**T.C.**
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# GÜÇ TRANSFORMATÖR KAZANIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE İKİ BAR BASINÇ İÇİN OPTİMUM TASARIM

**SEYİT ALİ ŞENTÜRK**

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

**GEBZE**
**2009**

**T.C.**
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# GÜÇ TRANSFORMATÖR KAZANIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE İKİ BAR BASINÇ İÇİN OPTİMUM TASARIM

**SEYİT ALİ ŞENTÜRK**
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**
**ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMANI**
**YRD. DOÇ. DR. HASAN KURTARAN**

**GEBZE**
**2009**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25 / 06 / 2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Seyit Ali ŞENTÜRK'ün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

### ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

# ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI:** GÜÇ TRANSFORMATÖR KAZANIN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE İKİ BAR BASINÇ İÇİN OPTİMUM TASARIM.

**YAZAR ADI:** Seyit Ali ŞENTÜRK

Hızla gelişen enerji sektöründe önemli bir ürün olan güç transformatörlerinin (trafoların) zor çalışma koşulları sonucu oluşan kuvvetlere karşı daha dayanıklı dış yapı (Kazan) kurma ihtiyacı doğmuştur. Normal işletme koşullarında ortalama işletme basıncı statik basınç olup yaklaşık 0,7 ile 1,0 bar (0,1 N/mm²) arasındadır. Trafolara yağ doldurma aşamasında vakum uygulanmaktadır (basınç ile vakum eşit olduğundan ≈1,0 bar uygulanmıştır).

Tez çalışmasında, standart olarak üretilen kazanın basıncı 1 bar dan 2 bar a çıkartılarak kazan yapısını mukavemeti incelenmiştir. Transformatörün kazanın basıncı iki katına çıkarken kazan boyutları (uzunluk, genişlik ve yükseklik) sabit kalacaktır. Kazan konstrüksiyonu katı modeli Autodesk Inventor 2008 yazılımında oluşturulmuştur. Kazan yapısını 2 N/mm² basınç için belirlenen şartlarda ANSYS Workbench sonlu elemanlar yazılımında lineer statik sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. ANSYS yazılımı kullanılarak, kazanın tüm yapı elemanları ile birlikte sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Kazanda oluşan deformasyonları ve gerilmeleri azaltmak için sonlu elemanlar analizi ile optimum tasarıma ulaşılmıştır. Tez çalışması sonucunda istenilen mukavemet değerlerine ulaşmak için minimum takviye kullanılarak kazan ağırlığı artışı en aza indirilmiştir.

Şu ana kadar geliştirilen transformatör kazanları çok sınırlıdır. Bu nedenle transformatörlerde artan basınca karşı kazanın geliştirilmesi son yıllarda önem kazanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç Transformatörü, Transformatör Kazanı, Sonlu Elemanlar Analizi, Transformatör Kazan Optimizasyonu.

# SUMMARY

**THESIT TITLE:** FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE POWER TRASFOMER TANK AND OPTIMUM DESIGN FOR TWO BAR PRESSURE.

**WRİTER NAME:** Seyit Ali ŞENTÜRK

In this study, static finite element analysis and structural optimization of the transformer tank, which manufactured for 1 bar (0,1 N/mm²) pressure, is computed. Tank dimensions (width, length and height) are not changed when the pressure increase to 2 bar. Solid model of transformer tank is generated by the Autodesk Inventor 2008 CAD software. Linear static finite element analyses of the transformer tank structure are computed by ANSYS Workbench software under certain defined load combinations and boundary conditions. Finite element model of the transformer tank is generated by using ANSYS software with full details all of the transformer tank's structural elements. In order to optimum design the structural for 2bar pressure of the transformer tank, the algorithm computes a series of different cross sections which also confirm to defined geometric limits, to optimize the minimum additional structural weight with out exceeding the allowable stress and deformation limits. At the end of the study, the structural weight of the transformer tank is minimum increased by 13%.

Today's developed transformer tanks are very limited. Developing transformer tank for improve pressure is getting importance in recent years because of that.

**Keywords:** Power Transformer, Transformer Tank, Finite Element Method, Transformer Tank Optimization.

# TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca her türlü desteğini benden esirgemeyen, akademik çalışmalarıyla sürekli değer üreten çok kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN'a yürekten teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde ve hayatımın her alanında bana büyük sabırla destek olan eşim Figen ŞENTÜRK'e, tez çalışmalarım sırasında desteğini benden esirgemeyen mekanik tasarım müdürü Turgay ERKUŞ'a, mühendislik müdürü Kemal OKUTUCU'ya, mekanik tasarım şef mühendis Fatih AKSAN'a, çalışmamın her aşamasında yakın ilgilerini hep hissettiren mesai arkadaşlarıma ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne teşekkürü borç bilirim.

**Haziran 2009**

**Seyit Ali ŞENTÜRK**

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

**Sayfa**

ÖZET IV
SUMMARY V
TEŞEKKÜR VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ IX
ŞEKİLLER DİZİNİ X
TABLOLAR DİZİNİ XV
1. GİRİŞ 1
1.1 Tez Çalışması 2
1.2. Literatür Çalışması 3
2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ 4
2.1 Kısa Tarihçesi 4
2.2 Transformatörün Önemi ve Kullanıldığı Yerler 5
2.3 Transformatörün Yapısı 6
2.3.1. Çekirdek 7
2.3.2. Bobin 7
2.3.3. Şalter 8
2.3.4. Kazan 8
2.3.5. Buşingler 9
2.3.6. Konservatör 10
2.3.7. Soğutma Sistemleri 10
2.4 Transformatör Kazan Yapısı 11
3. TRANSFORMATÖR KAZANININ ANALİTİK YÖNTEMLERLE HESABI 17
3.1 Kazan Basınç Hesabı 17
3.2 Analitik Yöntemlerle Transformatör Kazan Kapak Sacı Hesabı 20
3.3 Analitik Yöntemlerle Transformatör Kazan Taban Sacı Hesabı 22
3.4 Analitik Yöntemlerle Kazan Duvarlarındaki Takviye Sacı Hesabı 23
4. TRANSFORMATÖR KAZANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ 28

4.1 Transformatör Kazanın CAD Modeli 30
4.2 Transformatör Kazanının Sonlu Elemanlar Modeli 33
4.2.1 Sonlu Elemanlar Ağı 33
Şekil 4.7., Kazanın sonlu elemanlar ağı 34
4.3 Sınır Koşulları 34
4.4 Malzeme Özellikleri 37
4.5 Kazan Tabanında Oluşan Sehim Miktarının Sonlu Elemanlar Analizi İle Belirlenmesi 37
4.6 Üretilmiş Kazanın Sonlu Elemanlar Analizi 41
4.6.1 Üretilmiş Kazan Yapısının Bir Bar Vakumda İncelenmesi 41
4.6.2 Üretilmiş Kazanın Bir Bar Basınçta Sonlu Elemanlar Analizi 45
5 ANSYS WORKBENCH İLE KAZANIN OPTİMİZAYON 49
5.1 Birinci Alternatif Kazan Tasarımı 49
5.2 İkinci Alternatif Kazan Tasarımı 57
5.3 Üçüncü Alternatif Kazan Tasarımı 61
5.4 Dördüncü Alternatif Kazan Tasarımı 65
5.5 Beşinci Alternatif Kazan Tasarımı 72
5.6 Altıncı Alternatif Kazan Tasarımı 78
5.7 Yedinci Alternatif Kazan Tasarımı 84
5.7.1 Takviyelerdeki Kaynağın Etkisi 91
5.8 Sekizinci Alternatif Kazan Tasarımı 94
5.9 Alternatif Tasarımların Analiz Sonuçları Değerlendirilmesi 99
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 103
KAYNAKLAR DİZİNİ 105
ÖZGEÇMİŞ 106

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| T&D | : İletim ve Dağıtım |
| $\Delta\alpha$ | : Kaynak açısı |
| Ra | : Yüzey pürüzlülüğü |
| M | : Metrik |
| $P_u, P_m, P_c$ | : Hidrostatik basınç |
| $P$ | : Toplam basınç |
| $\rho$ | : Yoğunluk |
| $H_c$ | : Trafoda maksimum yağ yüksekliği |
| $H_t$ | : Kazan yüksekliği |
| $L_k$ | : Kazan iç uzunluğu |
| $B_k$ | : Kazan iç genişliği |
| $H_k$ | : Kazan iç yüksekliği |
| $F$ | : Kuvvet |
| $S$ | : Sac kalınlığı |
| $R_m$ | : Çekme dayanımı |
| $R_c$ | **:** Akma dayanımı |
| $E$ | : Elastisite modülü |
| G | : Kayma modülü |
| J | : Burulma sabiti |
| $\upsilon$ | : Poisson oranı |
| Kg | : Kilogram |
| N | : Newton |
| Mm | : Milimetre |
| MPa | : Mega pascal |
| MVA | : Mega volt amper |
| kV | : Kilovolt |

# ŞEKİLLER DİZİNİ


| Şekil | Sayfa |
|---|---|
| 1.1. 1831-M.Faraday | 2 |
| 2.1. Güç Transformatörü | 7 |
| 2.2. Çekirdek | 7 |
| 2.3. Çekirdek etrafına sarılmış bobin. | 8 |
| 2.4. Şalter tipleri | 8 |
| 2.5. Transformatör Kazanı | 9 |
| 2.6. Buşing tipleri | 9 |
| 2.7. Transformatör Genleşme Kabı | 10 |
| 2.8. Radyatör, Yağ-Hava ve Yağ-Su soğutucuları | 11 |
| 2.9. Transformatör kazanın elemanları | 12 |
| 2.10. Takviye kaynağı | 13 |
| 2.11. Kapak çerçevesinin kaynağı | 13 |
| 2.12. Kapak sacının kapak çerçevesine tespiti | 14 |
| 2.13. Transformatör üzerinde radyatör. | 15 |
| 2.14. Transformatör üzerine radyatör yandan görüntüsü | 15 |
| 2.15. Transformatör üzerinde genleşme deposu yerleşimi | 16 |
| 3.1. Güç transformatörü | 18 |
| 3.2. Trafonun normal işletme şartlarındaki basınç hesabı | 18 |
| 3.3. Kazan iç ölçüleri | 20 |
| 3.4. Kapak sacı hesabı | 21 |
| 3.5. Kapak sac kalınlık hesabın sonucu | 21 |
| 3.6. Kazan taban sacı hesabı | 22 |
| 3.7. Kazan taban sacı hesap sonucu | 23 |
| 3.8. Kazan takviye hesabı | 24 |
| 3.9. Kazan takviye sacı hesap sonucu | 25 |
| 3.10. Transformatör kazanı | 26 |
| 3.11. Transformatör kazan kapağı | 26 |
| 4.1. Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanları | 28 |
| 4.2. Transformatör kazanının katı modelin YG tarafı | 30 |

4.3. Domların kazan duvarına monte edilen dom flanşı 31
4.4. Transformatör kazanının katı modelin AG tarafı 32
4.5. Kazan kapağındaki adam delikleri ve domları 32
4.6. YG domların kazan duvarındaki kuşağa bağlantısı 33
4.7. Sonlu elemanlar ağı 34
4.8. Kazan katı modelin ANSYS görünümü 35
4.9. Kazan tabanın sabit destek olarak kabul edilmesi 35
4.10. Eşit basınç uygulanmış yüzeyler 36
4.11. Şalter kapağına uygulanan kuvvet 36
4.12. ANSYS'e aktarılmış kazanın alt kısmın katı modeli 38
4.13. Kazan alt kısmının sonlu elemanlar kafes yapısı 38
4.14. Sınır şartları uygulanmış kazan tabanı 39
4.15. Tabanda oluşan maksimum sehim 39
4.16. Tabanda oluşan von-Mises eşdeğer gerilme 40
4.17. Tabanda oluşan maksimum kayma gerilmesi 40
4.18. Vakuma alınmış kazan 42
4.19. Kazan üzerindeki basınç & vakum ölçer 43
4.20. Boş kazandaki takviyeler arasındaki fark 43
4.21. YG Bir bar vakumdaki kazanda oluşan sehim 44
4.22. Bir bar vakumdaki kazanda oluşan sehim 45
4.23. Bir bar basınçtaki kafes yapısı 46
4.24. Bir bar basınçta oluşan toplam sehim 47
4.25. Bir basınçtaki kazan duvarlarında oluşan sehim 47
4.26. Bir bar basınçta oluşan eşdeğer gerilme 48
5.1. Alternatif 1 kazan tasarımında oluşan toplam sehim 50
5.2. Alternatif 1 kazan tasarımında YG duvarında oluşan sehim 50
5.3. Alternatif 1 kazan tasarımında AG duvarında oluşan sehim 51
5.4. Alternatif 1 kazan tasarımında yan duvarda oluşan sehim 51
5.5. Alternatif 1 kazan tasarımında kapakta oluşan sehim 52
5.6. Alternatif 1 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim 52
5.7. Alternatif 1 kazan tasarımında Y-ekseni yönünde oluşan sehim 53
5.8. Alternatif 1 kazan tasarımında Z-ekseni yönünde oluşan sehim 53
5.9. Alternatif 1 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı 54
5.10. Alternatif 1 kazanda oluşan maksimum gerilme bölgesi 55

5.11. Alternatif 1 kazanın ön duvarında oluşan gerilmeler dağılımı 56
5.12. Alternatif 1 kazanın ön duvarında oluşan gerilmeler dağılımı 56
5.13. Alternatif 1 kazanın kapak altındaki takviyede oluşan gerilme 57
5.14. Alternatif 2 kazan tasarımının kafes yapısı 58
5.15. Alternatif 2 kazan tasarımında toplam sehim 58
5.16. Alternatif 2 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim 59
5.17. Alternatif 2 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim 59
5.18. Alternatif 2 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim 60
5.19. Alternatif 2 kazan tasarımındaki eşdeğer gerilme dağılımı 60
5.20. Alternatif 2 kazan tasarımında taban takviyesindeki gerilme dağılımı 61
5.21. Alternatif 3 kazan tasarımında kafes yapısı 62
5.22. Alternatif 3 kazan tasarımında toplam sehim 62
5.23. Alternatif 3 kazan tasarımında yan duvarda oluşan sehim 63
5.24. Alternatif 3 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim 63
5.25. Alternatif 3 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim 64
5.26. Alternatif 3 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim 64
5.27. Alternatif 3 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı 65
5.28. Alternatif 4 kazan tasarımında kafes yapısı 66
5.29. Alternatif 4 kazan tasarımında toplam sehim 66
5.30. Alternatif 4 kazan tasarımında AG duvarındaki sehim 67
5.31. Alternatif 4 kazan tasarımında X-ekseni doğrultusundaki sehim 67
5.32. Alternatif 4 kazan tasarımında Y-ekseni doğrultusundaki sehim 68
5.33. Alternatif 4 kazan tasarımında Z-ekseni doğrultusundaki sehim 68
5.34. Alternatif 4 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı 69
5.35. Alternatif 4 tasarımında YG dom tutucusundaki gerilme dağılımı 69
5.36. Alternatif 4 tasarımında taban takviyesindeki gerilme dağılımı 70
5.37. Alternatif 4 tasarımda kapak altındaki takviyede gerilme dağılımı 71
5.38. Alternatif 4 tasarımda yan duvarda oluşan gerilme dağılımı 71
5.39. Alternatif 5 kazan tasarımında kafes yapısı 72
5.40. Alternatif 5 kazan tasarımında toplam sehim 73
5.41. Alternatif 5 kazan tasarımında şalter alt kısımda oluşan sehim 74
5.42. Alternatif 5 kazan tasarımında AG duvarında oluşan sehim 74
5.43. Alternatif 5 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim 75
5.44. Alternatif 5 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim 75

5.45. Alternatif 5 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim 76
5.46. Alternatif 5 kazan tasarımında eşdeğer gerilme dağılımı 77
5.47. Alternatif 5 tasarımda taban takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı 77
5.48. Alternatif 5 tasarımda tabanın kenar takviyesindeki gerilme dağılımı 78
5.49. Alternatif 6 kazan tasarımında kazan kafes yapısı 79
5.50. Alternatif 6 kazan tasarımında toplam sehim 80
5.51. Alternatif 6 kazan tasarımında AG duvarındaki sehim 80
5.52. Alternatif 6 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim 81
5.53. Alternatif 6 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim 81
5.54. Alternatif 6 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim 82
5.55. Alternatif 6 tasarımda kazandaki eşdeğer gerilme dağılımı 82
5.56. Alternatif 6 tasarımında kazan taban takviyesindeki gerilme dağılımı 83
5.57. Alternatif 6 tasarımda kapak takviyesindeki gerilme dağılımı 83
5.58. Alternatif 7 tasarımda kazanın kafes yapısı 84
5.59. Alternatif 7 tasarımında kazanın AG duvarında oluşan sehim 85
5.60. Alternatif 7 tasarımında kazanın YG duvarında oluşan sehim 85
5.61. Alternatif 7 tasarımında kazanın X-ekseni yönünde oluşan sehim 86
5.62. Alternatif 7 tasarımda kazanın Y-ekseni yönünde oluşan sehim 86
5.63. Alternatif 7 tasarımda kazanın Z-ekseni yönünde YG duvarında sehim 87
5.64. Alternatif 7 tasarımda kazanın Z-ekseni yönünde AG duvarında sehim 87
5.65. Alternatif 7 tasarımda kazandaki eşdeğer gerilme dağılımı 88
5.66. Alternatif 7 tasarımında AG duvarındaki eşdeğer gerilme dağılımı 88
5.67. Alternatif 7 tasarımında kazanın köşe takviyesindeki eşdeğer gerilme 89
5.68. Alternatif 7 tasarımda taban takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı 89
5.69. Alternatif 7 tasarımda kapak takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı 90
5.70. Alternatif 7 tasarımda YG dom tutucusundaki eşdeğer gerilme dağılımı 91
5.71. Takviye kenarlarındaki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer gerilme 92
5.72. Kapak takviyesindeki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer gerilme 93
5.73. Duvarların birleştiği kuşaktaki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer ger 93
5.74. Alternatif 8 tasarımında kazanın kafes yapısı 94
5.75. Alternatif 8 tasarımında kazandaki toplam sehim 95
5.76. Alternatif 8 tasarımında kazanın AG duvarındaki sehim 95
5.77. Alternatif 8 tasarımında kazanın X-ekseni yönündeki sehim 96
5.78. Alternatif 8 tasarımında kazanın Y-ekseni yönündeki sehim 96

5.79. Alternatif 8 tasarımında kazanın Z-ekseni yönündeki sehim 97
5.80. Alternatif 8 tasarımında kazanın eşdeğer gerilme dağılımı 97
5.81. Alternatif 8 tasarımında kazanın AG duvarındaki eşdeğer gerilme 98
5.82. Alternatif 8 tasarımında taban takviyedeki eşdeğer gerilme dağılımı 98

# TABLOLAR DİZİNİ


| Tablo | Sayfa |
|---|---|
| 4.1. Kullanılan malzeme özellikleri | 37 |
| 4.2. Taban sacındaki sehim ve gerilme hesapların karşılaştırılması | 39 |
| 5.1. Tasarımlarda statik analiz sonuçların karşılaştırılması | 99 |

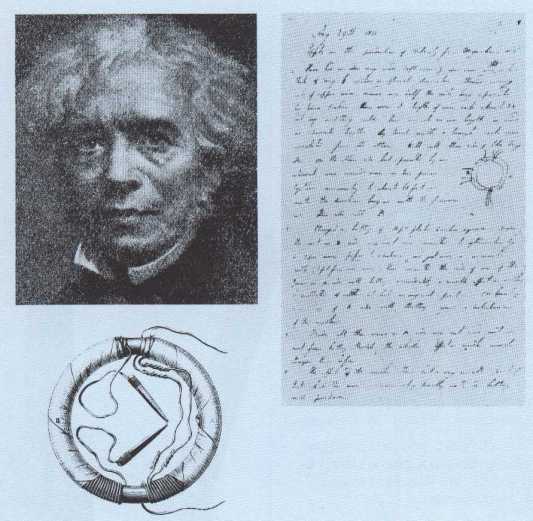
# 1. GİRİŞ

Transformatörler (Trafolar) modern yaşama bağlı olarak elektrik iletim ve dağıtım sistemlerin çok önemli bileşenleridir. Transformatörler elektriğe ihtiyacı olan sanayi kuruluşları, demiryolları ve yerli tüketicilere elektriğin üretildiği yerlerden verimli şekilde taşınması için kullanılmaktadırlar. Trafolarda teknolojinin yeterli seviyelere gelindiği düşünülse de sürekli gelişmektedir. Önceleri kullanılan elektrik güç istasyonlarından evlere ulaşana kadar dört veya daha fazla trafodan geçerek iletilmekteydi. Son yüzyıl da kamu kuruluşları elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan yerlere büyük miktarlarda, daha verimli ve daha maliyetli ekipmanlarla tüketicilerin ihtiyaç duydukları elektrik için destekleyici trafolar inşa etmektedirler. Oldukça olgunlaşmış ve çoğunlukla temel teknoloji kullanılmaktadır, fakat tasarım araçları ve üretim teknikleri sürekli iyileşmekte, güçleri ve kapasiteleri sürekli artmaktadır [AREVA, 2008].

