [43] ince cidarlı basınç kabı analizinde kullanılan diyagramlar görülmektedir. Gerilme analizi, bir basınç kabına uygulanan dış kuvvetler ve buna karşılık gelen gerilmeler arasındaki ilişkinin belirlenmesi olarak ifade edilebilir [50]. Endüstride yaygın olarak kullanılan silindirik ve küresel kapların elastik deformasyonlarını incelemek için Hooke kanunu gerekmektedir [53].

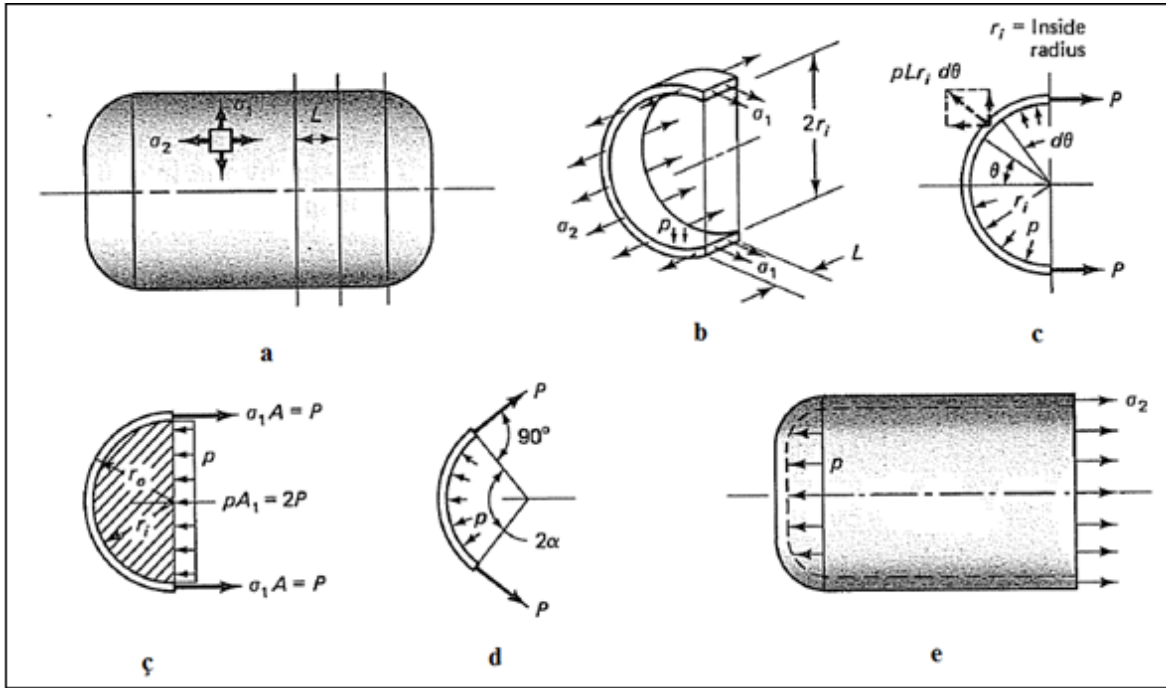
İki boyutta, bir noktadaki gerilme durumu malzemenin içinde rastgele bir pozisyonundan alınan dört bitişik atom düzlemini temsil eden dört dik çizgi çizilerek Şekil 3.4-a’da gösterilmektedir. Bu “gerilme karesi” üzerindeki düzlemler normallerinin yönelimleri ile tanımlanabilir; üst yatay düzlem bir  $+y$  düzlemidir, çünkü  $+y$  yönünde normal noktaları vardır. Sağdaki dikey düzlem bir  $+x$  düzlemidir. Benzer şekilde, alt dikey ve sol yatay düzlemler sırasıyla  $-y$  ve  $-x$  düzlemleridir [43].



Şekil 3.4. (a) iki boyutlu gerilme durumu, gerilme karesi (b) normal gerilme işaretleri [43]

Hem pozitif hem de negatif bileşenleri olan bir gerilme durumu olan Şekil 3.4-b’de görülebileceği üzere yaygın kullanımdaki işaret kuralına göre çekme gerilmeleri pozitif, basma gerilmeleri negatif olarak tanımlanır.  $X$  yönünde hareket eden pozitif bir çekme gerilmesi  $+x$  yönünde bir ok ile çizilir. Ancak gerilme karesinin dengede olabilmesi için bu ok  $-x$  yönünde diğer bir ok ile dengelenmelidir. Bu nedenle pozitif gerilme,  $+$  düzlemdeki bir  $+$  ok veya  $-$  düzlemdeki bir  $-$  ok ile gösterilir. Basma gerilmeleri bunun tam tersidir:  $+$  düzleminde bir  $-$  ok veya  $-$  düzleminde  $+$  bir ok olarak gösterilir [43].

Bu gerilmelerin büyüklüğü, serbest cisim diyagramı göz önüne alınarak belirlenebilir. İç basıncı oluşturan sıvının ihmal edilebilir bir ağırlığa sahip olduğu varsayılır. İç basınç, akışkanın üzerinde etkili olan bir kuvvet oluşturur. Bu denklemler ile elde edilecek sonucun doğruluğu, kabın “ince-cidarlı” olmasına bağlıdır. Basınç kabının gövde cidarındaki basıncı dengelemek için radyal bir gerilim olmalıdır. Ancak iç yüzeydeki radyal gerilme,  $p$ 'ye eşittir, çevresel gerilmeler ise  $p$  nin  $(r / 2t)$  katıdır. Bu oran büyük olduğunda, çevresel gerilmelere kıyasla radyal gerilmeler ihmal edilebilir. Şekil 3.5’de ince cidarlı basınç kabı analizinde kullanılan diagramlar görülmektedir [43, 53].



Şekil 3.5. (a) Tasarlanan bir basınç kabı (b) normal gerilmeler (c) iç basınç (ç) basınç altında küredeki kuvvetler (d) dik direnç kuvvetleri (e) serbest cisim diyagramı [53]

İç basıncı  $p$ , iç çapı  $r_i$ , boyu  $L$  olan bir basınç kabı için toplam direnç kuvveti  $2P$  denklem 3.1’deki gibi hesaplanabilir. Birim uzunluğunun eksenel bir kesiti göz önüne alınarak Şekil 3.5-b’deki *Hoop* (çevresel) gerilmesi olan birincil normal gerilme elde edilir [43 ,53].

$$2P = 2 \int_0^{\pi/2} p L r_i \cos d\phi = 2 p r_i L \quad (3.1)$$

$$2P = A_1 p = 2 r_i L p \quad (3.2)$$

$$2A = 2L(r_o - r_i) \quad (3.3)$$

$$2r_i L p = 2L(r_0 - r_i)\sigma_1 \quad (3.4)$$

Burada dış yarıçap ( $r_0$ ) ile iç yarı çapın ( $r_i$ ) farkı cidar kalınlığına ( $t$ ) eşit olduğu için [53],

$$\sigma_1 = \frac{pr_i}{t} \quad (3.5)$$

Şekil 3.5-b’de görülen boylamsal normal gerilme, ikinci normal gerilme olarak ifade edilmektedir. İkinci normal gerilme ise aşağıdaki gibi hesaplanır [53].

$$p\pi r_i^2 = \sigma_2 (\pi r_0^2 - \pi r_i^2) \quad (3.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} = \frac{pr_i^2}{(r_0 + r_i)} \quad (3.7)$$

Burada dış yarıçap ( $r_0$ ) ile iç yarı çapın ( $r_i$ ) farkı cidar kalınlığına ( $t$ ) eşit olduğu ve ince cidarlı basınç kaplarında  $r_0 = r_i = r$  olarak kabul edilebileceği için [53],

$$\sigma_2 = \frac{pr_i}{2t} \quad (3.8)$$

Dikkat edilmesi gereken sonuç çevresel gerilmelerin boylamsal gerilmelerin iki katı olduğudur. Farklı yönlerdeki farklı gerilmelerin bir yönde diğerinden daha güçlü hale getirilebilecek mühendislik malzemelerinin zorlayıcı avantajlarından birini gösterir. Geleneksel izotropik malzemedan yapılmış bir basınçlı kap, Hoop gerilmelerini akma sınırının altında tutacak kadar kalın yapılırsa, boylamsal yönde olması gerekenden iki kat daha güçlü olacaktır [43].



#### 4. ASME ve PNAE G-7 KODLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Dünya üzerinde işletilmekte olan nükleer güç santrallerinin önemli bir kısmı ASME ve PNAE G-7 standartları baz alınarak tasarlanmış, inşa edilmiş ve işletilmektedir. Bu standartların farklılıklarının yanı sıra var olan benzerlikleri de bulunmaktadır. Bu bölümün amacı ülkemizde hali hazırda Akkuyu'da inşaatı devam eden ve Sinop'da kurulması planlanan nükleer güç santralleri için kullanılan/kullanılacak olan bu iki kodun mümkün olduğunca özet ve basınçlı ekipmanları içerecek sınırlı bir çerçevede nükleer güvenlik açısından karşılaştırılmasıdır.

Yapısal bütünlüğün ve güvenilirliğin sağlanması nükleer güç santralının güvenli çalışmasının gösterilmesinde çok önemlidir. Sızdırmaz reaktör ortamının kirlenmesine yol açabilecek sistemlerin, yapıların ve bileşenlerin arıza potansiyeli ve burada oluşabilecek bir sızıntının ortam dışına bırakılması olasılığı değerlendirilmeli ve en aza indirilmelidir. Bu amaçla Kodlar ve Standartlar, santralin tasarlanması ve inşaat aşamalarında tutarlı bir mühendislik yaklaşımı sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır [3].

Tasarım kodlarındaki prosedürler, farklı arıza süreçlerinden, santral işletimi ve güvenilirliği konusundaki geçmiş deneyimler ile materyaller ve yükleme koşulları hakkında uygulanabilir araştırma ve geliştirme konularından faydalanılarak geliştirilmişlerdir [3].

Basınç kabı ve borulama kodlarındaki ana tasarım kuralları, gerilmelerin birincil gerilme (yük kontrolü için), ikincil gerilme (gerinim kontrolü için) ve yüzeydeki azami gerilme olarak sınıflandırılan doğrusal elastik metot yöntemine dayanmaktadır. Bu yaklaşım yalnızca, eksenel simetrik yarı-statik yükler altındaki silindirik gövde gibi basit durumlar için geliştirilebilir. Daha karmaşık geometriler ve yük kombinasyonları için mevcut gerilme sınıflandırma metodolojilerinin uygulanması karmaşık, oldukça tutucu ve kullanıcının yaklaşımına bağlıdır. Bununla beraber tasarım aşamasında doğrusal elastik yaklaşım modeline etkili bir alternatif olarak doğrusal olmayan analiz belirtilebilir. Doğrusal olmayan analizde gerçek malzeme davranışları ve daha doğru deformasyon kriterleri kullanılmaktadır [5]. PNAE G-7 ve ASME kodları basınç kapları ve borulama sitemleri için lineer olmayan tasarım kriterlerini belirlemek için hazırlanmışlardır.

PNAE G-7 ve ASME yapısal olarak birbirinden tamamen farklı iki arayüz içerir. Bu gerçek iki kodu karşılaştırmayı çok zor bir hale getirir. Yaklaşık olarak yapılmış karşılaştırma Çizelge 4.1’de verilmektedir [4].

Çizelge 4.1. PNAE G-7 ile ASME kodlarının yaklaşık olarak eşleştirilmesi [4]

| PNAE G-7        | ASME                                                                           |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| PNAE G-7-008-89 | ASME Code II<br>ASME Code III (NCA, NB, NC, ND)<br>ASME Code V<br>ASME Code XI |
| PNAE G-7-009-89 | ASME Code III (NB, NC, ND)<br>ASME Code IX                                     |
| PNAE G-7-010-89 | ASME Code III (NB, NC, ND)<br>ASME Code V<br>ASME Code IX                      |
| PNAE G-7-002-86 | ASME Code II<br>ASME Code III (NCA, NB, NC, ND,<br>Appendices)                 |

Genel olarak, PNAE G-7 serisinin kapsamı ASME Bölüm III’ün kapsamından daha dardır. PNAE G-7 serisi sadece nükleer adada bulunan bileşenleri kapsamaktadır. Destek yapıları, kor içi bileşenler, beton içeriklerin metal kaplamaları veya yakıt ve atıkların taşınması için muhafaza için özel gereklilikleri içermez [4].

#### 4.1. Ekipman Sınıflandırması

PNAE G-7’nin, ASME Bölüm III’de olduğu gibi ekipman güvenlik sınıflandırmasına bağlı olarak bölümlere ayrılmadığına dikkat etmek önemlidir. Aynı PNAE G-7 tasarım gereksinimleri genel olarak güvenlik sınıflamasına bakılmaksızın uygulanır ancak güvenlik sınıflandırmasına göre farklı inceleme ve test gereklilikleri getirilmiştir [4].

Nükleer güç santrallerindeki bütün ekipmanlar PNAE G-7 ve ASME’de grup için A,B,C ve güvenlik sınıfı için 1,2,3 olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma ekipmanın nükleer güvenlik için olan önemine göre belirlenmektedir. PNAE G-7 NGS’deki ekipmanları I ve II olarak iki farklı sismik sınıfa ayırmakta iken, ASME’de böyle bir ayırım bulunmamaktadır. PNAE G-7'nin aksine, ASME sadece bir sismik (kategori I ) içerir. Bu kategori, bir NGS’yi durdurmaya esas deprem meydana gelirse işlevlerini koruyacak şekilde tasarlanmış tüm bileşenleri ve ekipmanları içerir. Bu sınıflandırmalarda ASME kodu yüklerin uygulanmasından başlayarak izin verilen mekanik hasara göre ayırırken ve PNAE G-7 kodu ise ekipmanları fonksiyonel kriterlere göre ayırmıştır [3, 4, 54, 55]. Çizelge 4.2’de genel bir karşılaştırma verilmiştir.

Çizelge 4.2. İşletme koşulları sınıflandırması

| PNAE G-7           | ASME                 |
|--------------------|----------------------|
| NOC                | Seviye A<br>Seviye B |
| VNOC               | Seviye B<br>Seviye C |
| ES                 | Seviye C<br>Seviye D |
| Tasarım Ötesi Kaza | Seviye D             |

NOC : Normal işletme durumu

VNOC : Normal işletme durumu ihlali

ES : Acil durum

PNAE G-7 tasarım kuralları genel olarak güvenlik grubundan bağımsızdır. Özellikle, tüm güvenlik grupları için dayanım analizi kuralları, PNAE G-7 içerisinde aynıdır ve genellikle ASME Bölüm III'te tanımlandığı gibi Sınıf 1 ile tutarlıdır. Bununla birlikte, imalat ve işletme kuralları PNAE G-7 uyarınca güvenlik grubuna bağlı olarak değişebilir [4].

#### 4.2. Dayanım Analizlerindeki İzin Verilen Gerilmeler

ASME ve PNAE G-7 izin verilen gerilme değerlerini belirlemek için aynı mekanik özellikleri kullanır. Bununla birlikte, güvenlik faktörlerinin değerlerinde farklılıklar vardır. Nominal izin verilen gerilme değerleri, bir bileşenin ait olduğu güvenlik sınıfına ve uygulanan tasarım yöntemine bağlı olarak ASME ve PNAE G-7 arasında farklılık gösterir [4]. PNAE G-7 ve ASME kodları yapılacak olan dayanım analizlerinde genel membran gerilmeleri, yerel membrane gerilmeleri ve eğilme gerilmelerini gereklilik olarak belirlemiştir. Ekipman ve borular için iç basınç yükü altında izin verilebilir nominal gerilmeler Çizelge 4.3'deki gibi verilmiştir [54, 55].

Çizelge 4.3. İzin verilebilir nominal gerilmeler [54, 55]

| Kod      | Sembol     | İzin Verilen Nominal Gerilme                                                                                                             |
|----------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PNAE G-7 | $[\sigma]$ | Bütün çelikler için – $\min \{ R_m^T/2,6; R_{p0,2}^T/1,5 \}$                                                                             |
| ASME     | $S_m$      | Ferrus çelikler – $\min \{ S_T/3; 1,1 S_T^T/3; S_Y^T/1,5 \}$<br>Östenitik çelikler – $\min \{ S_T/3; 1,1 S_T^T/3; S_Y/1,5; 0,9 S_Y^T \}$ |

$[\sigma]$  : Nominal izin verilen gerilme

$S_m$  : İzin verilen tasarım gerilme değeri

$R_m^T$  : Belirli sıcaklıktaki çekme mukavemeti minimal değeri

$R_{p0,2}^T$  : Belirli sıcaklıktaki akma mukavemeti minimal değeri

$S_T$  : Oda sıcaklığındaki çekme mukavemeti minimal değeri

$S_T^T$  : Belirli sıcaklıktaki çekme mukavemeti minimal değeri

$S_Y$  : Belirli sıcaklıktaki akma mukavemeti minimal değeri

$S_Y^T$  : Belirli sıcaklıktaki akma mukavemeti minimal değeri

PNAE G-7 ve ASME için nihai dayanıklılık için güvenlik faktörleri sırasıyla 2.6 ve 3.0'dır ve oldukça yakındır. Her iki koda ait ferritik malzemeler için akma dayanımı güvenlik faktörü 1,5'e eşittir [4].

Cıvatalardaki izin verilen gerilmeler ise Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Cıvatalardaki izin verilen gerilmeler

| Kod      | Formül                                                            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|
| PNAE G-7 | $[\sigma] = \frac{R_{p0,2}^T}{2}$                                 |
| ASME     | $S_m = \min \left( \frac{1}{3} S_y ; \frac{1}{3} S_y R_y \right)$ |

Cıvatalar için akma gerilmesi üzerinden verilen formüller birbirinden 1,5 kat farklıdır. Ancak bu dayanım analizlerinde önemli bir fark yaratmaz [4].

Bu kriterlerin uygulanmasında, seçilen sıcaklıktaki akma dayanımını  $S_y R_y$  ve seçilen sıcaklıktaki çekme dayanımını  $1.1 S_T R_T$  olarak ASME komitesi tarafından kabul edilmiştir [56].

Yukarıda tanımlanan izin verilen gerilme değerlerinin farklı malzemeler için ASME ve PNAE G-7'ye göre karşılaştırılması Çizelge 4.5'de sunulmuştur [55].

Çizelge 4.5. İzin verilen gerilme değerleri, MPa [54, 55]

| Malzeme   | T, °C | $[\sigma]$ (PNAE G-7) | $S_m$ (ASME) |
|-----------|-------|-----------------------|--------------|
| St.20     | 250   | 130                   | 130          |
| 15GS      | 300   | 150                   | 150          |
| 08H18N10T | 300   | 118                   | 118          |

Buradan anlaşılacağı üzere PNAE G-7 ve ASME kodları hesaplamalarda farklı formüller kullanılmaktadırlar ve pratik olarak benzer çalışma basıncı aralığı için izin verilen gerilme değerleri aynıdır [54].

Sismik yükleme dikkate alınarak bir karşılaştırma yapılırsa Çizelge 4.6'daki gibi izin verilen gerilme değerleri görülebilir.

Çizelge 4.6. İzin verilen sismik gerilme [54, 55]

| Kod      | Sınıf | Kategori | Yükleme | S <sub>a</sub>     |
|----------|-------|----------|---------|--------------------|
| PNAE G-7 | 2     | I        | NOC+MRZ | 1.8[σ]             |
| ASME     | 1     | I        | SL+SSE  | 3.0 S <sub>m</sub> |

NOC : Normal işletme durumu

MRZ : Maksimum tasarım depremi

SL : Uzun süreli yükleme

SSE : Güvenli kapatma depremi

Belirtilen malzeme değerleri için izin verilen sismik değerler Çizelge 4.7’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.7. İzin verilen sismik gerilme değerleri, MPa [54, 55]

| Malzeme   | PNAE G-7 | ASME | ASME/PNAE G-7 |
|-----------|----------|------|---------------|
| St.20     | 234      | 390  | 1.67          |
| 15GS      | 270      | 450  | 1.67          |
| 08H18N10T | 212      | 354  | 1.67          |

PNAE G-7'ye (Kategori 1) göre hesaplanan izin verilen gerilme seviyesinin, ASME'den elde edilen değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir [54, 55].

### 4.3. Reaktör Basınç Kapları İçin Malzeme Seçimi

NGS ekipmanları için malzeme seçimi çok önemlidir, çünkü özellikler çalışma süresine göre değişiklik gösterebilir. Mekanik, fiziksel, kimyasal özellikler ile termal ve nötron gevrekleşmesine karşı direnç, NGS'nin güvenli işletim ömrü için önemlidir [57]. Dünyada reaktör basınç kapları için kullanılan malzemeler farklılık göstermekle birlikte Çizelge 4.8’de yaygın olarak kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.8. ASME ve PNAE G-7'ye göre çeliklerin kimyasal kompozisyonu [57]

| Tip             | Kullanım Yılı | C            | Mn           | Cr           | Mo           | Ni           | Diğer Elementler | P          | S          | Cu           |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|------------|------------|--------------|
| Amerikan Çeliği |               |              |              |              |              |              |                  |            |            |              |
| SA-212B         | 1950          | ≤0,3<br>1    | 0,85<br>1,20 | -            | -            | -            | 0,15<br>0,30 Si  | ≤0,03<br>5 | ≤0,04<br>0 | -            |
| SA-302B         | 1960          | ≤0,2<br>5    | 1,15<br>1,5  | ≤0,3<br>5    | 0,45<br>0,6  | -            | -                | ≤0,03<br>5 | ≤0,03<br>5 | -            |
| SA-336          | 1965          | 0,19<br>0,25 | 1,10<br>1,30 | 0,25<br>0,45 | 0,50<br>0,60 | 0,40<br>0,50 | -                | ≤0,02<br>5 | ≤0,02<br>5 | -            |
| SA-533          | 1989          | ≤0,2<br>7    | 1,15<br>1,55 | -            | 0,45-<br>0,6 | 0,4<br>0,7   | -                | ≤0,03<br>5 | ≤0,04<br>0 | ≤0,1<br>0    |
| SA-508          | 1989          | ≤0,2<br>5    | 1,2<br>1,5   | ≤0,2<br>5    | 0,55<br>0,7  | 0,4<br>1,00  | -                | ≤0,01<br>5 | ≤0,01<br>5 | 0,10<br>0,15 |
| Rus Çeliği      |               |              |              |              |              |              |                  |            |            |              |
| 15Cr2MoVA       | 1960          | 0,13<br>0,18 | 0,30<br>0,60 | 2,50<br>3,00 | 0,60<br>0,80 | ≤0,4<br>0    | 0,10<br>0,12V    | ≤0,02<br>0 | ≤0,02<br>0 | ≤0,3<br>0    |
| 15Cr2NiMoV<br>A | 1975          | 0,12<br>020  | 0,40<br>0,90 | 1,6<br>2,7   | 0,40<br>0,75 | 1,0<br>1,5   | 0,25<br>0,35V    | ≤0,02<br>5 | ≤0,02      | ≤0,02        |
| 15Cr2W2VA       | 2000          | 0,13<br>0,18 | 0,30<br>0,60 | 2,5<br>3,5   | ≤0,02<br>5   | ≤0,0<br>4    | 1,2<br>1,6W      | ≤0,00<br>6 | ≤0,00<br>6 | ≤0,0<br>6    |

ASME’de yer alan malzemelere ilişkin teknik gereklilikler ile Rusya Federasyonu’ndaki yarı mamullere uygulanan standartlardaki kontrol özelliklerinin çoğunluğu aynıdır. Bu benzerlikler kimyasal bileşimin belirlenmesi, mekanik özelliklerin test edilmesi, görsel muayene, ultrasonik muayene, radyografik test, mikro yapı incelemesi vb. gereklilikleri içerir. Aynı zamanda, bu genel özelliklerle ilgili özel gereksinimlere göre önemli teknik farklılıklar vardır ve bunlar standart veya şartnameye bağlı olarak değişir [4].

Dokümanlarda yer almayan yeni bir malzemenin kodlara göre kabulünün yapılması gerektiğinde PNAE G-7 ve ASME kodları büyük oranda tutarlılık gösterirler. Bu kabuller sırasında genel olarak malzeme kompozisyonu, kabul edilebilir karışım limitleri, yarı mamul

üretim prosedürleri, işletme sıcaklık aralığı, ısıtım ve izin verilen harici etki (nötron ışıması) göz önünde bulundurulur [4].

Kırılma tokluğu için ASME detaylı gereklilikler tanımlamışken PNAE G-7 benzer ama daha sade gereklilikler tanımlamıştır. Hem ASME hem de PNAE G-7 daha düşük servis sıcaklığı ve süneksizlik sıcaklığı tahminini gerektirmekle beraber bunları tahmin etmek için farklı yaklaşımlar kullanır. ASME malzeme kalınlığına ve bileşen uygulamasına bağlı olarak farklı kriterler kullanırken, PNAE G-7 süneksizlik sıcaklığının belirlenmesinde yalnızca malzemenin akma dayanımına bağlı kriterler kullanır [4].

#### 4.4. Ekipmanların Boyutlandırılması, Gerilmelerin Sınıflandırılması ve Mekanik Yükler

PNAE G-7 serisine göre bir bileşenin dayanım analizi temel boyutların belirlenmesi (cidar kalınlığı) ve detaylı yapısal analiz olmak üzere iki adımdan oluşur. ASME’de de benzer analizler cidar kalınlığı belirlemek için farklı bölümlerde verilmiştir. Her iki kod da analizlerde korozyon etkisini dikkate almıştır [4]. ASME ve PNAE G-7 en yaygın şekiller için temel ölçülere ait formülleri barındırmaktadır (Çizelge 4.9) [4].

Çizelge 4.9. Cidar kalınlığı belirlemek için kullanılan formüller [4]

| Bileşen Şekli                    | S <sub>R</sub><br>PNAE G-7-002-86                                           | t<br>ASME                                               |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Silindirik Gövde                 | $\frac{p \cdot D}{2\phi[\sigma] - p} \quad (4.2.1)$                         | $\frac{p \cdot R}{S_m - p/2} \quad (NB - 3324.1)$       |
| Konik Gövde                      | $\frac{p \cdot D}{2\phi[\sigma] - p} \times \frac{1}{\cos a} \quad (4.2.1)$ | Mevcut formül yok                                       |
| Elips ya da dış bükey taban      | $\frac{p \cdot D}{4\phi[\sigma] - p} \times \frac{D}{2H} \quad (4.2.1)$     | Mevcut formül yok                                       |
| Yarı küre taban ya da küre gövde | $\frac{p \cdot D}{4\phi[\sigma] - p} \quad (4.2.1)$                         | $\frac{p \cdot R}{2 \cdot S_m - p} \quad (NB - 3324.2)$ |
| Boru, dirsek                     | $\frac{p \cdot D_a}{2\phi[\sigma] + p} \quad (4.2.2)$                       | $\frac{p \cdot D_o}{2(S_m + 0,4p)} \quad (NB - 3641.1)$ |

Çizelge 4.9. (devam) Cidar kalınlığı belirlemek için kullanılan formüller [4]

|                    |                                                             |                   |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|
| Dairesel düz taban | $K_4 \cdot D_R \sqrt{\frac{p}{\phi[\sigma]}} \quad (4.2.3)$ | Mevcut formül yok |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|

Farklı gerilme tipleri farklı izin verilen gerilme sınır değerlerini gerektirir. Bu sınırları oluşturmada önce, sınırların uygulanması gereken gerilme kategorilerinin seçilmesi gerekir. Gerilme kategorileri aşağıda sunulmuştur.

#### Birincil Gerilme

Birincil gerilme, iç - dış kuvvetler ile momentler arasındaki denge yasalarını yerine getirmek için gerekli olan yüklemeler tarafından oluşan gerilmelerdir. Bir birincil gerilme, malzemenin cidar kalınlığı boyunca akma dayanımını aşarsa, parçalanmasının önlenmesi, tamamen malzemenin gerilme dayanımı özelliklerine bağlıdır [58].

1. Genel membran gerilmesi
2. Yerel membran gerilmesi
3. Eğilme gerilmesi

#### İkincil Gerilme

İkincil gerilme bir yapının kendi kendini sınırlaması ile oluşan gerilmelerdir. Uygulanan dış bir yüke karşılık oluşacak dengeden ziyade iç gerilme düzeni sağlanmalıdır. Bu gerilmeler termal genişleme veya süreksizlik koşullarından kaynaklanmaktadır. İkincil gerilmeler yerel olarak akmalara veya distorsiyonlara neden olabilmektedir [58].

#### Azami Gerilme

Azami gerilmeler değerlendirilen bölgedeki en yüksek gerilmeyi ifade eder. Azami gerilmeler önemli distorsiyonlara neden olmamakla birlikte muhtemel yorulma hatası kaynağı olarak öne çıkmaktadırlar [58].

Hem PNAE G-7 hem de ASME kodundaki gerilme sınıflandırması, belirli gruplarda birleştirilen gerilmelerin izin verilen değerleri aşmadığından emin olmak için gerçekleştirilir. İki kod da aynı terimleri kullansa da farklı olarak sembolize etmişlerdir (Çizelge 4.10) [4].

Çizelge 4.10. Gerilme sembollerinin karşılaştırılması [4]

|                                                                            | PNAE G-7'ye göre semboller | ASME'ye göre semboller |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Genel membran gerilmesi                                                    | $\sigma_m$                 | $P_m$                  |
| Yerel membran gerilmesi                                                    | $\sigma_{mL}$              | $P_L$                  |
| Genel eğilme gerilmesi                                                     | $\sigma_b$                 | $P_b$                  |
| Yerel eğilme gerilmesi                                                     | $\sigma_{bL}$              | $Q$                    |
| Genel ısı gerilme                                                          | $\sigma_T$                 | $Q$                    |
| Boruların serbest serbest uç yer değiştirmelerinden kaynaklanan gerilmeler | $\sigma_K$                 | $P_e$                  |

PNAE G-7 gerilme kategorisi grupları için özel semboller kullanırken ASME bu grupları bu gerilmelerin toplamı olarak ifade etmektedir (Çizelge 4.11) [4].

Çizelge 4.11. Gerilme kategori gruplarının karşılaştırılması [4]

|                                   | PNAE G-7'ye göre semboller | ASME'ye göre semboller         |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Cıvatalar harici bütün bileşenler | $(\sigma)_1$               | $P_m$                          |
|                                   | $(\sigma)_2$               | $P_{m(L)} + P_b$               |
|                                   | $(\sigma)_{RV}$            | $P_{m(L)} + P_b + P_e + Q$     |
|                                   | $(\sigma_{aF})$            | $P_{m(L)} + P_b + P_e + Q + F$ |
| Cıvatalar                         | $(\sigma)_1$               | $P_m + Q_m^1$                  |
|                                   | $(\sigma)_{3w}$            | $P_m + Q_m$                    |
|                                   | $(\sigma)_{4w}$            | $P_m + P_b + Q$                |

Çizelge 4.11. (devam) Gerilme kategori gruplarının karşılaştırılması [4]

|           |                   |                     |
|-----------|-------------------|---------------------|
| Cıvatalar | $(\sigma_{aF})_w$ | $P_m + P_b + Q + F$ |
|-----------|-------------------|---------------------|

<sup>1</sup>Burada  $Q_m$  ilk sıkılaştırmadan kaynaklanan ortalama gerilmeler (cıvata ön gerilmesi) anlamına gelir.

ASME'ye göre mekanik yükleme değerlendirmesi hesaba dayalı (elastik veya elasto-plastik) ya da deneysel metodlarla yapılabilirken PNAE G-7'ye göre yalnızca elastik analizler kabul edilmektedir [4]. Tahmin edilen gerilmelerin sınır değerleri PNAE G-7'ye göre Çizelge 4.12'de, ASME'ye göre ise Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14'de verilmektedir [4].

Çizelge 4.12. PNAE G-7'ye göre bileşenler, borular ve cıvatalar için mekanik gerilme sınırları [4]

| Hizmet Seviyesi          | Bileşenler ve Borular |                | Cıvatalar      |                 |                 |
|--------------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                          | $(\sigma)_1$          | $(\sigma)_2$   | $(\sigma)_1$   | $(\sigma)_{3w}$ | $(\sigma)_{4w}$ |
| NOC                      | $[\sigma]$            | 1,3 $[\sigma]$ | $[\sigma]$     | 1,3 $[\sigma]$  | 1,7 $[\sigma]$  |
| VNOC                     | 1,2 $[\sigma]$        | 1,6 $[\sigma]$ | 1,2 $[\sigma]$ | 1,6 $[\sigma]$  | 2,0 $[\sigma]$  |
| ES                       | 1,4 $[\sigma]$        | 1,8 $[\sigma]$ | 1,4 $[\sigma]$ | 1,8 $[\sigma]$  | 2,4 $[\sigma]$  |
| NOC + MDE <sup>(1)</sup> | 1,4 $[\sigma]$        | 1,8 $[\sigma]$ | 1,2 $[\sigma]$ | -               | 2,2 $[\sigma]$  |
| NOC + DE <sup>(1)</sup>  | 1,2 $[\sigma]$        | 1,6 $[\sigma]$ | 1,4 $[\sigma]$ | -               | 2,0 $[\sigma]$  |
| NOC + DE <sup>(2)</sup>  | 1,5 $[\sigma]$        | 1,9 $[\sigma]$ | 1,5 $[\sigma]$ | -               | 2,3 $[\sigma]$  |

<sup>1</sup>Sismik kategori 1 stabilite bileşenleri ve boru hatları sınırları.

<sup>2</sup>Sismik kategori 2 stabilite bileşenleri ve boru hatları sınırları.

Çizelge 4.13. ASME'ye göre bileşenler ve borular için mekanik gerilme sınırları [4]

| Hizmet Seviyesi | $P_m$                    | $P_L + P_b$                  |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| A               | $S_m$                    | 1,5 $S_m$                    |
| B               | 1,1 $S_m$                | 1,1 x 1,5 $S_m$              |
| C               | min (1,2 $S_m$ ; $S_y$ ) | min (1,8 $S_m$ ; 1,5 $S_y$ ) |

Çizelge 4.13. (devam) ASME'ye göre bileşenler ve borular için mekanik gerilme sınırları [4]

|   |                            |                                       |
|---|----------------------------|---------------------------------------|
| D | $\min (2,4 S_m ; 0,7 S_u)$ | $1,5 \times \min (2,4 S_m ; 0,7 S_u)$ |
|---|----------------------------|---------------------------------------|

Çizelge 4.14. ASME'ye göre cıvatalar için mekanik gerilme sınırları [4]

| Hizmet Seviyesi | $P_m$ | $P_m + Q_m$            | $P_m + P_b + Q_m$ |
|-----------------|-------|------------------------|-------------------|
| A,B,C           | $S_m$ | $2,0 S_m$              | $3,0 S_m$         |
| D               | -     | $\min (s_y ; 0,7 S_u)$ | $S_u^{(1)}$       |

<sup>1</sup>Çekme gerilmesi 700 MPa'dan büyük olan yüksek dayanımlı cıvatalar için

NOC ve VNOC seviyelerinde (ASME'nin A ve C seviyelerine benzer) PNAE G-7 kodu, malzeme gücünün daha yüksek bir oranını, ancak ES'de daha düşük bir orana izin verir (ASME'de seviye D) [3].

Bileşen ve boru gerilme sınırları PNAE G-7 ve ASME kodlarında A seviye yükler için aynıdır. Yalnızca PNAE G-7'nin eğilme gerilmesinde biraz daha tutucu bir yaklaşım gösterdiği görülmektedir. Cıvata gerilme limitleri için biraz farklı metodlar kullanılmakla beraber ASME A, B, C, hizmet seviyeleri için aynı izin verilebilir gerilmeleri kullanmaktadır [4].

ASME ve PNAE G-7 kodlarının ikisi de kayma gerilmelerini sınırlarlar. Bununla birlikte PNAE G-7 kayma gerilmesi sınırı ASME koduna göre daha yüksektir [4].

#### 4.5. Genel Kıyaslama ve Değerlendirme

PNAE G-7 ve ASME kodlarının temellerinin teknik kavramlara ve normatif yaklaşımlara göre benzer olduğu sonucuna varılabilir. Bunların uygulanması, tarihi gelişim sonucu ortaya çıkan ülke yaklaşımlarına göre teknik özelliklerde farklılık gösterir [4].

PNAE G-7 serisini tamamlayan önemli sayıda rehber doküman ve ilgili standartların uygulanmasını içerir. Bu nedenle, PNAE G-7'de belirtilemeyen gereklilikler genellikle ilgili

uygulanabilir rehber belgelerde ve standartlarda bulunur ve belirli malzeme ürün formları ve belirli parçalar veya bileşenler için uygulanmaktadır [4].



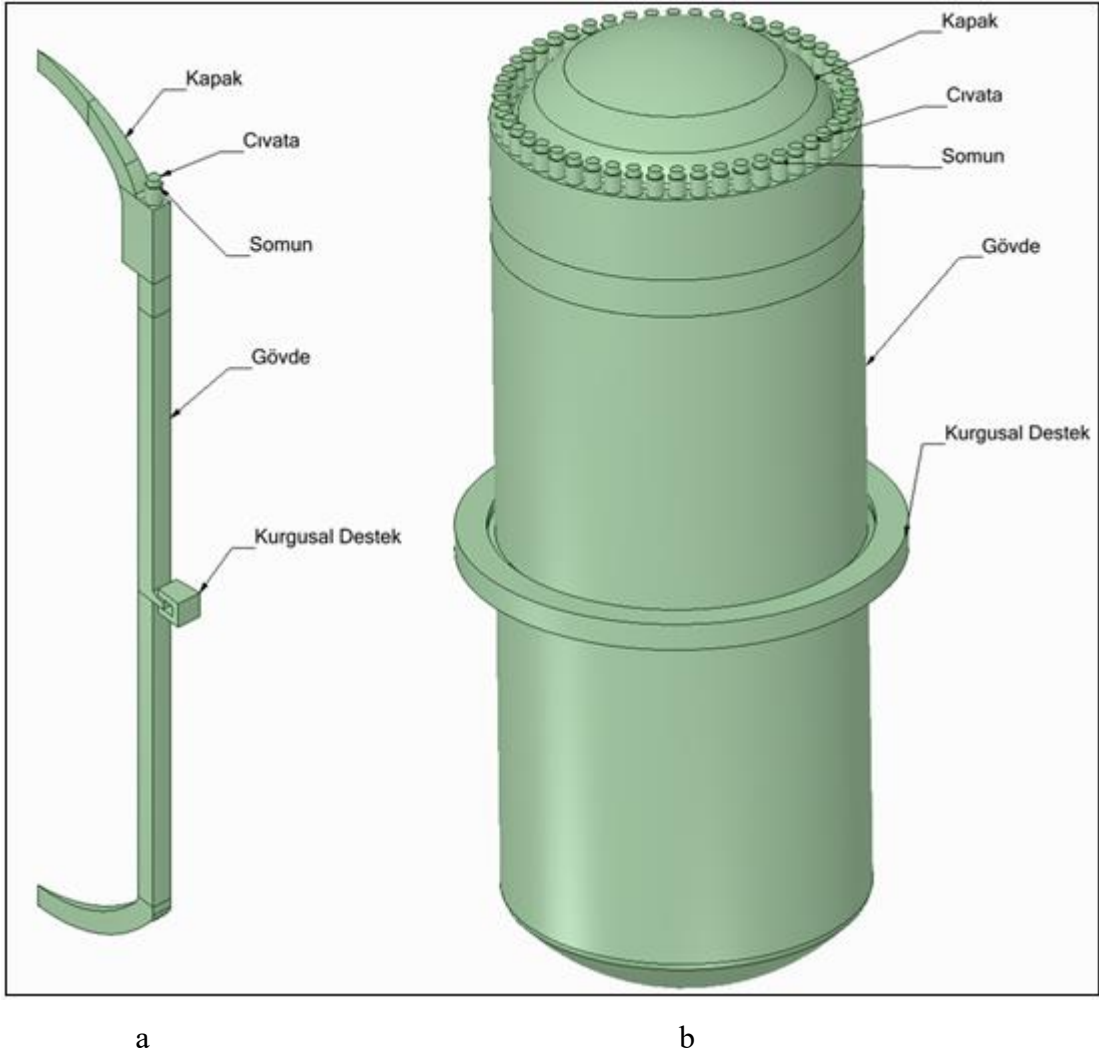
## **5. MODELLEME VE ANALİZ**

Bu bölümde reaktör basınç kabının farklı sınır koşulları altındaki performansını incelemek için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, sonlu elemanlar tekniğine dayanan ticari bir yapısal analiz yazılımı olan ANSYS® Workbench kullanılmıştır.

Reaktör basınç kabının yapısal davranışını araştırmaya yönelik analiz süreci; basınç kabı için basitleştirilmiş geometrik model geliştirilmesi, sonlu elemanlar programında modelin oluşturulması, malzeme özelliklerinin tanımlanması, sınır koşullarının uygulanması, denklem sistemlerinin çözümü ve sonuçların analizinden oluşmaktadır.

### **5.1. Reaktör Basınç Kabının Geometrisi**

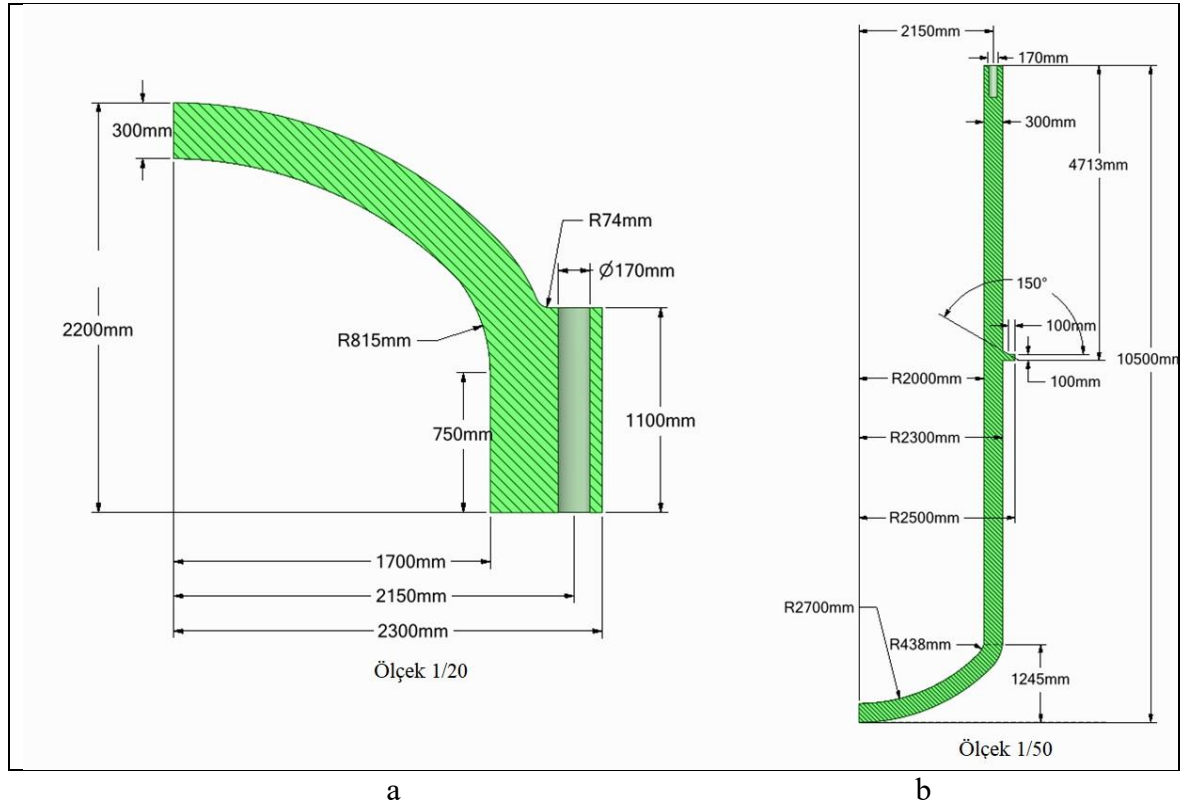
Reaktör basınç kabına ait modelleme ANSYS® Mechanical Spaceclaim modülü kullanılarak yapılmıştır. Modeli oluşturan alt parçaların yerleşim şeması Şekil 5.1’de görülmektedir.



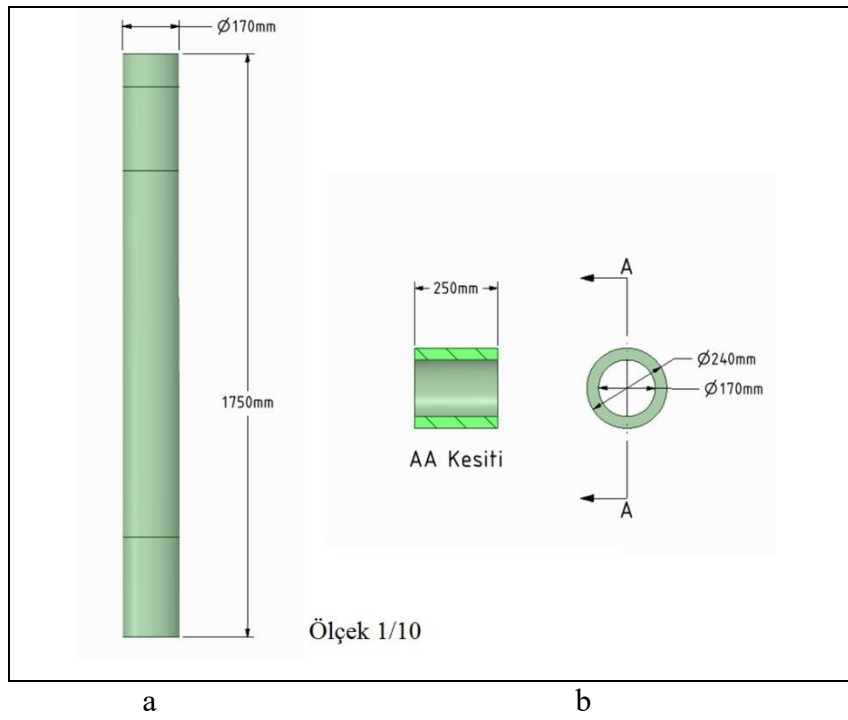
Şekil 5.1. (a) Reaktör basınç kabının 1/50 oranında bölümlenmiş modeli (b) reaktör basınç kabının tam modeli

Reaktör basınç kabı analizi için alt gövde, kapak, cıvata ve somun modellenmiştir. Analiz için reaktör basınç kaplarının içerisinde bulunan diğer parçalar ve sızdırmazlık elemanları kullanılmamıştır. Analiz sürecindeki işlem zamanını azaltmak için 1/50 oranında bölümlenmiş bir modelleme oluşturulmuştur (Şekil 5.1-a).

Reaktör basınç kabı modellemesi yapılırken ekipmanın boyutlarının seçimi için açık kaynaklardan yararlanılmıştır [6-11]. Oluşturulan kurgusal basınç kabı modelinin boyutları Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



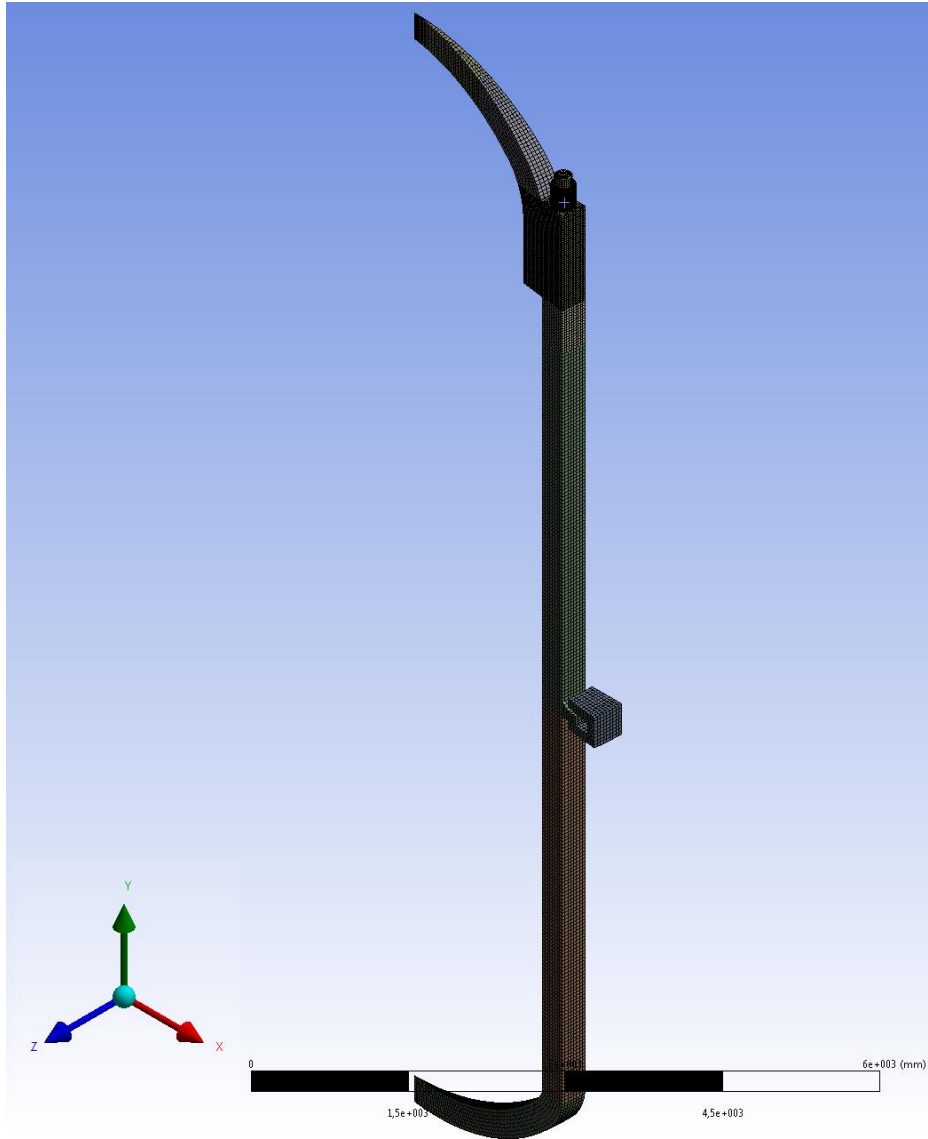
Şekil 5.2. Reaktör basınç kabı (a) kapağı (b) gövdesi



Şekil 5.3. Reaktör basınç kabında kullanılan (a) cıvata (b) somun

## 5.2. Mesh (Ağ) Oluşturulması

Kullanılan modelde mümkün olduğunca hexahedral (altı yüzlü) baskın bir yapı oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak modelin karmaşıklığından ötürü hexahedral ağ oluşturulmasının mümkün olmadığı yerlerde ANSYS tarafından tetrahedral (dört yüzlü) ağ oluşturulmuştur. Şekil 5.4'te oluşturulan modelin ağ oluşturulduktan sonraki görünümü verilmiştir. Daha detaylı ağ görünümü resimleri Ek-1 ile Ek-3 arasında verilmiştir.



Şekil 5.4. Modele ait ağ görünümü

Modele ait kapak, cıvata, somun ve gövdeye ait eleman boyutları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Modelde kullanılan eleman boyutları (mm)

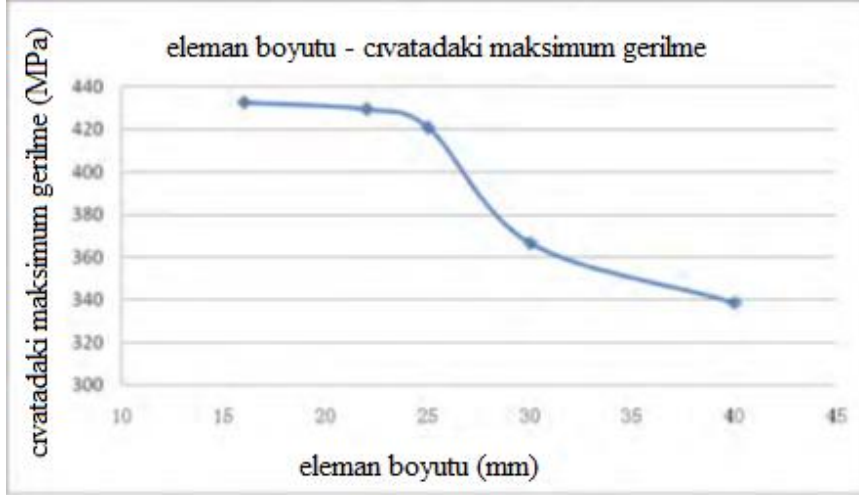
| Kapak<br>Üst-Orta | Kapak Alt | Gövde-<br>Cıvata | Gövde<br>üst-orta-<br>alt | Destek | Somun | Cıvata |
|-------------------|-----------|------------------|---------------------------|--------|-------|--------|
| 40                | 20        | 30               | 40                        | 40     | 10    | 20     |

Oluşturulan modelde 286188 düğüm noktası (node), 60572 eleman (element) bulunmaktadır. Ayrıca ortalama eleman kalitesi ise 0,94003 olarak ANSYS tarafından hesaplanmıştır.

#### Ağ Yakınsaması (Mesh Convergence)

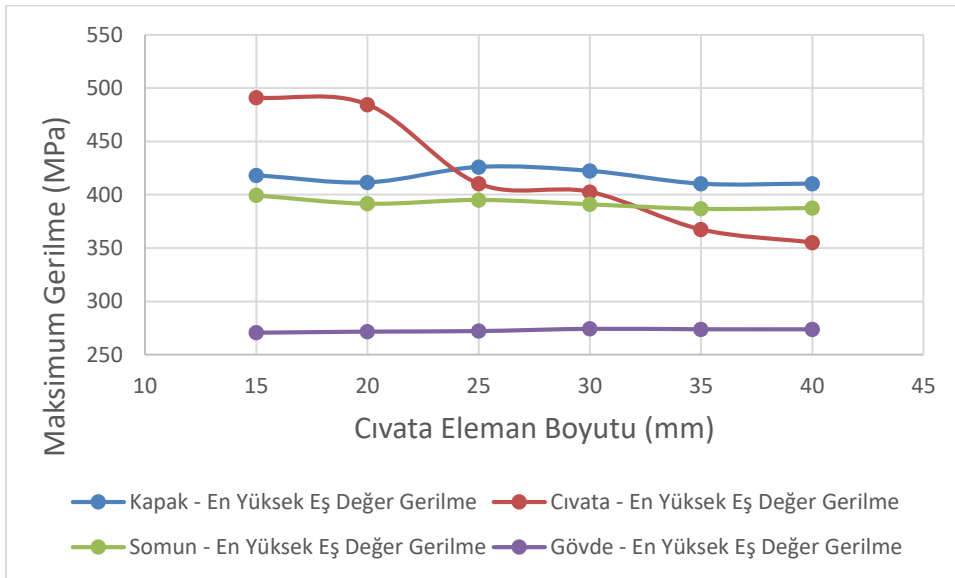
Sonlu elemanlar analizinde yakınsama terimi sıklıkla kullanılır. Doğrusal modellemelerde kesin sonuç elde edildiğinden yakınsamaya ihtiyaç duyulmazken doğrusal olmayan modellerde yaklaşık bir sonuç elde edebilmek için tekrarlayan bir çözüm prosedürüne ihtiyaç duyulur.

Analizde genellikle ağ boyutu değiştirildiğinde çözüme ait değerler de değişir. Ağ yakınsaması bir sonlu elemanlar analizi sonuçlarının ağın boyutunun değiştirilmesinden etkilenmemesini sağlamak için elemanların ne sayıda ve ne boyutta olması gerektiği olarak ifade edilebilir. Şekil 5.5’de görülebileceği üzere Ting ve diğerleri [27] tarafından eleman boyutunun hassasiyetini ayarlamak için cıvatadaki en yüksek eş değer gerilme ile eleman boyutu karşılaştırılarak ağ yakınsaması çalışması yapılmıştır. Bu yakınsama sonucunda cıvatadaki eleman boyutunu 22 mm olarak yeterli görmüşlerdir. Bu tez kapsamında kullanılan eş değer gerilme terimi Von Mises gerilmesini ifade etmektedir.



Şekil 5.5. Eleman boyu – En yüksek eş değer gerilme [27]

Analizde kullanılan modelin hesaplanmasında cıvata özelinde 6 farklı eleman büyüklüğü denemiştir. Yapılan ağ yakınsamaları sonucunda 20 mm eleman boyutunun yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.6. Eleman boyu – En yüksek eş değer gerilme

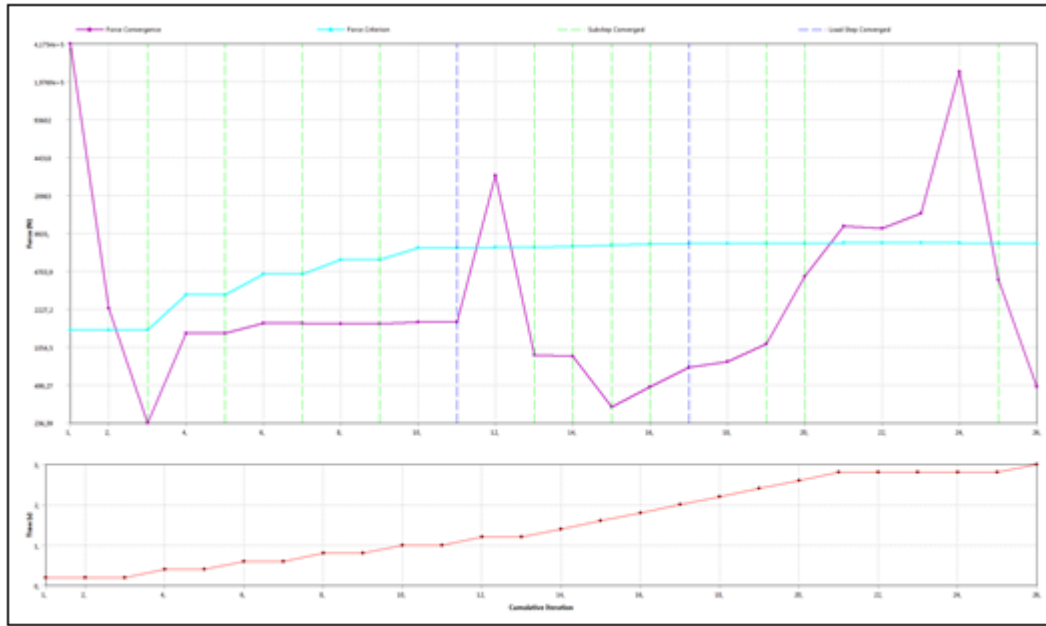
Ağ yakınsaması elde edilirken modelde kapak ve gövde için 15H2NMFA, cıvata ve somun için 38HN3MFA malzemesi seçilmiş; 17 MPa basınç, 350 °C sıcaklık ve 4700 kN cıvata öngerilmesi yükleri uygulanmıştır.

### Kuvvet Yakınsaması (Force Convergence)

Sonlu elemanlar analizlerinde, doğrusal olmayan problemler Newton Raphson metodu ile iterasyonlarla çözülür. Bu doğrusal olmayanlıklar büyük defleksiyonlar, malzeme özellikleri veya temaslar yoluyla ortaya çıkar. Etki ve tepki kuvvetleri arasındaki fark, artık kuvvet olarak adlandırılır. Yapıdaki kuvvet dengesizliğinin bir ölçüsüdür. Yakınsama kriteri, kuvvet dengesizliklerini en aza indirmeyi amaçlayan algoritma olarak kuvvetler dengesine dayanır. Doğru ya da kabul edilebilir çözümlere iterasyonlarla yaklaşılr. Her bir iterasyon sonunda program yakınsama kriterinin karşılanıp karşılanmamasına göre iterasyonu durdurur ya da çözüm kabul edilebilir bir tolerans sınırları içerisinde gelene kadar devam ettirir [15, 59].

Bu çalışmada artık kuvvet için yakınsama kriteri her bir adımda % 0,1 olarak ayarlanmıştır. Örneğin 5 000 000 N olarak uygulanan cıvata öngerilmesi için ilk yük adımındaki kuvvet kriteri 5000 N olarak uygulanır. Her bir yük adımı 5 alt adıma ayrılmıştır. Bu nedenle her bir alt adımdaki kabul kriteri 1000 N olarak çözümlerde kullanılır. Gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizindeki artık kuvvetler için kabul kriteri oranı  $2 \times 10^{-4}$  olarak ortaya çıkmaktadır.

Kapak ve gövde için 15H2NMFA, cıvata ve somun için 38HN3MFA malzemesi kullanılarak 17 MPa basınç, 350 °C sıcaklık ve 4700 kN cıvata öngerilmesi altında kuvvet yakınsamasına ait grafik aşağıda verilmiştir (Şekil 5.7). Ek-4’de kuvvet yakınsama grafiği daha büyük olarak sunulmuştur.



Şekil 5.7. Kuvvet yakınsaması grafiği

### 5.3. Analizde Kullanılan ANSYS Elemanları

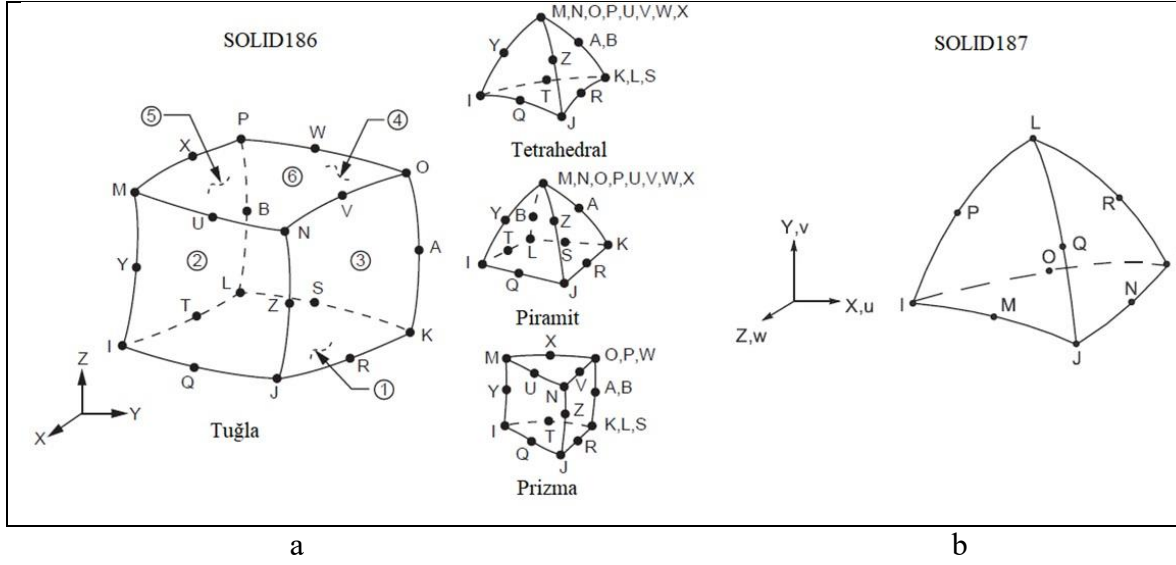
Oluşturulan modele ait analizde ANSYS tarafından kullanılan elemanlar Çizelge 5.2’de listelenmiştir.

Çizelge 5.2. Analizde kullanılan ANSYS elemanları

| Bileşen                                      | ANSYS Eleman Tipi  | Tanım              |
|----------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Gövde, kapak, cıvata ve somun dahil parçalar | SOLID186, SOLID187 | Üç boyut elemanı   |
| Temas                                        | CONTA174, TARGE170 | Temas elemanı      |
| Cıvata Öngerilmesi                           | PRETS179           | Ön gerilme elemanı |
| Basınç                                       | SURF154            | Basınç elemanı     |

#### 5.3.1. SOLID186 and SOLID187 üç boyutlu katı elemanlar

Oluşturulan modelde kuadratik hacimli elemanlar SOLID186 (Şekil 5.8-a) ve SOLID187 (Şekil 5.8-b) kullanılmıştır.



Şekil 5.8. (a) SOLID186 elemanın geometrik şekilleri (b) SOLID187 elemanın geometrik şekli [60]

SOLID186, 20 düğümlü bir altı yüzlü (hexahedral) hacim elemanı iken, SOLID187 ise 10 düğümlü bir dörtyüzlü (terahedral) hacim elemanıdır. Şekil 5.8-a'da gösterildiği gibi SOLID186'da düzgün tuğla benzeri formunun yanı sıra piramit, prizma ve tetrahedral geometrik formlara sahiptir. Kaliteli bir mesh oluşturmak için tuğla formu kullanılırken, bunun mümkün olmadığı yerlerde diğer formlar kullanılır. Bununla birlikte, SOLID186'nın diğer formları (tetrahedral ve piramit) 10 düğümlü SOLID 187 tetrahedral elemanındaki tek bir düğümlü karşılaştırıldığında, tuğla elemandaki sekiz düğümlü sonlu elemandaki bir geometrik konumu paylaştığı için hesaplamalarda verimli olmazlar. Bu nedenle, 10 düğümlü SOLID187 tetrahedral eleman daha verimli bir ağ için 20 düğümlü SOLID186 tetrahedral eleman yerine kullanılır [15, 60].

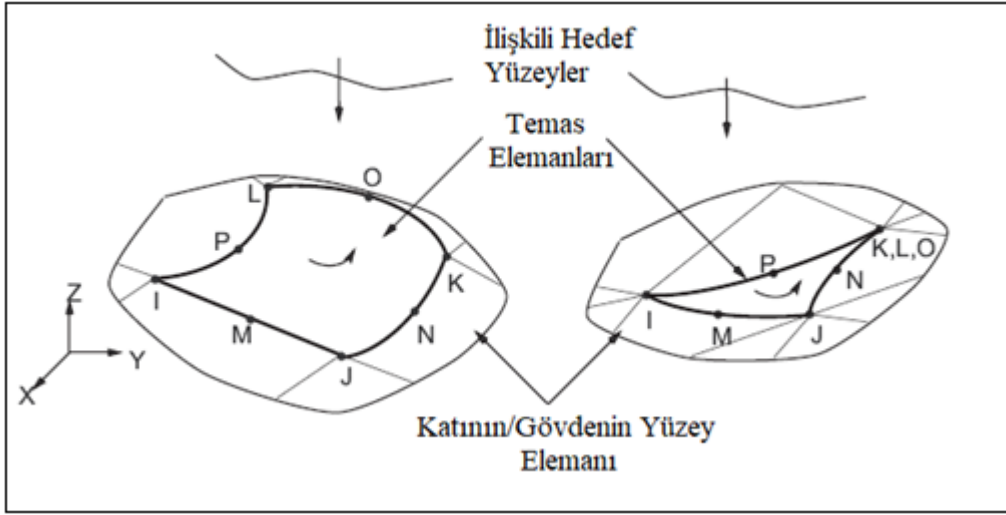
Tetrahedral ve hexahedral elemanlar sonlu elemanlar ağında doğrudan birleşemezler. SOLID186'ya ait piramit element, bu iki element arasında bir geçiş elementi olarak hizmet ederek tabanı tuğla elemana, üçgen yüzleri SOLID187'ye ait tetrahedral elemana bağlanabilir [15, 60].

Hem SOLID186 hem de SOLID187 üç yapısal serbestlik derecesi  $x$ ,  $y$  ve  $z$  koordinat yönlerinde ötelenme; termal serbestlik derecesine (cisime ait gövde sıcaklığı); elasto-plastik malzeme davranışına sahiptir [15, 60].

SOLID186 ve SOLID187’de sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri her bağlantı noktasında değerlendirilir. Şekil fonksiyonundan bağımsız olarak malzemeler girilen sıcaklıkta hesaplanırlar [60].