Elektrik santralleri çoğu zaman tüketim merkezlerinden uzaktadırlar. Elektrik enerjisi üreten santraller baraj veya kömür yataklarında kurulmuşlardır. Enerjinin santrallerden, tüketim merkezlerine kadar iletiminin verimli bir şekilde yapılabilmesi için yüksek gerilimler gerekir. Oysa santrallerdeki jeneratörlerin ürettikleri gerilim orta gerilim kademesindedir. Gerilimi yüksek değerlere çıkartmak ve enerjinin uzaklara verimli bir şekilde iletimini sağlamak için trafolar kullanılır. Trafolar enerjinin frekansında değişiklik yapmadan iletimine yardımcı olurlar ve hareket eden parçaları olmadığı için verimleri çok yüksektir [Adnan PEŞİNT, 1977; Moser H.P, 1987].

Trafolar Faraday (Şekil 1.1) yasasının doğrudan bir uygulamasıdır. Daha bu yüzyılın başında geniş çapta geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Konuyu yakından izlemeyenler için trafonun tekniği artık yenilik beklenmeyen bir saha gibi gözükmektedir. Gerçekte ise trafolar giderek gelişmekte ve ilginç yenilikler görmektedirler. Yönlendirilmiş kristalli soğuk haddelenmiş saclar ile büyük bir ilerleme sağlanmıştır. Bu sacların geliştirilmesi sürdürülmekte ve gürültü düzeyini düşürücü önemli sonuçlar elde edilmektedir. Diğer yandan trafoların deneme koşulları giderek artmaktadır. Üzerinde araştırmaların sürdürüldüğü bu konuların yanında yağ analizi ile arıza olasılığının saptanması, yönlendirilmiş soğutma, alan

dağılımının bulunması, özel kurutma yöntemi, uygulamaya giren diğer bazı ilginç konulardır. Tasarım, geliştirme ve araştırmada en etkin araç sayısal hesap makineleri olmuştur. Bu sayede sorunların derinliğine incelenebilmekte ve alternatifler içinden en uygunu seçilebilmekte, yani optimizasyon yapılabilmektedir. Teknik, bilim ve ekonominin karşılaşma ve bütünleşme sahasıdır. Bu gerçeği doğrulayan çok güzel örnekler trafolarda da bulunabilir [İlhami ÇETİN, 1981].



Şekil 1.1., 1831-M.Faraday

Teknolojinin hızla ilerlemekte olduğu 21. yüzyılda teknolojinin kullanılabilmesi için elektriğe olan gereksinim hızla artmaktadır. İhtiyaç olan enerjiyi tedarik edebilmek için alternatif enerji kaynak arayışları sürekli devam etmektedir. Bu arayışlar sonucunda bazı kaynaklardan daha fazla güç elde edebilmektedir. Üretilen yüksek güçlerdeki ve gerilimlerdeki elektriğin iletilmesi görevini transformatörler üstlenir. Dolayısıyla trafolara gelen bu yüksek güç ve gerilimi karşılayabilmesi için yapısının buna dayanıklı olması gerekir [ABB, 2004; Martin J. Heathcote, 1998].

## 1.1 Tez Çalışması

Transformatör kazanın içinde bulunan aktif kısım (sargılar etrafında elektrik geçmektedir), yağdan ve kısa devrelerden dolayı basınç oluşmaktadır. Bu tezde kazan yüzeylerine uygulanan basınç artışı ile kazan duvarların mukavemeti incenecektir. Transformatör kazanları içinde 1 bar (0,1 $N/mm^2$ = 0,1 MPa) basınç oluşacak şekilde üretilirler. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda maksimum 1,5 bar

basınca dayanıklı kazan imal edilmiştir. Artan enerji talepleri ile birlikte kazanda oluşan basınç da sürekli yükselmektedir. Bu tezde kullanılan trafonun gücü 250 MVA'dir. Trafonun çalışma esnasında kazan içinde oluşan basınç ise 1 bar dır. Trafonun çalışacağı yerde üzerine gelecek olan yüklemelerden dolayı basınç 2 bar a çıkacaktır. Geliştirme tasarımı yapılacak olan kazanın boyutları değişmeyecektir. En az yapısal tasarım değişikliği ile en uygun tasarımın bulunması için sonlu elemanlar analizi kullanılarak ANSYS Workbench yazımlı ile statik analiz yapılacaktır.

## 1.2. Literatür Çalışması

Çoğu kişiler tarafından transformatör kazanı ile ilgili geliştirilecek bir şey kalmadığı düşünülerek mekanik kısımları (kazan yapısını) inceleyen bir çalışma bulunamamıştır. Yapılan literatür araştırmalarında transformatörlerin elektriksel kısımları incelenmiştir. Bu nedenle çalışılacak konu ile ilgili AREVA T&D trafo fabrikasında üretilen transformatör kazan yapısının geliştirilme ihtiyacından yola çıkılarak böyle bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir. Genel olarak üretilen trafolarda 1 bar ($N/mm^2$) basınca dayanabilecek kazanlar tasarlanmıştır. Transformatör kullanıcılarının özel istekleri doğrultusunda şu ana kadar maksimum 1,5 bar basınca dayanıklı kazanlar üretilmiştir. Elektrik gereksinim talepleri sürekli arttığından kazan yapısının da geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

# 2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ

Transformatör, iki veya daha fazla elektrik devresini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlayan bir elektrik aletidir. Bir elektrik devresinden diğer elektrik devresine enerjiyi elektromanyetik alan aracılığıyla nakleder. En basit halde, birbirine yakın olan iki sargıdan ibarettir. Eğer bu iki sargı ince demir levhaların üzerine sarılmışsa buna demir çekirdekli transformatör denir. Eğer demirsiz plastik tüp gibi bir çekirdeğe sarılmışsa buna hava çekirdekli transformatör denir. Sargılardan birine voltaj uygulanırsa, diğerinde de bir voltaj meydana gelir. Voltajın tatbik edilmesiyle ortaya çıkan akım, sargı etrafında bir manyetik alan doğurur. Bu alan, yakına olan diğer sargıda bir voltaj ortaya çıkarır. Ancak, manyetik alanın daima değişerek çıkış sargısındaki voltajı devam ettirmesi gerekir. Birinci bobine tatbik edilen voltaj sabit olursa, diğer bobinde herhangi bir voltaj meydana gelmez. Ancak doğru akım sürekli olarak kapatılır ve açılırsa manyetik alan değişerek bir çıkış meydana gelir. Otomobillerde bulunan radyo alıcısındaki vakum tüp bu prensiple çalışır. [AREVA, 2008; ABB, 2004]

Genel olarak transformatörler bir elektrik devresinde voltaj veya akımı indirmek ya da yükseltmek için kullanılırlar. Elektronikte ise esas olarak farklı devrelerdeki yükselticileri birleştirmek, doğru akım dalgalarını daha yüksek bir değerdeki alternatif akıma çevirmek ve sadece belirli frekansları iletmektedirler. İzolasyon amacıyla bazen sayaçlar ve dirençlerle beraber çalışırlar. Elektrik akım iletiminde, esas olarak voltajı yükseltmek veya düşürmek için kullanılırlar. Ölçü aletlerinde özel transformatörler kullanılır [İlhami Çetin, 1981].

## 2.1 Kısa Tarihçesi

Önceleri yalnız aydınlatma amaçları için kullanılan elektrik enerjisi daha sonra pek çok alanda kullanılmaya başlanınca, iletim ve dağıtım sistemlerinin önemi artmıştır. 19. asrın sonlarına doğru Avrupa ve Amerika'da elektrik enerjisinin taşınmasına başlanmıştır, ancak gerilimin yüksek olmaması nedeni ile iletim kısa mesafelere yapılabilmiştir. Elektrik enerjisin taşınmasına gerek duyulduğu yıllarda bu enerji doğru akım olarak üretilebilmekteydi. Enerji üretimi, iletimi ve dağıtımı jeneratörlerden elde edilen alçak gerilimle yapılıyordu. Bu bakımdan kullanma alanlarının da santral yakınlarında bulunması gerekmekteydi. Alçak gerilimde,

gerilim düşümü ve güç kaybı, enerjinin uzaklara iletimini ekonomik olmaktan çıkarıyordu. Daha sonraları alternatif akım tekniği gelişti ve daha büyük gerilimler elde edildi [İlhami ÇETİN, 1981; Martin J. Heathcote, 1998].

Enerji iletimi ve dağıtımının gelişmesinde en önemli adım, trafonun bulunuşu olmuştur. Transformatör yardımı ile elektrik enerjisinin iletimi dağıtımı kolaylaşmış, bu enerji daha çok kullanılır duruma gelmiştir. Trafo kullanılarak ilk enerji taşıması, 19. asrın sonlarına doğru Amerika'da yapılmış, üretilen enerji 500 volt gerilimle 1600 metreye taşınmıştır. Aynı tarihlerde İtalya'da 150 HP lik bir güç 2000 volt ile 27 km'ye taşınmıştır. 3 fazlı alternatif akımla yapılan ilk enerji taşıma ise 1891 yıllarında Almanya'da gerçekleşmiş, 150 kW lık bir güç 15 kV luk bir gerilimle 170 km'ye taşınmıştır [AREVA, 2008].

Yurdumuzda ilk enerji taşıması 1902 yılında Tarsus'ta yapılmış, bir değirmenden elde edilen 2kW'lık bir güç şehre taşınmıştır. Daha sonraları İstanbul Silahtarağa santrali işletmeye açılmış, onu büyük şehirlerde kurulan santraller ve dağıtım şebekeleri izlemiştir. Bugün yurdumuzda pek çok hidrolik, termik, gaz türbinli ve dizelli santraller elektrik enerjisi üretmekte, üretilen bu enerji de en yükseği 390 kV olan gerilimlerle yurdun birçok bölgelerine taşınmaktadır [M. Adnan PEŞİNT,1977].

## 2.2 Transformatörün Önemi ve Kullanıldığı Yerler

Transformatörler hareket etmeyen elektrik makinelerinden olup, belirli bir gerilimdeki elektrik enerjisini diğer bir gerilimdekine çevirmeye yararlar. Özellikle enerji iletimindeki rolleri çok önemlidir. Bunlar, endüstride bir ve üç fazlı olarak önemli sayıda kullanılmaktadırlar. Bazı özel hallerde faz sayısı yukarıda söz edilenlerden farklı olarak da yapılırlar. En ufak zayıf akım transformatörlerinden çok büyük güçte (600 000 kVA) enerji iletiminde kullanılan transformatörler inşa olunmaktadır. Transformatörlerin diğer elektrik makinelerine göre en büyük üstünlükleri verimlerinin yüksek oluşudur. Büyük transformatörlerde malzemeyi ekonomik olarak kullanarak % 99 ila 99,5 arasında verim elde etmek mümkündür. Verimin bu kadar büyük olmasının nedeni burada sürtünme kayıplarının olmayışıdır [Turgut BODUROĞLU, 1988; Lowdon Eric, 1988].

Kullanıldıkları yerler neresi olursa olsun, prensip bakımından daima aynıdırlar, genel olarak yekdiğerine ve toprağa karşı izole edilmiş iki sargı ile üzerinde sargıları taşıyan demir çekirdekten oluşurlar. Uyarılan sargıya primer ve diğerine sekonder denir. Transformatörün yükseltici veya alçaltıcı olmasına göre primerin gerilimi sekonderden küçük veya büyük olabilir [Turgut BODUROĞLU, 1988; AREVA, 2008].

Trafolar, elektrik santrallerinde veya tüketim merkezleri yakınlarında, trafo merkezleri ve postalarında, sanayi merkezlerinde, atölye, laboratuar ve benzeri yerlerde kullanılır. Ayrıca bazı ölçü aletlerinin çalıştırılmalarında ölçü transformatörleri kullanılmaktadır [Adnan PEŞİNT, 1977; ABB; 2004].

Trafolar gerilim yükseltici olarak kullanıldıkları gibi, gerilim düşürücü olarak da kullanılırlar. Santral yakınlarında daha çok gerilim yükseltici, tüketim merkezleri yakınlarında da düşürücü olarak kullanılmaktadırlar [Adnan PEŞİNT, 1977].

## 2.3 Transformatörün Yapısı

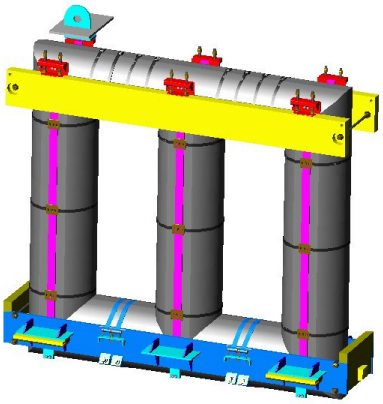
Elektrik enerjisinin dağıtılması ve iletilmesinde temel görevi üstlenen transformatörler değişik güçlerde ve büyüklerde olabilirler. Büyüklüklerine göre dağıtım ve güç transformatörleri diye ikiye ayrılırlar. Dağıtım transformatörler alçak ve orta gerilimler içerdiğinden sadece küçük yerlerde kullanırlar. Güç transformatörleri ise alçak ve yüksek gerilim içermesinden dolayı büyük güçlerin iletilmesinde kullanılırlar. Ayrıca kuru tip ve yağlı tip transformatörlerde mevcuttur. Değişik ebatlar üretilmelerine karşı genel olarak aynı elemanlardan oluşurlar. Şekil 2.1'de görülen bir güç transformatörün yapısı birçok parçaların birleşiminden oluşmuştur [AREVA, 2008]. Bunlar;



Şekil 2.1., Güç Transformatörü

### 2.3.1. Çekirdek

Çekirdek trafo kazanının iç kısmında bulunmaktadır. Çok sayıda ince saçların bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Bu saçları bir arada tutmak için alt ve üst kısımdan demir levhalarla sıkıştırılmaktadırlar. Ayrıca bu sacların sıkıştırılmasında çelik bandajlar da kullanılmaktadırlar [AREVA, 2008; ABB, 2004].

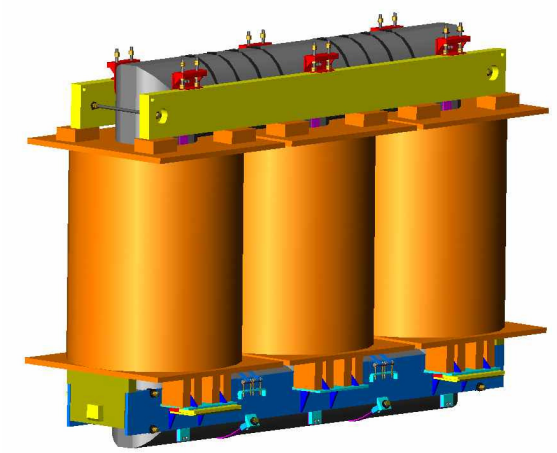


Şekil 2.2., Çekirdek

### 2.3.2. Bobin

Çekirdeğin etrafına sıralan bakır sargıların oluşturduğu yapıdır. Sargılar içerisinde elektriği ileten küçük bakır lamalar bulunmaktadır. Bu bakırlar özel bir kâğıt malzeme ile izole edilmişlerdir ve çekirdek etrafında sarılmıştır. Bobin içerisine yağın geçmesini sağlamak içi ağaç parçalar kullanılarak kanallar bırakılmaktadır. Bu

şekilde trafonun çalışma esnasındaki ısınan sargılar arasına yağ girerek soğutma sağlanmaktadır.



Şekil 2.3., Çekirdek etrafına sarılmış bobin.

### 2.3.3. Şalter

Şalter bir devredeki elektrik akımını açıp kapamaya ya da değiştirmeye işini yapan araçtır. Kazanın iç kısmında genel olarak çekirdeğe bağlı bulunur. Bobindeki sargılardan çıkan uçlar şaltere bağlanarak istenilen kademelerde güç ve gerilim üretilir. Bazı durumlarda şalter yerine komütatörde kullanılmaktadır.

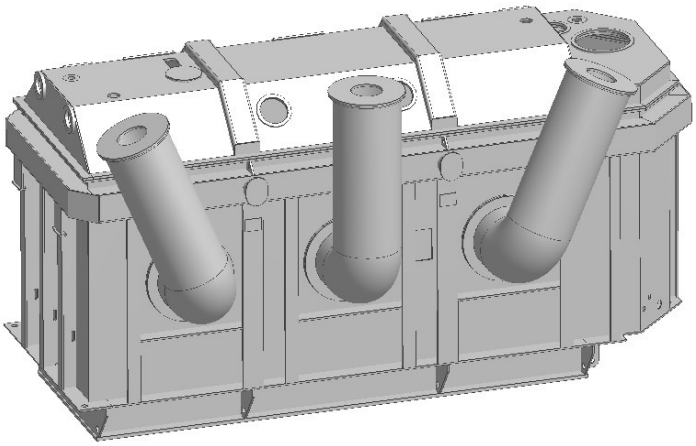


Şekil 2.4., Şalter tipleri

### 2.3.4. Kazan

Transformatörün dış iskeletini oluşturan yapıdır. Çekirdek, bobin ve şalterin (aktif kısmın) ısınmasını önlemek için yağ ile soğutma yapılmaktadır ve dolayısıyla bunu kapalı bir ortamda olması gerekir. Bu kapalı ortam kazanı oluşturmaktadır. Kazan içerisinde geçen iletken tellerden demir sacların ısınmasını engel olacak şekilde aktif kısım ile sac aralarında mesafeler bırakılarak boyutları belirlenir. Şekil

2.5'da tez çalışmasında kullanacak trafo kazanı gösterilmiştir. Trafo kazanları farklı şekillerde de olabilirler.