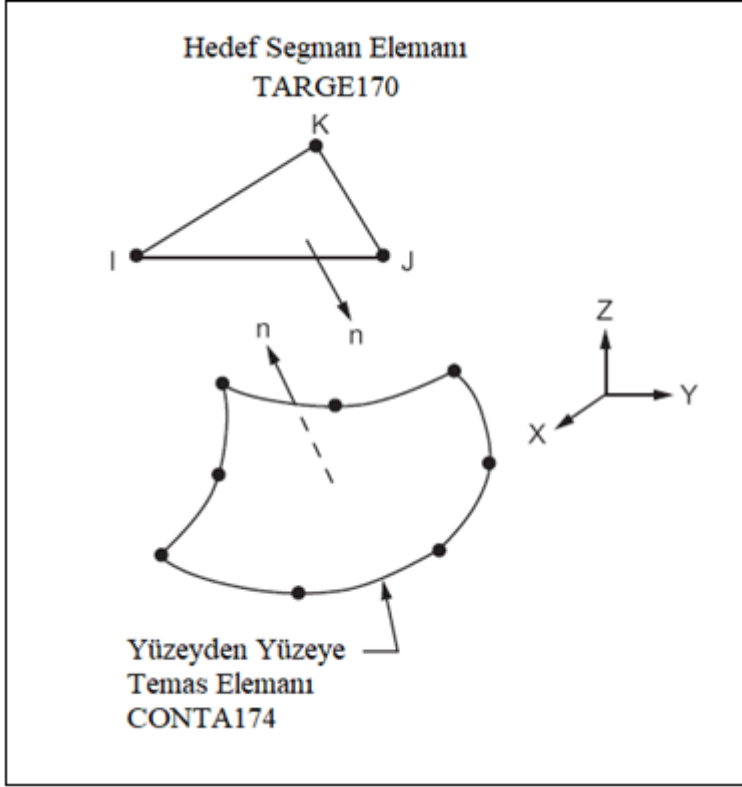
### 5.3.2. CONTA174 ve TARGE170 üç boyutlu temas elemanları

Kullanılan analizde temas yüzeyi etkileşimi CONTA174 (Şekil 5.9) ve TARGE170 (Şekil 5.10) kullanılarak modellenmiştir. CONTA174 8 düğümlü ikinci dereceden temas ve TARGE170 hedef yüzey öğeleridir.



Şekil 5.9. CONTA174 8 düğüm yüzeyden yüzeye bağlantı elemanı [60]

CONTA174, rijit-esnek ve esnek-esnek temas analizi için amaçlanan 8-düğümlü bir elemandır. Genel bir temas analizinde iki veya daha fazla gövde arasındaki temas alanı genellikle önceden bilinmemektedir. CONTA174, üç boyutlu geometrilere uygulanabilir. Katı cisimler veya gövdeler arasındaki temas için uygulanabilir [60].



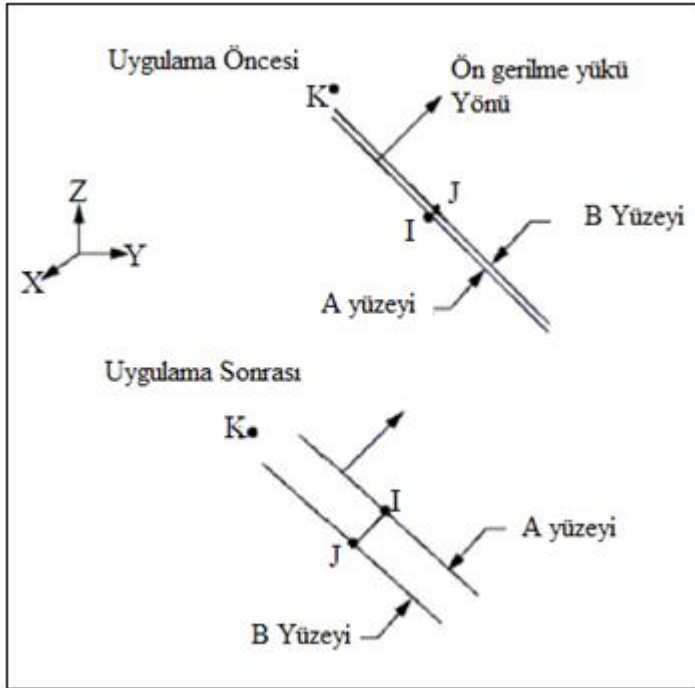
Şekil 5.10. TARGE170 hedef segman elemanı [60]

İki gövde arasındaki temasın incelenmesi sırasında bir gövdenin yüzeyi temas yüzeyi olarak alınırken, diğer gövdenin yüzeyi hedef yüzey olarak alınır. Sonlu elemanlar analizinde “temas-hedef” çifti kavramı yaygın olarak kullanılmaktadır. Rijit-esnek temas için, temas yüzeyi deforme olabilir gövdeyle ilişkilidir ve hedef yüzey rijit yüzey olmalıdır. Esnek-esnek temas için, hem temas hem de hedef yüzeyler deforme olabilir gövdelerle ilişkilendirilirler. Temas ve hedef yüzeyleri bir “Temas Çifti” oluşturur. TARGE170 temas elemanı olarak üç boyutlu hedef yüzeylerinden CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 ve CONTA177 ile bağlantı kurmak için kullanılır [60].

CONTA174 ve TARGE170 elemanları sürtünmeli teması (frictional contact) ve bağlı teması (bonded contact) modellemek için kullanılır. Sürtünmeli temas, temas eden yüzeylerin, Coulomb sürtünme modeline dayanarak birbirlerine doğru kaymasına ve ayrıca yüzeylerin ayrılmasına izin verir. Bağlı temas, temas eden yüzeylerin kaymasına veya ayrılmasına izin vermez, bütün yönlerde hareket kapalıdır [15, 60].

### 5.3.3. PRETS179 üç boyut ön gerilme elemanı

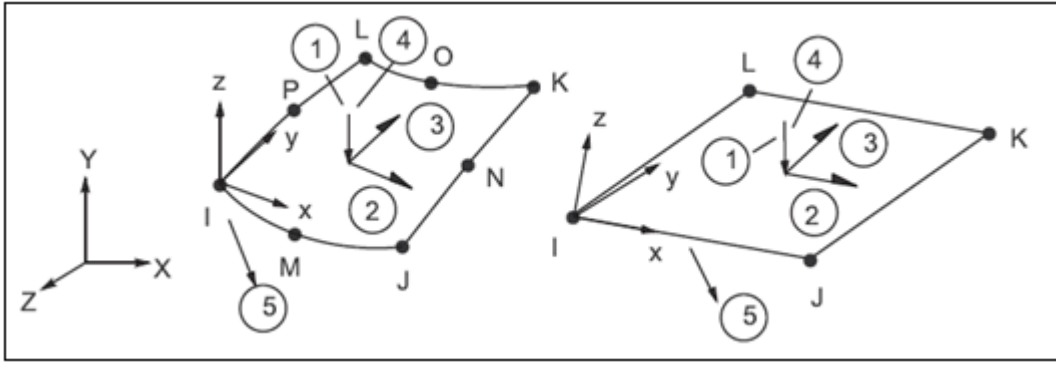
PRETS179 ön gerilme elemanı ağ yapısı kurulmuş bir modeldeki iki veya üç boyutlu ön gerilme kesitini tanımlamak için kullanılır. Bu elemana ön gerilme elemanı denmesinin sebebi cıvataların diğer yüklemelerden önce ön gerilmelerinin tamamlanmasının beklenmesidir. Bu 3 düğümlü ön gerilme elemanı, cıvata yükleme kuvvetini cıvatanın boylamsal yer değiştirmesine dönüştürür [15, 60].



Şekil 5.11. PRETS179 ön gerilme elemanı [4]

### 5.3.4. SURF154 üç boyutlu yüzey elemanı

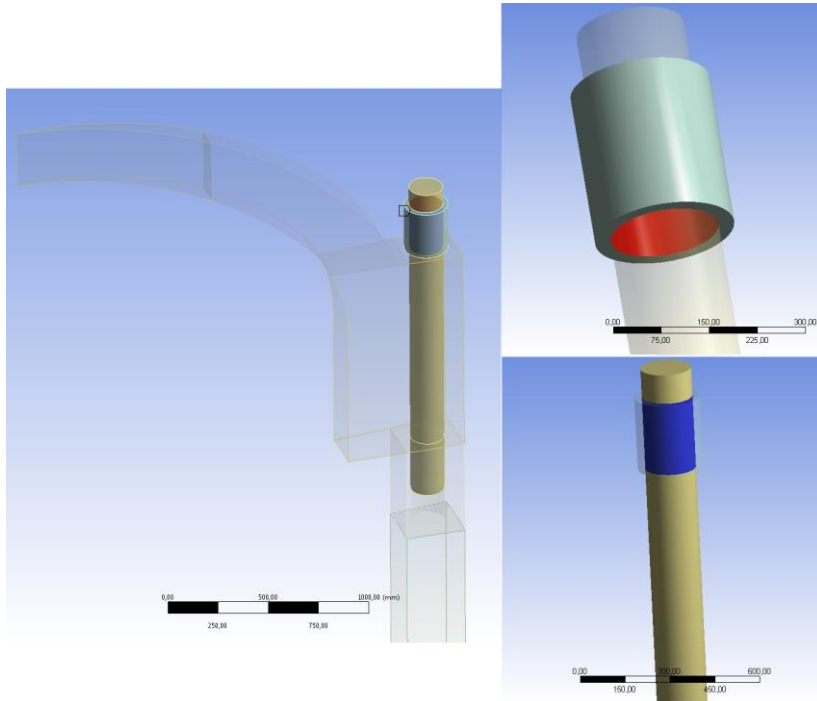
SURF154, katı elemanlar SOLID186 ve SOLID187 üzerine yerleştirilmiş 8 düğümlü ikinci dereceden bir yüzey elemanıdır ve modellerde basınç yüklemesini uygulamak için kullanılır [15].



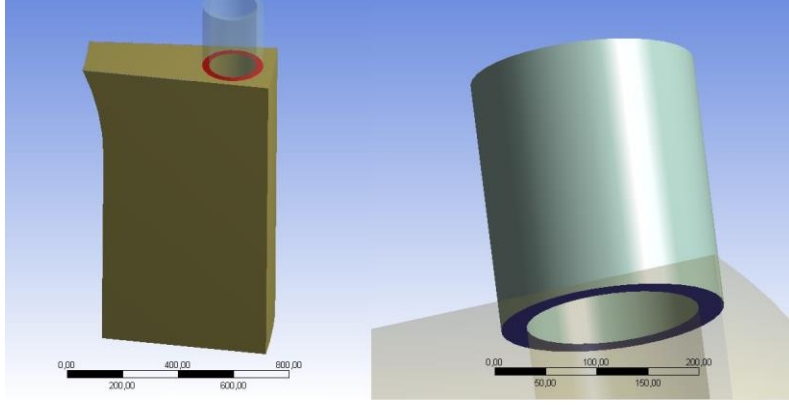
Şekil 5.12. SURF154 üç boyutlu yüzey elemanı [60]

#### 5.4. Modelde Oluşturulan Bağlantılar

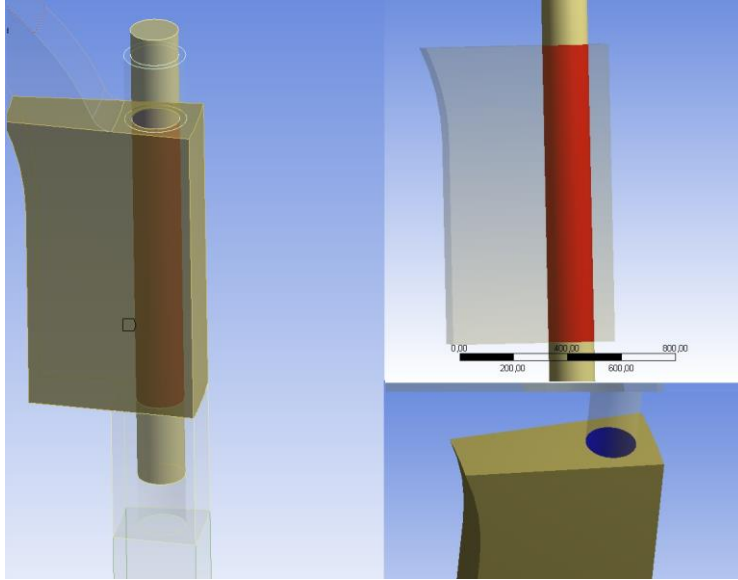
Modelde oluşturulan hedef-temas ilişkisi aşağıda Şekil 5.13 ila 5.18 arasında gösterilmiştir. Daha kolay ve düzgün ağ yapısı oluşturmak için kapak ve gövde birkaç parçaya bölünmüştür (kapak 3 parça, gövde 4 parça), parçaların birleştirilmesi rijit (bonded) temas ile yapılmış olup burada gösterilmemiştir.



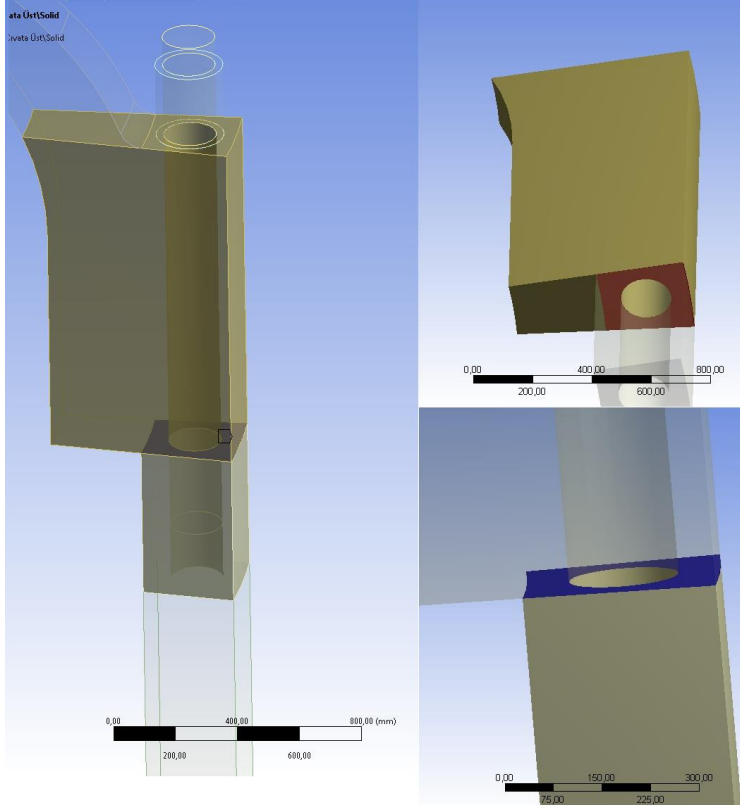
Şekil 5.13. Cıvata-somun temas yüzeyleri



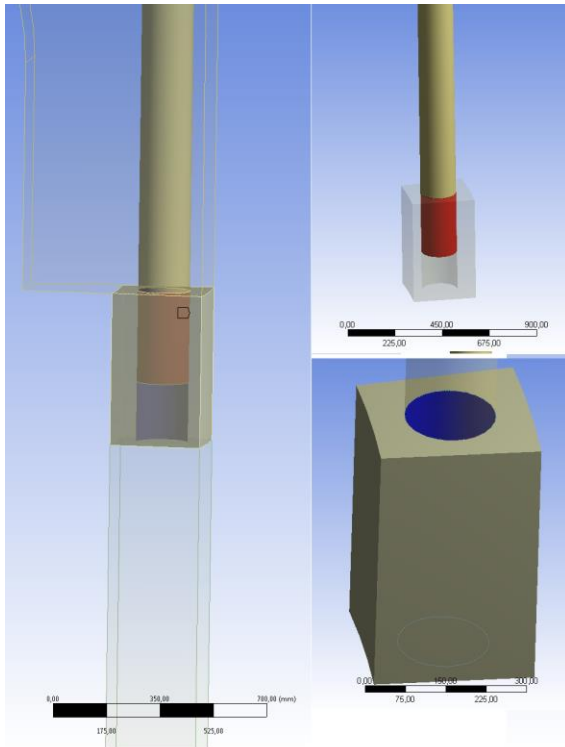
Şekil 5.14. Somun-kapak temas yüzeyleri



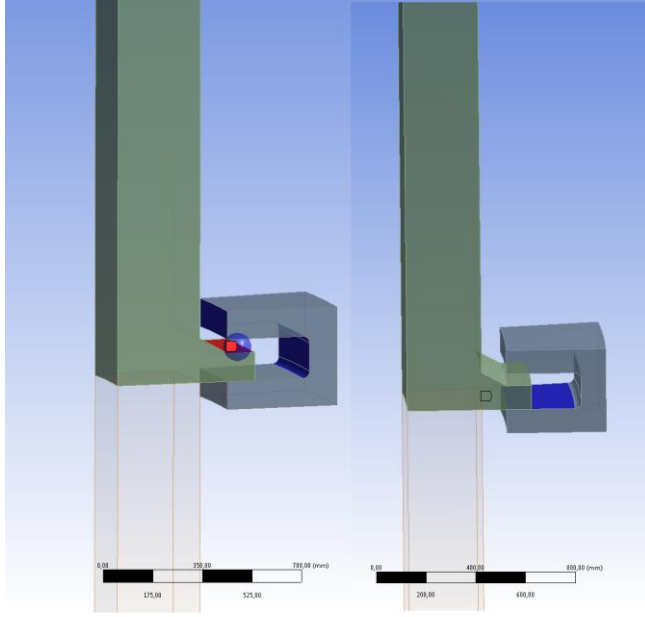
Şekil 5.15. Kapak-cıvata temas yüzeyleri



Şekil 5.16. Kapak-gövde temas yüzeyleri



Şekil 5.17. Gövde-cıvata temas yüzeyleri



Şekil 5.18. Gövde-destek temas yüzeyleri

### 5.5. Analiz Prosedürü

Bu bölümde modelin çözümünde kullanılan doğrusal yapısal statik analiz denge denklemleri verilmiştir [60].

$$[K].\{u\} = \{F\} \quad (5.1)$$

Ya da

$$[K].\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (5.2)$$

$$[K] = \sum_{m=1}^N [K_e] \quad (5.3)$$

$\{F^a\}$  : Uygulanan yük vektörü

$[K]$  : Toplam rijitlik matrisi

$\{u\}$  : Nodal yer değiştirme vektörü

$N$  : Eleman sayısı

$[K_e]$  :Eleman rijitlik matrisi

$\{F^r\}$  : Tepki yük vektörü

Toplam kütle matrisi  $[M]$ , eleman kütle matrislerinin  $[M_e]$  toplamı olarak ifade edilmektedir [60].

$$[M] = \sum_{m=1}^N [M_e] \quad (5.4)$$

Hızlanmaya ait hız vektörü  $\{F^{ac}\}$ , toplam kütle matrisi  $[M]$  ile hızlanma yük vektörünün  $\{a_c\}$  çarpımıdır [60].

$$\{F^{ac}\} = - [M] \cdot \{a_c\} \quad (5.5)$$

Toplam uygulanan yük vektörü  $\{F^a\}$  ise:

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\}) \quad (5.6)$$

$\{F^{nd}\}$  - Uygulanan nodal yük vektörü

$\{F_e^{th}\}$  - Eleman termal yük vektörü

$\{F_e^{pr}\}$  - Eleman basınç yük vektörü

Birinci dereceden doğrusal sistemler için genel denklemler, doğrusal yapısal statik analiz, denklemleri Denklem (5.1) ve Denklem (5.2) aynıdır.  $[K]$  toplam rijitlik matrisi termal analizdeki iletkenlik matrisini ve  $\{u\}$  nodal yer değiştirme vektörü nodal bağımsızlık derecesini ifade eder. Toplam uygulanan yük vektörü  $\{F^a\}$  ise şöyle tanımlanır [60]:

$$\{Q^a\} = \{Q^{nd}\} + \sum_{m=1}^N \{Q_e\} \quad (5.7)$$

$\{Q^a\}$  : Isı akışı

$\{Q^{nd}\}$  : Uygulanan nodal ısı akış hız vektörü

$\{Q_e\}$  : Isı akışı

## 5.6. Malzemeler ve Mekanik Özellikleri

Oluşturulan modellerde kullanılmak üzere ASME ve PNAE G-7 kodlarından seçilen malzemeler ayrı olarak analizlerde kullanılmıştır. Hangi parçaya hangi malzemenin seçildiği Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Parçalara ait malzeme listesi

| Kod      | Uygulanan Parça | Seçilen Malzeme          |
|----------|-----------------|--------------------------|
| ASME     | Kapak           | SA-508 Grade 3 Class 1   |
|          | Gövde           | SA-508 Grade 3 Class 1   |
|          | Cıvata          | SA-540 Grade B23 Class 3 |
|          | Somun           | SA-540 Grade B23 Class 3 |
| PNAE G-7 | Kapak           | 15H2NMFA                 |
|          | Gövde           | 15H2NMFA                 |
|          | Cıvata          | 38HN3MFA                 |
|          | Somun           | 38HN3MFA                 |

Parçalarda kullanılan malzemelere ait mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 5.4 ila Çizelge 5.7 arasında verilmiştir. Kullanılan modeldeki poisson oranı bütün malzeme ve bütün sıcaklık aralıkları için 0,3 [1, 27, 28, 61, 62] olarak kabul edilmiştir. Malzeme özellikleri SA-508 Grade 3 Class 1 ve SA-540 Grade B23 Class 3 için ASME kodundan ve ilgili makalelerden [37, 56, 63, 64], 15H2NMFA ve 38HN3MFA için ise PNAE G-7-002-86 kodundan ve ilgili yayınlardan [57, 61, 63] alınmıştır.

Analiz sırasında ihtiyaç duyulacak elastoplastik malzeme özellikleri için, biri elastik bölge, diğeri plastik bölge olmak üzere iki çizgili olarak tanımlanan gerilme-gerinim eğrisi ile ifade edilen isotropik bilineer sertleşme özellikleri kullanılmıştır. Elastik bölge özellikleri için Young modülü (elastisite modülü) kullanılırken, plastik bölge için gerekli olan tanjant modülü (plastisite modülü) elastisite modülünün %10’u olarak kabul edilmiştir [19].

Çizelge 5.4. SA-508 Grade 3 Class 1 mekanik özellikleri

| SA-508 Grade 3 Class 1       |          |      |       |      |      |      |       |       |      |
|------------------------------|----------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
|                              | Sıcaklık |      |       |      |      |      |       |       |      |
|                              | 25       | 40   | 100   | 150  | 200  | 250  | 300   | 350   | 400  |
| Çekme gerilmesi MPa          | 552      | 552  | 552   | 552  | 552  | 552  | 552   | 552   | -    |
| Akma gerilmesi MPa           | 345      | 345  | 323   | 314  | 305  | 299  | 292   | 285   | -    |
| Uzama katsayısı $\mu K$      | 6,4      | 6,5  | 7,0   | 7,3  | 7,7  | 7,9  | 8,3   | 8,55  | 8,8  |
| Elastisite modülü E, GPa     | 191      | -    | 187   | 184  | 181  | 178  | 174   | 171   | 167  |
| Isı iletim katsayısı (W/m°C) | 23,5     | 23,6 | 23,55 | 23,4 | 23,1 | 22,8 | 22,35 | 21,75 | 21,3 |

Çizelge 5.5. SA-540 Grade B23 Class 3 mekanik özellikleri

| SA-540 Grade B23 Class 3 |          |      |      |      |      |      |      |      |     |
|--------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|                          | Sıcaklık |      |      |      |      |      |      |      |     |
|                          | 25       | 40   | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400 |
| Çekme gerilmesi MPa      | 1000     | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 979  | -   |
| Akma gerilmesi MPa       | 895      | 896  | 857  | 838  | 825  | 814  | 802  | 782  | -   |
| Uzama katsayısı $\mu K$  | 6,4      | 6,5  | 7,0  | 7,3  | 7,7  | 7,9  | 8,3  | 8,55 | 8,8 |

Çizelge 5.5. (devam) SA-540 Grade B23 Class 3 mekanik özellikleri

|                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Elastisite modülü<br>E, GPa     | 191  | -    | 187  | 184  | 181  | 178  | 174  | 171  | 167  |
| Isı iletim katsayısı<br>(W/m°C) | 20,9 | 21,0 | 21,3 | 21,5 | 21,5 | 21,4 | 21,2 | 21,0 | 20,5 |

Çizelge 5.6. 15H2NMFA mekanik özellikleri

| 15H2NMFA                                 |          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                          | Sıcaklık |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                                          | 20       | 50   | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  |
| Çekme gerilmesi<br>MPa                   | 608      | 593  | 588  | 578  | 568  | 559  | 549  | 539  | -    |
| Akma gerilmesi<br>MPa                    | 490      | 480  | 470  | 461  | 451  | 451  | 451  | 441  | -    |
| Uzama katsayısı<br>$\mu K$               | -        | 11,5 | 11,9 | 12,2 | 12,5 | 12,8 | 13,1 | 13,4 | 13,6 |
| Elastisite modülü<br>E, GPa              | 210      | 207  | 205  | 202  | 200  | 197  | 195  | 190  | 185  |
| Isı iletim katsayısı<br>$\lambda$ W/(mK) | -        | -    | 29   | -    | 30   | -    | 31   | -    | 32   |

Çizelge 5.7. 38HN3MFA mekanik özellikleri

| 38HN3MFA                              |          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                       | Sıcaklık |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                                       | 20       | 50   | 100  | 150  | 200  | 250  | 300  | 350  | 400  |
| Çekme gerilmesi MPa                   | 981      | 981  | 942  | 912  | 903  | 883  | 863  | 834  | -    |
| Akma gerilmesi MPa                    | 880      | 880  | 844  | 814  | 804  | 785  | 765  | 746  | -    |
| Uzama katsayısı $\mu K$               | -        | 11,5 | 11,9 | 12,2 | 12,5 | 12,8 | 13,1 | 13,4 | 13,6 |
| Elastisite modülü E, GPa              | 215      | 212  | 210  | 207  | 205  | 202  | 200  | 195  | 190  |
| Isı iletim katsayısı $\lambda$ W/(mK) | 54       | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 44   |

### 5.7. Analizde Kullanılan Yükler

Kullanılan modelin cıvata öngerilmesi, basınç ve sıcaklık altında çalışması planlanmıştır. Analiz süreci 3 adımda işletilmiştir. Modele sırasıyla, cıvata öngerilmesi, iç basınç ve ısı yük uygulanmıştır. Farklı sıcaklık ve basınç değerleri altındaki davranışları incelenmiştir.

Analiz sürecinde modele uygulanacak olan farklı sıcaklık ve basınç değerleri Çizelge 5.8’de gösterilmektedir. Cıvata öngerilmesi yükü olarak uygulanacak olan kuvvet değerleri Bölüm 5.7.1’de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.8. Analizde kullanılan yük değerleri

| Durum | Malzeme                                            | Sıcaklık (°C) | Basınç (MPa) | Cıvata Öngerilmesi (kN) |
|-------|----------------------------------------------------|---------------|--------------|-------------------------|
| 1.    | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 300           | 17           | 4700                    |
| 2.    | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 300           | 17           | 4700                    |
| 3.    | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 300           | 21           | 5800                    |
| 4.    | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 300           | 21           | 5800                    |
| 5.    | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 300           | 25           | 6900                    |
| 6.    | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 300           | 25           | 6900                    |
| 7.    | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 300           | 27           | 7450                    |
| 8.    | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 300           | 27           | 7450                    |
| 9.    | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 350           | 17           | 4700                    |
| 10.   | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 350           | 17           | 4700                    |
| 11.   | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 350           | 21           | 5800                    |
| 12.   | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 350           | 21           | 5800                    |
| 13.   | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 350           | 25           | 6900                    |

Çizelge 5.8. (devam) Analizde kullanılan yük değerleri

|     |                                                    |     |    |      |
|-----|----------------------------------------------------|-----|----|------|
| 14. | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 350 | 25 | 6900 |
| 15. | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 350 | 27 | 7450 |
| 16. | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 350 | 27 | 7450 |
| 17. | 15H2NMFA<br>38HN3MFA                               | 350 | 30 | 4700 |
| 18. | SA-508 Grade 3 Class 1<br>SA-540 Grade B23 Class 3 | 350 | 30 | 4700 |

### 5.7.1. Cıvata önerilmesi

Şekil 5.3-a'da gösterilen cıvata için önerilme yükü eşitlik 5.8'deki ampirik formüle göre hesaplanmıştır [23].

$$P_{\text{önerilme}} = \frac{C \cdot P \cdot ID^2}{S \cdot D^2} \quad (5.8)$$

Burada,

$P_{\text{önerilme}}$  : Cıvata önerilme yük değeri (MPa)

P : İç basınç (MPa)

ID : En büyük iç çap değeri (mm)

C : Cıvata sıkıştırma belirsizliği (+10%)

S : Modeldeki cıvata sayısı

D : En küçük cıvata çapı (mm)

İlgili değerler yerine koyulduğunda eşitlik 5.9'daki 207,06 Mpa gerilme değeri elde edilir.

$$P_{\text{önerilme}} = \frac{1,1 \cdot 17 \cdot 4000^2}{50 \cdot 170^2} = 207,06 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

Elde edilen değer kuvvete dönüştürüldüğünde 4699822 N değeri elde edilir (eşitlik 5.10). Bu değer analizde 4700 kN olarak kabul edilmiştir.

$$F = \sigma \cdot A = 207,06 \cdot \pi \cdot \frac{170^2}{4} = 4699822 \text{ N} \quad (5.10)$$

Benzer olarak 21, 25 ve 27 MPa için hesaplama yapılmış ve cıvata ngerilmeleri hesaplanmıştır. Sırasıyla 5805663 N, 6911503 N ve 7464424 N değerleri bulunmuştur. Çizelge 5.9’da analizde kullanılan öngerilme değerleri verilmiştir.

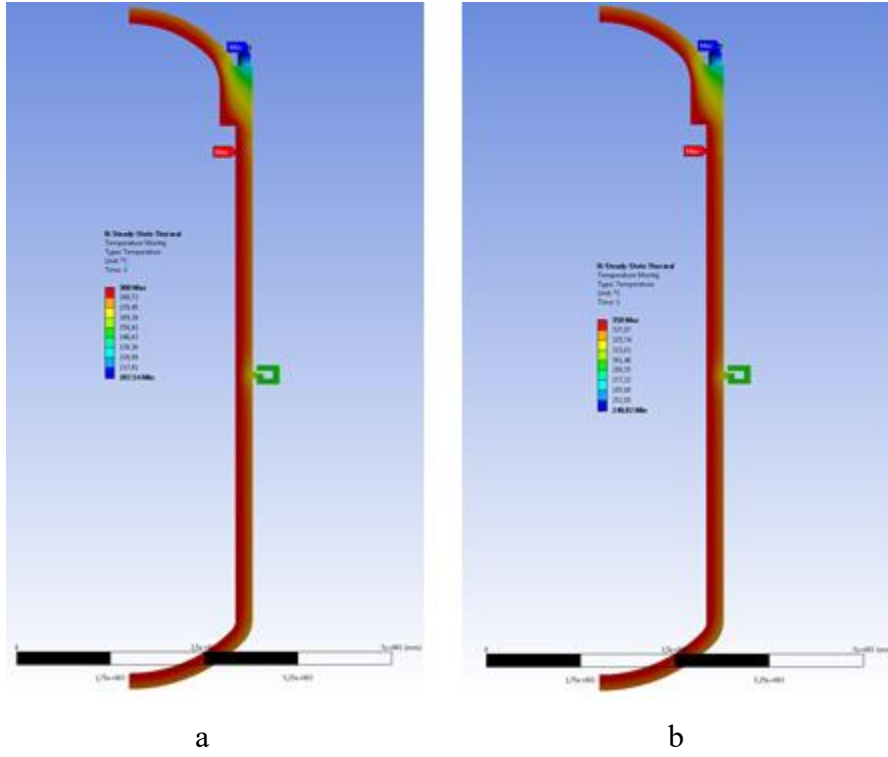
Çizelge 5.9. Analizde kullanılan cıvata öngerilme yükleri

| İ Basınç                  | 17 MPa | 21 MPa | 25 MPa | 27 MPa |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Cıvata ngerilme Yükü (kN) | 4700   | 5800   | 6900   | 7450   |

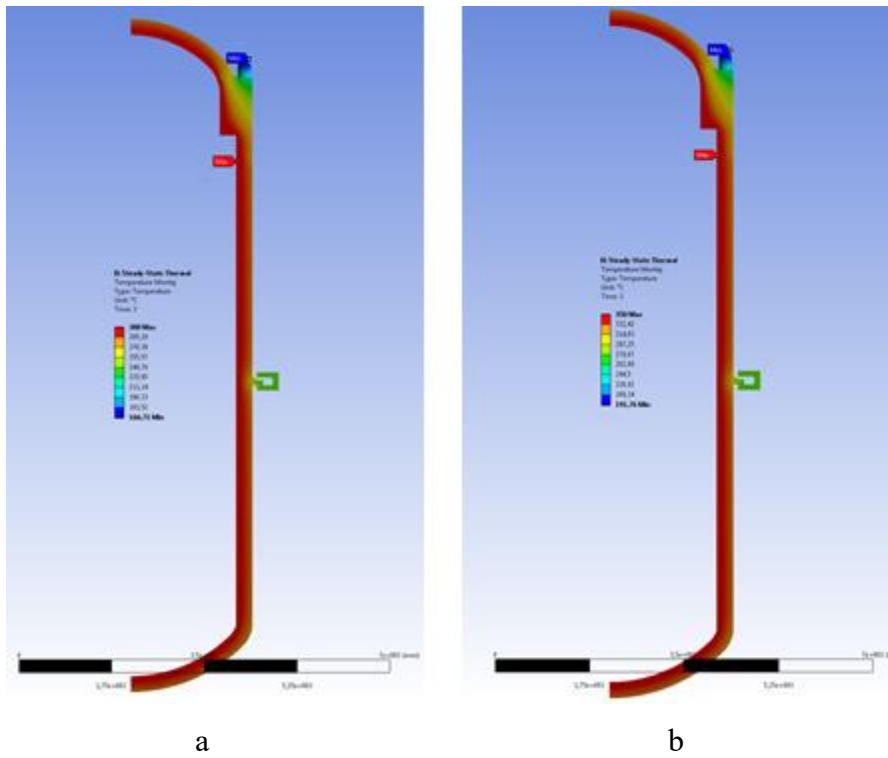
## 5.8. Modelin Analizinin Gerçekleştirilmesi

### 5.8.1. Isıl yük analizi

Oluşturulan model için gerçekleştirilen analizde 300 ve 350 C olmak üzere iki farklı sıcaklık değeri kullanılmıştır. 15H2NMFA (kapak, gövde) ve 38HN3MFA (cıvata, somun) malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin 300 C’deki sıcaklık dağılımı şekil 5.19-a’da; 15H2NMFA (kapak, gövde) ve 38HN3MFA (cıvata, somun) malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin 350 C’deki sıcaklık dağılımı şekil 5.19-b’de; SA-508 Grade 3 Class 1 (kapak, gövde) ve SA-540 Grade B23 Class 3 (cıvata, somun) malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin 300 C’deki sıcaklık dağılımı şekil 5.20-a’da; SA-508 Grade 3 Class 1 (kapak, gövde) ve SA-540 Grade B23 Class 3 (cıvata, somun) malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin 350 C’deki sıcaklık dağılımı şekil 5.20-b’de verilmiştir.



Şekil 5.19. 15H2NMFA ve 38HN3MFA malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı (a) 300 °C (b) 350 °C



Şekil 5.20. SA-508 Grade 3 Class 1 ve SA-540 Grade B23 Class 3 malzemeleri kullanılarak oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı (a) 300 °C (b) 350 °C

Elde edilen analiz sonuçlarından her iki malzeme grubu ve her iki sıcaklık değeri (300 - 350 °C) için benzer bir sıcaklık dağılımı görülmektedir. En yüksek sıcaklıklar kapak ve gövdenin iç cidarlarında görülürken, en düşük sıcaklıklar ise somun ve cıvatanın hava ile temas eden dış yüzeyinde görülmektedir.

300 °C için 15H2NMFA ve 38HN3MFA malzemeleri kullanıldığında en düşük sıcaklığın cıvata yüzeyinde 207,54 °C olduğu; SA-508 Grade 3 Class 1 ve SA-540 Grade B23 Class 3 malzemeleri kullanıldığında en düşük sıcaklığın cıvata yüzeyinde 166,71 °C olduğu görülmüştür.

350 °C için 15H2NMFA ve 38HN3MFA malzemeleri kullanıldığında en düşük sıcaklığın cıvata yüzeyinde 240,82 °C olduğu; SA-508 Grade 3 Class 1 ve SA-540 Grade B23 Class 3 malzemeleri kullanıldığında en düşük sıcaklığın cıvata yüzeyinde 191,76 °C olduğu görülmüştür.

### 5.8.2. Cıvata öngerilmesi + iç basınç + ısı yük analizi

Cıvata öngerilmesi + iç basınç + ısıl gerilme yüklemeleri sonrasında elde edilen gerilme değerlerinin izin verilen gerilme değerleri ile kıyaslanması Çizelge 5.10 ila 5.27 arasında verilmektedir.

Kapak ve gövde için ASME koduna göre izin verilen gerilme değerleri hesaplanırken eşitlik 5.11'den yararlanılmıştır [32].

$$P_L + P_b + Q < 3.S_m \quad (5.11)$$

Kapak ve gövde için PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerleri hesaplanırken eşitlik 5.12'den yararlanılmıştır [61].

$$(\sigma_{RV}) = \left( 2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) R_{p0,2}^T \quad (5.12)$$

PNAE G-7'de kullanılacak olan izin verilen gerilme değeri  $2R_{Tp0,2}$  değerinden küçük ya da eşit olmalıdır [61].

Durum 1 ve 2, 300 °C ve 17 MPa normal işletme durumu [10] olarak kabul edilmiş (PNAE G-7 için NOC ve ASME için Hizmet Seviyesi A); Durum 1 ve 2 haricindekiler ise 350 °C ve 17 MPa üzerindeki basınç değerleri normal işletmeden sapma durumu (PNAE G-7 için VNOC ve ASME için Hizmet Seviyesi B ve C) olarak kabul edilmiştir.

PNAE G-7 kodu civata harici bileşenler için genel veya lokal membran gerilmelerinin, genel ve lokal eğilme gerilmelerinin, genel sıcaklık gerilmelerinin ve ekipmanın dengelenmesi için gerilmelerin toplamaları ile tanımlanan azami indirgenmiş gerilme aralığı  $(\sigma)_{RV}$  için çalışma moduna göre herhangi bir ayırım yapmamıştır. Cıvatalarda ise NOC için  $1,3[\sigma]$  ve VNOC için  $1,6[\sigma]$  olarak izin verilen gerilmeler hesaplanmaktadır.

ASME kodunda ise bütün bileşenler için genel veya lokal membran gerilmelerinin, genel ve lokal eğilme gerilmelerinin, genel sıcaklık gerilmelerinin ve ekipmanın dengelenmesi için gerilmelerin toplamaları ile tanımlanan azami indirgenmiş gerilme aralığı  $P_L + P_b + Q < 3.S_m$  olarak tanımlanmıştır.

Her bir duruma ait izin verilen gerilmeler bu kabuller üzerinden ilgili malzemenin mekanik özelliklerine göre hesaplanmıştır.

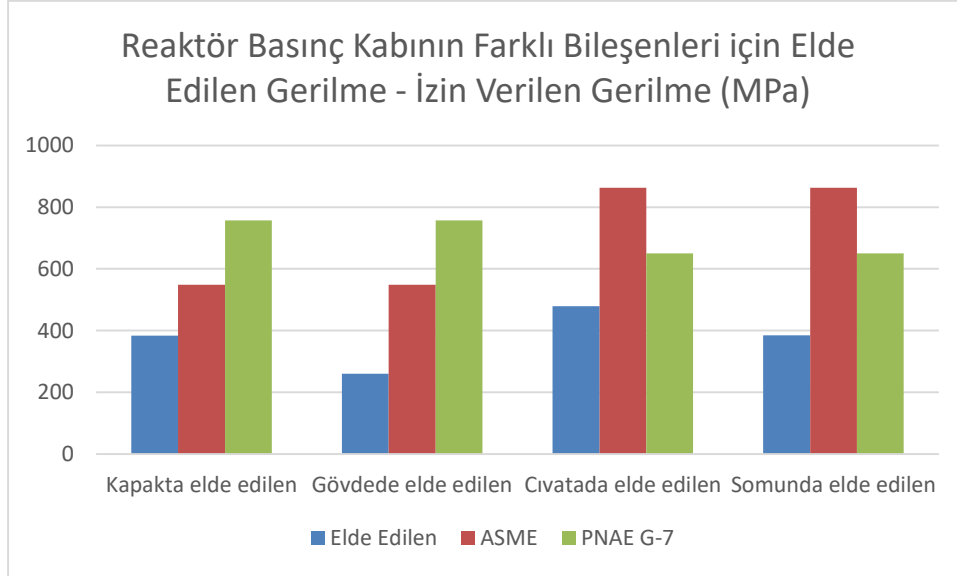
### Durum 1

Durum 1'e ait analiz sonuçları Çizelge 5.10'da verilmektedir.

Çizelge 5.10. Durum 1'e ait sonuçlar

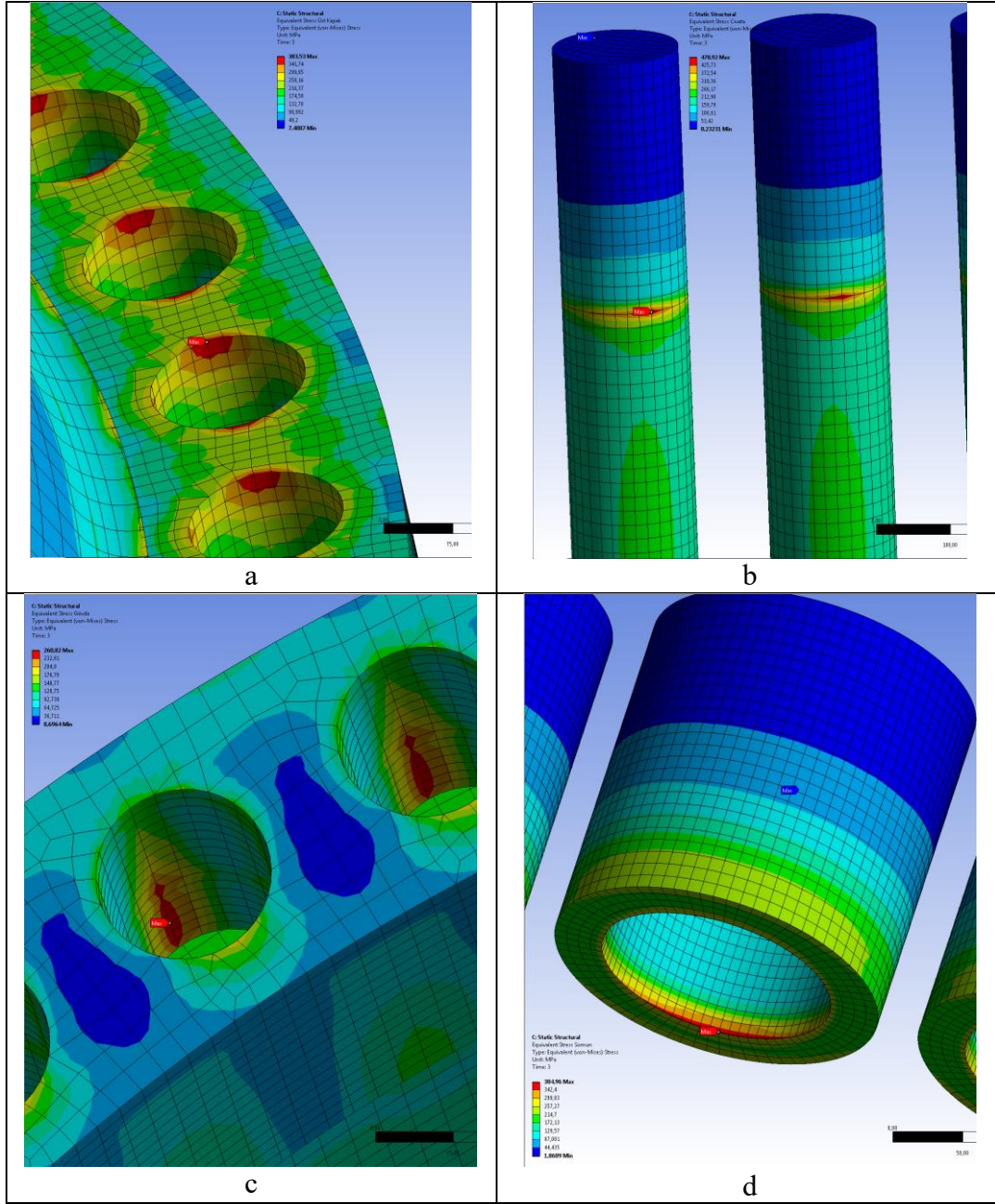
| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 1     | Kapak  | 383,53                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 1     | Gövde  | 260,82                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 1     | Cıvata | 478,92                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $1,7[\sigma]= 650$  | Geçti |
| 1     | Somun  | 384,96                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $1,7[\sigma]= 650$  | Geçti |

Normal işletme durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 1'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Durum 1 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme – izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 1'de gerçekleştirilen analize ait model üzerinde oluşan gerilmeler Şekil 5.22'de verilmektedir.



Şekil 5.22. Durum 1 – Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

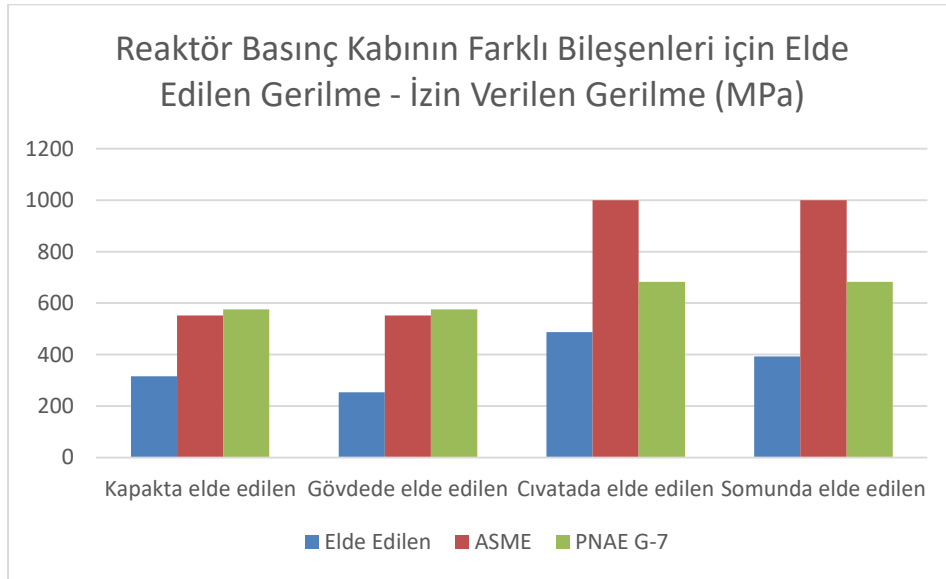
### Durum 2

Durum 2'ye ait analiz sonuçları Çizelge 5.11'de verilmektedir.

Çizelge 5.11. Durum 2'ye ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 2     | Kapak  | 314,94                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 2     | Gövde  | 253,89                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 2     | Cıvata | 487,34                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $1,7[\sigma]=682$   | Geçti |
| 2     | Somun  | 392,13                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $1,7[\sigma]=682$   | Geçti |

Normal işletme durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 2'ye ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. Durum 2 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme – izin verilen gerilme

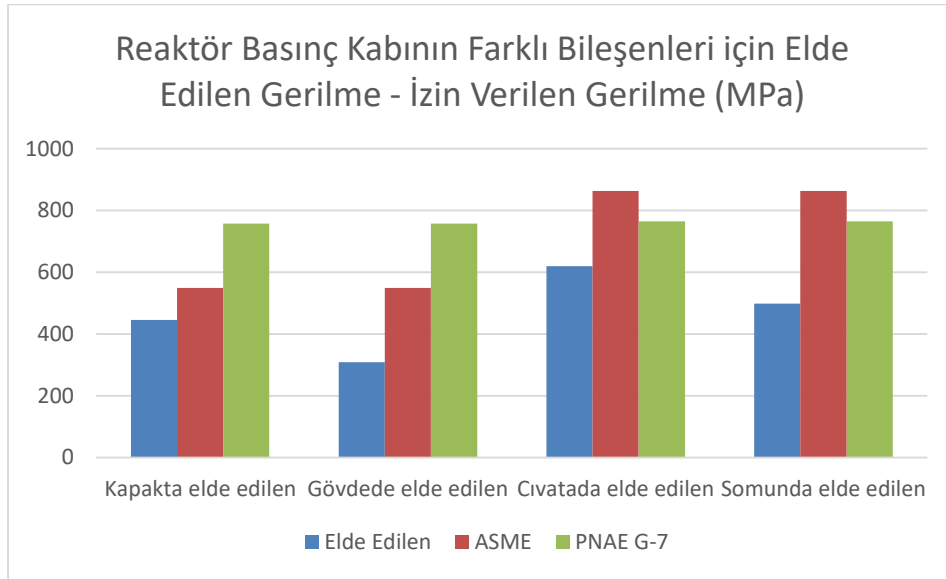
Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme



Çizelge 5.12. Durum 3'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 3     | Kapak  | 445,67                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 3     | Gövde  | 308,31                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 3     | Cıvata | 619,29                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Geçti |
| 3     | Somun  | 498,38                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Geçti |

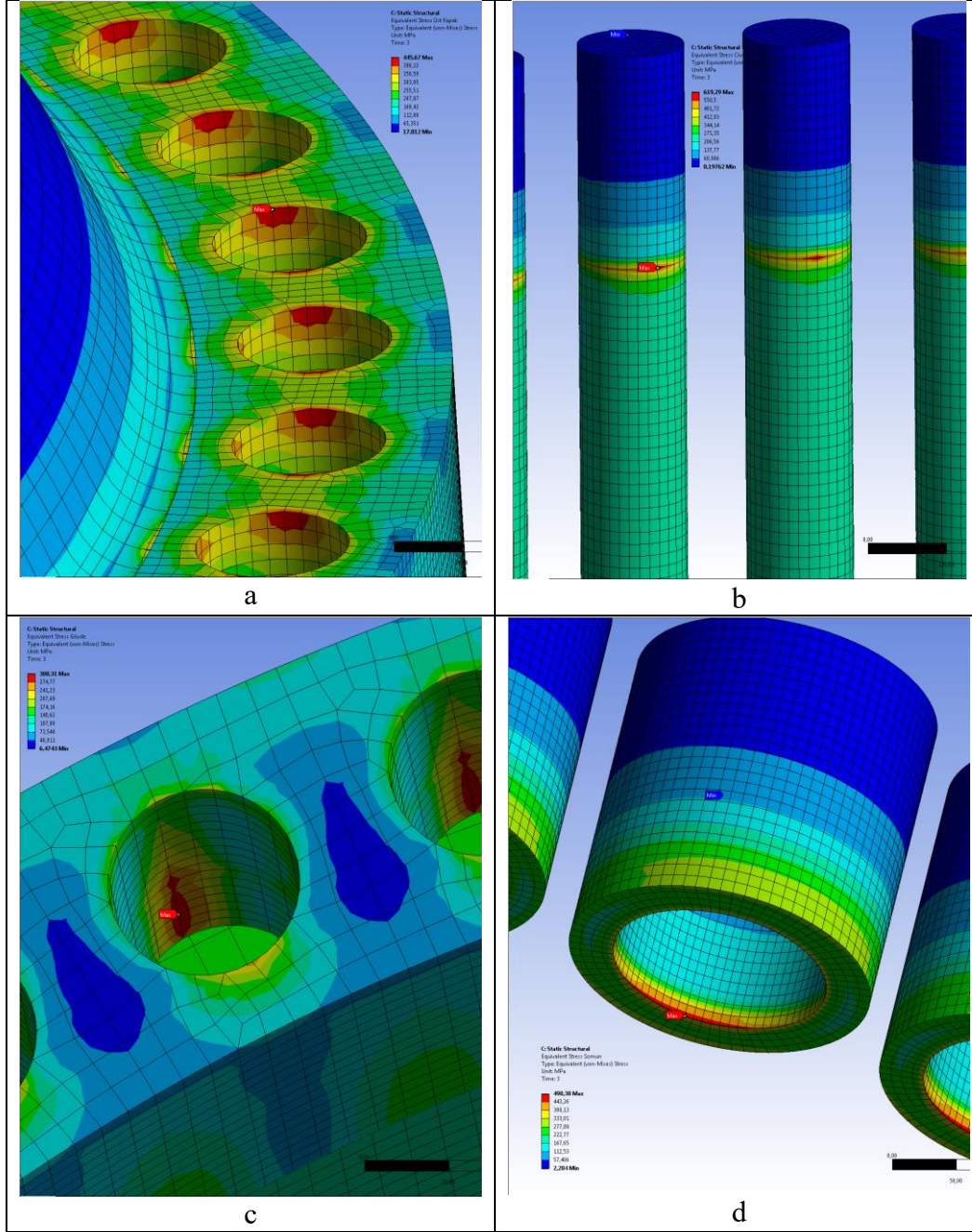
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 3'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. Durum 3 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 3’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.26’da verilmektedir.



Şekil 5.26. Durum 3 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

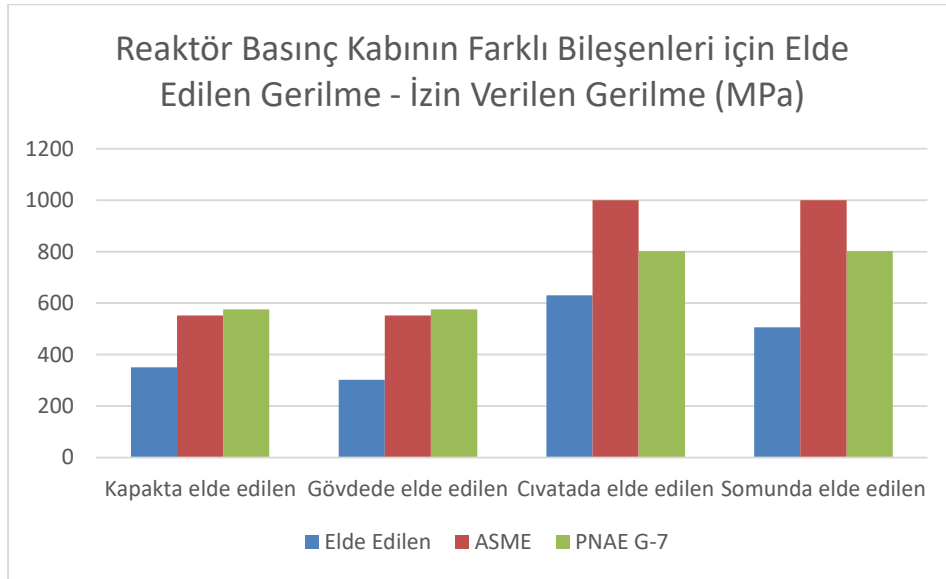
#### Durum 4

Durum 4’e ait analiz sonuçları Çizelge 5.13’de verilmektedir.

Çizelge 5.13. Durum 4'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 4     | Kapak  | 350,85                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 4     | Gövde  | 301,38                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 4     | Cıvata | 630,14                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Geçti |
| 4     | Somun  | 506,47                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Geçti |

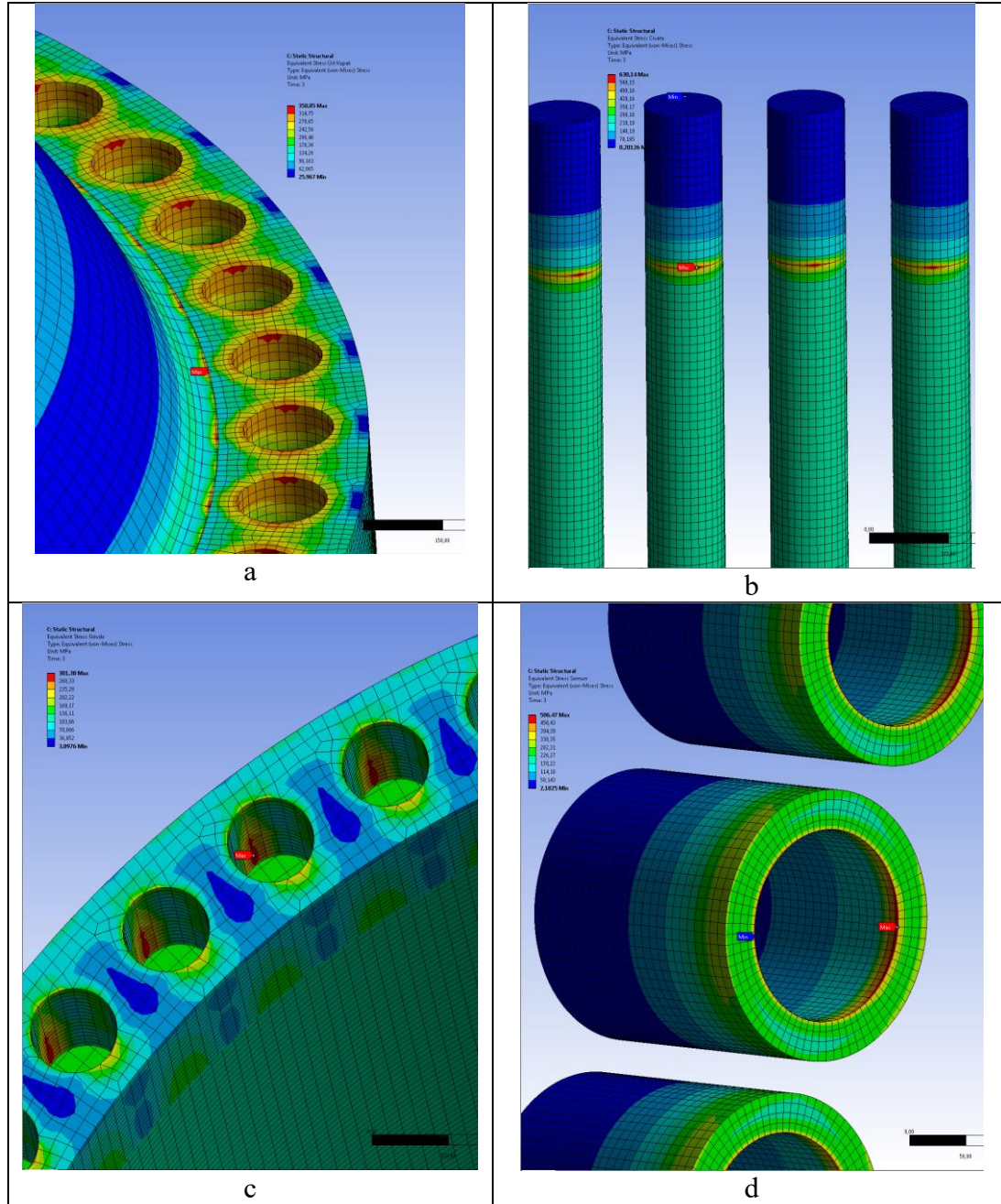
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 4'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.27).



Şekil 5.27. Durum 4 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek

gerilme değerin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 4’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.28’de verilmektedir.



Şekil 5.28. Durum 4 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

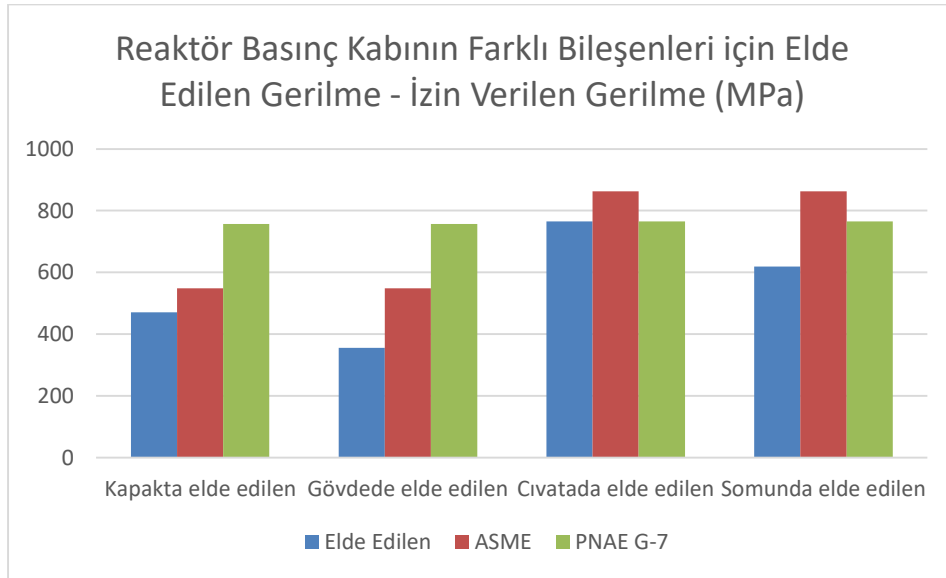
### Durum 5

Durum 5’e ait analiz sonuçları Çizelge 5.14’de verilmektedir.

Çizelge 5.14. Durum 5'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 5     | Kapak  | 470,5                              | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 5     | Gövde  | 355,64                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 5     | Cıvata | 765,19                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Kaldı |
| 5     | Somun  | 619,42                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Geçti |

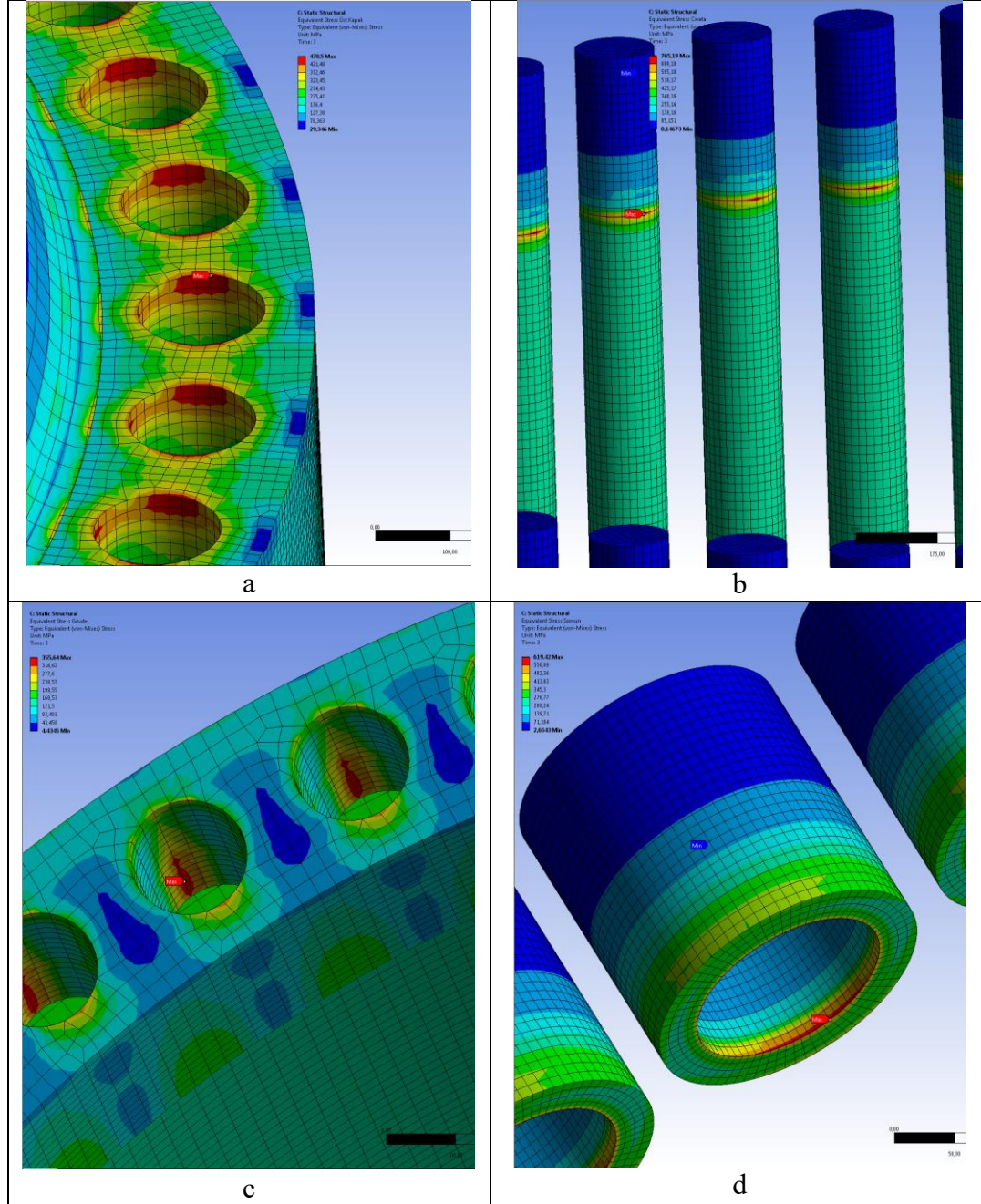
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 5'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. Durum 5 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 5’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.30’da verilmektedir.



Şekil 5.30. Durum 5 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

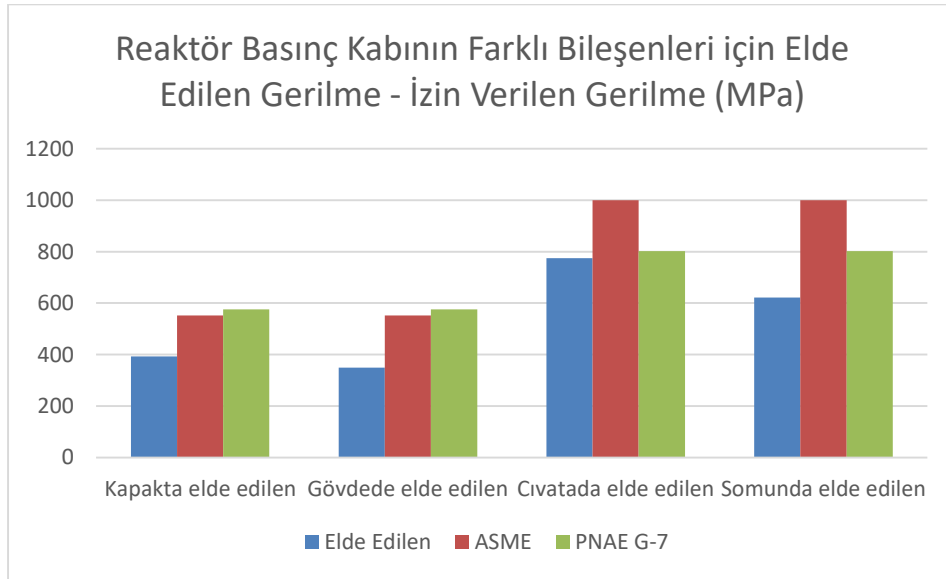
### Durum 6

Durum 6’ya ait analiz sonuçları Çizelge 5.15’de verilmektedir.