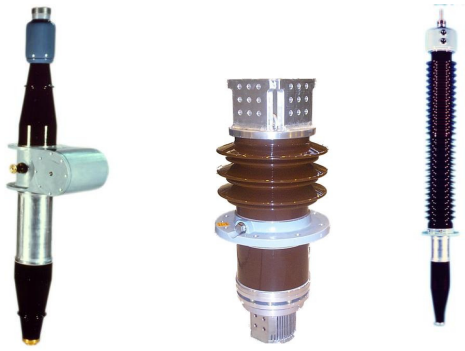


Şekil 2.5., Transformatör Kazanı

### 2.3.5. Buşingler

Buşingler elektriğin kazana kablolar vasıtasıyla girmesini ve çıkmasını sağlayan elemanlardır (Şekil 2.1). Kazanın üst kısmında bulundukları gibi duvarların yan yüzeyinde de olabilirler. Buşingler girecek ve çıkacak olan elektriğin gücüne ve gerilime bağlı olarak değişmektedirler. Genel olarak çalışma ortamına göre üç değişik tipte üretilirler. Bunlar;

— Yağ-Yağ Buşingler: Kazan içinde ve dışında yağ ortamda çalışır.
— Yağ-Hava Buşingler: Kazan içinde yağda, dışında ise havada çalışır.
— Yağ-SF6 Buşingler: Kazan içinde yağda, dışında ise SF6 gazlı ortamda çalışır.



Şekil 2.6., Buşing tipleri

### 2.3.6. Konservatör

Genleşme kabı (Konservatör) kazanın üst kısmında bulunmakta ve adından da anlaşıldığı gibi yağın genleşmesini sağlamaktadır (Şekil 2.7). Kazan içinde bulunan yağ ısınmadan dolayı yağ genleşir, kazan içerisinde oluşan yanmalardan dolayı gazlar meydana gelir ve buraya çıkar. Burada bir vana yardımıyla bu gazdan numune alınarak laboratuarda incelenmektedir. Bu şekilde gazlar sayesinde kazan içindeki yanmanın neden kaynaklandığı tespit edilmektedir. Konservatörler değişik büyüklüklerde olabilirler ve seçimleri kazandaki yağ miktarına göre yapılır.



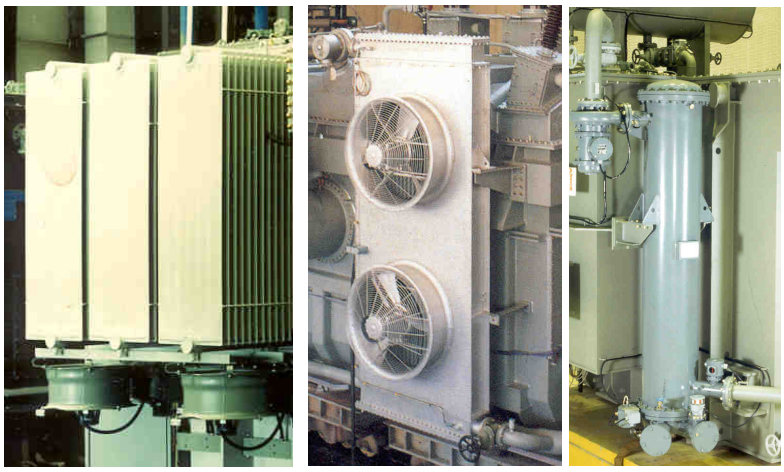
Şekil 2.7., Transformatör Genleşme Kabı

### 2.3.7. Soğutma Sistemleri

Transformatörlerde soğutucular değişik tiplerde yapılmaktadır. Bunlar;

- Radyatör ve fan ile yapılan soğutma
- Yağ-hava soğutucu kullanarak yapılan soğutma
- Yağ-Su soğutucu kullanılarak yapılan soğutma

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi radyatör ve diğer soğutuculara yağ girmekte ve burada hava veya su yardımıyla bu yağ soğutulmaktadır. Trafolarda oluşan elektriksel kayıplarla ısınmalar meydana gelmektedir. Soğutucular oluşan bu kayıplara göre sayıları ve ebatları belirlenir. Soğutma işlemini sağlamak için müşterilerin isteğine göre kazan üzerine veya ayrı bir üniteye monte edilerek soğutmayı sağlarlar. Soğutucu ünitelerine yağın ulaşmasını sağlam için borular, vanalar, pompalar vb. kullanılır. [ABB, 2004; AREVA, 2008].



Şekil 2.8., Radyatör, Yağ-Hava ve Yağ-Su soğutucuları

## 2.4 Transformatör Kazan Yapısı

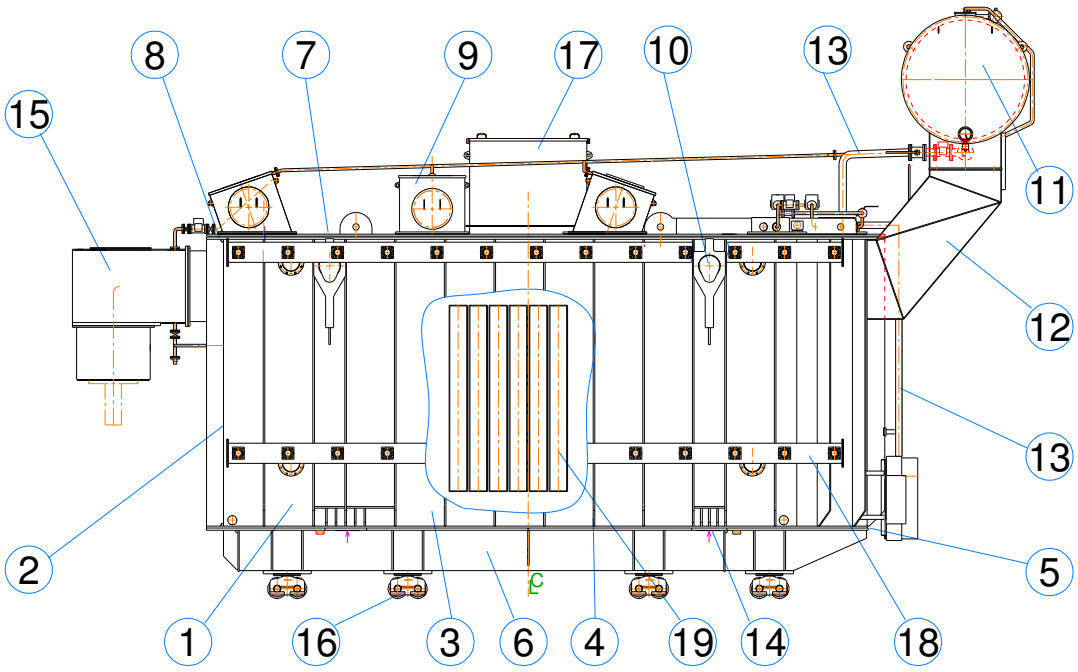
Kazan içinde elektrik devrelerin geçtiği ve bu elektrikten dolayı soğutmak için de yağın bulunduğu kapılı bir yapıdır. Kazan içinde yağ olmasından dolayı sızdırmazlık özelliği vardır. Ayrıca kazanın üzerinde aksesuarlar (buşing, genleşme kabı, radyatör vs.) ve destekleyici yapıların üzerinde taşıma görevi de üstlenir [ABB, 2004; Rothbart A. Harold, 1964].

Yağlı transformatörlerde sargılarla birlikte demir gövde, transformatör kazanı adı verilen bir kap içine yerleştirilir. Sonra sac levhalardan imal edilmiş olan bu kabın her tarafı yağ sızdırmaz bir halde sıkı sıkıya kapanır. Havası boşaltılmış fırınlarda kurutulan aktif kısım içindeki nem çıkarıldıktan sonra kazana yerleştirilir ve yağ doldurulur. Doldurulacak yağ içine nem kaçmamalıdır. Çünkü nem yağın izolasyon mukavemetini çok düşürür. Delinme mukavemeti 100 kV/cm üstünde olan yağ bulunan transformatör kabına bir damla suya tekabül eden nem girecek olursa, delinme mukavemeti hemen yarı değerine düşer. Nem alınmış yağın kurutulması gerekir. Şayet numunelik yağ bir cam tüp içine 150ºC civarında kaynatılacak olursa ve yağ içinde çıtırdamalar geliyorsa, bu taktirde yağda nem vardır ve elektriki dayanıklılığın kontrolüne gerek yoktur. Standartlara göre kaynatılıp yeniden kazana doldurulmaya hazır bir yağın elektriki delinme mukavemeti 125 kV/cm'nin altına düşmemelidir [Turgut BODUROĞLU, 1988; AREVA, 2008].

Transformatörün büyüklüğüne ve şekline göre kazan konstrüksiyonu değişir. Bundan önce bahsedildiği gibi ısınma nedenlerinden transformatör kazanları, küçük

güçlerden büyük güçlere doğru düz cidarlı, kaburga veya perdeli cidarlı, dalgalı cidarlı, borulu ve radyatörlü olarak imal olunurlar. Cebri olarak soğutulan büyük güçlerdeki transformatör kazanları da kalın saclardan olmak üzere düz cidarlı olarak inşa olunurlar [Turgut BODUROĞLU, 2008; Flanagan M. William, 1992].

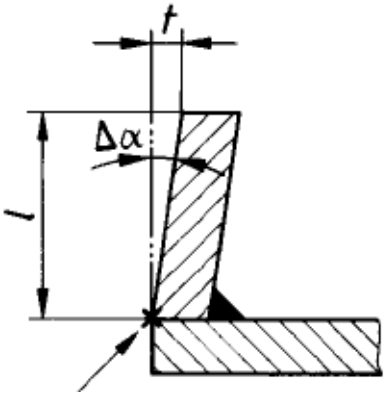
Yağ kazanları transformatörlerin büyüklüğüne ve soğutma şekline göre duvar sacları 1 ile 10mm kalınlığında saclardan yapılırlar. Küçük ve orta güçteki transformatörlerin kapak ve alt kısımları genel olarak 6 ile 10 mm'lik saclardan yapılır. Büyük güçlerdi transformatörlerde ise kapak ve alt kısımları 20 ile 70 mm'lik saclardan yapılır. Kazan cidarların kalınlığı genel olarak yağ yüksekliğine (Transformatör içindeki yağın en alt noktası ile en üst noktası arasındaki mesafe) bağlıdır. Bir metrelik kazan yüksekliğinde düz olan sac kalınlığı 3 mm'dır. Düz cidarlı daha yüksek kazanlarda çok kalın saclar kullanmamak için, kazan sacları çeşitli konstrüksiyonlarla desteklenir. Kazan saclarının desteklenmesine için çeşitli takviye konstrüksiyonlar mevcuttur. Şekil 2.9'da yapılan bir takviye örneği verilmiştir [Turgut BODUROĞLU, 1988; AREVA, 2008; Lowdon Eric, 1988].



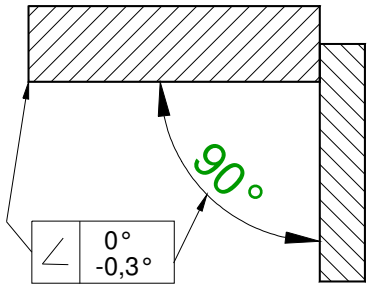

Şekil 2.9., Transformatör kazan elemanları

1 = Yan duvarlar
2 = Yan duvarlar
3 = Takviyeler arası duvar
4 = Takviye
5 = Taban plakası
6 = Kapak sacı
7 = Kapak
8 = Kazan üst çerçeve
9 = Dom
10 = Taşıma boynuzları
11 = Genleşme kabı
12 = Destekleyici
13 = Dolap borusu
14 = Kaldırma noktası
15 = Yağ kablo kutusu
16 = Tekerlekler
17 = Hava kablo kutusu
18 = Kolektör
19 = Mağnetik ekranlama

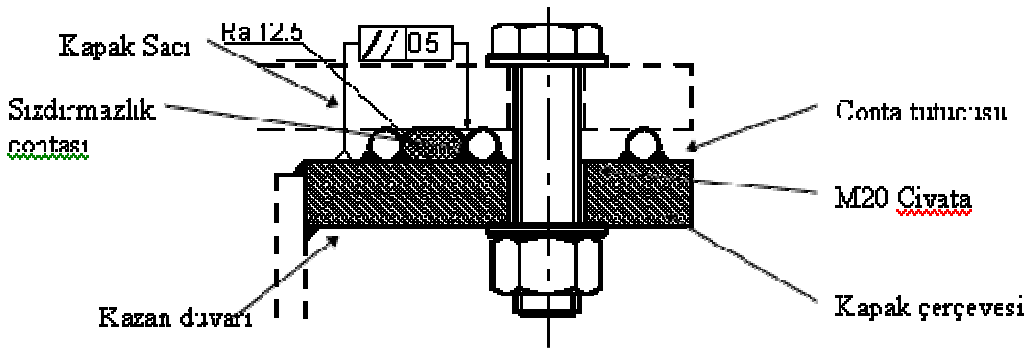
Kazanı oluşturan saclar genel olarak birbirleri ile kaynakla tuttururlar**.** Takviyelerin kazan duvarlarına 90º veya maksimum ± 20º (Δα) gelecek şekilde kaynak edilirler (Şekil 2.10). Taban sacı kazanın yan saclarına da kaynakla tutturulur. Kazan üst kısmında bulunan kapak çerçevesi ön ve yan duvar sacına Şekil 3.11'de görüldüğü gibi köşe kaynağı yapılarak tespit edilir. Kapak sacı da kapak çerçevesine ya cıvata ile bağlanır ya da kaynak edilir (Şekil 2.12). Burada en çok dikkat edilmesi gereken konu yapılan kaynağın sızdırmaz olması gerektiğidir. Bütün transformatör kazanlarına sızdırmazlık testi yapılmaktadır. [Turgut BODUROĞLU, 1988; AREVA 2008].




Şekil 2.10., Takviye kaynağı




Şekil 2.11., Kapak çerçevesinin kaynağı



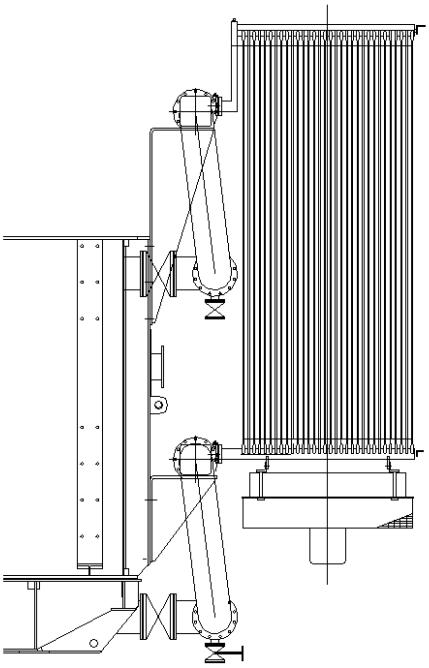

Şekil 2.12., Kapak sacının kapak çerçevesine tespiti

Kazan kapağında veya bazen de yan duvarlara gelen domlar buşinglerin tespit edilmesini sağlarlar. Domlar genel olarak dairesel olurlar ve buşinglerin elektriksel gerilim ve güçlerine göre çapları ve yükseklikleri değişmektedir. Transformatörün taşıma esnasında dom ve buşingler söküldüklerinden kazana montajlı olacak şekilde yapılırlar. Domu kazana tespit etmek için kapağa açılan deliğe flanş kaynatılmaktadır. Genel olarak domlar kazan kapağa dik olarak tespit edilmektedir, fakat bazı durumlarda da domlar açılı olarak da yapılabilmektedirler özellikle yağ-hava buşingleri kullanıldığında [Turgut BODUROĞLU, 1988].

Kazanların soğutulmasında daha önce değinildiği gibi radyatör, yağ-hava ve yağ-su soğutucular kullanılmaktadır. Radyatörlü soğutmada genel olarak trafo üzerine monte edilmektedirler (Şekil 2.13), fakat radyatör sayısı trafo üzerine yerleştirilemeyecek kadar fazla olduğu durumlarda da trafodan ayrı olarak soğutma bankları üzerine yerleştirilerek yapılmaktadır. Soğutmayı sağlamak için radyatör üzerlerine şekil 2.13'de görüldüğü gibi fanlar monte edilir. Atılması gereken ısı kayıplarına göre fanların adetleri belirlenmektedir. Radyatörler içerisinde yağın dolaşımını borular sağlamaktadır. Şekil 2.14'de görüldüğü gibi bu borular transformatörün üst kısmından ve alt kısmından radyatörlere bağlanmışlardır. Burada yağ kazanın üst kısmından çıkar ve radyatörlerden geçerek soğumakta, daha sonra da soğumuş yağ tekrardan kazana alt kısımdan girmektedir. Borular yağın en sıcak olduğu bölgeye yerleştirilerek yağın daha iyi soğuması sağlanır [Turgut BODUROĞLU, 1988; AREVA, 2008; ABB, 2004].



Şekil 2.13., Transformatör üzerinde radyatör.



Şekil 2.14., Transformatör üzerine radyatör yandan görüntüsü

Yağ genişleme kabı genel olarak kapağın üst kısmına yerleştirilir. Küçük trafolarda bu yağ rezervuarı sabit olarak bağlantı boruları yardımı ile kapağa kaynak edilir. Orta ve büyük güçlerde özel konstrüksiyonlara gerek duyulabilir. Normal olarak genleşme kabından kazana iki boru gider, bunlardan biri depodan kazana yağın akmasını sağlar, diğer boru ise havanın çıkmasını sağlar. Ani ısınmalarda yağın serbest genişlemesini sağlamak amacı ile bu genişleme kabı daima çevre ile

iştirak halinde tutulur. Bu amaçla üzerinde açık bir delik vardır. Yağ içine yabancı maddelerin girmemesi için bu delik başı aşağıya doğru bükülür. Genişleme kabı içindeki hava kaçırma borusunun içine yağ doldurma sırasında yağ kaçarak tıkanmaların meydana gelmemesi için bir miktar kap içinde uzatılır. Büyük trafolarda genişleme kabındaki yağın hava ile temas ederek okside etme ve nem almasına engel olmak amacıyla kap içine şamandıralar konur ve hava deliği ile yağ genişleme kabı arasında nem emici maddeler yerleştirilir. Bu suretle yağın temas yüzeyi küçülmüş ve yağ ile temas edecek havanın nemi giderilmiş olur. Genişleme kabı ile kazan arasındaki bağlantı borusunun iç çapının ince seçilmesi genişleme kabındaki oksidasiyonlardan esas kazan içindeki yağın etkilenmemesine yardım eder. Şekil 2.15'de kapağa sabit bir şekilde tespit olunmuş genişleme kabı görülmektedir [Turgut BODUROĞLU, 1988; Rothbart A. Harold, 1964].