Çizelge 5.15. Durum 6'ya ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 6     | Kapak  | 392,43                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 6     | Gövde  | 348,68                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 6     | Cıvata | 774,57                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Geçti |
| 6     | Somun  | 621,1                              | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Geçti |

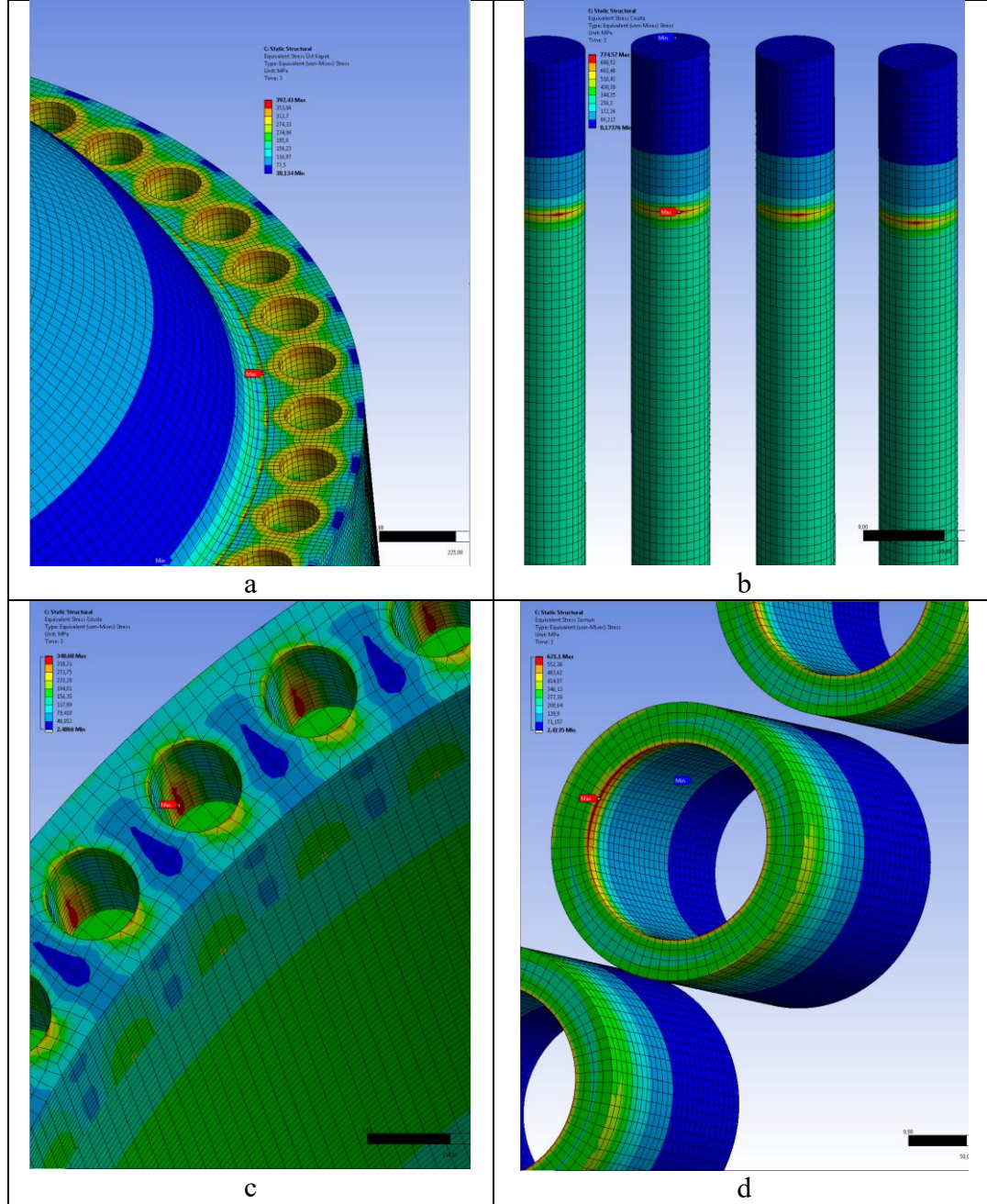
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 6'ya ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.31).



Şekil 5.31. Durum 6 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek

gerilme değerin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 6'da gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.32'de verilmektedir.



Şekil 5.32. Durum 6 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somun

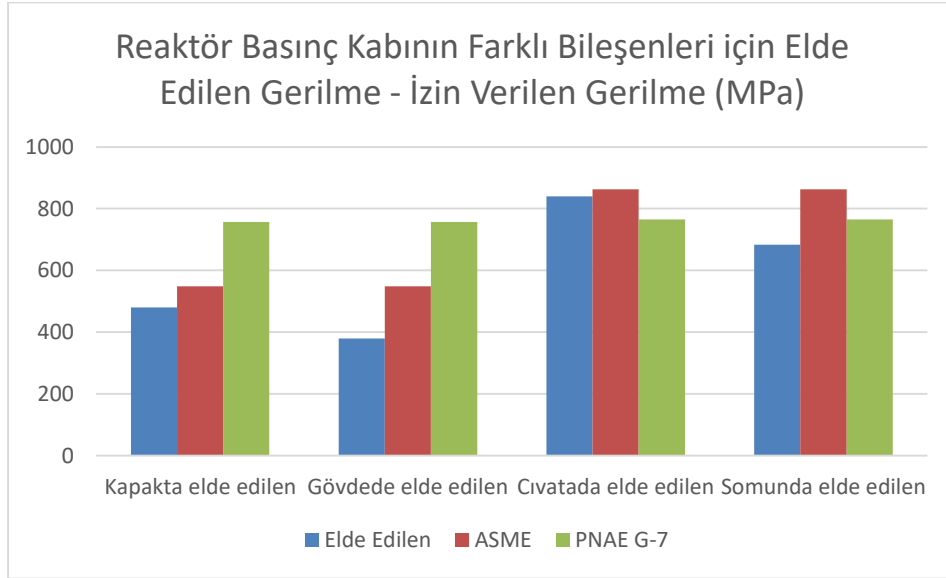
### Durum 7

Durum 7'ye ait analiz sonuçları Çizelge 5.16'da verilmektedir.

Çizelge 5.16. Durum 7'ye ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 7     | Kapak  | 479,89                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 7     | Gövde  | 379,23                             | $P_L + P_b + Q=549$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=757$ | Geçti |
| 7     | Cıvata | 840,38                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Kaldı |
| 7     | Somun  | 682,95                             | $P_L + P_b + Q=863$                | Geçti | $2,0[\sigma]=765$   | Geçti |

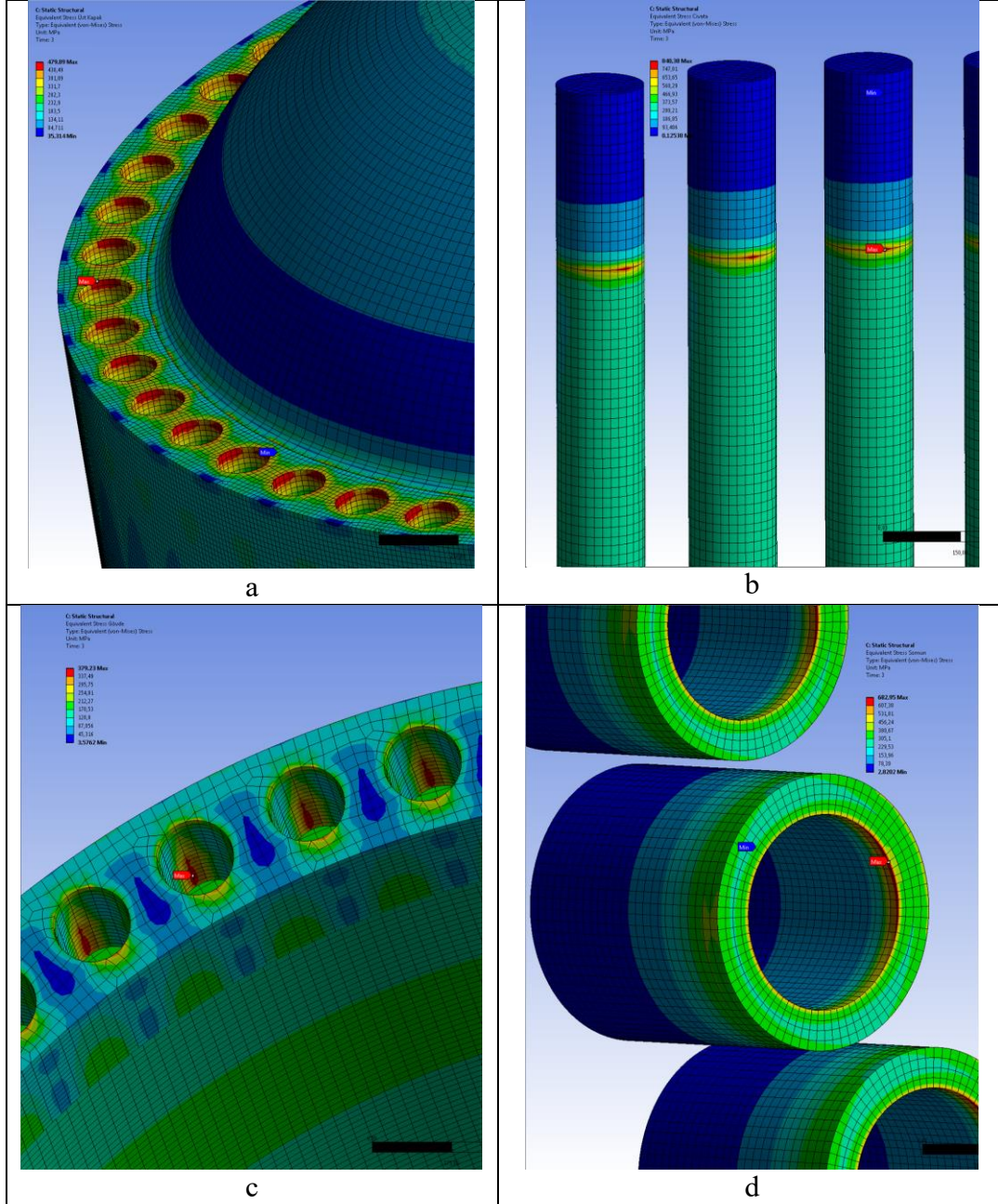
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 7'ye ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. Durum 7 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 7’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.34’de verilmektedir.



Şekil 5.34. Durum 7 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

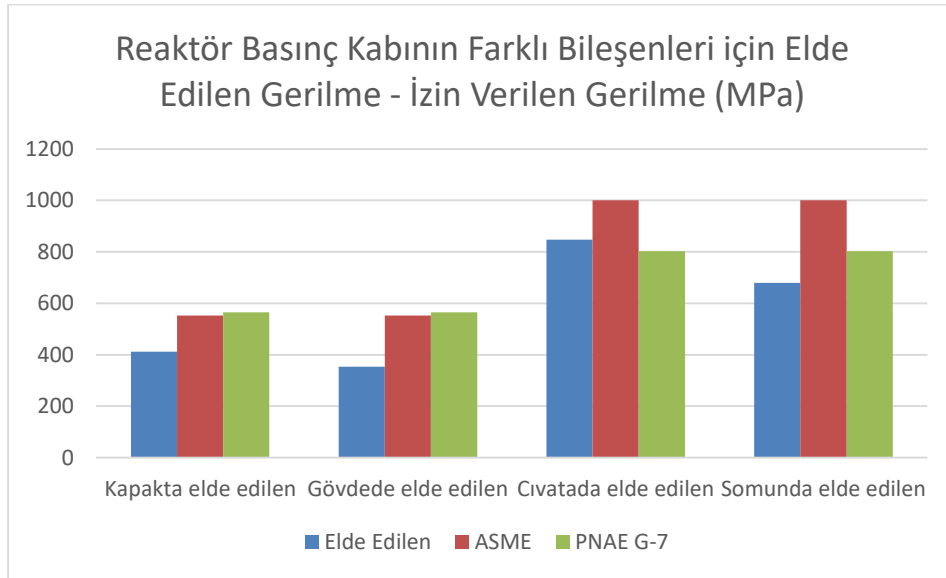
### Durum 8

Durum 8’e ait analiz sonuçları Çizelge 5.17’de verilmektedir.

Çizelge 5.17. Durum 8'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 8     | Kapak  | 411,55                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 8     | Gövde  | 353,98                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=576$ | Geçti |
| 8     | Cıvata | 847,6                              | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Kaldı |
| 8     | Somun  | 679,48                             | $P_L + P_b + Q=1000$               | Geçti | $2,0[\sigma]=802$   | Geçti |

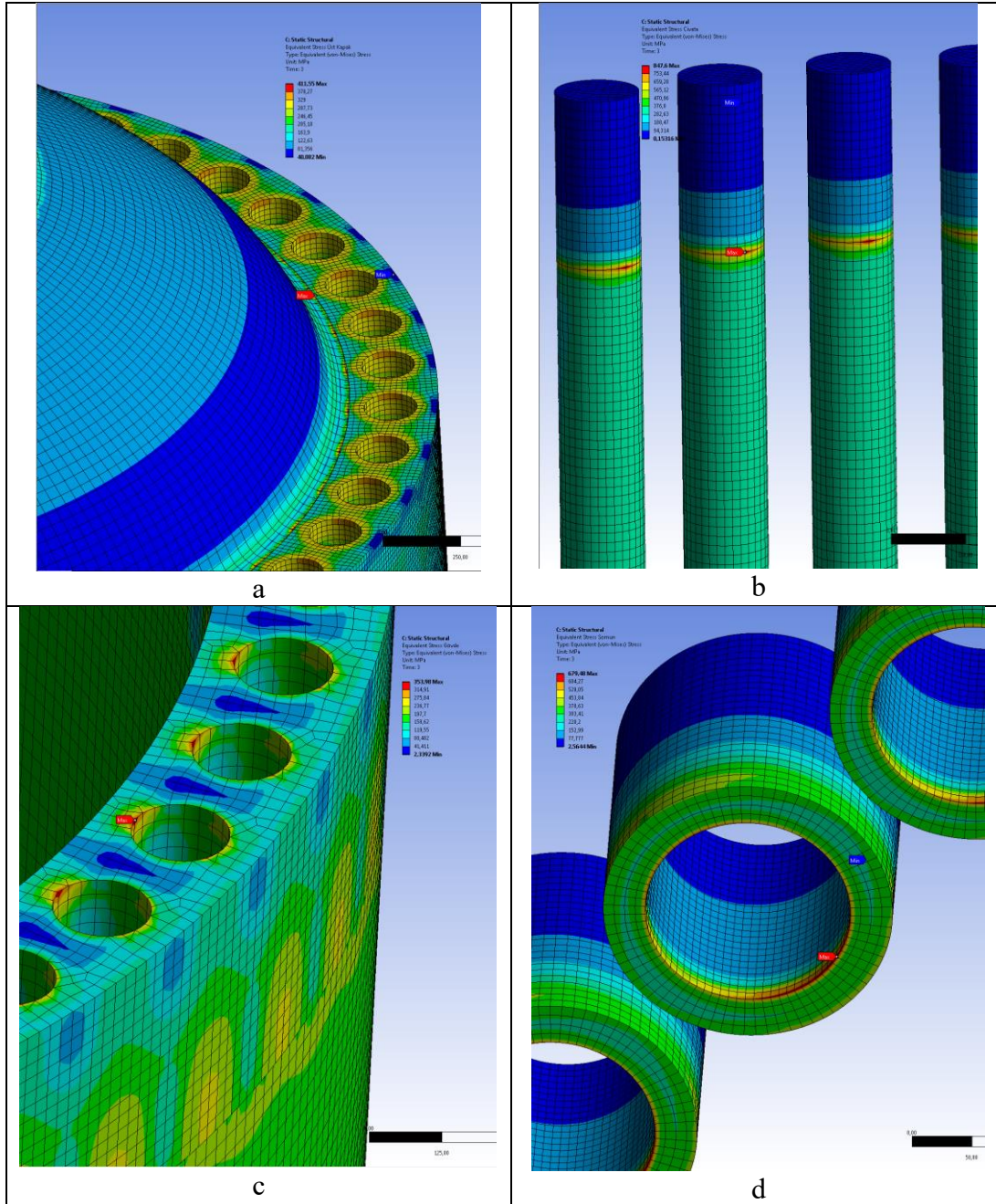
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 8'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.35).



Şekil 5.35. Durum 8 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için kapak ve cıvata ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde;

somun için civatanın en yüksek gerilme değerin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 8’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.36’de verilmektedir.



Şekil 5.36. Durum 8 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) civatada (c) gövdede (d) somunda

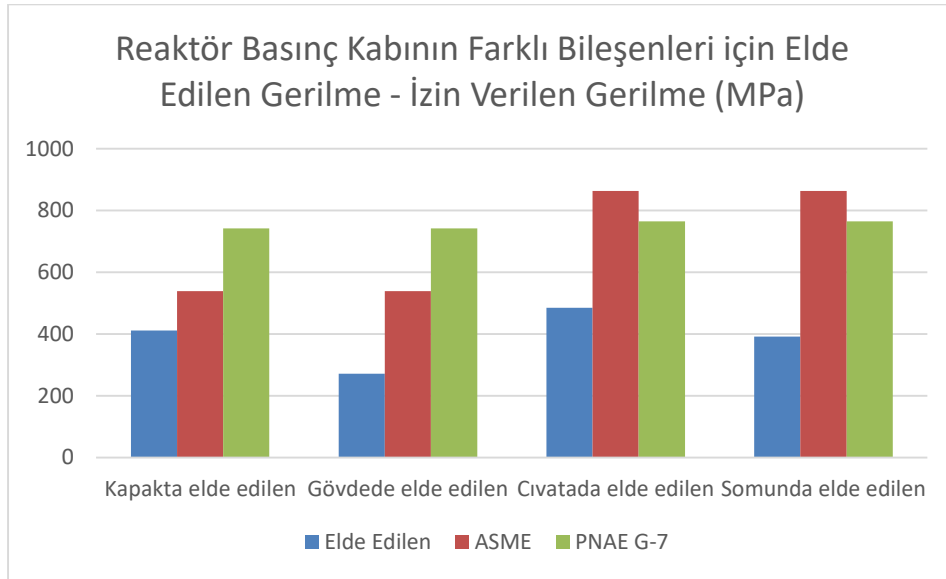
### Durum 9

Durum 9’a ait analiz sonuçları Çizelge 5.18’de verilmektedir.

Çizelge 5.18. Durum 9'a ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 9     | Kapak  | 411,51                             | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 9     | Gövde  | 271,7                              | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 9     | Cıvata | 484,63                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |
| 9     | Somun  | 391,65                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |

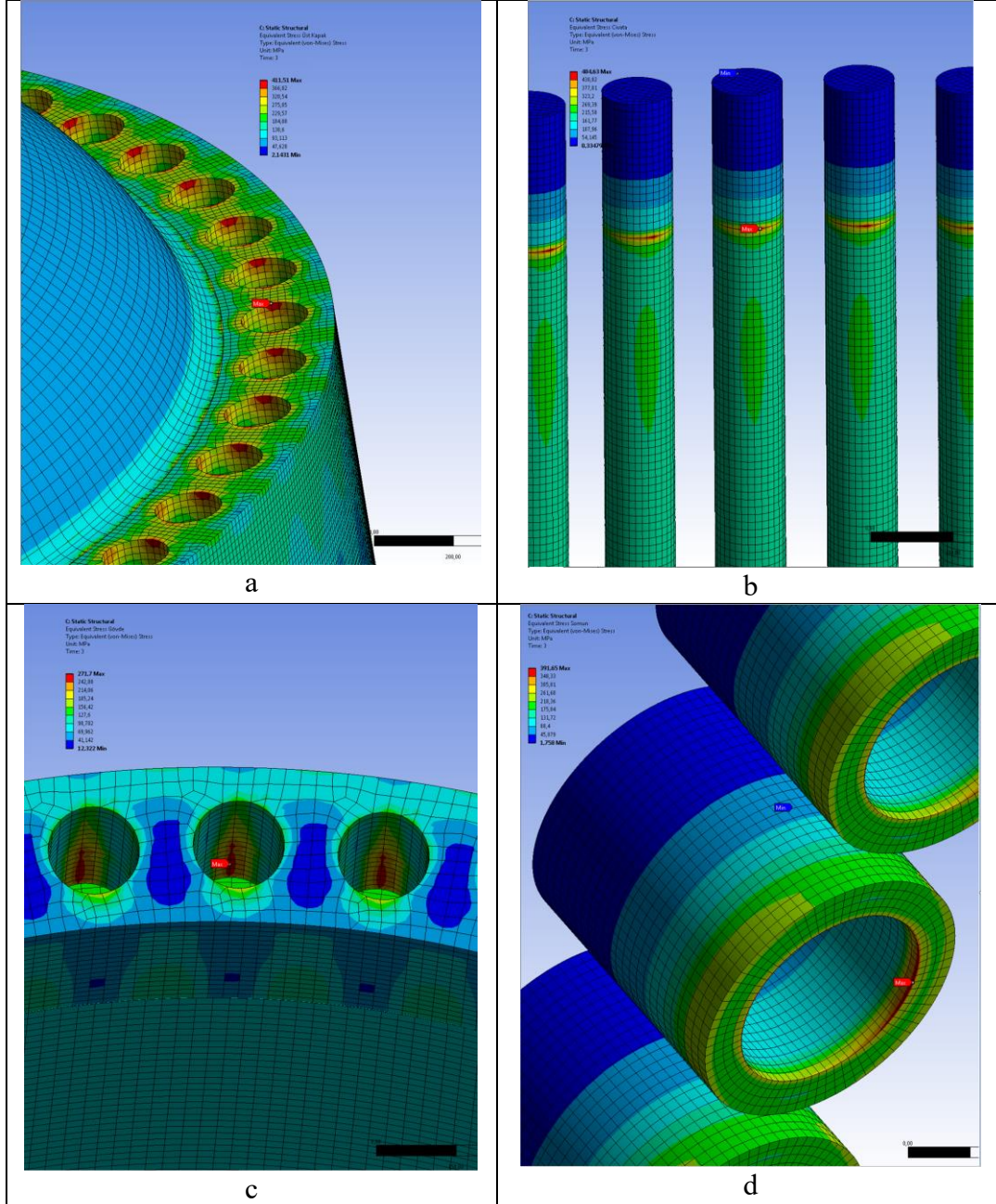
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 9'a ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.37).



Şekil 5.37. Durum 9 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 9’da gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.38’de verilmektedir.



Şekil 5.38. Durum 9 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

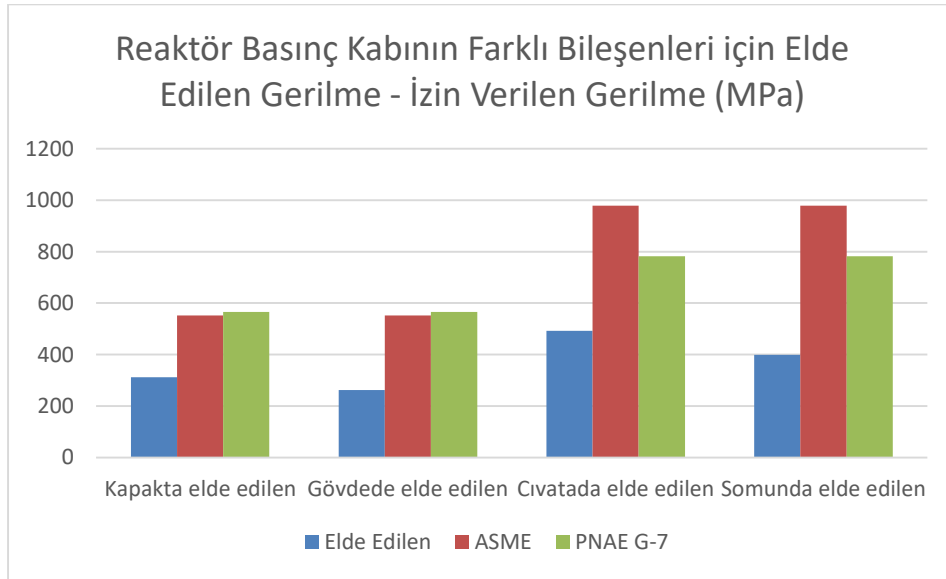
### Durum 10

Durum 10’a ait analiz sonuçları Çizelge 5.19’da verilmektedir.

Çizelge 5.19. Durum 10'a ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 10    | Kapak  | 311,43                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 10    | Gövde  | 261,48                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 10    | Cıvata | 492,53                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |
| 10    | Somun  | 398,63                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

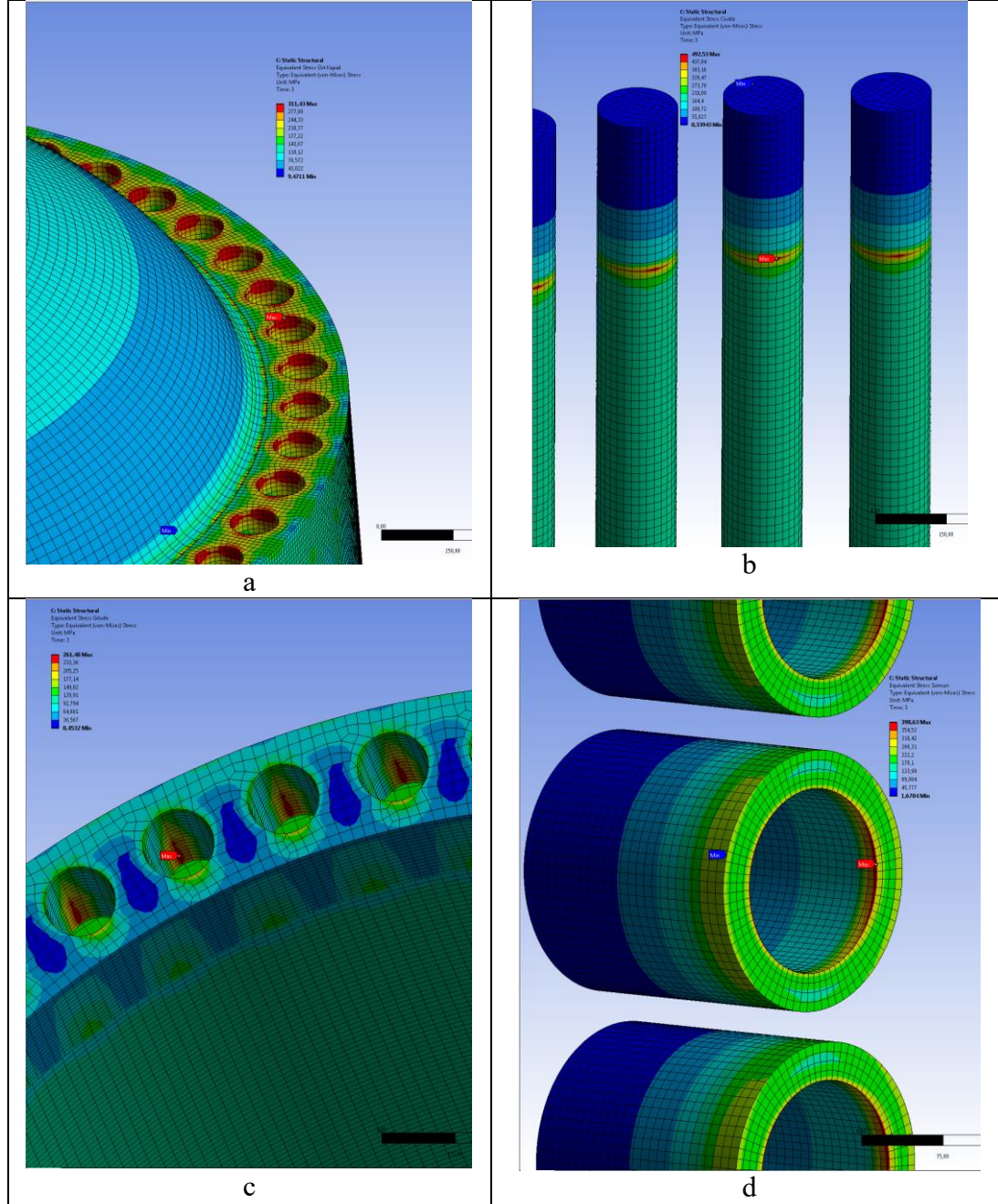
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 10'a ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.39).



Şekil 5.39. Durum 10 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 10'da gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.40'da verilmektedir.



Şekil 5.40. Durum 10 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

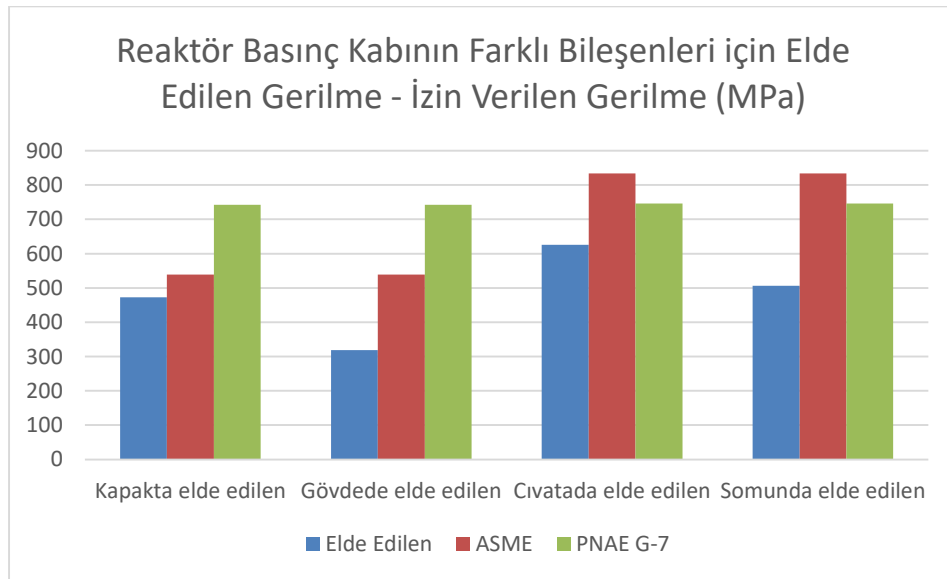
### Durum 11

Durum 11'e ait analiz sonuçları Çizelge 5.20'de verilmektedir.

Çizelge 5.20. Durum 11'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 11    | Kapak  | 473,14                             | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 11    | Gövde  | 319,2                              | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 11    | Cıvata | 625,46                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |
| 11    | Somun  | 505,87                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |

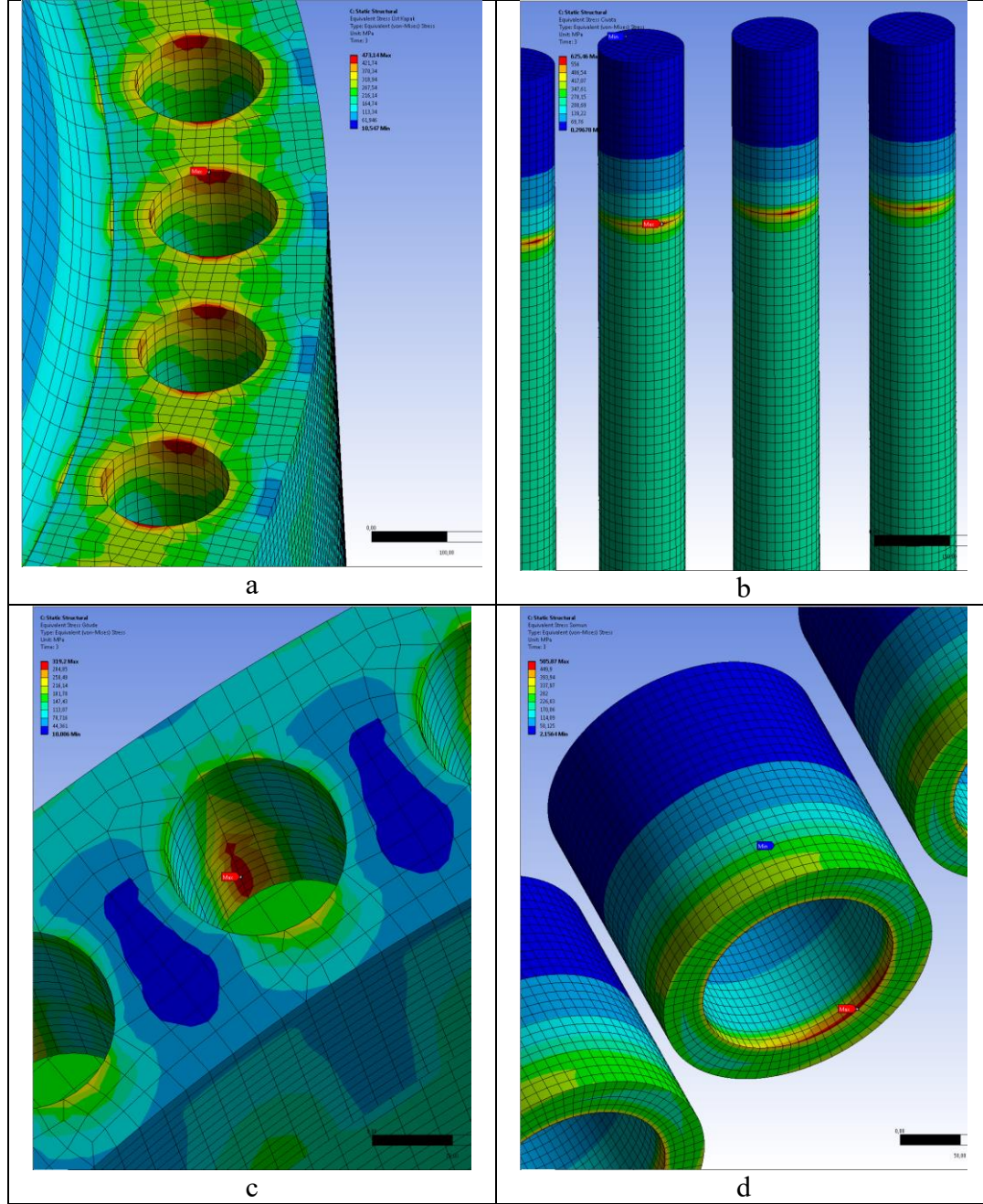
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 11'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.41).



Şekil 5.41. Durum 11 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 11’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.42’de verilmektedir.



Şekil 5.42. Durum 11 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) civatada (c) gövdede (d) somunda

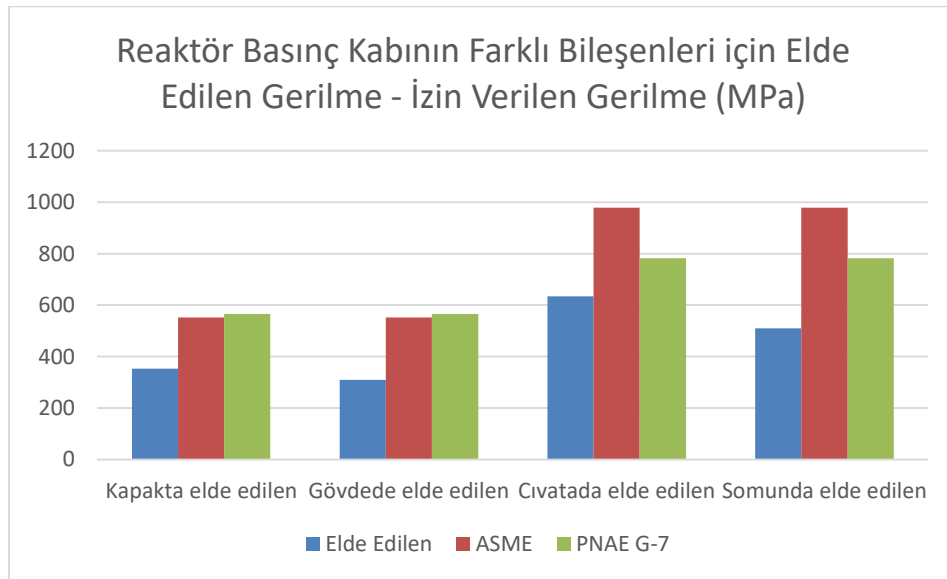
### Durum 12

Durum 12’ye ait analiz sonuçları Çizelge 5.21’de verilmektedir.