Şekil 2.15., Transformatör üzerinde genleşme deposu yerleşimi

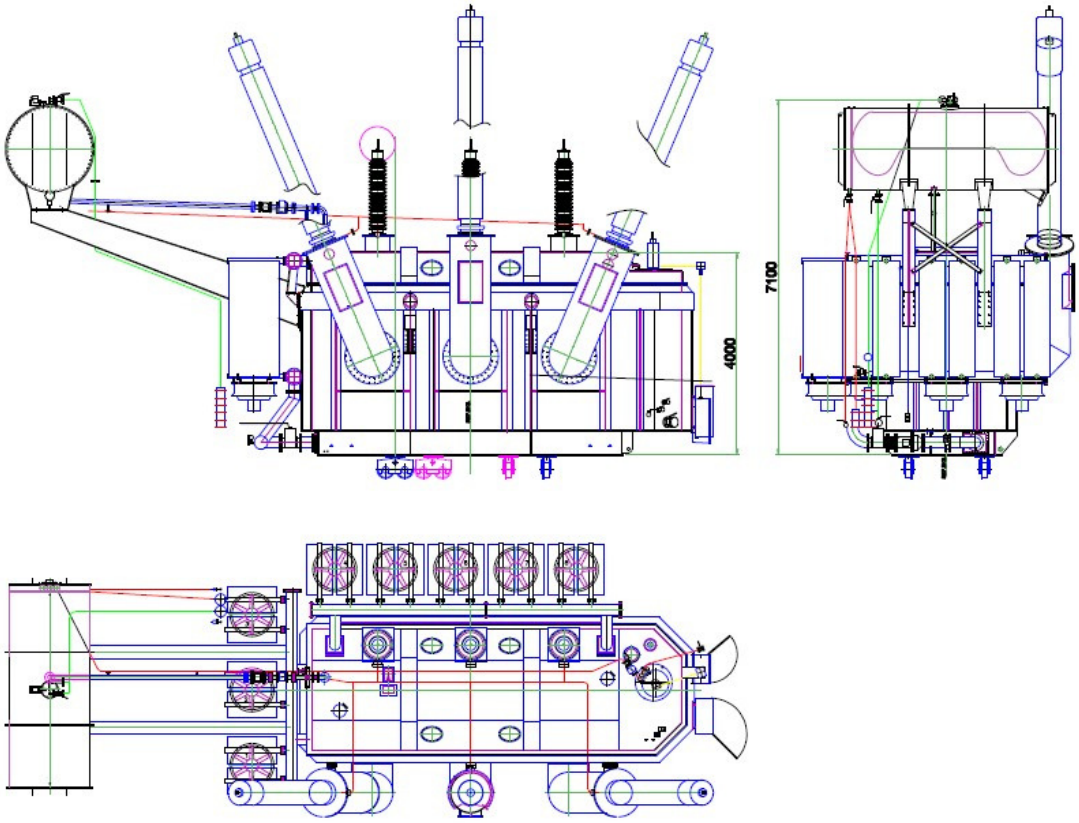
# 3. TRANSFORMATÖR KAZANININ ANALİTİK YÖNTEMLERLE HESABI

Trafo hesaplarındaki analitik yöntemler trafo parçalarını kirişe benzeterek mukavemet hesapları yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında ele alınan 250 MVA gücündeki trafonun 1 bar basınca göre mukavemet hesabı yapılmıştır. Öncelikle trafonun yüksekliği, genişliği ve uzunluğu hesaplanarak kazan boyutları tespit edilmiştir. Atılması gereken ısı miktarına göre radyatör ve fan sayıları belirlenerek kazan üzerine tespiti yapılmıştır. Buşing tiplerine göre domlar kazan üzerine monte edilirler. Buşinglerin elektriksel atlama mesafelerine göre de genleşme deposunun kazan üzerine monte edilecek yerleri belirlenirler. Genleşme deposunun boyutları kazan, borular ve radyatörlerin içerisindeki yağ miktarı bulunarak belirlenirler. Trafonun nakil esnasında kaldırılacağı yüke göre de kaldırma kulakların taşıma kapasiteleri belirlenerek kazanı merkezleyecek şekilde yerleştirilirler. Trafonun tekerlekleri de toplam tona göre kaç adet ve taşıma kapasitelerine karar verilerek kurulacağı tesisteki ray aralıklarına göre kazan alt kısmına konumlandırılırlar.

Bu tez çalışmasında trafo kazanının iç kısımda oluşan basınç duvar sacları üzerine gelen etkileri belirlenerek bu kazan iyileştirilmiştir. Kazan tasarımında kazan içerisinde oluşan basınç, duvar kalınlığı, kapak kalınlığı ve taban sacın kalınlığı hesapları yapılmıştır.

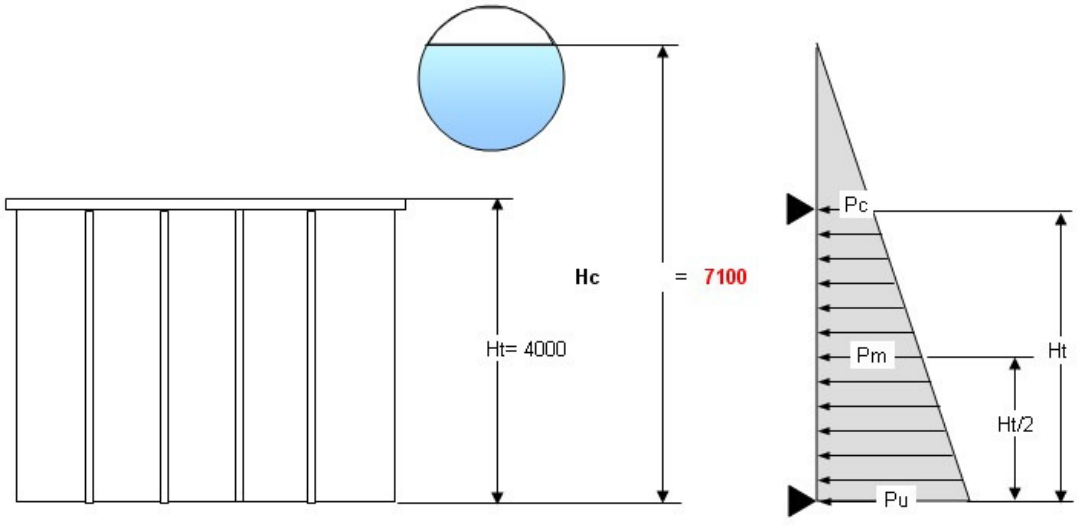
## 3.1 Kazan Basınç Hesabı

Şekil 3.1'de 250MVA gücündeki trafo resmi verilmektedir. Bu resimde trafo kazanı üzerine yerleştirilmişmiş dom ve üzerlerinde buşingler, genleşme deposu, radyatörler ve fanlar gibi trafonun son halidir. Trafodaki işletme basıncı ile kazan basıncı için trafo içerisindeki maksimum yağ seviyesi (yağın en alt nokta ile en üst nokta arasındaki mesafe) ile kazan kapağına kadar olan yağ seviyesi ile hesaplanır.




Şekil 3.1., Güç transformatörü

Şekil 3.1'de verilen 7100 mm ölçüsü trafodaki maksimum yağ yüksekliğidir. Maksimum yağ seviyesi kazan tabanından genleşme deposunda yağın çıkabileceği en üst seviyedir. Bu ölçüye göre işletme basıncı hesaplanmaktadır. Kazan kapağındaki basıncı ise de yağın en üst seviyesi ile kazan içerisindeki yağ yüksekliğin farkı ile hesaplanmaktadır.




Şekil 3.2., Trafonun normal işletme şartlarındaki basınç hesabı

Şekil 3.2'de trafonun normal işletme şartlarında kazan ve diğer ekipmanlar üzerine gelen hidrostatik basınç dağılımı gösterilmiştir. Trafolarda kullanılan yağın 90º deki yoğunlu (ρ) 0,89 kg/dm³'tür. Bu bilgilerle basınç hesabı;

$$P_u = 10^{-4} \times \rho \times H_c = 10^{-4} \times 0{,}89 \times 7100 = 0{,}6319 \,\text{bar} \quad (4.1)$$

Normal işletmedeki hidrostatik basıncı 0,6319 bar çıkmaktadır (3.1). Burada bulunan basınç trafonun işletmede %100 verimle çalışmasında ortaya çıkar. Bazı durumlarda transformatör üzerine aşırı yükselmeler gelebilmektedir. Trafonun çalışacağı yerde gelebilecek maksimum yüklenme hesaplanarak transformatör imalatçılarına bildirilir. Bu tez çalışmasındaki transformatörün üzerine %300'lük gibi bir yüklenme olabileceği belirlenmiştir.

$$P = 3 \times P_u = 3 \times 0{,}6319 = 1{,}8957 \,\text{bar} \quad (3.2)$$

3.2 eşitliğinde %300'lük bir yüklenme durumunda basıncımız 1,8957 bar olarak hesaplanmaktadır. Burada emniyetli olması için trafo kazanına gelebilecek basıncı yaklaşık 2 bar olarak kabul edilir. Oluşan bu basınç aynı zamanda vakum basıncımızdır.

Kapak üzerinde oluşan hidrostatik basınç;

$$P_c = 10^{-4} \times \rho \times (H_c - H_t) = 10^{-4} \times 0{,}89 \times (7100 - 4000) = 0{,}276 \,\text{bar} \quad (3.3)$$

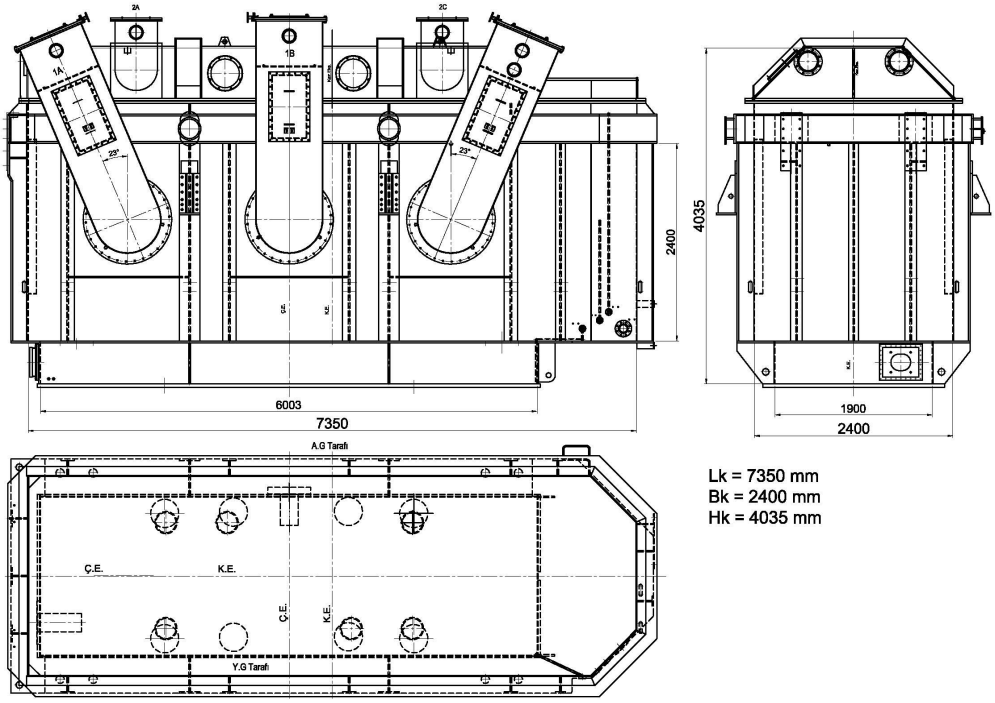
%100 normal işletmedeki hidrostatik basıncında 3.3 eşitliğinde 0,27 bar bulunur. Bulunan bu değeri %300 çalışma durumunda ise;

$$P_c = 3 \times 0{,}276 = 0{,}828 \,\text{bar} \quad (4.4)$$

3.4 eşitliğinde kazan kapağı üzerinde gelen basınç 0.828 bar olarak hesaplanmaktadır. Fakat trafo vakum altında yağ ile doldurulursa bütün yüzeylere gelen basınç eşit olur (Pu=Pc). Genel olarak trafolarda yağ doldurma işlemi vakum altında yapılmaktadır. Bu nedenle bu tezdeki yapılan optimizasyonlarda trafo kazanın bütün yüzeylerine 2 bar sabit basınç uygulanmıştır.

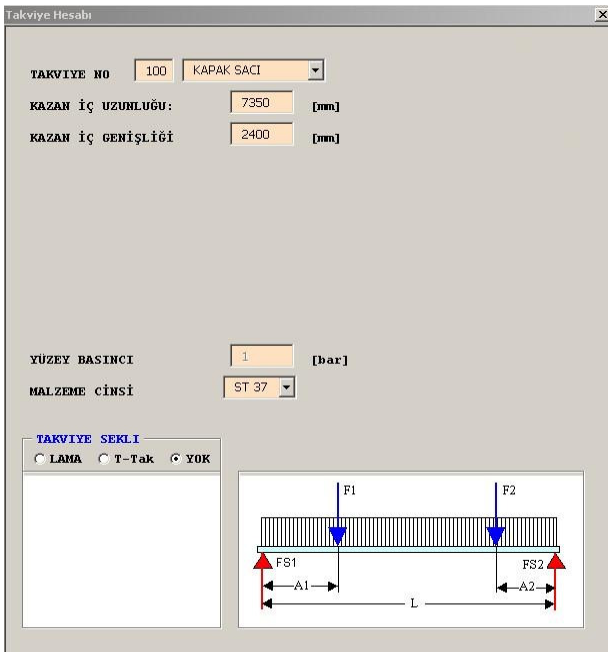
## 3.2 Analitik Yöntemlerle Transformatör Kazan Kapak Sacı Hesabı

Üzerinde iyileştirme yapılmış olan kazan için 1 bar basınç için mukavemet hesapları yapılmıştır. Bu kazana 2 bar basınç uygulandığında oluşacak etkileri ANSYS Workbench yardımı ile optimize edilerek belirlenmiştir. Analitik yöntemlerle kapak hesabı için çeşitli programlar hazırlanmıştır. Bu programlar yardımıyla kapak sacın kalınlığı yaklaşık olarak belirlenmektedir. Program ile hesap yapılabilmesi için bazı değerlerin (kazan iç kısım uzunluğu, genişliği, yüksekliğidir) girilmesi gerekmektedir. Kazan iç ölçüleri şekil 3.3'de gösterilmiştir.



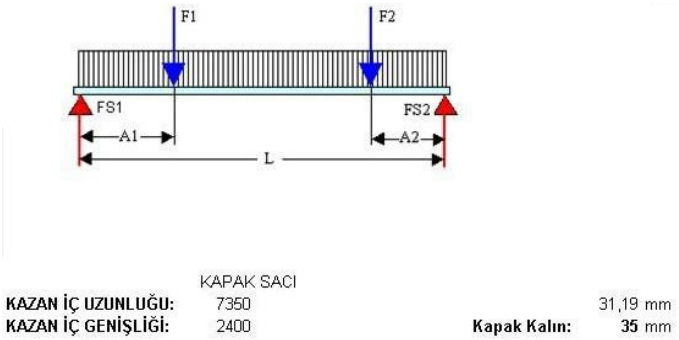

Şekil 3.3., Kazan iç ölçüleri

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi kazan iç uzunluğu (Lk) 7350 mm, kazan iç genişliği (Bk) 2400 mm ve kazan iç yüksekliği (Hk) 4035 mm olarak bulunmuştur. Şekil 3.4'de de görüldüğü gibi kapak sacı hesabı için kazan iç uzunluğu ve kazan iç genişliği girilmektedir. Burada kapak yüzeyine gelen basınç standart olarak 1bar kabul edilmiştir.




Şekil 3.4., Kapak sacı hesabı

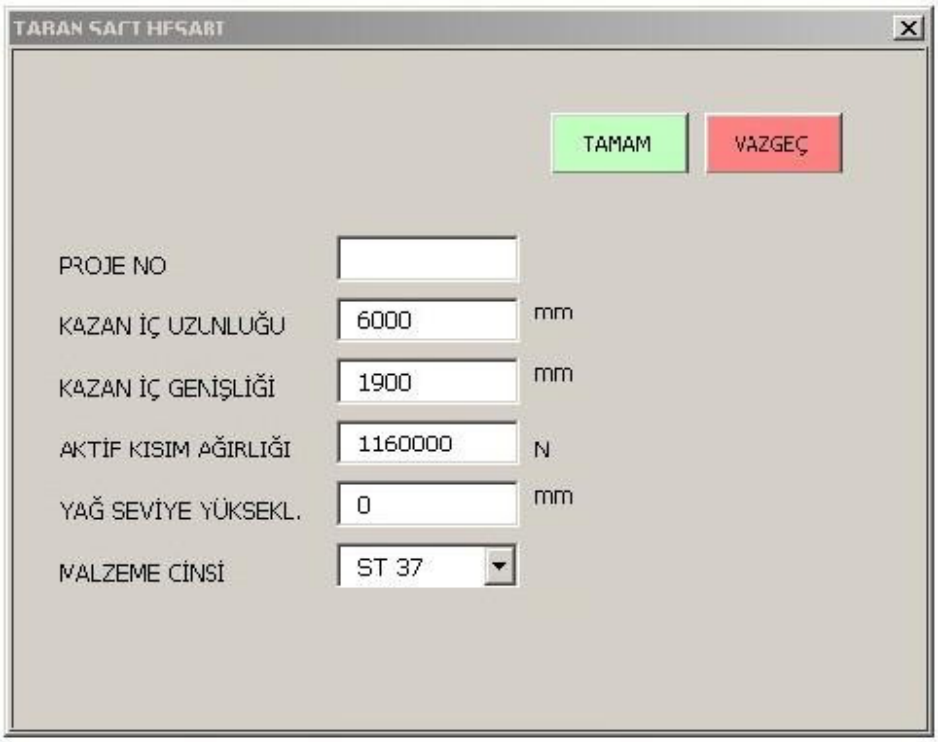
Şekil 3.4'deki programın çalıştırılması ile şekil 3.5'deki sonuçlar elde edilmiştir. Burada 1 bar basınç sac üzerine yayılı yük olarak dağıtılmıştır. F1 ve F2 kuvvetleri buşinglerden gelmektedir ve bu kuvvetler sabit olarak kabul edilmiştir. Kazan iç uzunluğu ve genişliği verilmesi ile kapak sacın kalınlığı 31,2 mm olarak hesaplanmıştır. Piyasada kullanılan sacların bu değerlere en yakın olanlarının kalınlıkları 30 ile 35 mm'dir, emniyet açısından bulunan değerin üstüne çıkılmalıdır. Bundan dolayı kullanılması gereken sacın kalınlığı 35 mm kabul edilmiştir.




Şekil 3.5., Kapak sac kalınlık hesabın sonucu

## 3.3 Analitik Yöntemlerle Transformatör Kazan Taban Sacı Hesabı

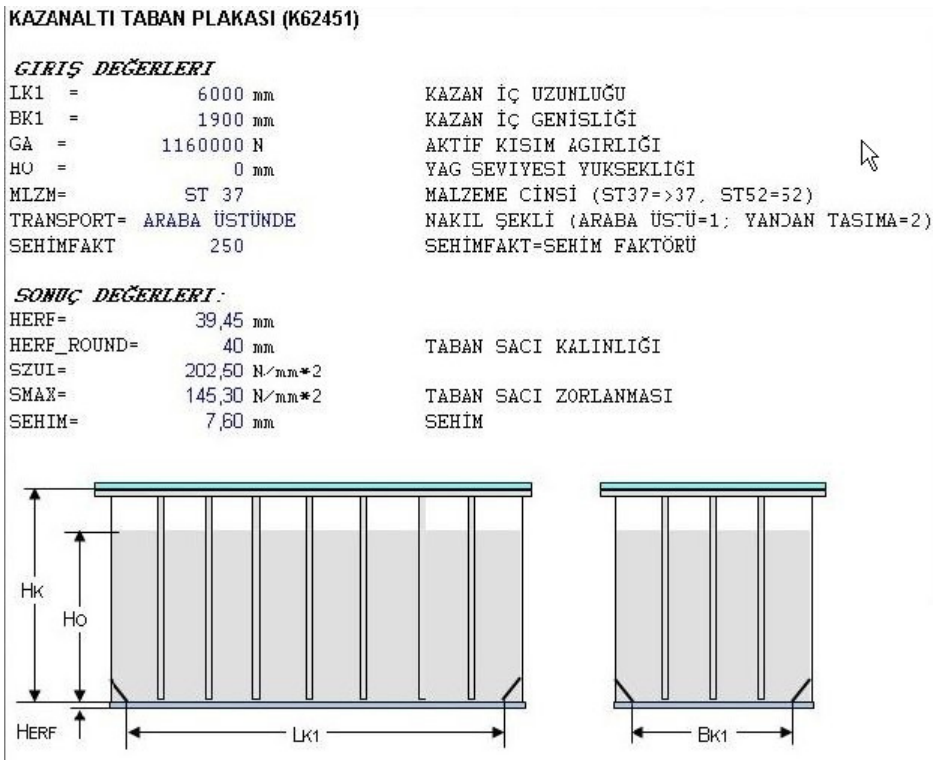
Kazan taban sacı hesabında ise şekil 3.3'de tabanın alt kısmında bulunan 6000 mm (taban uzunluğu) ve 1900 mm (taban genişliği) ölçüleri programa girilmektedir. Bunların dışında trafo kazanının içinde bulunan ve taban yüzeyine oturan aktif kısmın ağırlığının da bilinmesi gerekmektedir. Kullanılan sargı bakırların ağırlığı, sargı izolasyonları (ağaç ve kâğıt), şalter ağırlığı ve çekirdek sacı ile sıkıştırma düzeninin ağırlıkları aktif kısım ağırlığını oluşturmaktadır. Bu trafo için hesaplanan aktif kısım ağırlığı 116000 kg olarak bulunmuştur.