Çizelge 5.21. Durum 12'ye ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 12    | Kapak  | 352,23                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 12    | Gövde  | 308,87                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 12    | Cıvata | 634,44                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |
| 12    | Somun  | 509,84                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

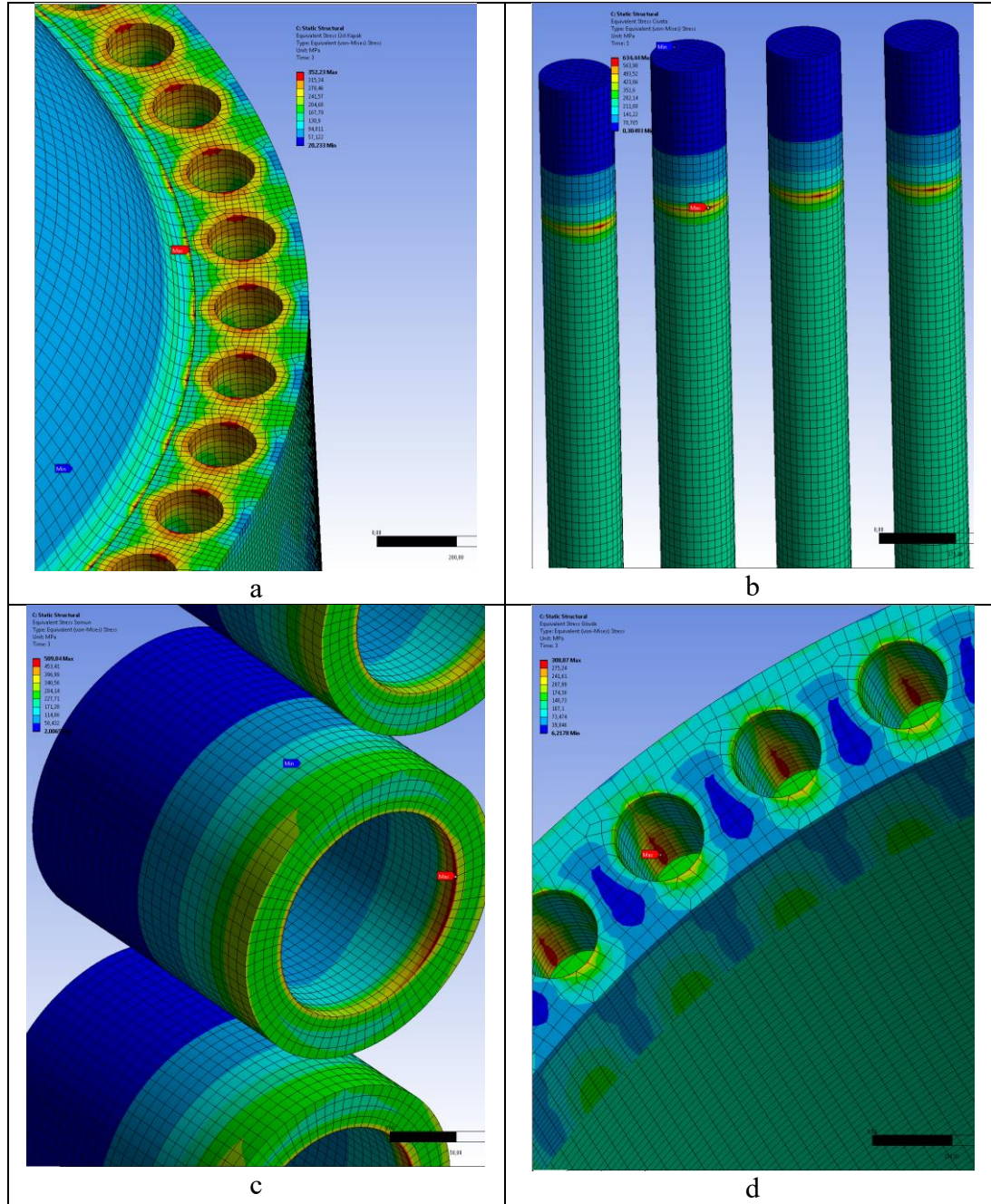
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 12'ye ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.43).



Şekil 5.43. Durum 12 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek

gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 12’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.44’de verilmektedir.



Şekil 5.44. Durum 12 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

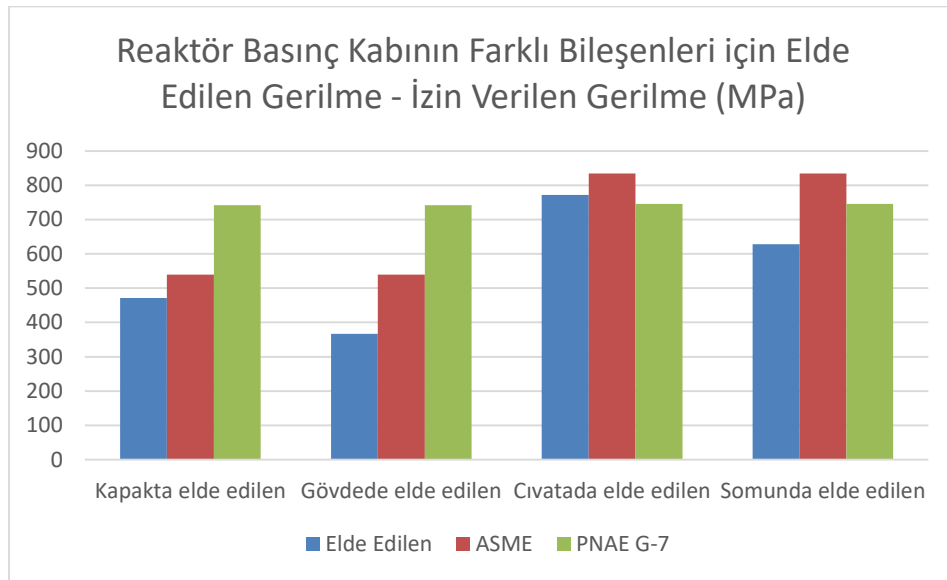
### Durum 13

Durum 13’e ait analiz sonuçları Çizelge 5.22’de verilmektedir.

Çizelge 5.22. Durum 13'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 13    | Kapak  | 471,63                             | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 13    | Gövde  | 366,56                             | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 13    | Cıvata | 771,8                              | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Kaldı |
| 13    | Somun  | 627,72                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |

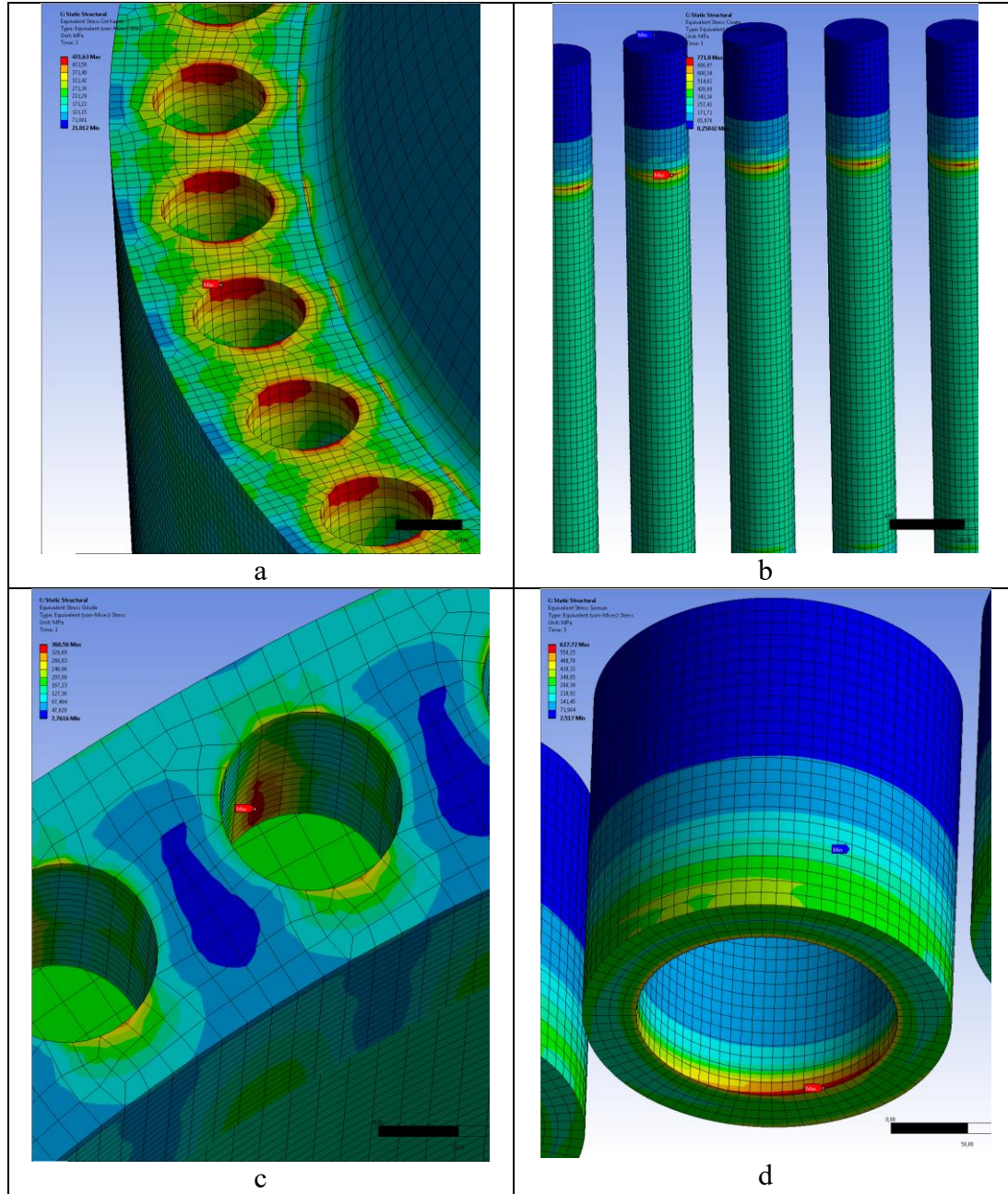
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 13'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.45).



Şekil 5.45. Durum 13 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme

değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 13'de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.46 verilmektedir.



Şekil 5.46. Durum 13 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) civatada (c) gövdede (d) somunda

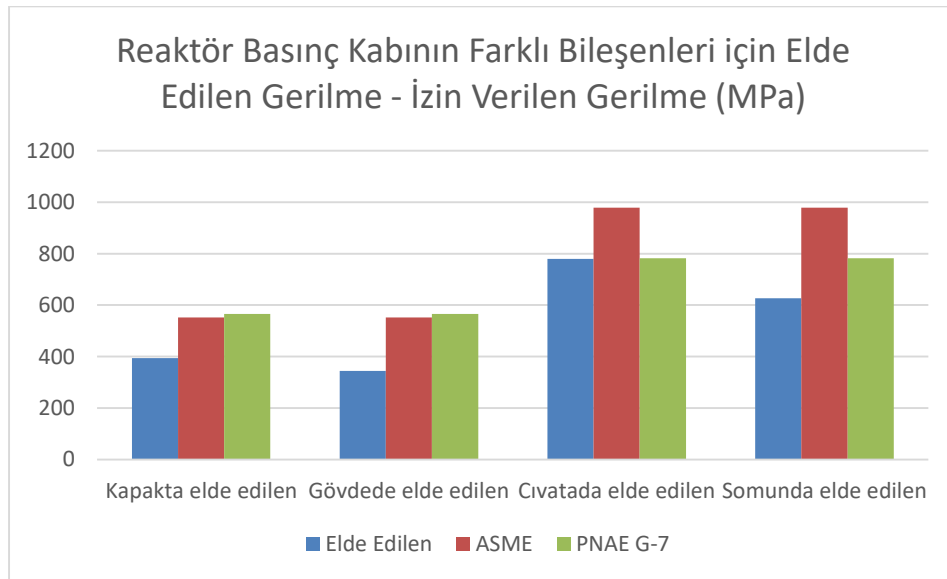
#### Durum 14

Durum 14'e ait analiz sonuçları Çizelge 5.23'de verilmektedir.

Çizelge 5.23. Durum 14'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 14    | Kapak  | 393,58                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 14    | Gövde  | 344,3                              | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 14    | Cıvata | 778,97                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |
| 14    | Somun  | 626,06                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

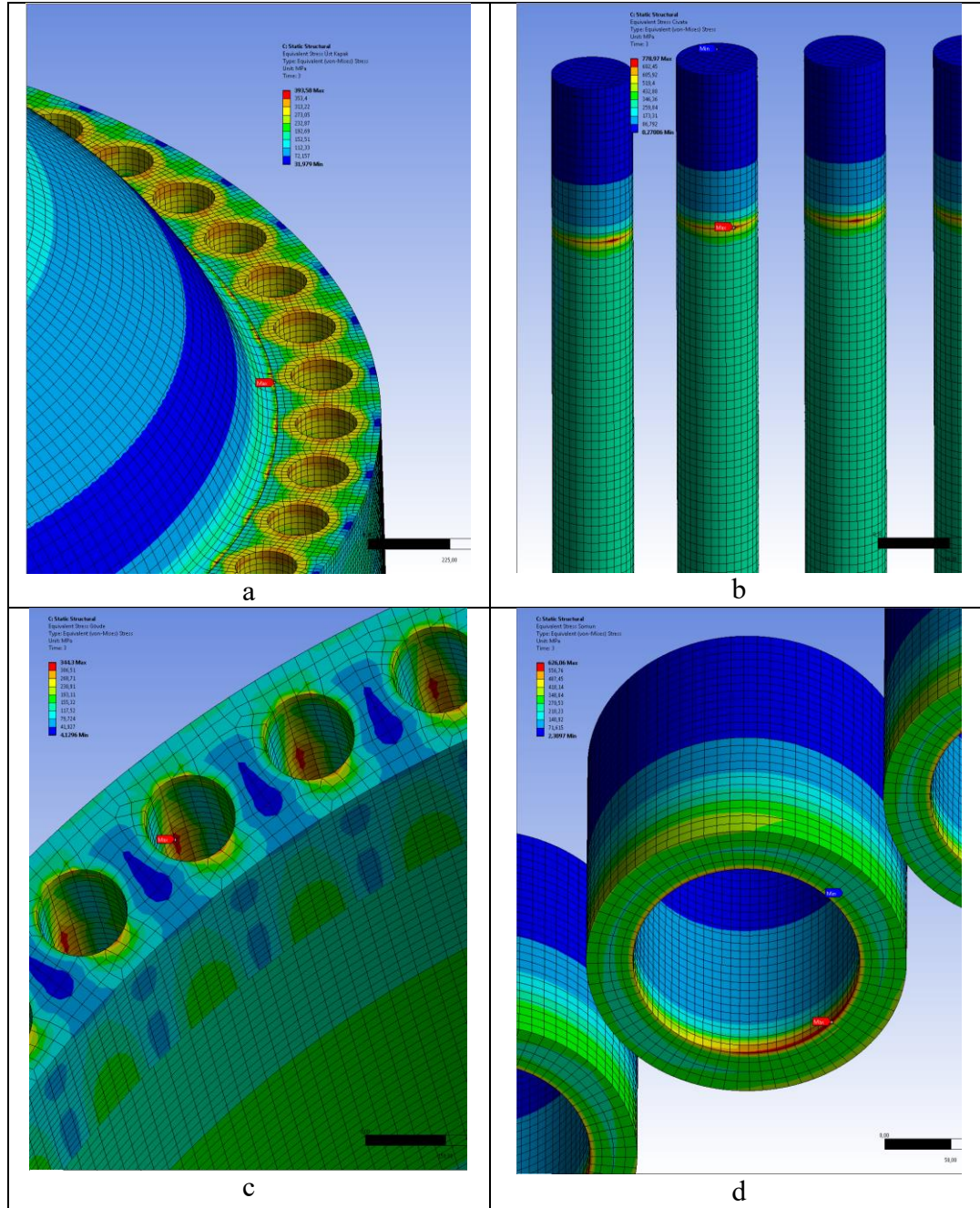
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 14'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.47).



Şekil 5.47. Durum 14 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek

gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 14’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.48 verilmektedir.



Şekil 5.48. Durum 14 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvata (c) gövdede (d) somunda

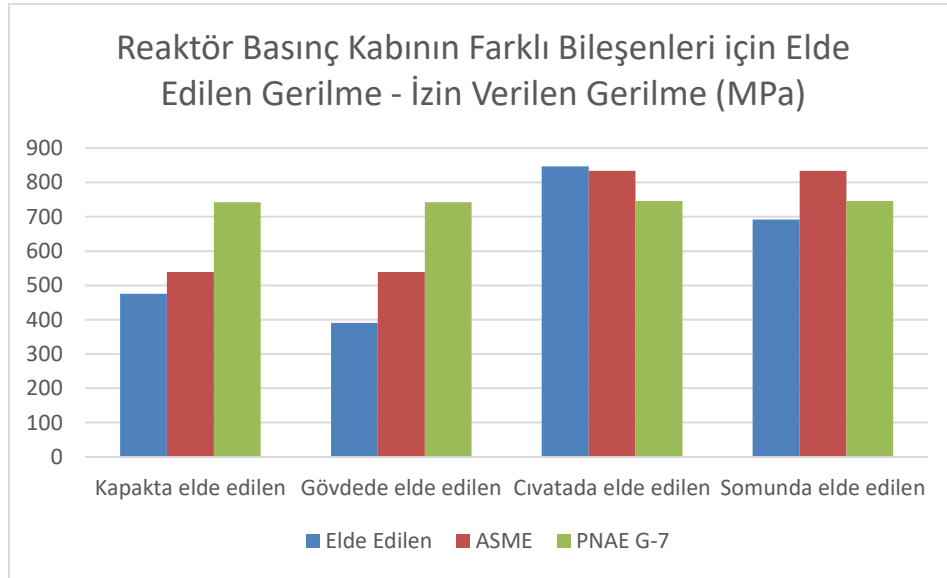
### Durum 15

Durum 15’e ait analiz sonuçları Çizelge 5.24’de verilmektedir.

Çizelge 5.24. Durum 15'e ait sonuçlar

| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 15    | Kapak  | 475,7                              | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 15    | Gövde  | 390,21                             | $P_L + P_b + Q=539$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=742$ | Geçti |
| 15    | Cıvata | 847,19                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Kaldı | $2,0[\sigma]=746$   | Kaldı |
| 15    | Somun  | 691,54                             | $P_L + P_b + Q=834$                | Geçti | $2,0[\sigma]=746$   | Geçti |

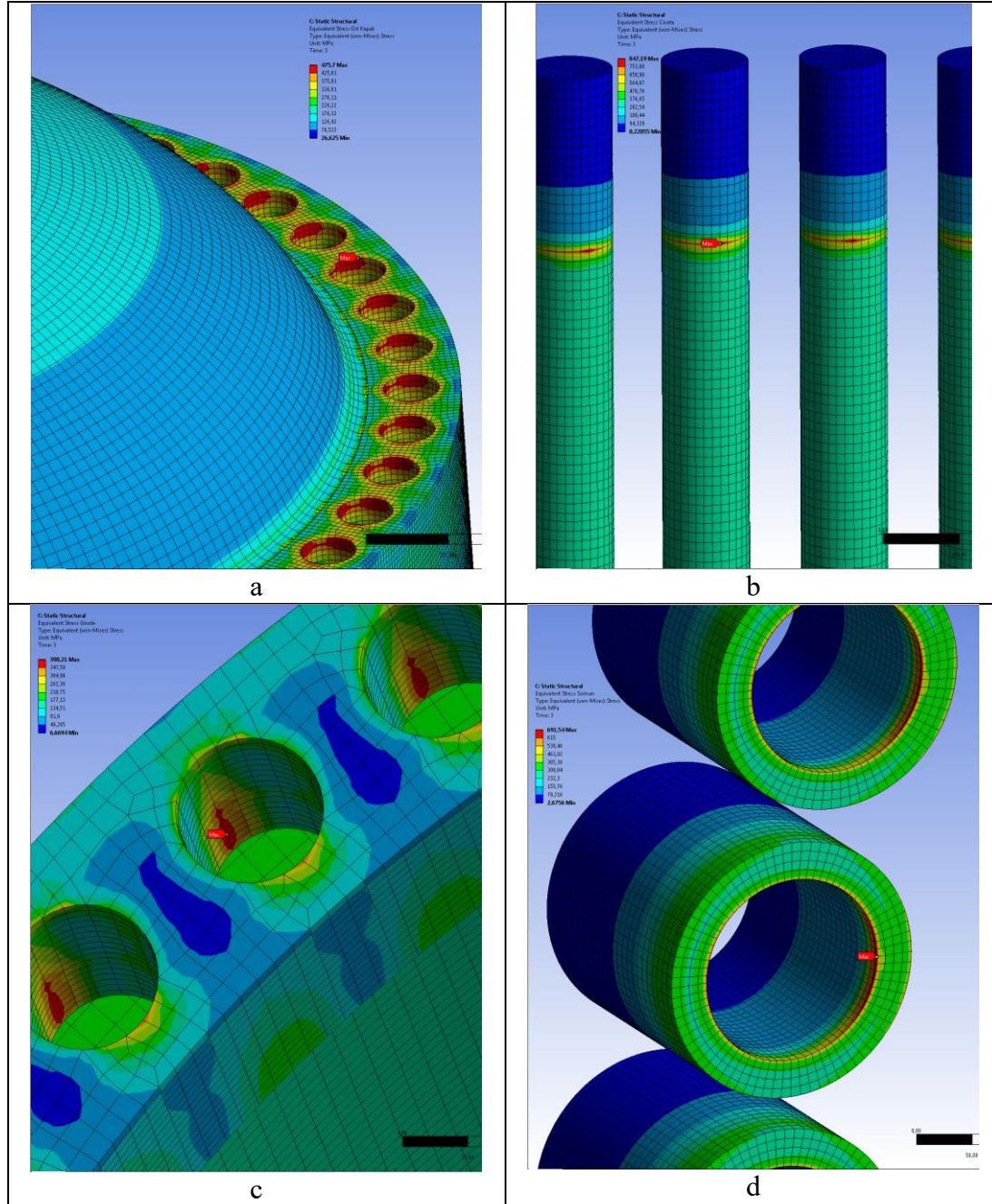
Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 15'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin hem ASME hem de PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerlerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.49).



Şekil 5.49. Durum 15 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde

ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 15’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.50’de verilmektedir.



Şekil 5.50. Durum 15 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

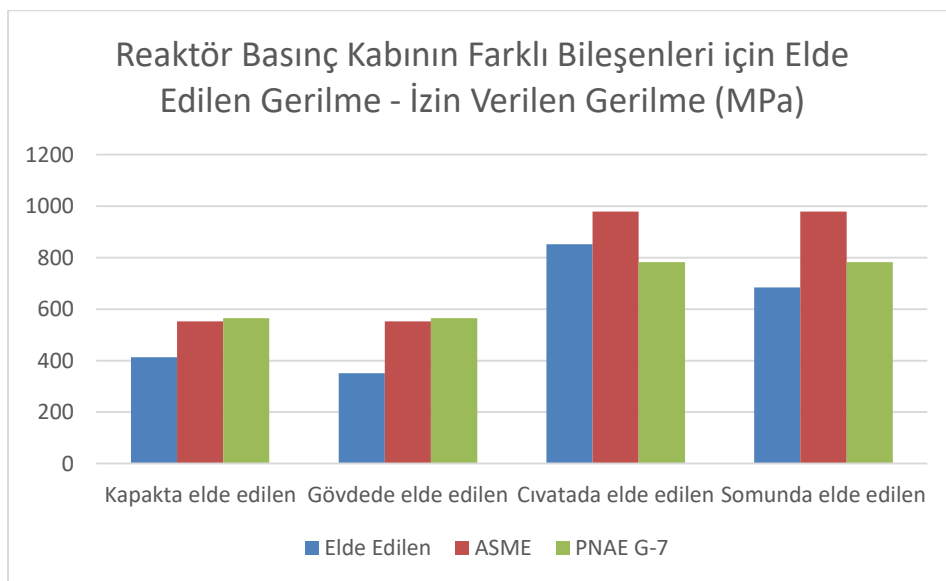
Durum 16

Durum 16'ya ait analiz sonuçları Çizelge 5.25'de verilmektedir.

Çizelge 5.25. Durum 16'ya ait sonuçlar

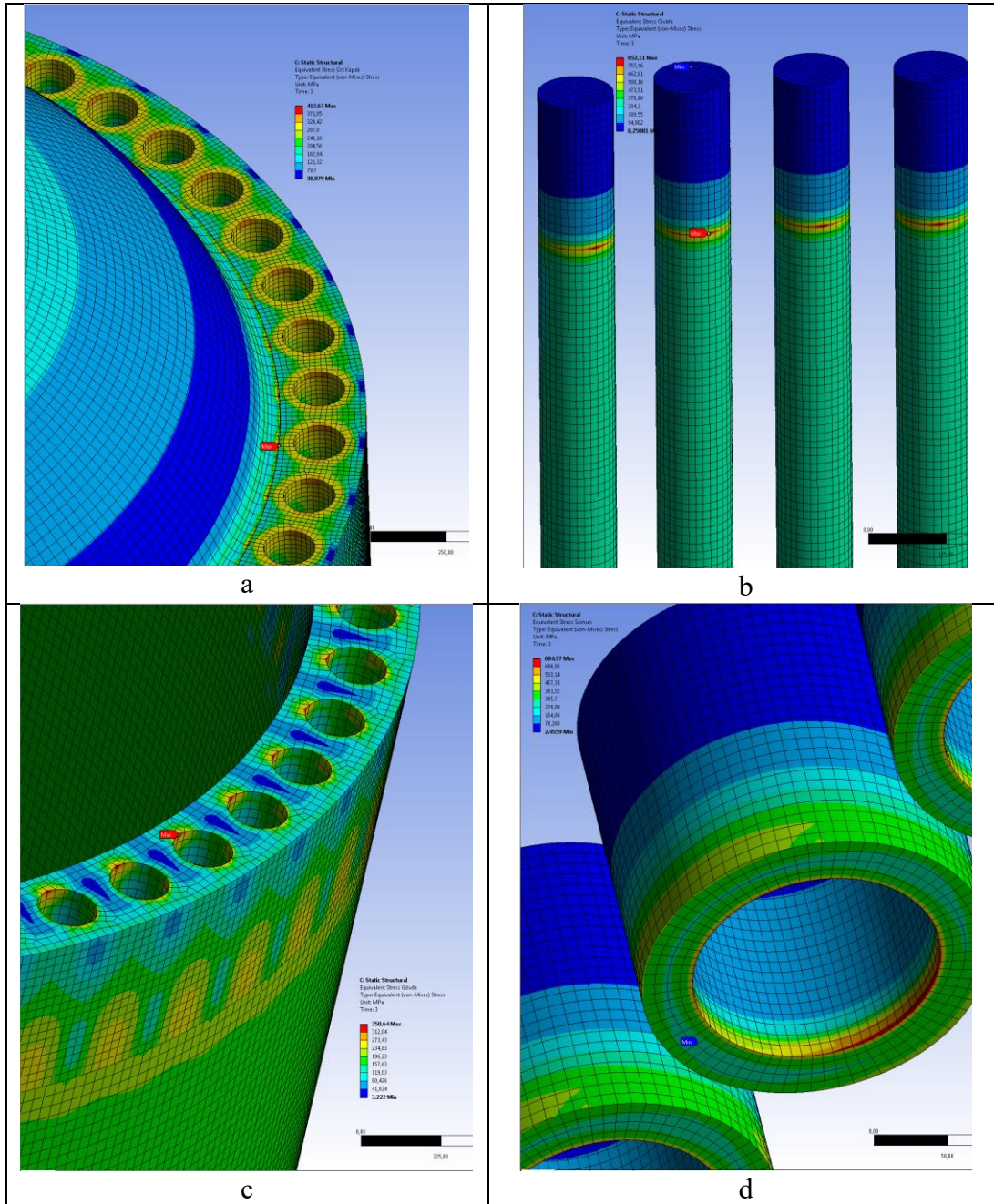
| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 16    | Kapak  | 412,67                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 16    | Gövde  | 350,64                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 16    | Cıvata | 852,11                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Kaldı |
| 16    | Somun  | 684,77                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 16'ya ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu; ancak cıvataya ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerinin üstünde olduğu görülmüştür (Şekil 5.51).



Şekil 5.51. Durum 16 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için kapak ve cıvata ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 16'da gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.52'de verilmektedir.



Şekil 5.52. Durum 16 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

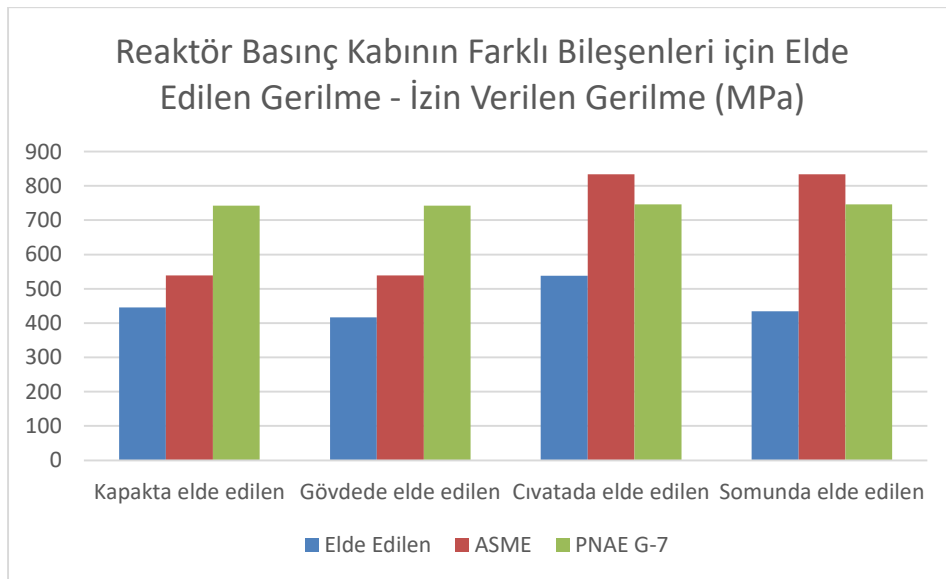
Durum 17

Durum 17'ye ait analiz sonuçları Çizelge 5.26'da verilmektedir.

Çizelge 5.26. Durum 17'ye ait sonuçlar

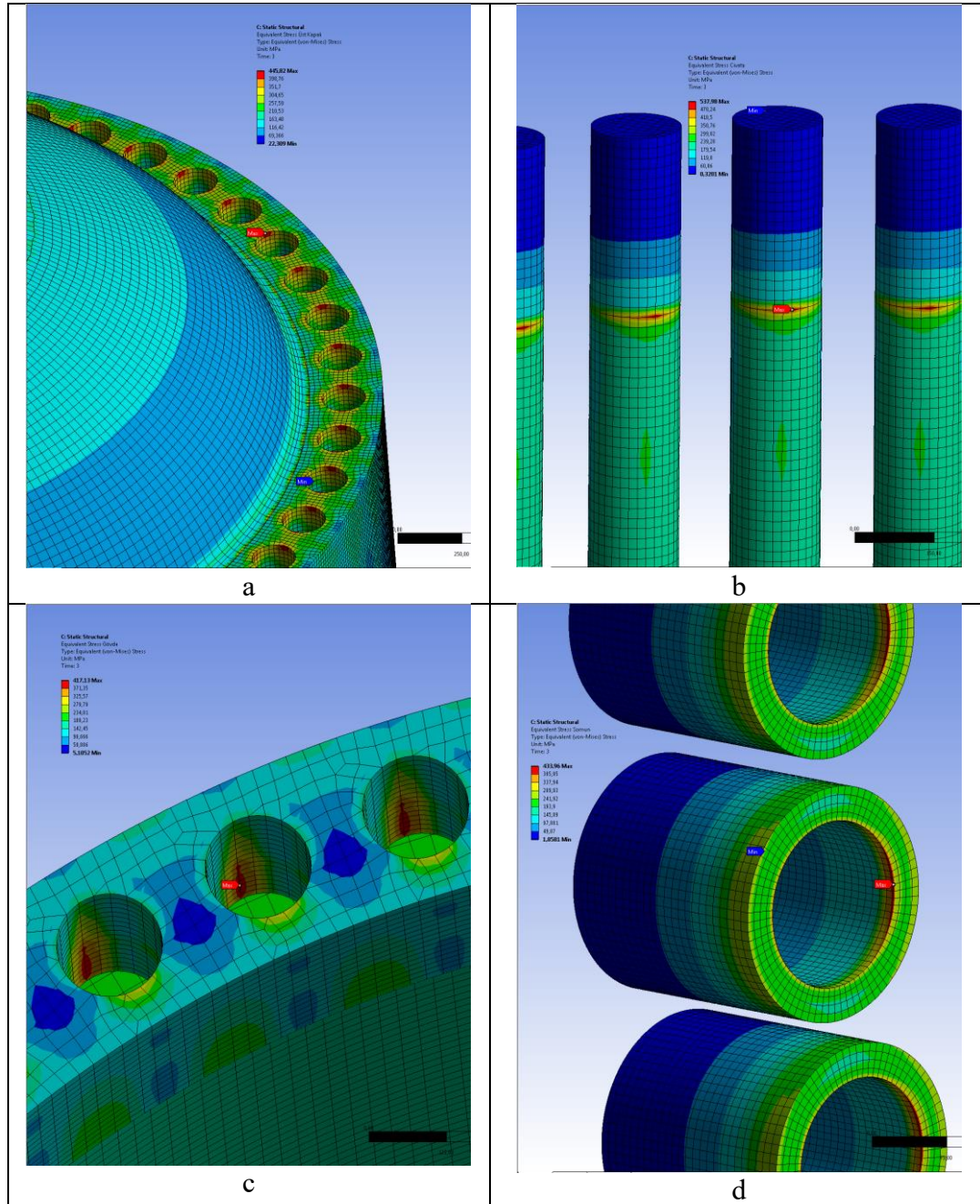
| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 17    | Kapak  | 445,82                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 17    | Gövde  | 417,13                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 17    | Cıvata | 537,93                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |
| 17    | Somun  | 433,96                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 17'ye ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.53).