Şekil 3.6., Kazan taban sacı hesabı

Şekil 3.6'da görülen programda aktif kısım ağırlığı N (1kg=10N) cinsinden girilmektedir. Trafo nakil esnasında kaldırma indirme esnasında kazan içerisinde bulunan yükün ağırlığı tabana etkilemektedir. Genel olarak nakil esnasına kazan üzerindeki aksesuarlar (buşing, radyatör, borular, genleşme deposu vb.) sökülmektedir ve ayrıca yağ da boşaltılmaktadır. Bundan dolayı kazan içerisinde yağ olmadığından yağ seviyesi de sıfır olmaktadır. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi hesap sonucunda taban sacın kalınlığı 39,45 mm bulunmuştur ve bu değerin bir üst değeri

40 mm olarak alınmıştır. Taban sacında oluşan maksimum gerilmede 145,30 N/mm$^2$ ve maksimum sehim de 7,60 mm hesaplanmıştır.



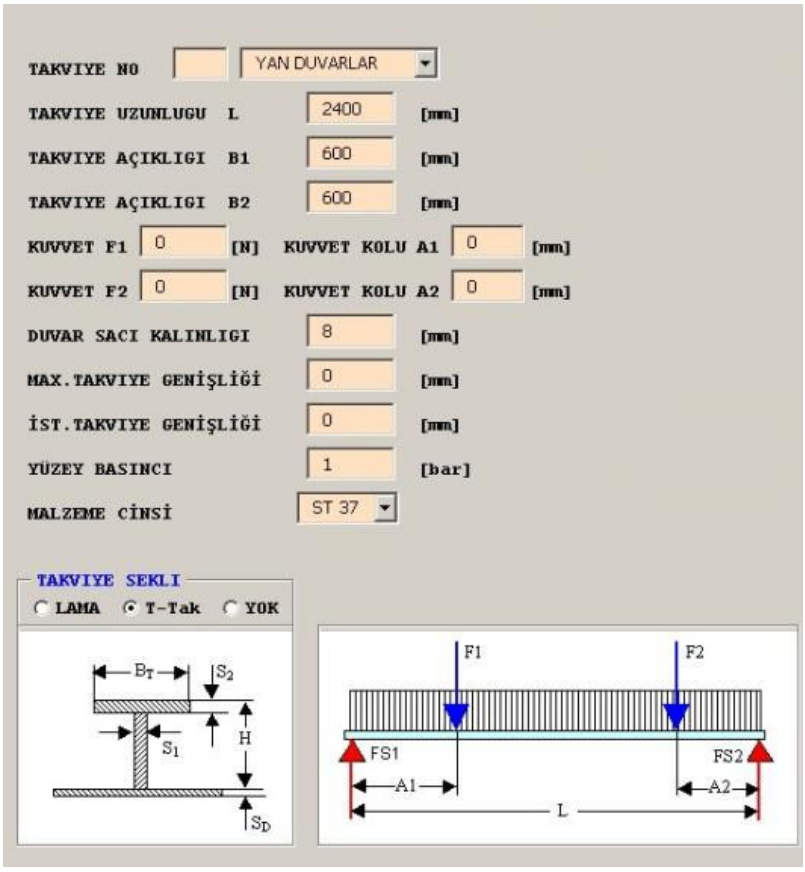

Şekil 3.7., Kazan taban sacı hesap sonucu

Bu tez çalışmasında kazan boyutları ve aktif kısım değiştirilmediğinden tabana gelen yük de değişmemektedir. Bu sebeple kazan taban sacı da 40 mm olarak kabul edilmiştir. Transformatörün çalışacağı yerde tabanın altına tekerlek ve benzeri bir destek olmadığından çalışma esnasında oluşan basıncın da etkisi olmayacaktır.

## 3.4 Analitik Yöntemlerle Kazan Duvarlarındaki Takviye Sacı Hesabı

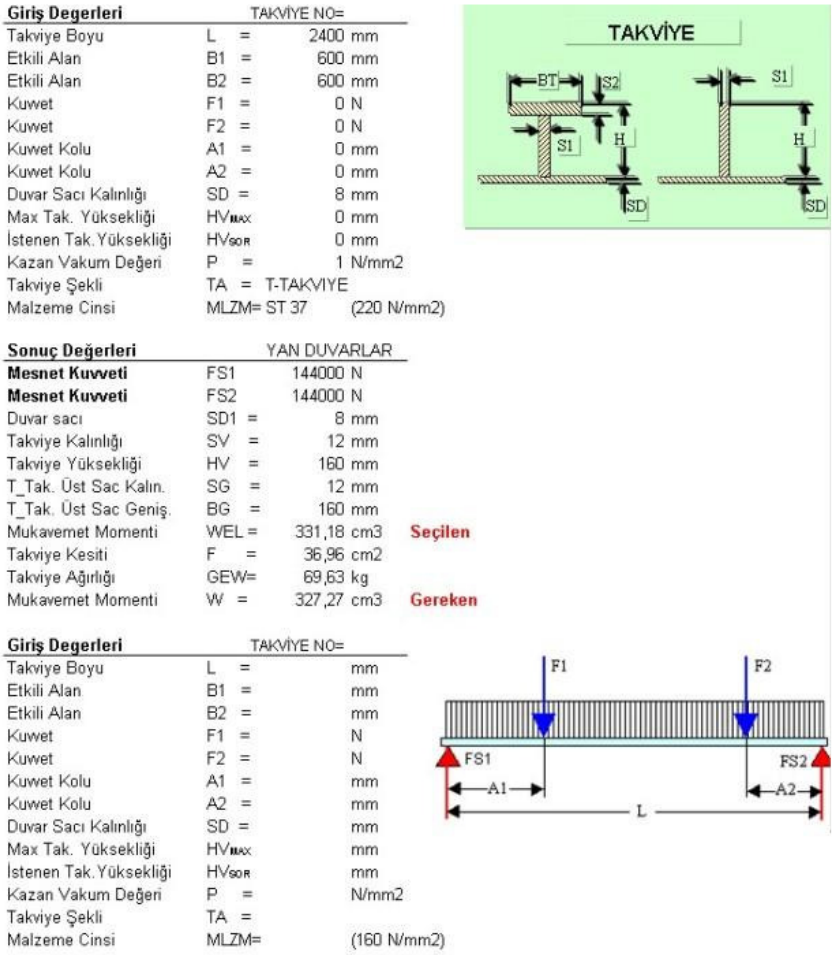
Kazan takviye sacı kalınlık hesabı için şekil 3.8'de ara yüzü gösterilen program kullanılmıştır. Bu programda el ile girilen değerler takviye uzunluğu (2400 mm), takviyeler arası mesafe (600 mm), duvar sac kalınlığı (8 mm) girilmekte. Ayrıca takviye tipi de seçilmektedir. Takviyeler arasındaki mesafeler standart olarak 600 mm alınmaktadır, fakat yan duvarda dom çıkışı olursa 600 mm'den daha fazla alınabilmektedir. Kazanlarda kullanılan takviyeler lama (I-takviye) ve T-takviye olarak 2 tipte yapılmaktadır. Duvar üzerindeki takviyeler hareketli mesnet olarak

kabul edilmiştir. Trafo kazan duvar sacları genel olarak 6, 8, 10 ve 12 mm kalınlıklarda kullanılmaktadır. Üretilmiş trafonun kazan basıncı 1 bar olduğundan duvar kalınlığı 8 mm olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi programa kuvvet uygulandı ise kuvvetleri ve kenarlara olan mesafeler de girilir. Yüzeye uygulanacak basınç da 1 bar olarak girilmiştir.



Şekil 3.8., Kazan takviye hesabı

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi mukavemet momenti 327,27 $cm^3$ olarak hesaplanmıştır. Takviye yüksekliği 160 mm, takviye kalınlığı 12 mm, T-takviye yüksekliği 160 mm ve T-takviye kalınlığı da 12 mm olarak bulunmuştur. Hesaplanmış olan bu değerler minimum değerlerdir. Kazan tasarımında takviyelerin emniyetli olması açısından takviye yüksekliğini 180 mm, T-takviye yüksekliği 160 mm ve takviye kalınlıklarını da 16mm olarak seçilmiştir.



| Giriş Degerleri | | TAKVİYE NO= | | |
|---|---|---|---|---|
| Takviye Boyu | L = | 2400 | mm | |
| Etkili Alan | B1 = | 600 | mm | |
| Etkili Alan | B2 = | 600 | mm | |
| Kuwet | F1 = | 0 | N | |
| Kuwet | F2 = | 0 | N | |
| Kuwet Kolu | A1 = | 0 | mm | |
| Kuwet Kolu | A2 = | 0 | mm | |
| Duvar Sacı Kalınlığı | SD = | 8 | mm | |
| Max Tak. Yüksekliği | $HV_{MAX}$ | 0 | mm | |
| İstenen Tak.Yüksekliği | $HV_{SOR}$ | 0 | mm | |
| Kazan Vakum Değeri | P = | 1 | N/mm2 | |
| Takviye Şekli | TA = | T-TAKVIYE | | |
| Malzeme Cinsi | MLZM= | ST 37 | (220 N/mm2) | |

| Sonuç Değerleri | | YAN DUVARLAR | | |
|---|---|---|---|---|
| **Mesnet Kuvveti** | FS1 | 144000 | N | |
| **Mesnet Kuvveti** | FS2 | 144000 | N | |
| Duvar sacı | SD1 = | 8 | mm | |
| Takviye Kalınlığı | SV = | 12 | mm | |
| Takviye Yüksekliği | HV = | 160 | mm | |
| T_Tak. Üst Sac Kalın. | SG = | 12 | mm | |
| T_Tak. Üst Sac Geniş. | BG = | 160 | mm | |
| Mukavemet Momenti | WEL = | 331,18 | cm3 | **Seçilen** |
| Takviye Kesiti | F = | 36,96 | cm2 | |
| Takviye Ağırlığı | GEW= | 69,63 | kg | |
| Mukavemet Momenti | W = | 327,27 | cm3 | **Gereken** |

| Giriş Degerleri | | TAKVİYE NO= | |
|---|---|---|---|
| Takviye Boyu | L = | | mm |
| Etkili Alan | B1 = | | mm |
| Etkili Alan | B2 = | | mm |
| Kuwet | F1 = | | N |
| Kuwet | F2 = | | N |
| Kuwet Kolu | A1 = | | mm |
| Kuwet Kolu | A2 = | | mm |
| Duvar Sacı Kalınlığı | SD = | | mm |
| Max Tak. Yüksekliği | $HV_{MAX}$ | | mm |
| İstenen Tak.Yüksekliği | $HV_{SOR}$ | | mm |
| Kazan Vakum Değeri | P = | | N/mm2 |
| Takviye Şekli | TA = | | |
| Malzeme Cinsi | MLZM= | | (160 N/mm2) |

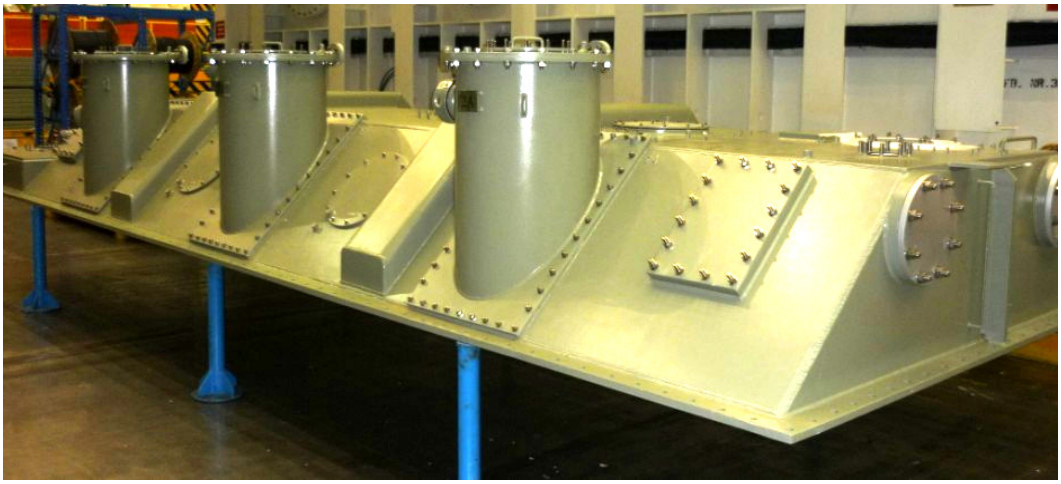
Şekil 3.9., Kazan takviye sacı hesap sonucu

Hesaplama sonucunda 250 MVA gücündeki transformatörün kazanındaki takviye ölçüleri bulunmuştur (Şekil 4.10). Kazanın ön duvarında dom çıkışı olduğundan takviyeler arası mesafe 900 mm'ye çıkarılmıştır ve takviyeler arasına başka bir takviye ile desteklenmiştir. Kazan duvarlarındaki mukavemeti arttırmak için üst kısımda U-takviye ile bütün yüzeyler birbirine kaynatılmışlardır. Nakil esnasında trafoyu kaldırmak için kullanılan kaldırma boynuzları ve genleşme deposunu taşıma ayakları U-takviye üzerine kaynatılmaktadırlar. Bu takviye üzerine gelen yük fazla olduğundan kalınlığı 16 mm seçilmiştir. Kaldırma boynuzların olduğu takviyelerde kaldırma esnasında oluşacak yüklere karşı sac kalınlıkları 20 mm ve takviye genişliği de 180 mm seçilmiştir.



Şekil 3.10., Transformatör kazanı

Şekil 3.11'de kazan kapağı ve üzerindeki domlar gösterilmiştir. Kapak üzerine iki ayrı bölgede sac kalınlığı 20 mm olan U-profil takviye ile desteklenmiştir. Domlar ve el delikleri kapak üzerine cıvatalar aracılığı ile tespit edilmiştir. Tez çalışmasında domun üzerindeki buşingin kapağa etkisi az olduğundan yok sayılmıştır. Bu denenler katı modelde dom üzerine buşing oluşturulmamıştır.



Şekil 3.11., Transformatör kazan kapağı

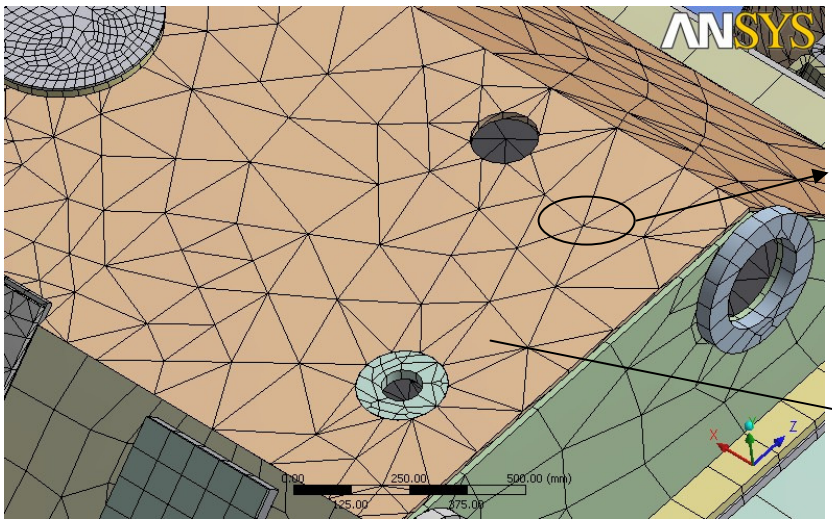
Kazan kapak kalınlığı, duvar kalınlığı ve takviye hesapları analitik yöntemleri kullanan programlarla yapılmıştır. Bu programla sadece basit yapıların, düz bir levhaya uygulanan basınç sonucu oluşan etkileri hesaplanabilmektedir. Düz bir duvar

yüzeyinde delikler olduğunda bu analitik yöntemler yetersiz gelmektedir. Transformatörün kazan kapağında ve duvarlarında delikler olduğundan bu program sonuçları doğru değerleri göstermemektedir. Dolayısıyla bu durumda Sonlu Elemanlar Analizine ihtiyaç duyulmaktadır.

# 4. TRANSFORMATÖR KAZANININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Sonlu elemanlar metodu matematikçilerden ziyade daha çok mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Metot ilk olarak gerilme analizi problemlerine uygulanmıştır. Tüm bu uygulamalarda bir büyüklük alanının hesaplanması istenmektedir. Gerilme analizinde bu değer deplasman alanı veya gerilme alanı; ısı analizinde sıcaklık alanı veya ısı akısı; akışkan problemlerinde ise akım fonksiyonu veya hız potansiyel fonksiyonudur. Hesaplanan büyüklük alanın almış olduğu en büyük değer veya en büyük gradyen pratikte özel bir öneme haizdir [Engin, A. ve ark.2000].

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar "nod" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler (Bak Şekil 4.1). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.




Şekil 4.1., Bir sonlu eleman modelinde nod noktaları ve elemanları

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o

elemanın nodlarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Bir varyasyenel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir.

Modelleme bir fiziksel yapı veya sürecin analitik veya sayısal olarak yeniden inşa edilmesidir. Sonlu elemanlar metodunda modelleme basitçe nod ve elemanlardan oluşan bir ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür. Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamayacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Diğer yandan zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereksiz kadar çok sayıda elemanlardan oluşan bir modellemede istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır. Hesaplanan değerlerin kabul edilebilir olup olmadıklarının kontrol edilmesi ayrı bir öneme sahiptir.