Şekil 5.53. Durum 17 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için cıvata ve somun ile birleştiği noktada; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 17’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.54’de verilmektedir.



Şekil 5.54. Durum 17 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

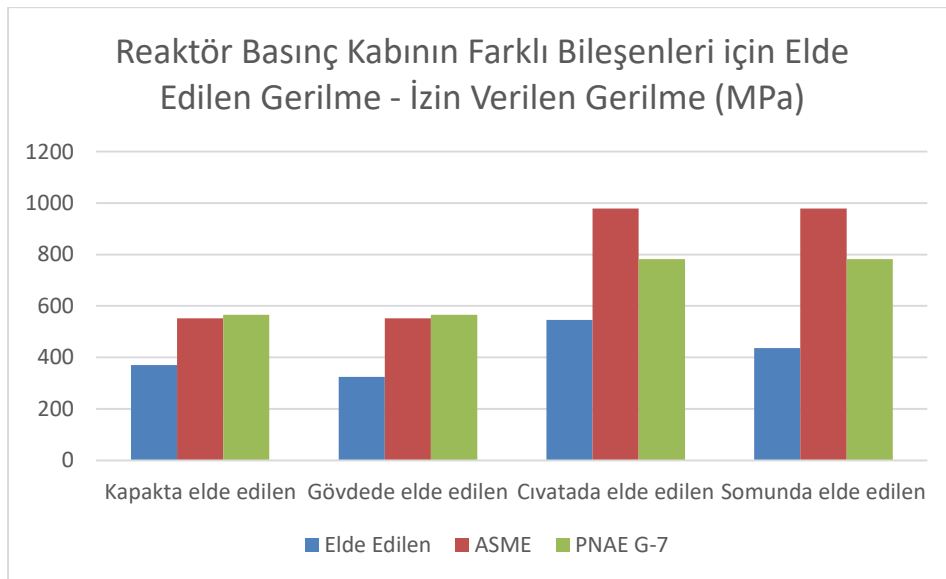
Durum 18

Durum 18'e ait analiz sonuçları Çizelge 5.27'de verilmektedir.

Çizelge 5.27. Durum 18'e ait sonuçlar

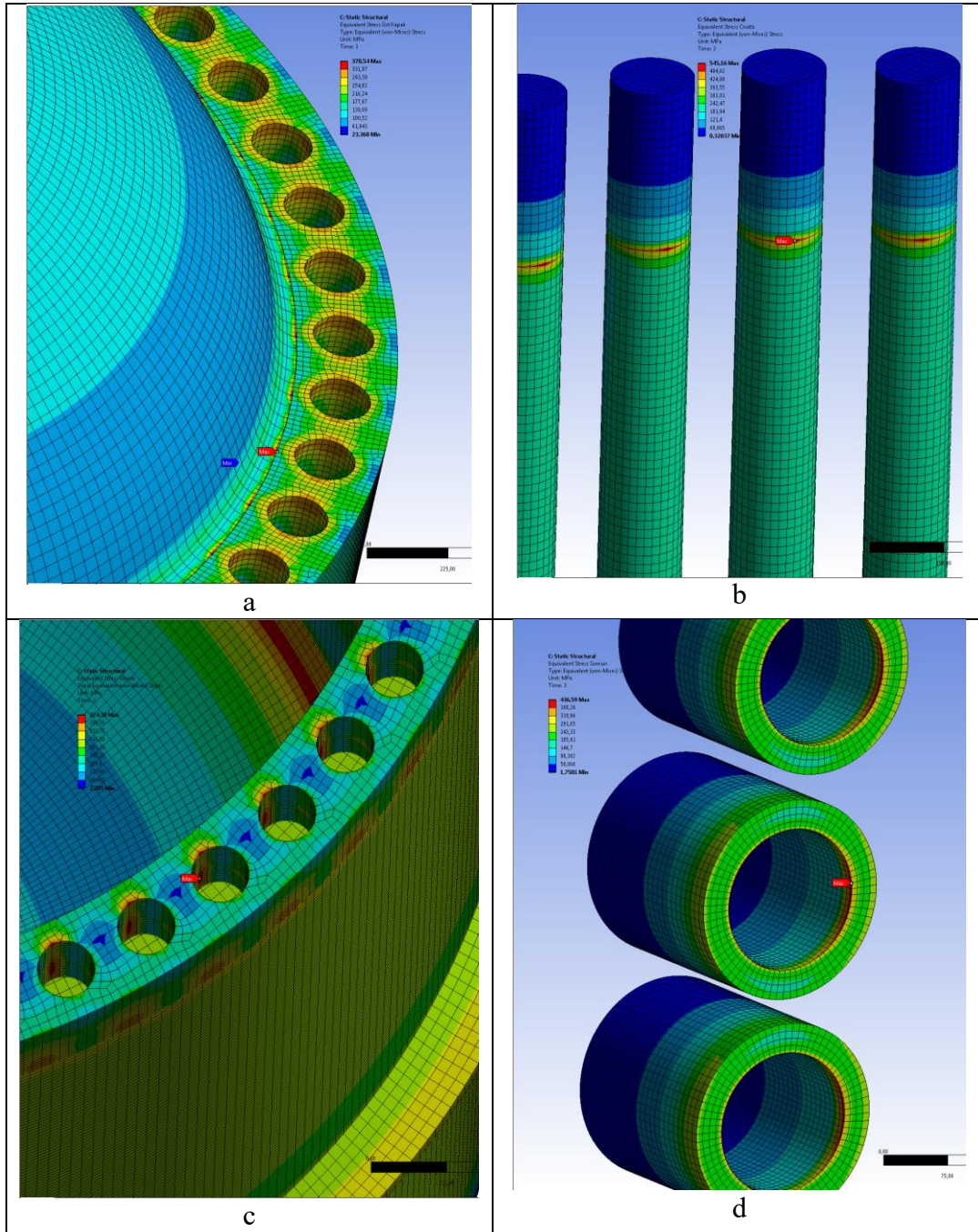
| Durum | Parça  | Elde Edilen Maksimum Gerilme (MPa) | İzin verilen gerilme (MPa) / Sonuç |       |                     |       |
|-------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------|---------------------|-------|
|       |        |                                    | ASME                               |       | PNAE G-7            |       |
| 18    | Kapak  | 370,54                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 18    | Gövde  | 324,38                             | $P_L + P_b + Q=552$                | Geçti | $(\sigma)_{RV}=565$ | Geçti |
| 18    | Cıvata | 545,16                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |
| 18    | Somun  | 436,59                             | $P_L + P_b + Q=979$                | Geçti | $2,0[\sigma]=782$   | Geçti |

Normal işletmeden sapma durumu olarak izin verilen gerilme değerleri belirlenen Durum 18'e ait analiz sonuçlarına göre kapak, gövde, cıvata ve somuna ait elde edilen en yüksek eş değer gerilmelerin ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında olduğu görülmüştür (Şekil 5.55).



Şekil 5.55. Durum 18 - Reaktör basınç kabının farklı bileşenleri için elde edilen gerilme - izin verilen gerilme

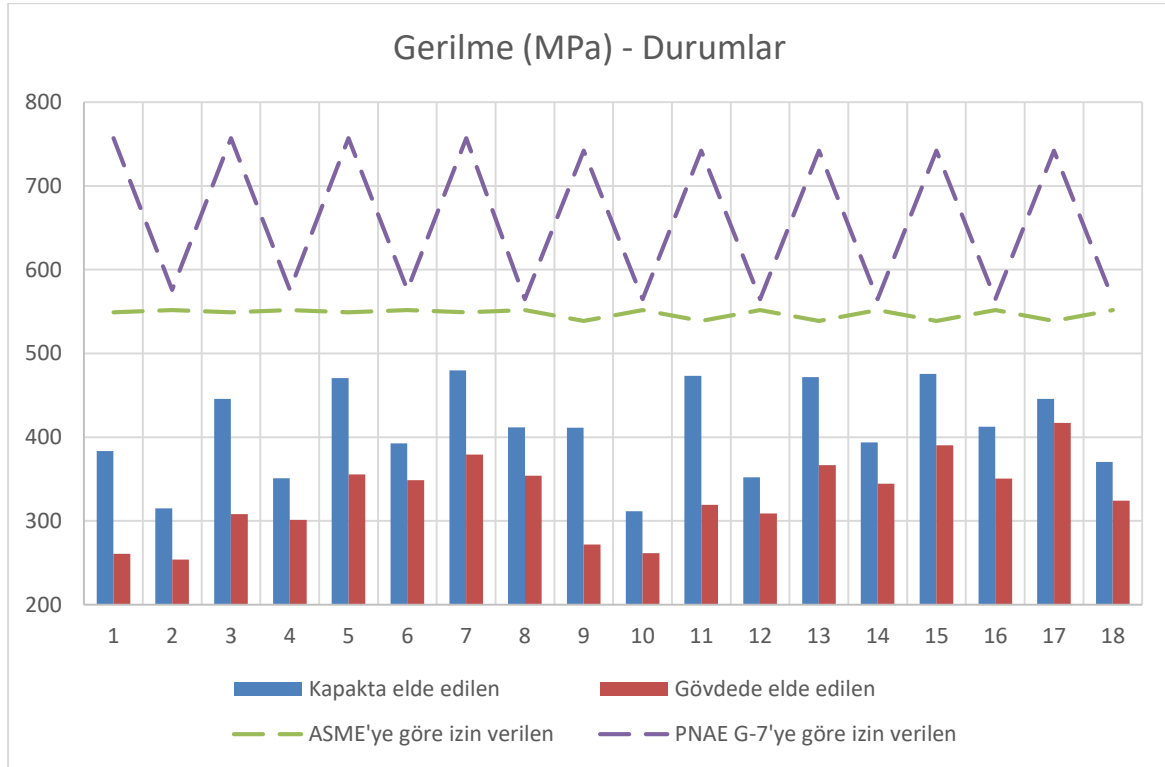
Ekipmanlar üzerinde oluşan gerilme dağılımı incelendiğinde en yüksek gerilmenin kapak için kapağın alt kısmı ile orta kısmının birleşim yerinde; cıvata için kapak ve somun ile temas ettiği yüzeylerden reaktör basınç kabının merkezine bakan yüzeyinde; gövde için cıvatanın gövde ile bağlandığı deliğin dış tarafa bakan yüzeyinde; somun için cıvatanın en yüksek gerilme değerinin olduğu bölgenin karşı yüzeyinde olduğu görülmüştür. Durum 18’de gerçekleştirilen analize ait resimler Şekil 5.56’da verilmektedir.



Şekil 5.56. Durum 18 - Hesaplanan eş değer gerilmeler (a) kapakta (b) cıvatada (c) gövdede (d) somunda

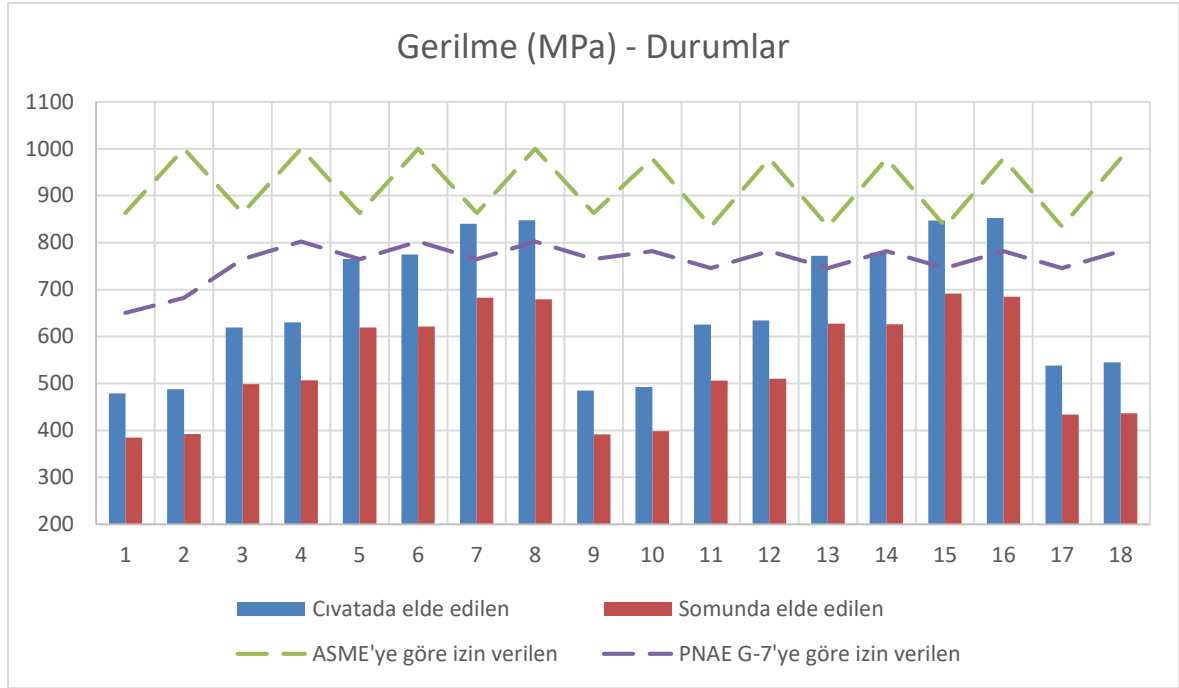
### 5.9. Değerlendirme

Kapak ve gövdeye (15H2NMFA ve SA-508 Grade 3 Class 1 malzemeleri için) uygulanan yüklerin sonucu olarak elde edilen eş değer gerilmeler bütün durumlar için hem ASME hem de PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında bulunmaktadır (Şekil 5.57).



Şekil 5.57. Kapak ve Gövde için Gerilme – Durumlar

Cıvata ve somuna uygulanan yüklerin karşılığı olarak elde edilen eş değer gerilme sonuçları ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerleri ile kıyaslandığında cıvatanın Durum 7, 8, 13, 15 ve 16'da başarılı olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 5.58).



Şekil 5.58. Cıvata ve Somun için Gerilme – Durumlar



## 6. ANALİTİK HESAPLAMA

Sonlu elemanlar analizinin sonuçlarını kıyaslamak için teorik hesaplamalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bölümde basınç kabı için gerekli minimum kalınlık, izin verilen gerilme ve maksimum gerilme değerlerini bulmak için analitik hesaplamalar sunulmuştur. Bu hesaplamalar, malzeme ve basınç değişkenleri ile modelde oluşan gerilmelerin değişiminin anlaşılmasına da yardımcı olacaktır. Bu bölümde ince cidarlı silindir teorisine göre ASME [45, 66] ve PNAE G-7 [61] kodlarına göre basınçlı kap tasarımı ele alınmıştır.

### 6.1. ASME Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Gövdesi Tasarımı

ASME koduna göre iç basınç yükü altındaki minimum gövde kalınlığı boylamsal gerilmeye bağlı cidar kalınlığı ve çevresel gerilmeye bağlı cidar kalınlığı olarak ikiye ayrılmıştır. Burada seçilecek olan cidar kalınlığı bu iki formülden elde edilen cidar kalınlığı değerinden az olmamalıdır.

#### 6.1.1. Çevresel gerilmeye bağlı cidar kalınlığı

Bu formül kalınlığın iç yarıçapın yarısını geçmediği ya da basıncın 0,385SE den küçük olduğu durumlarda uygulanır [45, 66].

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad (6.1)$$

t : Minimum gereken cidar kalınlığı

P : Tasarım iç basıncı

R : Gövde iç yarıçapı

S : İzin verilen maksimum gerilme

E : Silindirik veya küresel gövdelerdeki uygun mafsallık için bağlantı verimliliği veya açıklıklar arasındaki bağlantıların verimini ifade eder. Hangi değer daha küçük ise o seçilir.

### 6.1.2. Boylamsal gerilmeye bağılı cidar kalınlığı

Kalınlık, iç yarıçapın yarısını geçmiyorsa veya iç basınç 1.25SE'yi geçmiyorsa, aşağıdaki formül kullanılır [45, 66].

$$t = \frac{P \cdot R}{2 \cdot S \cdot E + 0,4 \cdot P} \quad (6.2)$$

### 6.2. ASME Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Tabanı Tasarımı

ASME'ye göre iç basınç altındaki cidar kalınlığı aşağıdaki formüle göre hesaplanır [45, 66].

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P} \quad (6.3)$$

L : Dış bükey ya da ya da yarı küre tabanların iç yarıçapı

Denklem 6.3'deki dışbükey tabanlar için L/r taban oran katsayısı M, denklem 6.4 ile hesaplanır.

$$M = \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right) \quad (6.4)$$

### 6.3. PNAE G-7 Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Gövdesi Tasarımı

İç veya dış basınç altında çalıştırılacak olan basınç kaplarının silindirik veya konik gövde cidar kalınlığı aşağıdaki formülle belirlenir [61].

$$S_R = \frac{P \cdot D}{2\varphi[\sigma] - P} \quad (6.5)$$

$\varphi$  : Tasarım güç azaltma indeksi

#### 6.4. PNAE G-7 Koduna Göre İç Basınç Altında Basınç Kabı Tabanı Tasarımı

İç veya dış basınç altında çalıştırılacak olan eliptik veya dış bükey tabanlara ait cidar kalınlığı aşağıdaki formülle belirlenir [61].

$$S_R = \frac{P \cdot D}{4\phi[\sigma] - P} \times \frac{D}{2H} \quad (6.6)$$

#### 6.5. İnce Cidarlı Basınç Kaplarındaki Gerilmeler

Cidar kalınlığının yarıçapın 10'da 1'i olduğu durumlarda basınç kapları ince cidarlı olarak kabul edilir [46]. Bu basınç kaplarına iç basınç uygulandığında çevresel (Hoop) ve boylamsal gerilmeler oluşabilir. Bu gerilmeler bu tezin 3.6'ncı bölümünde incelenmiş ve formülleri verilmiştir.

#### 6.6. Analitik Sonuçların Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları ile Karşılaştırılması

##### 6.6.1. Cidar kalınlığı karşılaştırılması

Açık kaynaklardan [6-11] faydalanılarak tasarlanmış reaktör basınç kabına ait gövde ve dış bükey taban (torispherical) cidar kalınlığı farklı iç basınç değerleri ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre 15H2NMFA ve SA-508 Grade 3 Class 1 malzemeleri için hesaplanmış izin verilen en düşük cidar kalınlıkları ile kıyaslanmıştır (Çizelge 6.1). Gerçekleştirilen kıyaslama sonucunda tasarlanan modele ait cidar kalınlığının uygulanan bütün iç basınç değerleri için başarılı olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.1. Cidar kalınlıklarının analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması

|   | Malzeme/<br>Bileşen/<br>İç Basınç<br>(MPa) | ASME                                                       |                                                           | PNAE<br>G-7                                   | Mevcut<br>Cidar<br>Kalınlığı<br>(mm) | Sonuç |             |
|---|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-------|-------------|
|   |                                            | Boylamsal<br>Gerilmeye<br>Bağlı Cidar<br>Kalınlığı<br>(mm) | Çevresel<br>Gerilmeye<br>Bağlı Cidar<br>Kalınlığı<br>(mm) | İzin<br>Verilen<br>Cidar<br>Kalınlığı<br>(mm) |                                      | ASME  | PNAE<br>G-7 |
| 1 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>17                  | 81,97                                                      | 175,44                                                    | 150,78                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 2 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>21                  | 100,86                                                     | 219,44                                                    | 187,92                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 3 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>25                  | 119,62                                                     | 264,55                                                    | 225,73                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 4 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>27                  | 128,94                                                     | 287,54                                                    | 244,90                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 5 | 15H2NMFA/<br>Taban/<br>17                  | 155,5                                                      |                                                           | 156,6                                         | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 6 | 15H2NMFA/<br>Taban/<br>21                  | 192,47                                                     |                                                           | 194,29                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 7 | 15H2NMFA/<br>Taban/<br>25                  | 229,58                                                     |                                                           | 232,32                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |
| 8 | 15H2NMFA/<br>Taban/<br>27                  | 248,2                                                      |                                                           | 251,45                                        | 300                                  | Geçti | Geçti       |

Çizelge 6.1. (devam) Cidar kalınlıklarının analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması

|    |                                            |        |        |        |     |       |       |
|----|--------------------------------------------|--------|--------|--------|-----|-------|-------|
| 9  | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/ Gövde/<br>17 | 81,97  | 175,44 | 167,08 | 300 | Geçti | Geçti |
| 10 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/Gövde/<br>21  | 100,86 | 219,44 | 208,44 | 300 | Geçti | Geçti |
| 11 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/Gövde/<br>25  | 119,62 | 264,55 | 250,63 | 300 | Geçti | Geçti |
| 12 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/Gövde/<br>27  | 128,94 | 287,54 | 272,04 | 300 | Geçti | Geçti |
| 13 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/ Taban/<br>17 | 172,56 |        | 173,18 | 300 | Geçti | Geçti |
| 14 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/ Taban/<br>21 | 213,63 |        | 214,97 | 300 | Geçti | Geçti |
| 15 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/ Taban/<br>25 | 254,88 |        | 257,16 | 300 | Geçti | Geçti |
| 16 | SA-508<br>Grade 3 Class<br>1/ Taban/<br>27 | 275,58 |        | 278,41 | 300 | Geçti | Geçti |

### 6.6.2. Normal gerilme karşılaştırılması

Reaktör basınç kabına ait gövde üzerindeki normal gerilmeler farklı iç basınç değerleri ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre 15H2NMFA ve SA-508 Grade 3 Class 1 malzemeleri için hesaplanmış, izin verilen en düşük normal gerilme değerleri SEA ile elde edilen en yüksek normal gerilmeler ile kıyaslanmıştır (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2. Normal gerilmelerin analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması

|   | Malzeme/<br>İç Basınç<br>(MPa)                | İzin Verilen<br>Gerilme (MPa) |                                 | SEA ile Elde<br>Edilen<br>Maksimum<br>Gerilme (MPa) |              | Analitik     |              | Sonuç |             |
|---|-----------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------------|
|   |                                               | ASME<br>P <sub>m</sub>        | PNAE<br>G-7<br>(σ) <sub>1</sub> |                                                     |              | Çev.<br>Ger. | Boy.<br>Ger. | ASME  | PNAE<br>G-7 |
|   |                                               |                               |                                 | Çev.<br>Ger.                                        | Boy.<br>Ger. |              |              |       |             |
| 1 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>17                     | 204                           | 234                             | 120,2                                               | 50,8         | 113,3        | 56,7         | Geçti | Geçti       |
| 2 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>21                     | 204                           | 234                             | 146,3                                               | 63,1         | 140          | 70           | Geçti | Geçti       |
| 3 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>25                     | 204                           | 234                             | 173,2                                               | 74,8         | 166,7        | 83,3         | Geçti | Geçti       |
| 4 | 15H2NMFA/<br>Gövde/<br>27                     | 204                           | 234                             | 193,5                                               | 82,9         | 180          | 90           | Geçti | Geçti       |
| 5 | SA-508<br>Grade 3<br>Class 1/<br>Gövde/<br>17 | 184                           | 212                             | 120,3                                               | 50,9         | 113,3        | 56,7         | Geçti | Geçti       |

Çizelge 6.2. (devam) Normal gerilmelerin analitik hesaplama ve sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre karşılaştırılması

|   |                                              |     |     |       |      |       |      |              |       |
|---|----------------------------------------------|-----|-----|-------|------|-------|------|--------------|-------|
| 6 | SA-508<br>Grade 3<br>Class<br>1/Gövde/<br>21 | 184 | 212 | 147,2 | 62,7 | 140   | 70   | Geçti        | Geçti |
| 7 | SA-508<br>Grade 3<br>Class<br>1/Gövde/<br>25 | 184 | 212 | 176,3 | 75,3 | 166,7 | 83,3 | Geçti        | Geçti |
| 8 | SA-508<br>Grade 3<br>Class<br>1/Gövde/<br>27 | 184 | 212 | 191,3 | 81,1 | 180   | 90   | SEA<br>Kaldı | Geçti |

Genel membran gerilmesi katı bir bölüm boyunca ortalama birincil gerilme olarak ifade edilir, basınç veya mekanik yükler tarafından üretilir. Kapak-gövde kesişimleri, gövde taban kesişimleri, nozullar ve destekler gibi süreksizliklerden uzakta oluşurlar [45]. Bu bilgiler ışığında; temas noktalarının çevresinde elde edilen normal gerilme değerlerinin analitik hesaplamalardan farklı olduğu görülmüştür. Bu nedenle süreksizliklerden uzaktaki bölgelerden rastgele 5 nokta seçilmiş ve analitik hesap kısmına bu noktaların ortalaması yazılmıştır. Bu noktalara örnek olarak 17 MPa basınç altındaki SA-508 Grade 3 Class 1 malzemesi kullanılan gövdeye ait boylamsal gerilmeler Ek-5’de, çevresel (Hoop) gerilmeler ise Ek-6’da sunulmuştur.

Bu hesaplamalar ile normal gerilmelerin (çevresel ve boylamsal) analitik formülde olduğu gibi malzeme özelliklerinden bağımsız olduğu da gösterilmiştir.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tasarlanan bir reaktör basınç kabının sırasıyla 15H2NMFA - 38HN3MFA ve SA-508 Grade 3 Class 1 - SA-540 Grade B23 Class 3 malzemeleri kullanılarak belirlenen sınır şartlarında (sıcaklık, basınç ve cıvata öngerilmesi) ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilmeler baz alınarak dayanım performansı ölçülmüştür.

Kapak ve gövdeye (15H2NMFA ve SA-508 Grade 3 Class 1 malzemeleri için) uygulanan yüklerin sonucu olarak elde edilen eş değer gerilmeler bütün durumlar için hem ASME hem de PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerlerinin altında bulunmaktadır. Burada kapak ve gövde için her hangi bir iyileştirmeye ya da sınır şartlarında bir düzeltmeye gerek olmadığı söylenebilir.

Cıvata ve somuna (38HN3MFA ve SA-540 Grade B23 Class 3) uygulanan yüklerin karşılığı olarak elde edilen eş değer gerilme sonuçları ASME ve PNAE G-7 kodlarına göre izin verilen gerilme değerleri ile kıyaslandığında cıvatanın bazı durumlarda başarılı olmadığı tespit edilmiştir.

Cıvata için 38HN3MFA malzemesi kullanıldığında elde edilen gerilme değerlerinin 300 °C sıcaklık, 25 MPa iç basınç, 6900 kN cıvata öngerilmesi; 300 °C sıcaklık, 27 MPa iç basınç, 7450 kN cıvata öngerilmesi; 350 °C sıcaklık, 25 MPa iç basınç, 6900 kN cıvata öngerilmesi; yüklemelerinde PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerlerini geçtiği, 350 °C sıcaklık, 27 MPa iç basınç, 7450 kN cıvata öngerilmesi yüklemesinde ise hem ASME hem de PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerlerini geçtiği görülmüştür.

Cıvata için SA-540 Grade B23 Class 3 malzemesi kullanıldığında elde edilen gerilme değerlerinin 300 °C sıcaklık, 27 MPa iç basınç, 7450 kN ve 350 °C sıcaklık, 27 MPa iç basınç, 7450 kN yüklemeleri altında PNAE G-7 koduna göre izin verilen gerilme değerlerini geçtiği görülmüştür.

Modele normal işletme şartlarındaki cıvata ön gerilmesi 4700 kN sabit tutularak 350 °C'de 30 MPa iç basınç uygulanmış (Durum 17 ve 18) ve basınç kabının performansı incelenmiştir.

Bu tezin 6. Bölümünde incelendiği gibi normal gerilme değerleri dikkate alınarak izin verilen gerilme değeri SA-508 Grade 3 Class 1 malzemesinde 30 MPa için elde edilen genel membran gerilmesi değeri sınır değerini aşarken (analitik hesaplama ile elde edilen 200 MPa, ASME koduna göre izin verilen 184 MPa), 15H2NMFA malzemesi için çok az bir farkla sınırın altında (analitik hesaplama ile elde edilen 200 MPa, ASME koduna göre izin verilen 204 MPa) kalmaktadır. Reaktör basınç kabına tek başına uygulanan 30 MPa'lık yükün genel membran gerilmesi olarak izin verilen gerilme değerleri için sınır değerlerini aşarken, gerilmelerin toplamı ile tanımlanan azami indirgenmiş gerilme aralığı için (civata öngerilmesi + iç basınç + sıcaklık) izin verilen gerilme sınır değerlerini aşmadığı görülmektedir (Durum 17 ve 18). Civata ön gerilmesi Eşitlik 5.8'deki gibi iç basınç ile doğru orantılı olarak arttırıldığında 25 MPa'dan daha büyük iç basınç değerleri için azami indirgenmiş gerilme aralığı sınır değerinin aşıldığı tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak uygulanan yüklerden en kritik olanının civata öngerilme yükü olduğu değerlendirilmektedir.

Aynı malzeme, iç basınç ve civata öngerilme yükleri altında 300 ve 350 °C sıcaklık değerleri incelendiğinde, 50 °C sıcaklık farkının reaktör basınç kabı üzerinde çok önemli bir etkisinin olmadığı (en fazla %7 gerilme artışı, Durum 1 ve 9 arasında) görülmüştür.

ASME ve PNAE G-7 kodları karşılaştırıldığında izin verilen gerilme değerleri için gövde ve kapakta ihmal edilebilecek kadar küçük bir fark bulunurken civata ve somun için PNAE G-7 kodunun ASME koduna göre daha tutucu olduğu görülmüştür.

### Öneriler

Bu tez çalışmadan yola çıkarak ileride yapılabilecek araştırmalar:

- Reaktör basınç kabı içerisinde ihmal edilmiş olan iç bileşenler (kor varili, koruyucu tüp ünitesi, kor perdesi vs.) eklenerek malzemelerin dayanımı hesaplanabilir.
- Reaktör basınç kabının boş ağırlığı, içindeki su kütlesi yük olarak eklenerek hesaplama yapılabilir.
- Mevcut model üzerinde sismik dayanım hesaplamaları yapılabilir.
- Reaktör basınç kabının bağlantı elemanları (conta vs) eklenerek sızdırmazlık elemanlarının performansı incelenebilir.
- Tasarlanan reaktör basınç kabı modeli üzerinden malzemelerin sürünme ve yorulma davranışları incelenebilir.

- Çok katmanlı (kompozit) reaktör basınç kabının performansı incelenebilir.



## KAYNAKLAR

1. Naser, M. Q. and Gupta, A. V. S. S. K. S. (2013). Structural and Thermal Analysis of Pressure Vessel by using Ansys. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 02(08), 740-744.
2. İnternet: Arshad Mahmud. Pressure Vessels Ensure Safety. ASME. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.asme.org%2Fengineering-topics%2Farticles%2Fpressure-vessels%2Fpressure-vessels-ensure-safety&date=2019-02-19>, Son Erişim Tarihi: 19.02.2019
3. Buckthorpe, D., Tashkinov, A., Brynda, J. Davies, L. M., Cueto-Felgeueroso, C. Detroux, P., Bieniussa, K. and Guinovart, J. (2003, 17-22 August). *Review and Comparison of WWER and LWR Codes and Standards*. Presented at Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Prague, Czech Republic.
4. ASME Standarts Technology LLC. (2012). *Code Comparison Report for Class 1 Nuclear Power Plant Components* (STP-NU-051-1). New York: ASME ST-LLC, 1-165.
5. Faidy, C., Wasylyk, A., Asada, S., Obushev, A., Herter, K., Ainsworth, R. and Byun, H.S. (2017). *Non-Linear Analysis Design Rules Part 1: Code Comparison, Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing – Mechanical Codes and Standards Task Force*. England: World Nuclear Association, 9-78.
6. Westinghouse Electric. (2000). *Westinghouse AP600 Design Control Document ML003691016*. Washington: US NRC.
7. Westinghouse Electric. (2011). *Westinghouse AP1000 Design Control Document ML11171A500*. Washington: US NRC.
8. Murtaza, U. T. and Hyder, J. M. (2015). Optimization of the Size and Shape of the Set-in Nozzle for a PWR Reactor Pressure Vessel. *Nuclear Engineering and Design*, 284, 219–227.
9. Greger, M., Petrzela, J., Lazlo, V., Cechel, T. and Juhas, M. (2011, 18-20 May). *Development of Technology for Forging of Bottoms of Pressure Vessels for Nuclear Power Plants*. Presented at Metal, Brno, Czech Republic.
10. International Atomic Energy Agency. (2009). *Integrity of Reactor Pressure Vessels in Nuclear Power Plants: Assessment of Irradiation Embrittlement Effects in Reactor Pressure Vessel Steels* (No. NP-T-3.11). Vienna, Austria: IAEA, 5-10.
11. Kadenko, I., Iermolenko, R., Sakhno, N. and Dubrovin, V. (2016, 4-6 October). *Qualification Experience of ISI Systems for WWER RPVs*. Presented at 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Dubrovnik, Croatia.