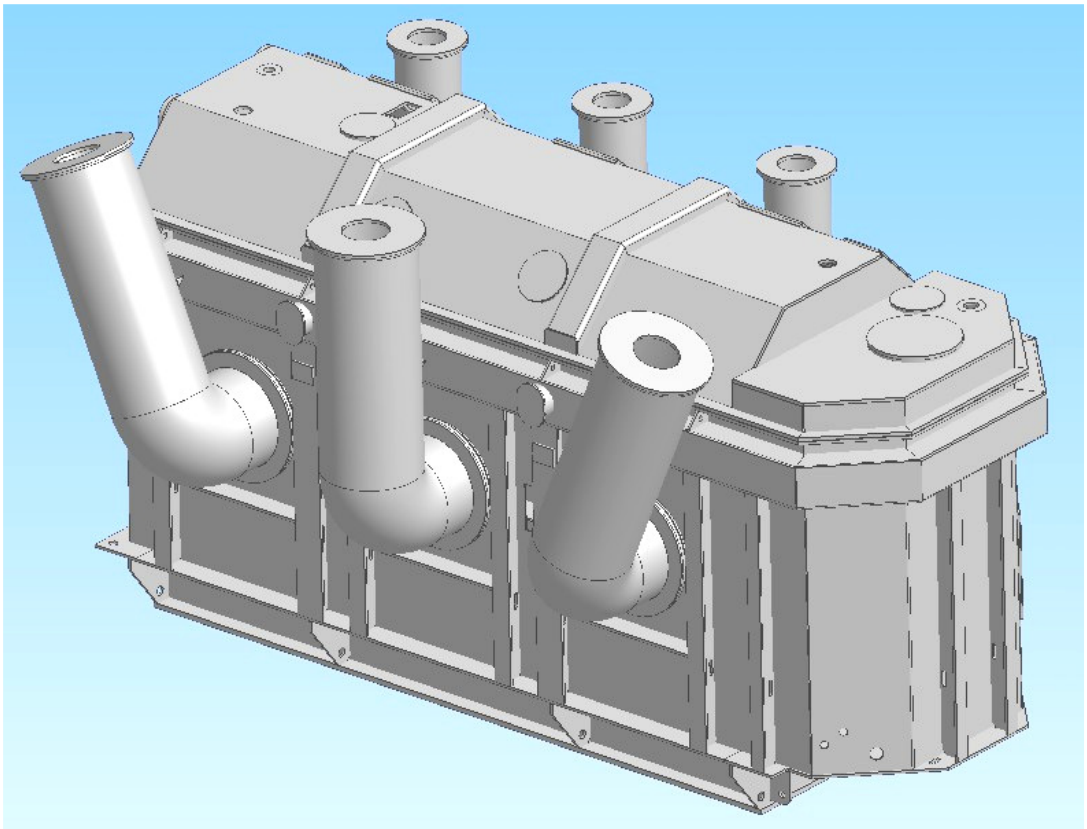
Sonlu elemanlar ile modelleme aşamasında, "eleman tipi (çubuk, kabuk. v.s), eleman şekli (dörtgen, üçgen) ve eleman sayısı ne olmalı?", "ara nodlu elemanlara ihtiyaç var mı?" gibi bir takım soruların cevaplanması gerekmektedir. Bu soruların cevabı ancak analiz edilen yapının ve seçilen eleman tiplerinin davranışı hakkında bilgi sahibi olunduktan sonra cevaplanabilir. Örneğin, gerilme analizinde yapının bir bölgesindeki gerilme durumunu en iyi yansıtan eleman tipi o bölge için seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında 3 boyutlu kiriş elemanı kullanılmıştır. Bu kiriş elemanı genel amaçlı bir sonlu eleman tipi olup 3 boyutlu işlemi yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu eleman tipi aynı zamanda uzay kiriş elemanı olarak da adlandırılmaktadır. Eleman uzayda iki adet nod ile tarif edilmektedir. Üçüncü bir nod ise serbestlik derecesine haiz olmayan ve eleman koordinat sistemini tarif etmek amacıyla kullanılmaktadır. Elemanın iki ucunu tespit eden iki adet nod için 12 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Her bir nod 3 adet öteleme ve 3 adet dönme serbestliğine sahiptir. Eleman herhangi doğrultuda gelen kuvvet ve herhangi bir

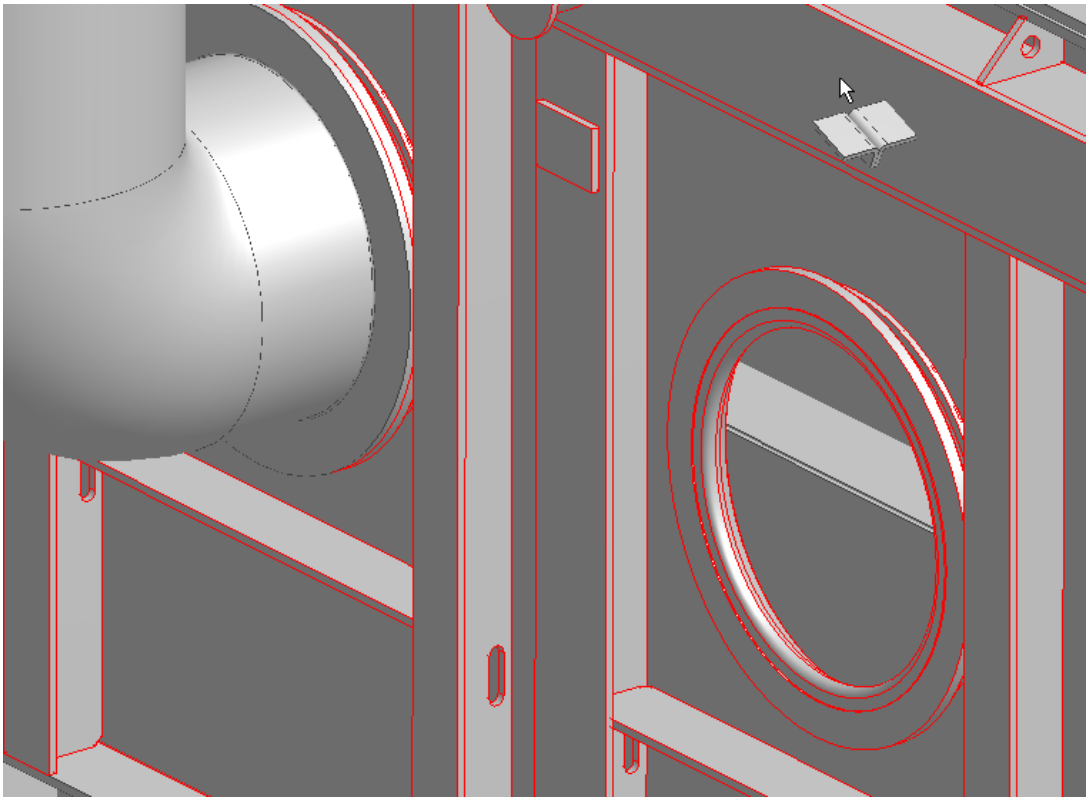
eksen etrafında dönme zorlamasına direnç gösterecek kapasiteye sahiptir. Elemanı tarif etmek için nodların koordinatına, elastisite modülüne (E), kayma modülüne (G), kesit alanına, kesit atalet momenti değerlerine, burulma sabitine (J) ve kiriş eksenine dik doğrultudaki deformasyon faktörlerine ihtiyaç vardır

## 4.1 Transformatör Kazanın CAD Modeli

Tez çalışmasında 1 bar basınca göre dizayn edilmiş transformatör kazanının Autodesk INVENTOR CAD programı ile katı model oluşturulmuştur. Şekil 4.2'de bu katı modelin yüksek gerilim (YG) tarafından görüntüsü verilmiştir. Yüksek gerilim buşing domları kazan duvarının ortasından çıkmaktadırlar. Bu domların uzunlukları 2500 mm'dir, çapları Ø800 mm'dir ve sac kalınlıkları 6 mm'dir. Domların üst kısımda buşinglerin montajı yapılabilmesi için 24 mm kalınlığında sac kaynatılmıştır. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi de domların kazana kaynatılmış flanşlara cıvatalar ile tespit edilmektedirler. Dom flanşlarındaki deliklere cıvata takılacağından bu delikler verilmemiştir. Kazan duvar sacları yapılan hesaplamalar sonucunda 8 mm verilmiştir. Kapak üzerindeki sacın kalınlığı da 16 mm'dir.

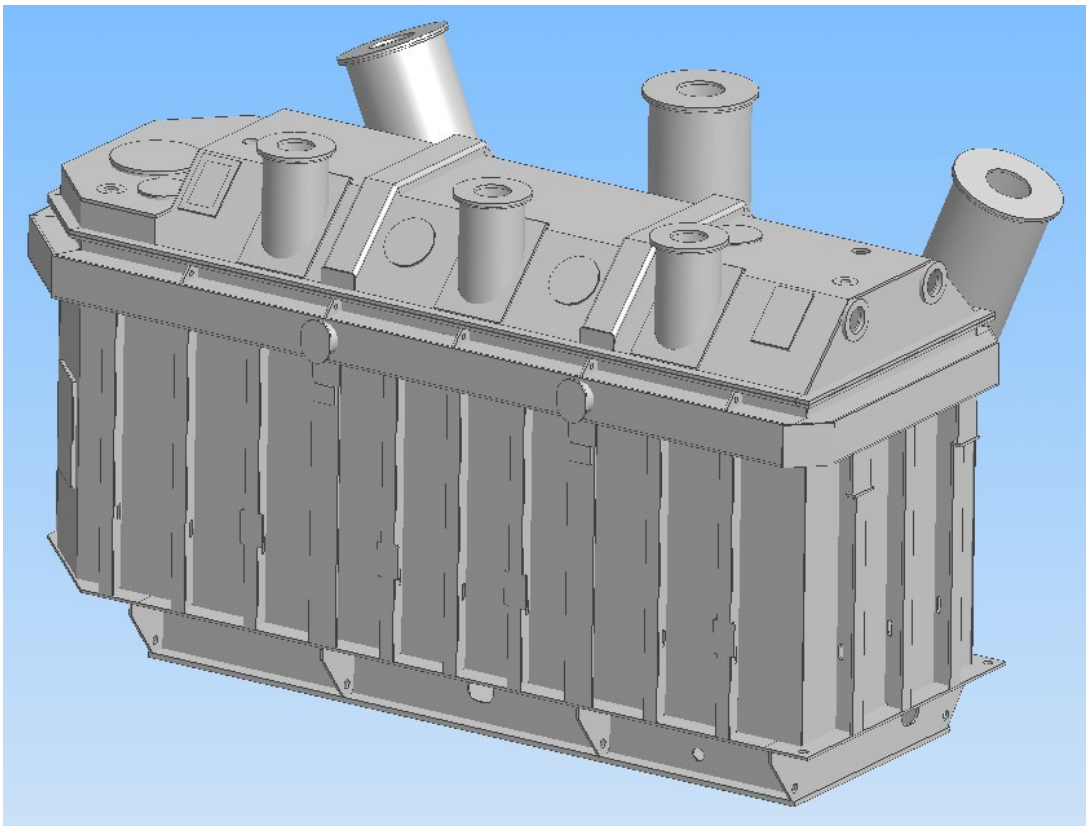


Şekil 4.2., Transformatör kazanının katı modelin YG tarafı

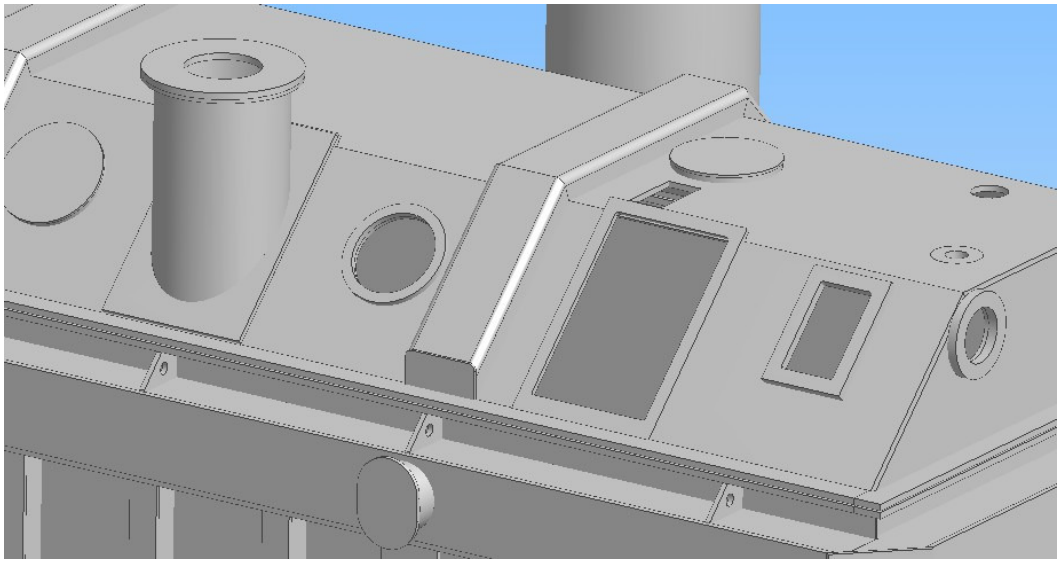


Şekil 4.3., Domların kazan duvarına monte edilen dom flanşı

Şekil 4.4'de de transformatör kazanının alçak gerilim tarafından görünümü görülmektedir. Alçak gerilim buşingleri ön duvardan çıkmayıp üst kısımdaki kapak üzerinden çıkmaktadır. Bu buşingler kapak üzerine kaynatılmış flanşa tespit edilmektedir. Flanş üzerindeki civatalı deliklere montaj edilen domlar üzerinde bulunmaktadırlar. Buşinglerin dom boyları 300 mm olduğundan ve buşinglerin üzerinde kablolara bağlandıklarından bunların ağırlığı ihmal edilmiştir. Ayrıca kapak üzerinde bulunan küçük delikler yağ akışını sağlamak için kullanılan borular içindir, orta delikler ise kazan içerisinde herhangi bir problemden dolayı müdahale edilebilmesi için adam delikleridir ve kapak üzerindeki alçak kısımda bulunan büyük delikler de şalter deliğidir. Kapak üzerinde açılan bu delikler üzerine Şekil 4.5'te görüldüğü gibi 10 mm kalınlığındaki kapaklar M16 civatalar ile tespit edilmiştir. Civatalar delikleri kapattığından bu cıvata delikleri oluşturulmamıştır. Şekil 4.4'te görülen T-takviyelerin ve kaldırma kulakları için kullanılan sacların kalınlıkları 20 mm'dir. Takviyelerin oturduğu çerçevenin kalınlığı 20 mm ve taban sacın kalınlığı da 40 m'dir. Bu kazanda kullanılan bütün saçların malzemesi St37-2 (S 235JR)'dır.

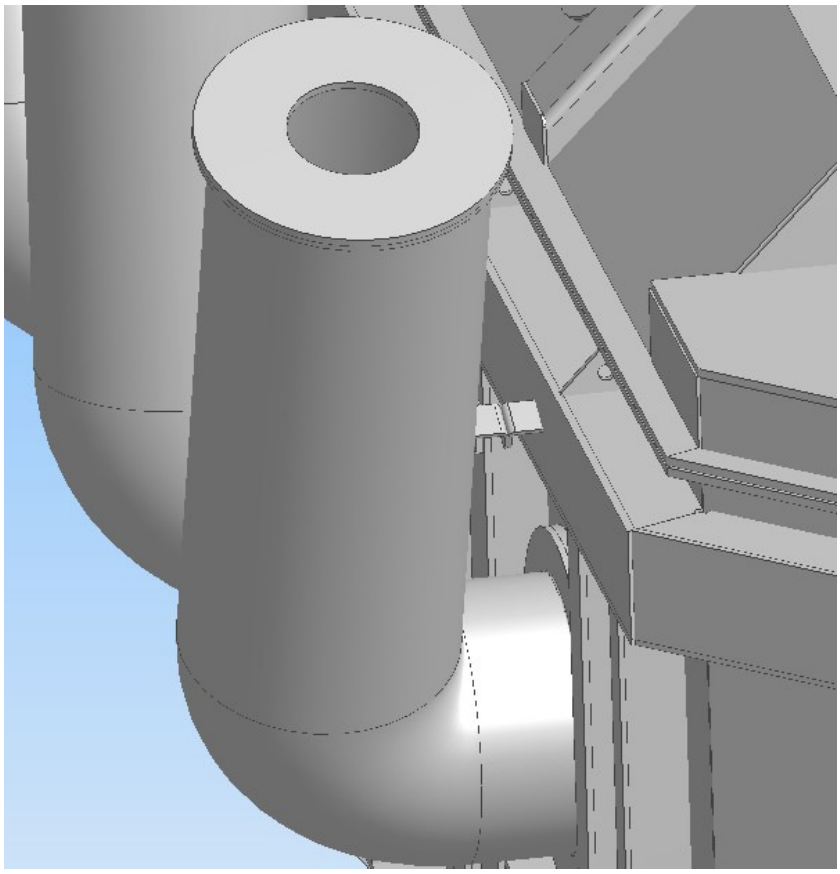


Şekil 4.4., Transformatör kazanının katı modelin AG tarafı



Şekil 4.5., Kazan kapağındaki adam delikleri ve domları

Şekil 4.6'te görüldüğü gibi YG domları kazan duvarlarının üst kısımdaki kuşakların üzerine tutucular yerleştirilmiştir. Aynı zamanda bu parçalar dom üzerine de kaynatılmaktadırlar. YG domları kazanın duvarının orta kısımdaki flanşa civatalar yardımıyla monte edilirler. Daha sonra üst kısımdaki tutucular birbirlerine bağalnırlar. Bu şekilde domlar daha mukavemetli olmuş olurlar.



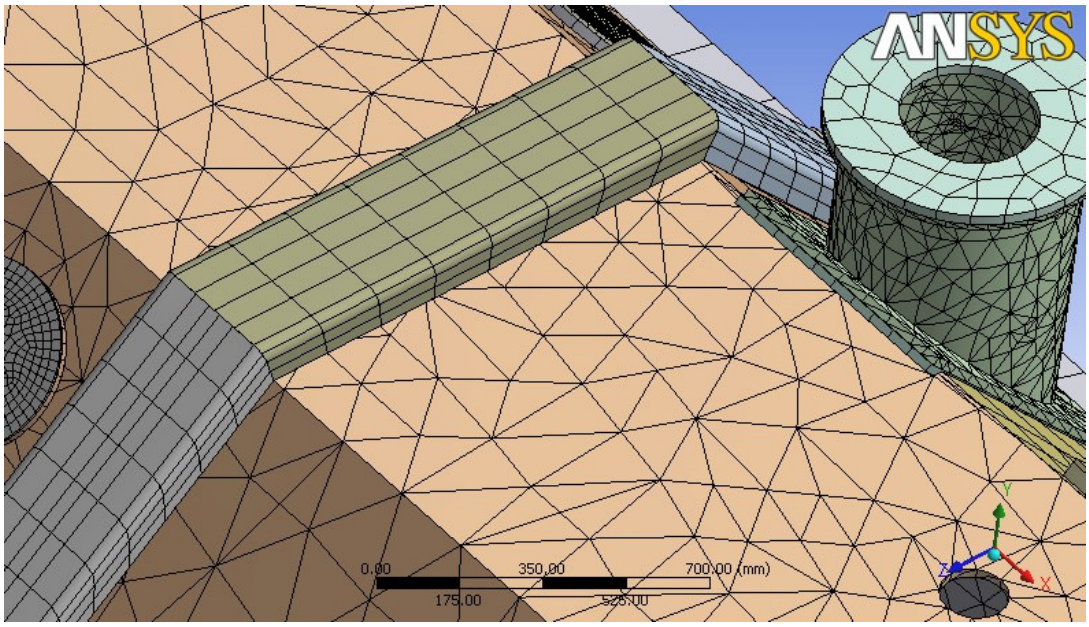
Şekil 4.6., YG domların kazan duvarındaki kuşağa bağlantısı

## 4.2 Transformatör Kazanının Sonlu Elemanlar Modeli

Tez çalışmasında transformatör kazanın katı modeli oluşturulmasında Autodesk INVENTOR kullanılmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz için ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. İnventor'da hazırlanan katı model "sat" dosyası olarak kaydedilmiştir. ANSYS Workbench'e katı modelin aktarılması için oluşturulmuş "sat" dosyasından faydalanılmıştır.

### 4.2.1 Sonlu Elemanlar Ağı

Güç transformatör kazanın sonlu elemanlar ağı şekil 4.7'de gösterilmektedir. Sonlu elemanlar ağı lineer katı elamanlardan (4-node tetrahedran ve 8-node kübik eleman) oluşmaktadır. Toplam eleman sayısı 102795 ve düğüm sayısı da 282743'tür. Katı modelinde parça sayısı arttıkça eleman ve düğüm sayıları da artacaktır.