12. Krishnamoorthy, R., Shukla, N., Taneja, D. and Bhardwaj, S. (2017). A Methodolgy of Fatigue Analysis of Pressure Vessels by FEA. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 12(4), 769-783.
13. Towarnicki, P. and Grzejda, R. (2018, 9-12 May). *Analysis of the Impact of Temperature Load on the State OF Stress in a Bolted Flange Connection*. Presented at 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, Swinoujście, Poland.
14. Zhang, Q., Wang, Z. W., Tang, C. Y., Hu, D. P., Liu, P. Q. and Xia, L. Z. (2012). Analytical Solution of the Thermo-Mechanical Stresses in a Multilayered Composite Pressure Vessel Considering the Influence of the Closed Ends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, 102–110.
15. Mogri, M. (2013). *Deformation and Stresses Generated on The Bolted Flange Joint Assembly and The Grayloc Clamp Connector at Eleveted Temperatures*. Master's Thesis, Carleton University, Ottawa, Ontario.
16. Satyanarayana, I. and Praveena, K. (2016). Design And Analysis of the Pressure Vessel by using FEM. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology (IJISSET)*, 3, 145–150.
17. Niyamat, M. and Bicha, K. (2015). Design and Stress Analysis of Pressure Vessel by Using Ansys. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, 4(7), 578–585.
18. Sanyasinaidu, S. and Chandanarao, K. (2013). Design and Thermo Mechanical Analysis of High Pressure Vessels with Dish End. *International Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 2(2), 67–73.
19. Abid, M. (2006). Determination of Safe Operating conditions for Gasketed Flange Joint Under Combined Internal Pressure and Temperature: A Finite Element Approach. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83, 433–441.
20. Abdel-Ghany, W. E., Ebeid, S. J. and Salama, M. (2014). Effect of Thermal and Mechanical Loads On A Non Parallel Face Flanges Using Finite Element Analysis. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology (IJISSET)*, 1(9), 327–335.
21. Mhetre, T. V. (2018). *Finite Element Analysis Of Composite Reactor Pressure Vessel*. Master's Thesis, The University of Texas, Arlington, USA.
22. Mann, J. A., Hilsabeck, J. and Mckoon, C. (2014, 25-27 March). *High Temperature Testing and Analysis of a Class 300 Bolted Flange Joint*. Presented at Proceedings of the ASME Symposium on Elevated Temperature Application of Materials for Fossil, Nuclear, and Petrochemical Industries, Marshalltown.
23. Moody, J., Chesworth, S. and O'Regan, P. (2016). *Nondestructive Evaluation: Reactor Pressure Vessel Threads in Flange Examination Requirements 3002007626*. California: Electric Power Research Institute, 12-42.
24. Gorla, R. S. R. and Tanawade, A. (2013). Probabilistic Structural and Thermal Analysis of a Gasketed Flange. *Applied Thermal Engineering Journal*, 59, 535–541.

25. Abid, M. and Nash, D. H. (2003). Comparative Study of the Behaviour of Conventional Gasketed and Compact Non-gasketed Flanged Pipe Joints Under Bolt Up and Operating Conditions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80, 831–841.
26. Omiya, Y. and Sawa, T. (2014, 20-24 July). *Stress Analysis and Sealing Performance Evaluation of Bolted Pipe Flange Connections With Smaller and Larger Nominal Diameter Under Repeated Temperature Changes*. Presented at Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Anaheim, California, USA.
27. Ting, J., Qiang B. G., Pan, L., Hong, Z. Q., Lei, P. and Xi, W. Y. (2011, 6-11 November). *Thermal and Fatigue Analysis of Bolt and Thread in Reactor Pressure Vessel*. Presented at Transactions (SMiRT 21), New Delhi, India.
28. Mohanty, S., Soppet, W. K., Majumdar, S. and Natesan, K. (2016). Thermal–Mechanical Stress Analysis of Pressurized Water Reactor Pressure Vessel With/Without a Preexisting Crack Under Grid Load Following Conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 310, 112–124.
29. Bouzid, A. H. and Nechache, A. (2005). Thermally Induced Deflections in Bolted Flanged Connections. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 127, 394-401.
30. Abid, M., Iqbal, S. and Khushnood, S. (2007). Nonlinear Finite Element Analysis of Gasketed Flange Joints under Combined Internal Pressure and Different Thermal Loading Conditions. *Failure of Engineering Materials and Structures*, 50, 217-228.
31. Sirajuddin, M. and Afzal (2018). Thermo-mechanical Analysis of Gas Turbine Casing to Enhance Fatigue Life. *AMSE Journals-AMSE IIETA Publication Series*, 86, 679-705.
32. Heng, L., Park, H. J., Wang, R., Kim, S. M., Yang, E. G. and Mun, D. S. (2017). Design and Analysis of Pressure Vessel According to Internal Design Pressure and Temperature Using FEM. *Advances in Engineering Research (AER)*, 102, 449-456.
33. Lošák, P., Létal, T., Buzík, J. and Nad, M. (2018). Leakage-Cause Analysis of a Flange Joint Designed According to Standards. *Materials and Technology*, 52, 295-298.
34. Guruchannabasavaiah, N. G., Shanmugam, P. and Arun, L. R. (2013). Effect of Temperature and Associated Deformations on the Gasket Seal Compression in a Pressure Vessel. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(8), 74-80.
35. Dubal, S.V. and Gajjal, S. Y. (2015, 26-27 February). *Finite Element Analysis of Reactor Pressure Vessel under Different Loading Conditions*. Presented at International Conference on Computing Communication Control and Automation, Maharashtra, India.
36. Chaudhry, V., Kumar A., Ingole, S., M., Balasubramanian A. K. and Muktibodh U. C. (2014, 4-7 February). *Thermo-Mechanical Transient Analysis of Reactor Pressure Vessel*. Presented at 1st International Conference on Structural Integrity (ICONS), Kalpakkam, India.

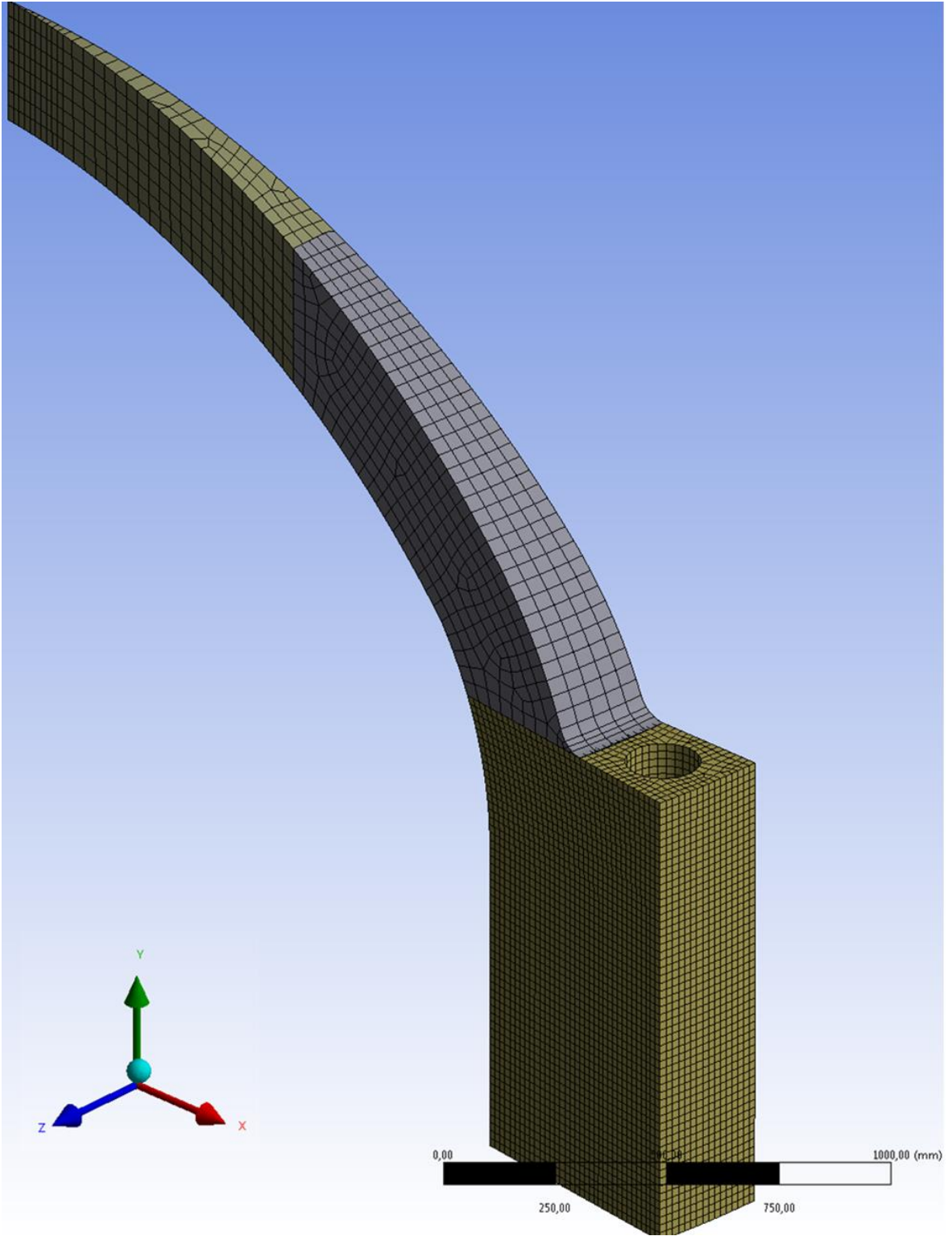
37. Wei, L., Xuwei, W. And Peiyong, Y. (2015, 25-26 September). *Three Dimensional Plastic Stress Analysis of Reactor Pressure Vessel Nozzle Belt*. Presented at International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM), Beijing.
38. Raju, P. R. and Maddaiah, K. C. (2016). Structural Analysis and Cost Estimation of Reactor Pressure Vessel. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, (5)10, 845-850.
39. Lin, T., Li, R., Long, H. and Ou, H. (2006). Three-Dimensional Transient Sealing Analysis of The Bolted Flange Connections of Reactor Pressure Vessel. *Nuclear Engineering and Design*, 236, 2599-2607.
40. Jan, A. (2008). *Pressure Vessel Engineering: Petrochemical Industry Practices in North America*. Master's Thesis, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
41. Internet: Reactor Pressure Vessel of Advanced Boiling Water Reactor. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.ihl.co.jp%2Fnupd%2Fnuclear%2520technology%2Fnuclear%2520power%2520plant%2Fphoto%2520rpv%2520of%2520abwr-e.html&date=2019-02-22>, Son Erişim Tarihi: 22.02.2019
42. Nilsen, K. (2011). *Development of Low Pressure Filter Testing Vessel and Analysis of Electrospun Nanofiber Membranes for Water Treatment*. Master's Thesis, Wichita State University, Kansas, USA.
43. Roylance, D. (2001). *Pressure Vessels*. Cambridge: Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1-10.
44. Ball, B. E. and Carter, W. J. (2002). *CASTI Guidebook to ASME Section VII Div. 1- Pressure Vessels*. Canada: CASTI Publishing Inc., 101,102.
45. Moss, D. R. and Basic, M. (2013). *Pressure Vessel Design Manual* (Fourth Edition). Great Britain: Elsevier, 1-477.
46. Ibrahim, A., Ryu, Y. and Saidpour, M. (2015). Stress Analysis of Thin-Walled Pressure Vessels. *Modern Mechanical Engineering*, 5, 1-9.
47. Internet: Types of Pressure Vessels. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Flabs.com%2FPpressure%2520vessel%2520e%2520-%2520book%2520-%2520Types.html&date=2019-02-25>, Son Erişim Tarihi: 25.02.2019
48. Nazal, S. J. (2013). *A Survey of Mechanical Properties And Design Issues of Pressure Vessels*. Master's Thesis, California State University, Fullerton, USA.
49. American Society of Mechanical Engineers. (1998). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VII, Division 1, Mandatory Appendices, Appendix I*. New York: ASME.
50. Khattak, M. A., Mukhtar, A., Rafique, A. F. and Zareen, N. (2016). Reactor Pressure Vessel (RPV) Design and Fabrication: A Literature Review. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 22(1), 1-12.

51. Internet: Regulator approves Olkiluoto 3 vessel report. World Nuclear News.. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.world-nuclear-news.org%2FRS-Regulator-approves-Olkiluoto-3-vessel-report-1112154.html&date=2019-02-26>, Son Erişim Tarihi: 26.02.2019
52. Hoffman, W. M. (2016). *Reduced Order Modeling of Reactor Pressure Vessels for Probabilistic Fracture Mechanics*. Master's Thesis, University of Idaho, Moscow.
53. Popov, E. P. (1990). *Engineering Mechanics of Solids*. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 143-159.
54. Stevenson, J., Kostarev, V., Bercovsky, A., Schukin, A. and Masopust, R. (1999, 15-20 August). *Comparison of Russian PNAE, ASME BPVC and Japan JEAG 4601 Regulations for Seismic Design of NPP's Piping Systems*. Presented at Transaction of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 15), Seoul, South Korea.
55. Kostarev, V., Bercovsky, A. and Schukin, A. (1997, 25-27 August). *Former Soviet Regulations for Seismic Design of NPPs and Comparison with Current International Practice*. Presented at Post Conference Seminar No. 16, Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities (SMiRT 14). Vienna, Austria,
56. American Society of Mechanical Engineers. (2010). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D Properties (Metric)*, New York: ASME.
57. Timofeev, B., Brumovsky M. and Estorff, U. V. (2010). *The Certification of 15Kh2MFA/15Cr2MoVA Steel and Its Welds for WWER Reactor Pressure Vessels*. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 7-10.
58. International Atomic Energy Authority. (1999). *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Components Important to Safety: Pressure Vessels* ( TECDOC-1102). Vienna, Austria: IAEA, 30.
59. Türk Loydu. (2019). *Procedure for the Determination of the Ultimate Strength of Stiffened Panels by Using Non-Linear Finite Element Analysis*. (Circular No: S.P 01/19), İstanbul: Türk Loydu, 1-25.
60. Kohnke, P. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference* (Release 15.0). Southpointe: ANSYS Inc., 1-988.
61. USSR Gosatomenergondzor. (1989). *Standard Rates for Calculation of Strength of Equipment and Pipelines in Nuclear Power Generating Facilities* (PNAE G-7-002-86). Moscow: Energoatomizdat.
62. Devaraju, A. and Pazhanivel K. (2015). Study on Stress Analysis for Design of Pressure Vessel. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 3(11), 98-101.
63. Korea Atomic Energy Research Institute (2008). *Evaluation of Nozzle Arrangement Focused on RPV Integrity* (KAERI/TR-3642/2008). Daejeon: Small and Medium-sized Reactor Technology Development Department, 7-16.

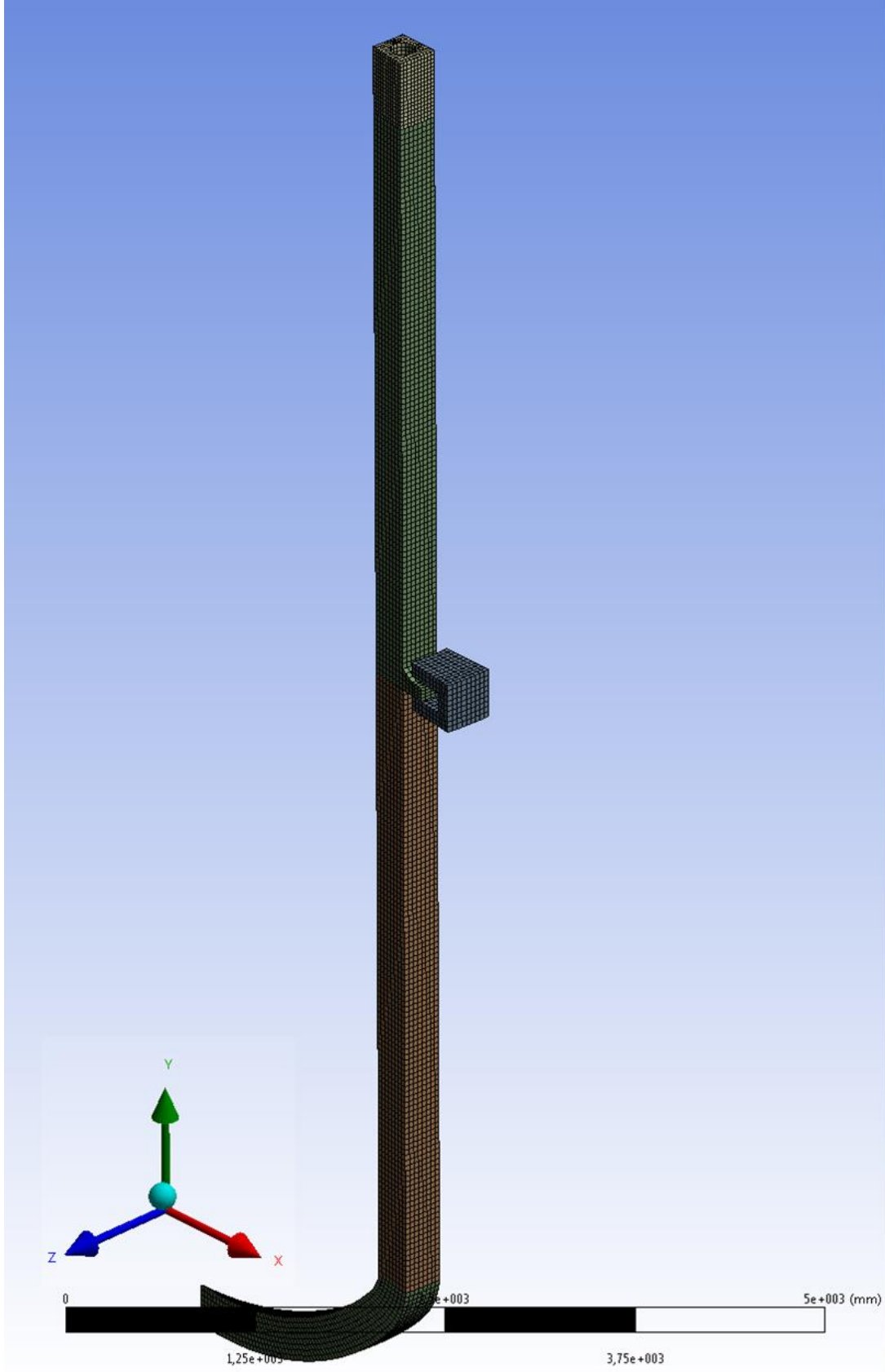
64. American Society of Mechanical Engineers. (2001). *ASME Section II, Part D, SubPart 1 and SubPart 2, Material Properties and ASME Section III, Division 1, Appendix I*, New York: ASME.
65. Ryzhov, S. B., Zubchenko A. S., Kashyrskiy Yu.V., Banyuk G. F., Koloskov M. M. and Degtyarev A. F. (2008). *Steel and Alloys of Power Equipment Handbook*. Moscow, Mashinostroenie: Gidropress.
66. American Society of Mechanical Engineers. (2007). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section-VIII, Division 1, Appendix I*, New York: ASME.

## **EKLER**

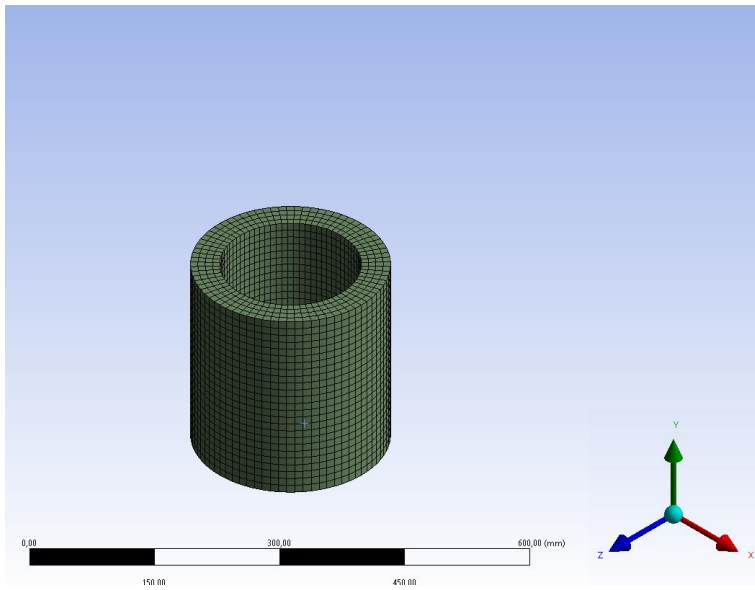
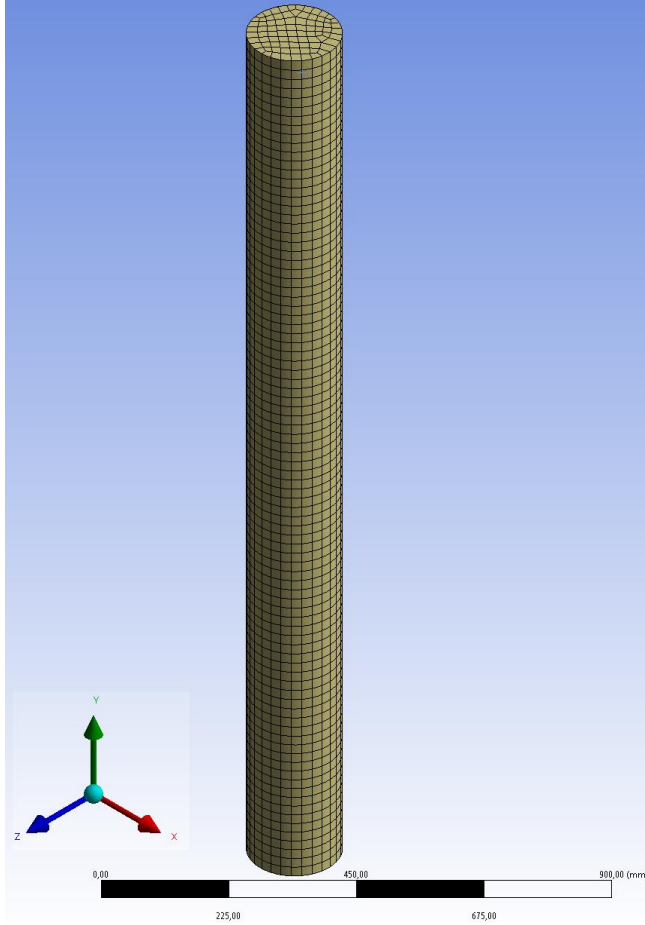
EK-1. Kapak ağ görünümü



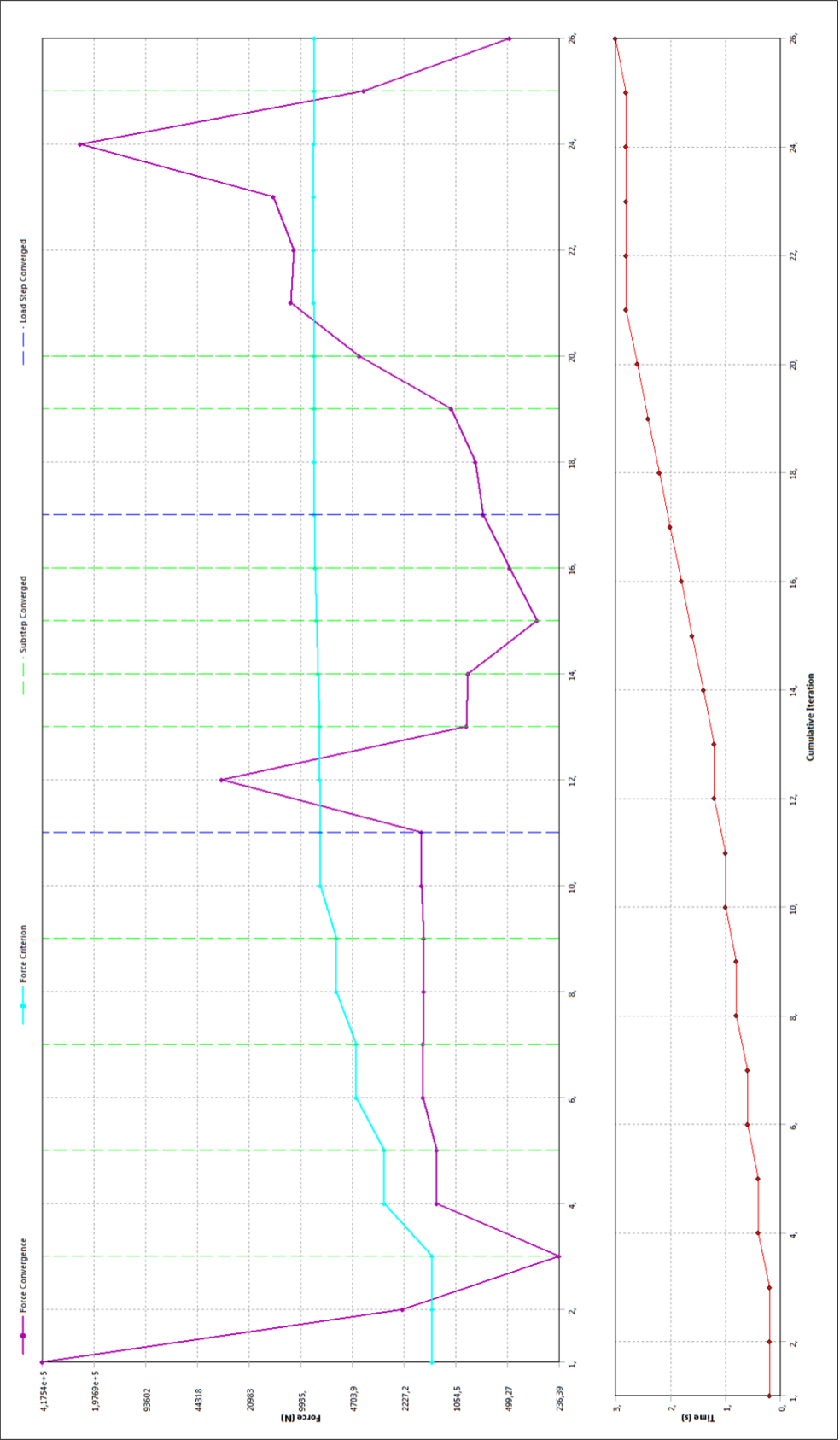
EK-2. Gvde ve destek ağ görünümü



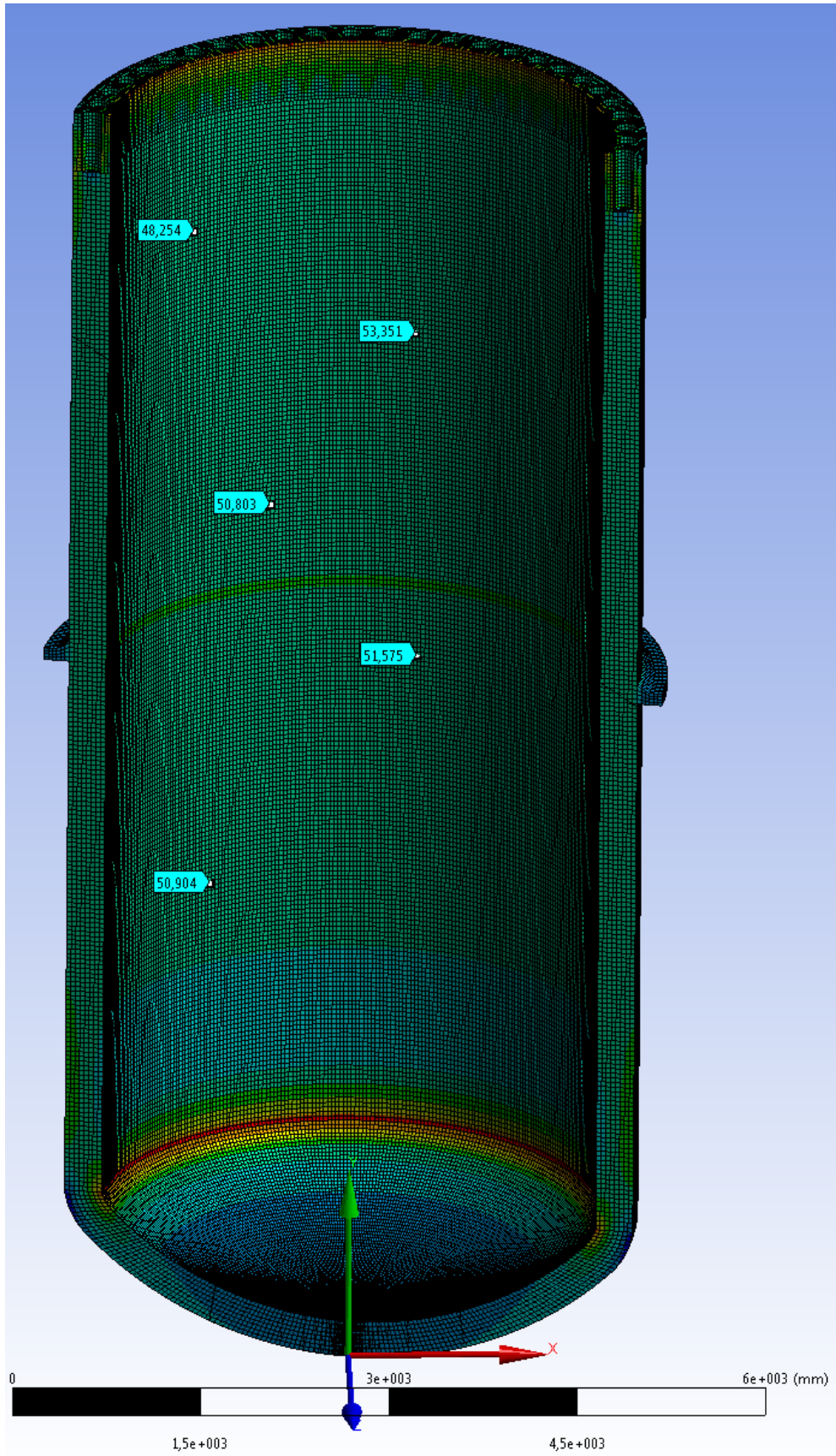
## EK-3. Cıvata ve somun ağ görünümü



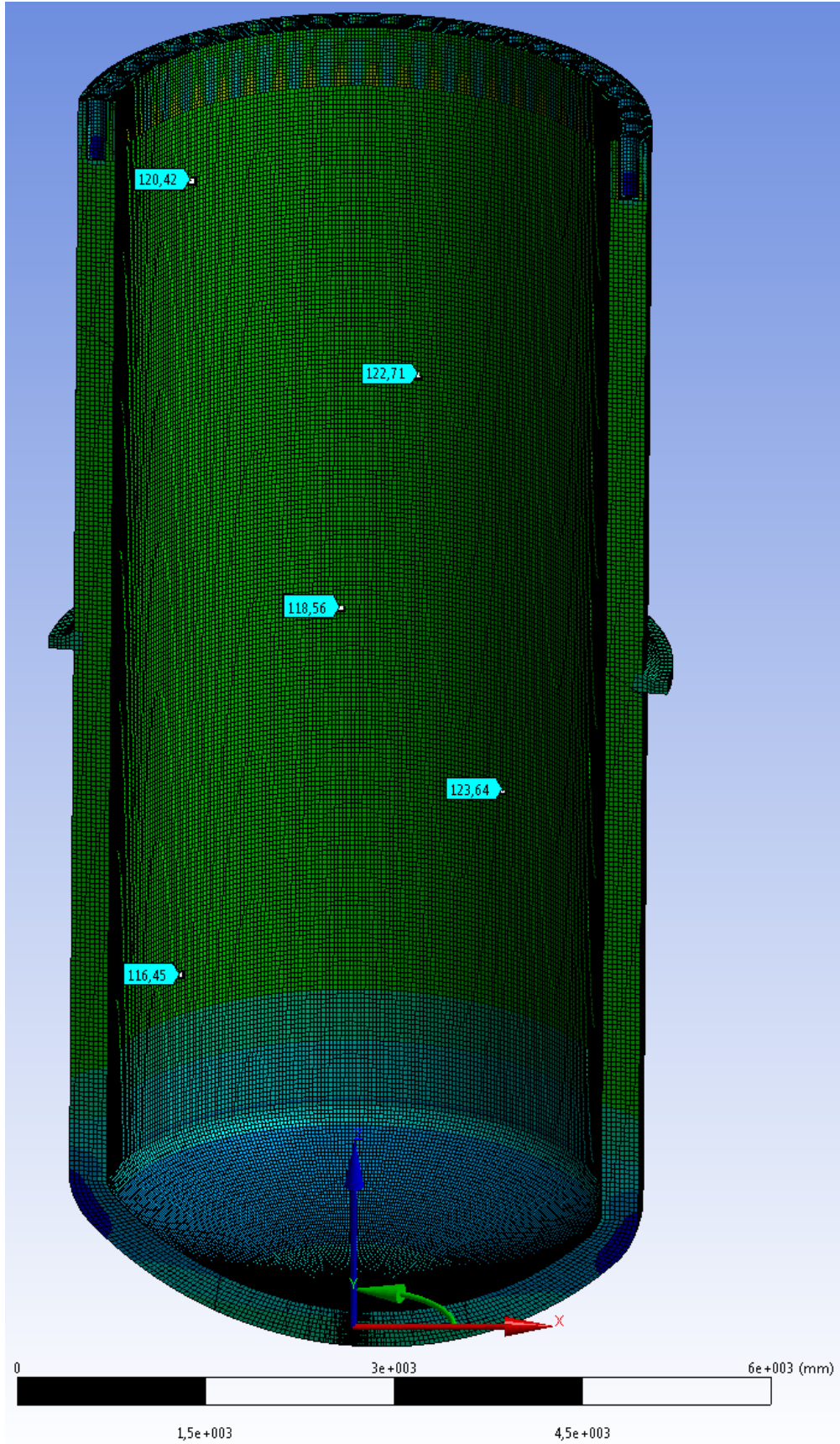
EK-4. Kuvvet Yakınsama Grafiği



EK-5. Boylamsal gerilmeler, örnek noktalar (SA-508 Grade 3 Class 1, 17 MPa)



EK-6. Çevresel (Hoop) gerilmeler, örnek noktalar (SA-508 Grade 3 Class 1, 17 MPa)



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Öztaş, Mehmet Kemal  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 19.01.1984, Bursa  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (554) 752 90 09  
 e-mail : mehmetkemal.oztas@gazi.edu.tr



### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                                | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|----------------------------------------------|------------------|
| Yüksek Lisans | Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği      | Devam Ediyor     |
| Lisans        | Kırıkkale Üniversitesi / Makine Mühendisliği | 2006             |
| Lise          | Turhan Tayan Anadolu Lisesi                  | 2002             |

### İş Deneyimi

| Yıl        | Yer                          | Görev            |
|------------|------------------------------|------------------|
| 2018-Halen | Nükleer Düzenleme Kurumu     | Makine Mühendisi |
| 2011-2018  | Türkiye Atom Enerjisi Kurumu | Makine Mühendisi |
| 2009-2009  | Çima Makine Ltd. Şti.        | Makine Mühendisi |
| 2008-2009  | HLS Makine Ltd. Şti.         | Makine Mühendisi |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

-

### Hobiler

Spor, Seyahat



*GAZİ GELECEKTİR...*