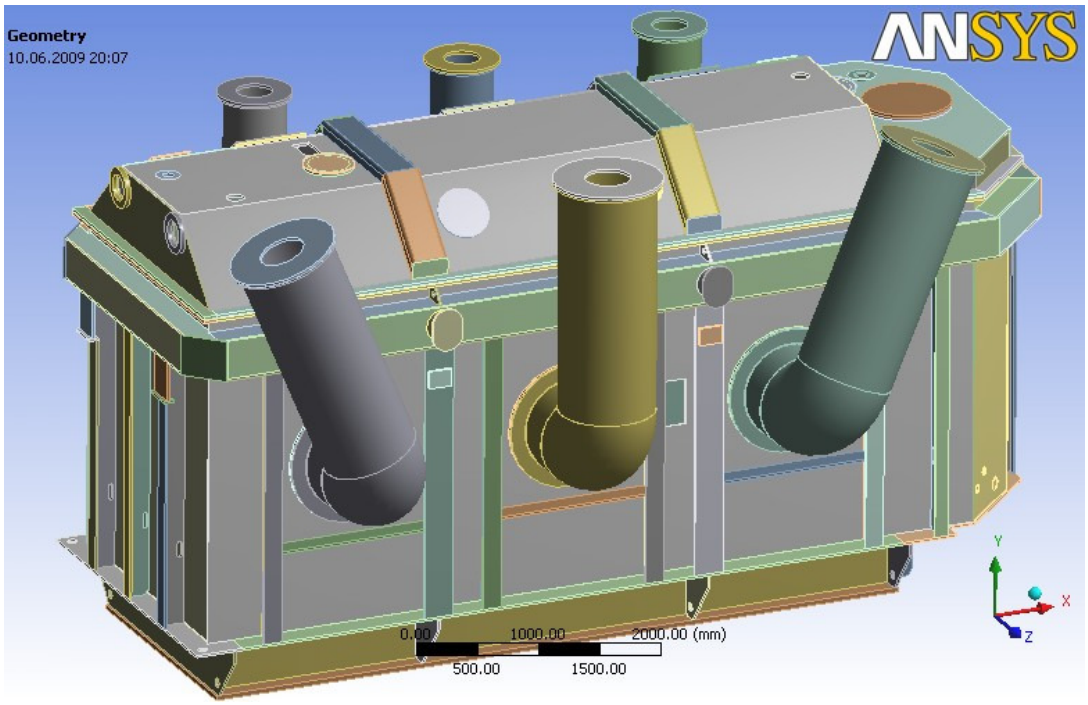



Şekil 4.7., Kazanın sonlu elemanlar ağı

## 4.3 Sınır Koşulları

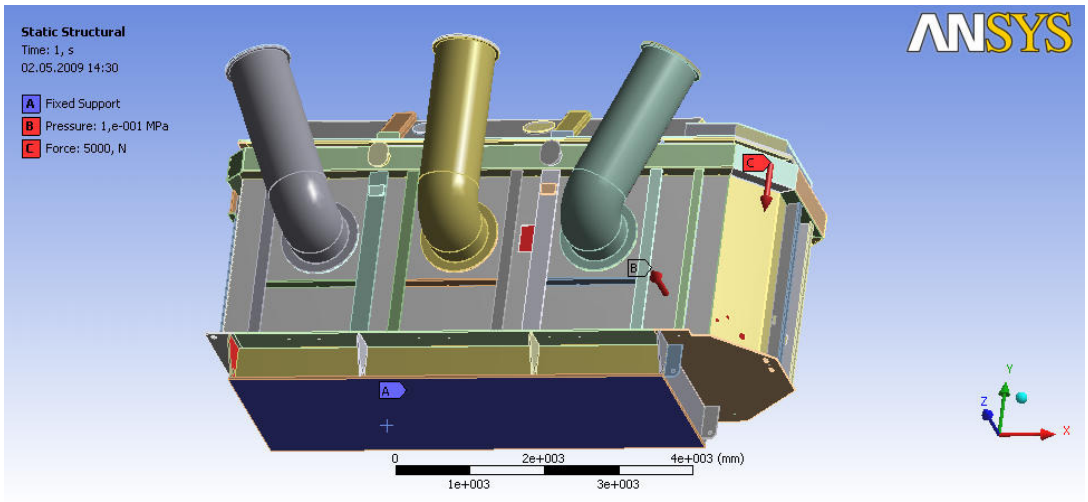
Şekil 4.8'de görülen kazan için oluşturulmuş "sat" dosyası ANSYS'e aktarılmıştır. Workbench'e aktarılan katı modeli için program her parçanın rengini ayrı olarak atamaktadır. Kazan modeli toplam olarak 215 parçadan oluşmuştur, hacim de 2,9161e+009 mm³ ve ağırlık da 22891 kg olarak bulunmuştur. Parçalar arasındaki kaynaklar kontak algoritmalar ile temsil edilmiştir. Toplam 648 tane kontak[1] oluşturulmuştur.

[1] ANSYS Workbench'te parçaların bir birine temas ettikleri yüzeylerdir.



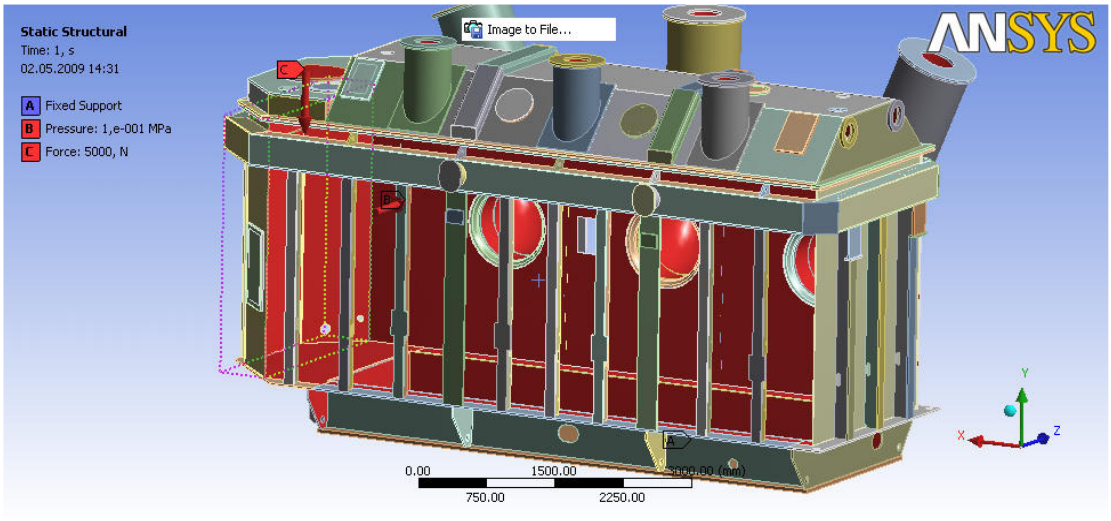

Şekil 4.8., Kazan katı modelin ANSYS görünümü

Transformatör çalışacağı sahada yerde sabit olarak duracağından şekil 4.9'da gösterildiği gibi alt tabandan sabitlenmiştir.



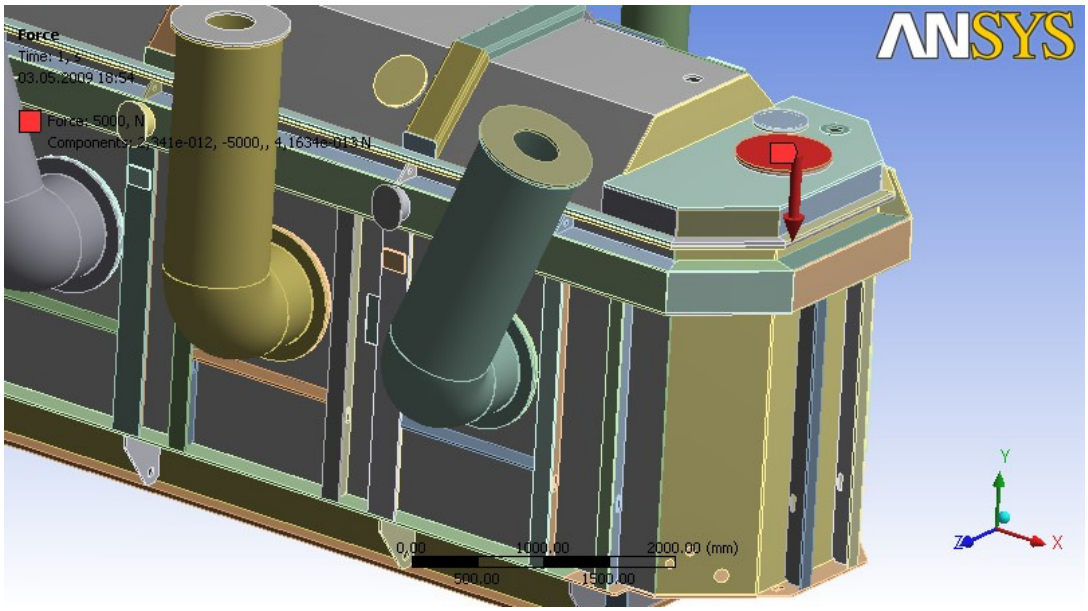

Şekil 4.9., Kazan tabanın sabit destek olarak kabul edilmesi

Kazanın iç yüzeyindeki yağ bütün yüzeylere temas ettiğinden şekil 4.10'da görüldüğü gibi modelin iç yüzeylerine basınç uygulanmıştır. Burada toplamda uygulanan basınç yüzeyleri 44 tanedir.




Şekil 4.10., Eşit basınç uygulanmış yüzeyler

Transformatörün içerisinde şalter bulunmaktadır ve kapağa tespit edilmektedir. Dolayısıyla kazan kapağı üzerine kendi ağırlığı etkimektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi şalterin ağırlığı 500 kg olduğundan kapak üzerine uygulanan kuvvet 5000 N'dur.




Şekil 4.11., Şalter kapağına uygulanan kuvvet

Oluşturulan yapı için uygulanan bütün koşullar tablo 4.1'de özetlenmiş olarak görülmektedir. Model için 3 ayrı koşul sabit yüzey, basınç ve kuvvet uygulanmıştır. Sabit destek olarak bir yüzey seçilmiştir. Basınç için kazan modelin iç yüzeyine toplam 44 yüzeye eşit olarak 0,1 MPa (1 bar) uygulanmıştır. Kuvvet için de şalter ağırlığından dolayı kapak üzerindeki şalter kapağa 5000 N uygulanmıştır. Yapılan

bütün çalışmalarda bu sınır koşulları sabit kabul edilmiştir. Kazanda oluşacak etkileri incelemek için sadece basın değeri değiştirilmiştir.

## 4.4 Malzeme Özellikleri

Transformatör kazanı sıcak haddelenmiş St37-2 (S 235JR) çelik malzemesi kullanılarak yapılmıştır. ANSYS Workbench'te yapılan sonlu elemanlar analizinde tablo 4.1'de mekanik özelliklerini gösterilen S 235JR çelik malzemesi kullanılmıştır.

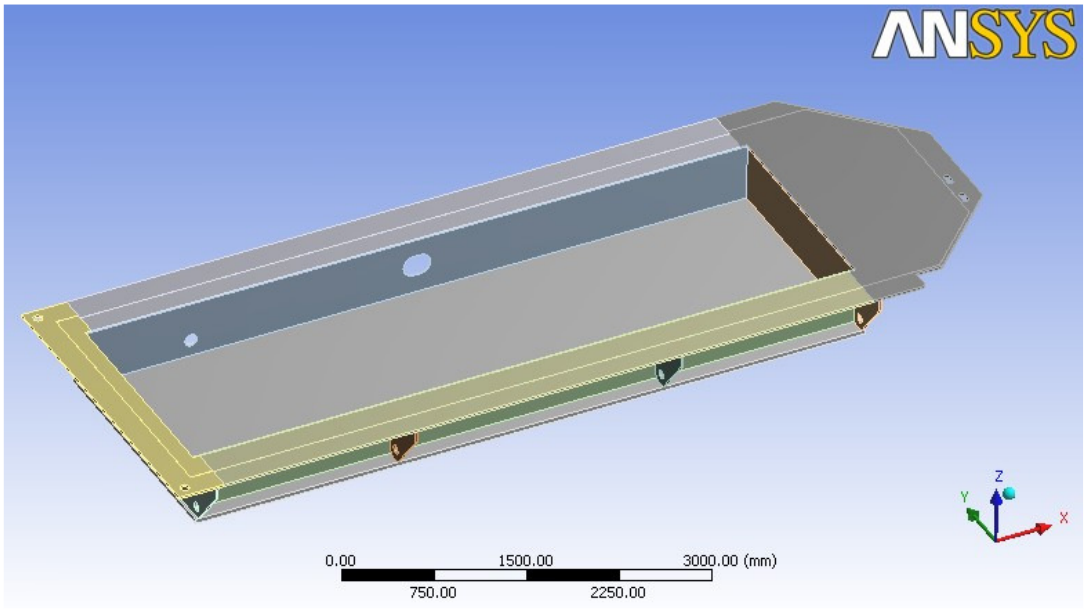
Tablo 4.1., St 37-2 (S 235JR) çelik malzemenin özellikleri

| | | |
|---|---|---|
| Yoğunluk (ρ) | 7,85e-006 | kg/mm³ |
| Elastisite modülü (E) | 210 | GPa |
| Poisson oranı ($\nu$) | 0,3 | |
| Çekme dayanımı (Rm) | 460 | MPa |
| Akma dayanımı (Rc) | 235 | Mpa |

Bu tezdeki tüm sonlu elemanlar analizi 1 GB ram ve İntel Core 2 CPU 2,16 GHz işlemcili Toshiba Satellite diz üstü bilgisayarda yapılmıştır. Trafonun boyutlarına göre sehimler çok küçük olduğu için analizlerde lineer sonlu elemanlar analizi metodu kullanılmıştır.

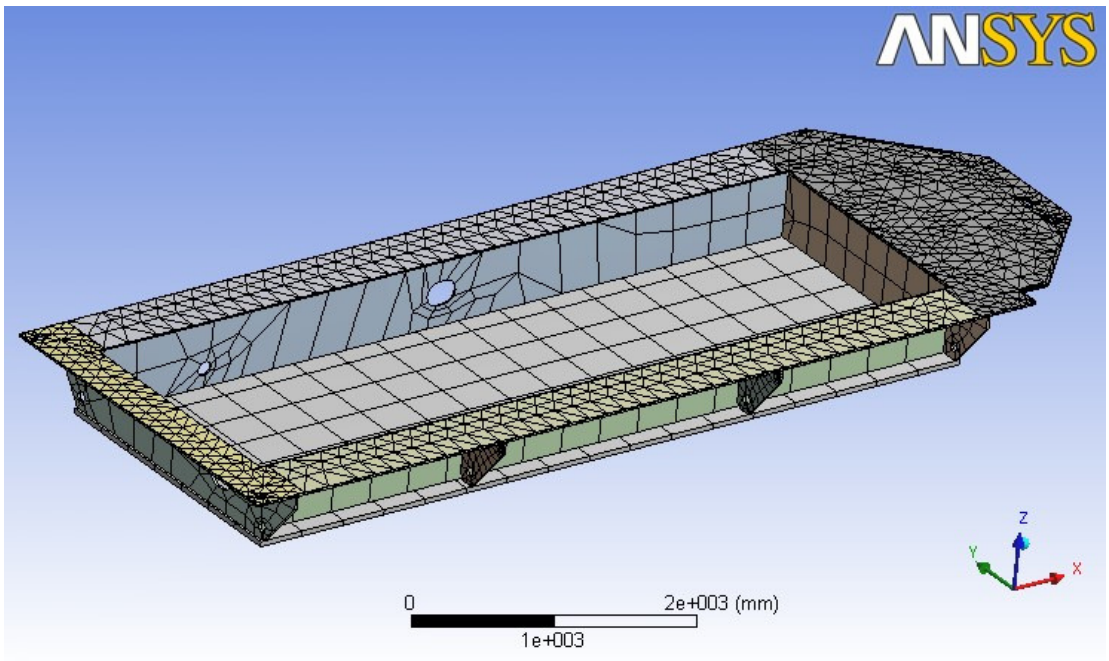
## 4.5 Kazan Tabanında Oluşan Sehim Miktarının Sonlu Elemanlar Analizi İle Belirlenmesi

Şekil 4,12'de Inventor'dan ANSYS Workbench'e aktarılmış kazanın alt kısmı gösterilmiştir. Nakil esnasında kazan içerisinde sadece aktif kısım olduğundan kaldırma esnasında tabana sadece aktif kısmın ağırlığı tesir etmektedir. Kazan tabanına gelen yük bütün yüzeye yayılmış olarak kabul edilmiştir.



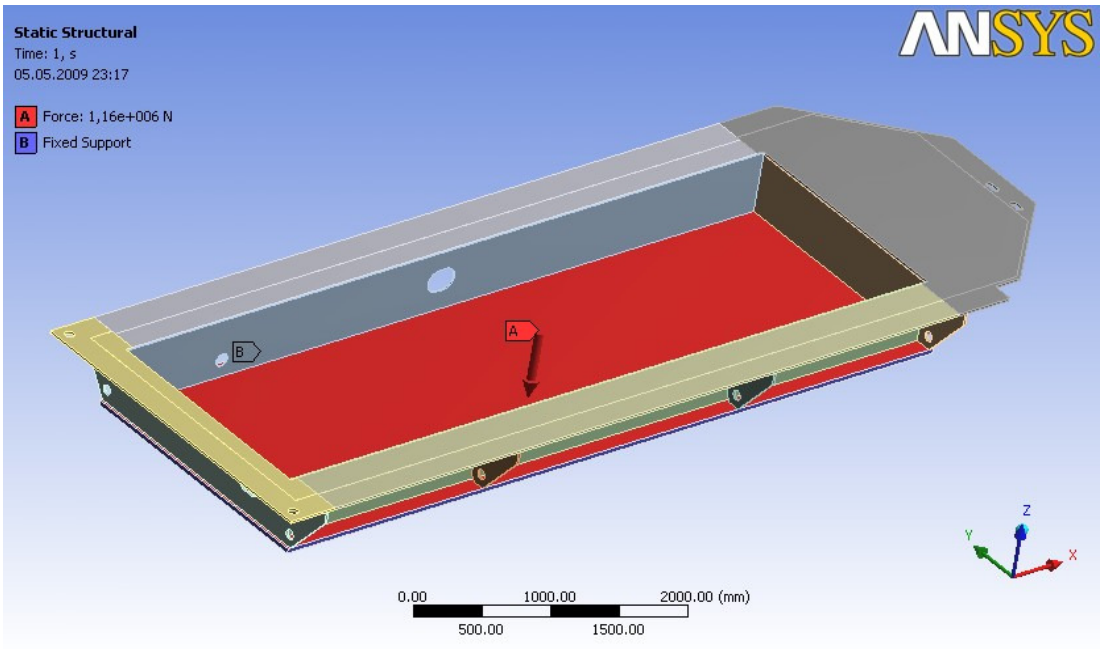

Şekil 4.12., ANSYS'e aktarılmış kazanın alt kısmın katı modeli

Şekil 4,13'de analiz programın otomatik olarak atamış olduğu kafes yapısı gösterilmiştir. Sonlu elemanlar kafes (ağ) yapısı toplam 4396 elemandan ve 14182 düğümden oluşmaktadır.



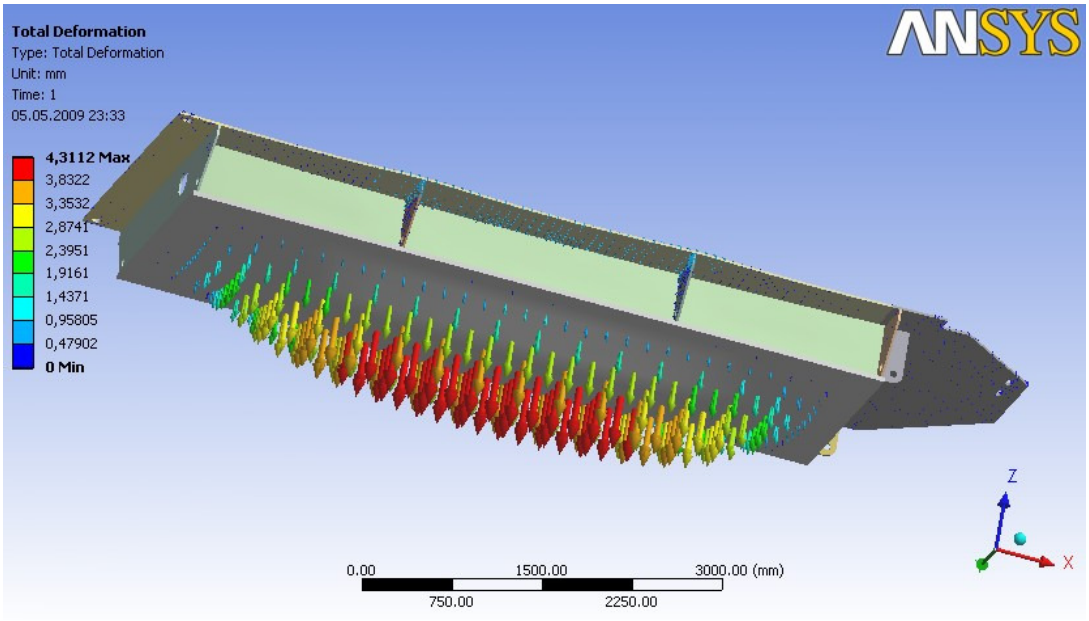

Şekil 4.13., Kazan alt kısmının sonlu elemanlar kafes yapısı

Şekil 4.14'de gösterilen kısımlar sabit mesnet olarak kabul edilmiştir. Tabanın iç kısmına bütün yüzeylere eşit olarak yayılmış 1160000 N (116000 kg) kuvvet uygulanmıştır. Taban sacın kalınlığı 40 mm'dir.




Şekil 4.14., Sınır şartları uygulanmış kazan tabanı

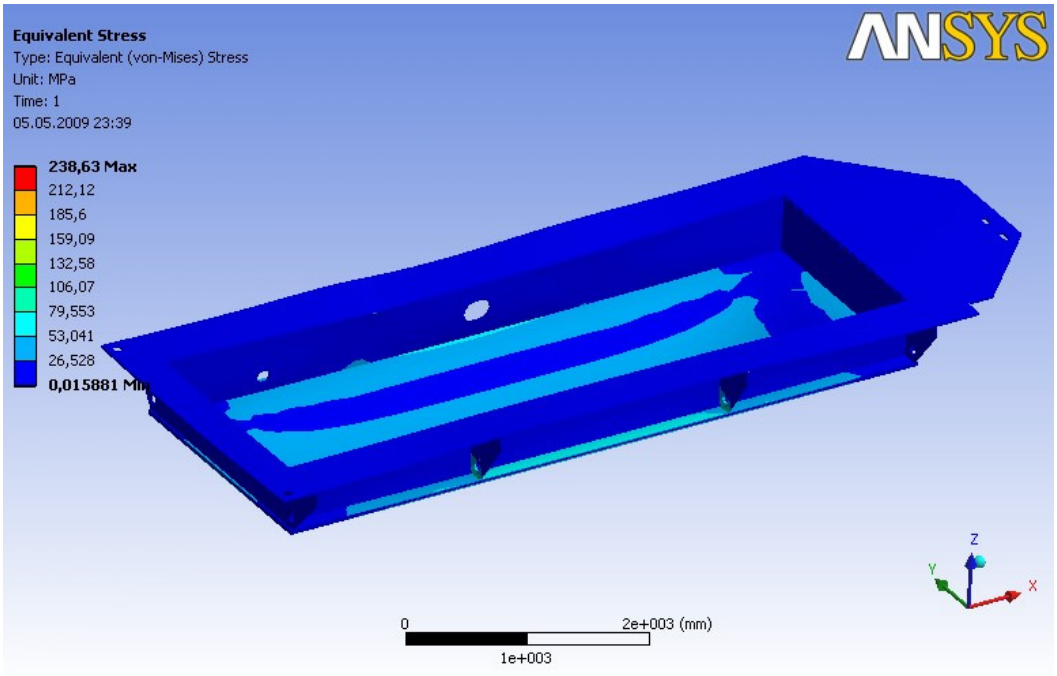
Şekil 4.15'de tabana uygulanan yayılı yük gösterilmiştir. Kazanın alt kısımda maksimum sehim (deformasyon) orta kısımlarında görülmüştür ve maksimum değeri 4,3 mm'dir. Daha önce basit hesaplama programı ile yapılan hesapta bu sehim değeri 7,6 mm bulunmuştur. Mukavemet formüllerle yapılan hesaplamada sehim değeri sonlu elemanlar analizine göre %44 daha fazla çıkmıştır.




Şekil 4.15., Tabanda oluşan maksimum sehim

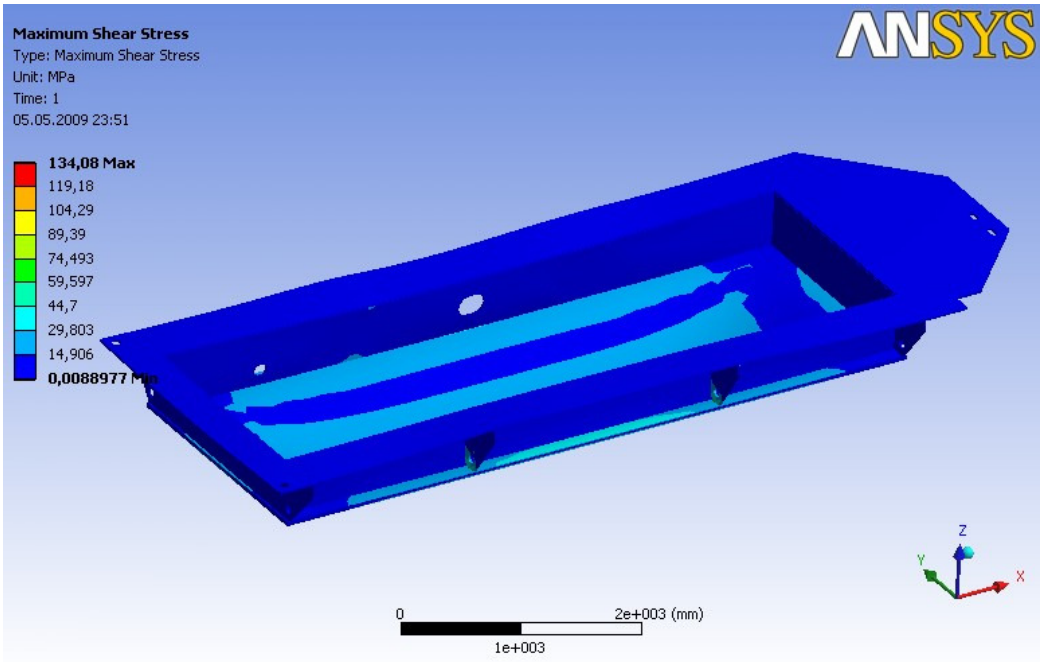
Şekil 4.16'da kazan alt kısmının von-Mises eşdeğer gerilmesinin maksimum değeri 238 MPa ($N/mm^2$)'dir. Daha önce basit programla yapılan hesapta eşdeğer

gerilme 202,5 MPa olarak bulunmuştur. Mukavemet formülleri ile yapılan hesaplamada analize göre yaklaşık %15 daha fazla çıkmıştır.




Şekil 4.16., Tabanda oluşan von-Mises eşdeğer gerilme

Şekil 4.17'de taban sacında oluşan maksimum kayma gerilmesinde maksimum değer 134 MPa olarak verilmiştir. Daha önce formüllerle oluşturulmuş basit programın hesabında maksimum sac zorlanması 145 MPa bulunmuştur. Formüllerle yapılan hesapta analize göre %8 daha fazla çıkmıştır.




Şekil 4.17., Tabanda oluşan maksimum kayma gerilmesi

Bu kısımda sonlu elemanlar analizi ve mukavemet formülleri (analitik yöntemlerle mukavemet hesabı) ile oluşturulmuş programın sonuçları tablo 4.2'de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda ikisinin arasında ortalama %20 fark tespit edilmiştir.

Tablo 4.2., Taban sacındaki sehim ve gerilme hesapların karşılaştırılması

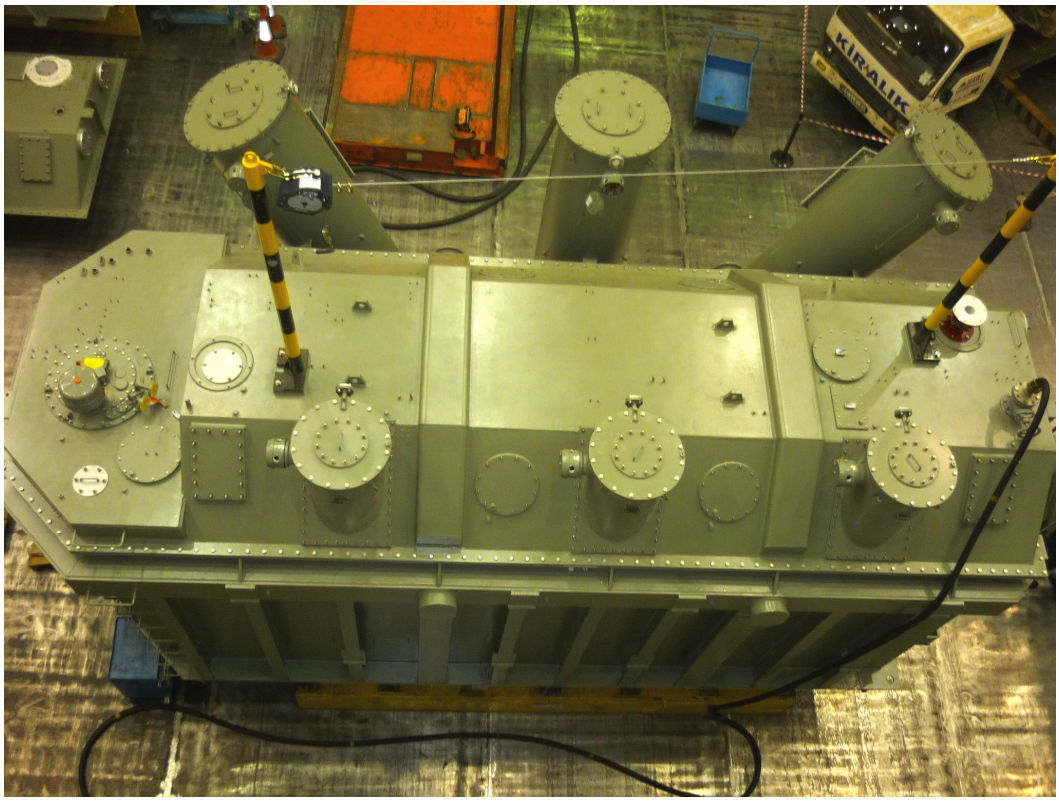
| Yapılan hesap | Mukkavemet formül sonucu | Sonlu elemanlar analiz sonucu | % fark |
|---|---|---|---|
| Toplam sehim | 7,6 mm | 4,3 mm | 44 |
| Eş gerilme | 202 Mpa | 238 Mpa | 15 |
| Maksimum kayma gerilmesi | 145 Mpa | 134 Mpa | 8 |

## 4.6 Üretilmiş Kazanın Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi ile optimizasyonu yapılmadan önce kazan için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu ispatlanması önemlidir. Üretilmiş 1 bar basınçlı kazan ile lineer statik analiz sonuçları arasında farklılıklar karşılaştırılmıştır.

### 4.6.1 Üretilmiş Kazan Yapısının Bir Bar Vakumda İncelenmesi

Şekil 4.18'de üretimi tamamlanmış ve içine aktif kısım yerleştirilmiş trafo kazanı vakuma alınmıştır, vakum süresi 110 saattir. Üzerinde ölçüm yapılacağından trafo vakumdan alınmadan yarım saat önce inceleme yapılmıştır.




Şekil 4.18., Vakuma alınmış kazan

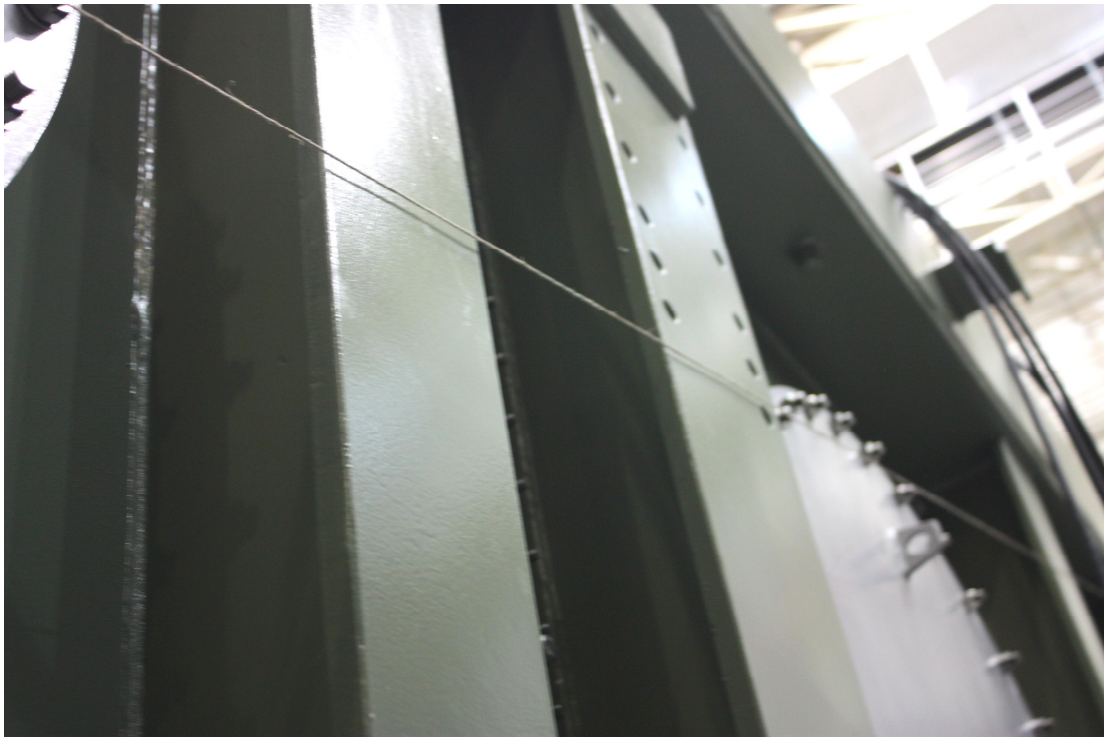
Kazan boyutları büyüktür, bu nedenle ön ve arka duvarlara atılan takviyeler birbirlerine paralel olmayabilirler. Takviyeler arasındaki kaçıklıkları tespit etmek için art arda üretilmiş kazanlar arasındaki farklılıklar ölçülmüştür. Vakuma altındaki trafo ile vakumda olmayan kazanlardan ölçüler alınarak farklılıklar belirlenmiştir. Vakum uygulandığından duvarların orta kısımlarında kazanın iç kısmına doğru çöküntüler oluşmuştur. Basınçta ve vakumda oluşacak sehimler aynı değerdedir. Kazan uzunluğu 6000 mm olmasından dolayı oluşacak sehim'i tespit edilebilmesi için iki uçtan ip gerdirilerek yapılmıştır.

Kazan içerisinde 1 bar vakum olduğunu tespit etmek için basınç & vakum ölçer kullanılmıştır. Kazanın iç kısmından radyatörlere giden yağ boruları için kazan alt kısmında vanalar bulunmaktadır. Vanalara bu cihaz takılmaktadır ve kazan içinde oluşan vakum değeri tespit edilmektedir. Vakum esnasında cihaz basınçölçere göre ters çalışmaktadır. Kazanın içi boş olduğunda gösterge 1000 mbar (1 bar) göstermektedir, vakum süresi boyunca gösterge 1 mbar'a doğru gider. Duvarlarda sehim ölçmeye başlamadan önce cihaz şekil 4.19'da üzerindeki gösterge 1 mbar göstermektedir.




Şekil 4.19., Kazan üzerindeki basınç & vakum ölçer

Şekil 4.20'de kazan duvarının iki ucunda gerdirilmiş ip görünmektedir. Sehim'in en fazla olacağı duvarın orta kısmında yapılan ölçümler ile diğer takviyeler arasındaki fark 5 mm olarak belirlenmiştir.



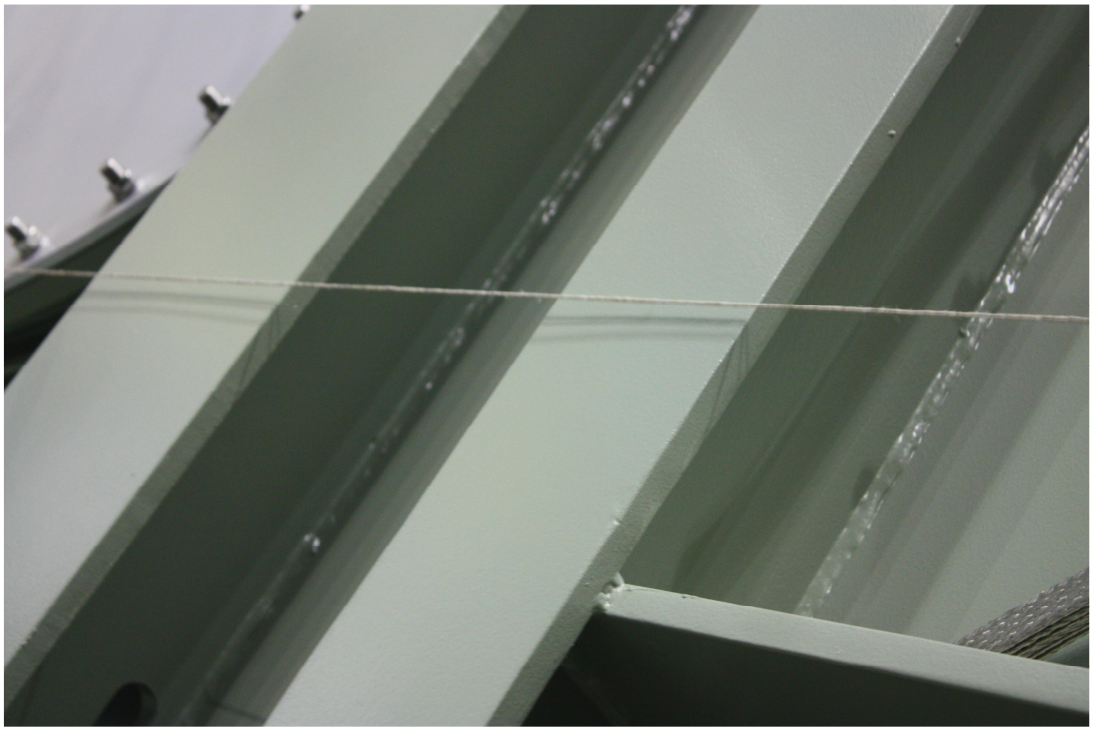
Şekil 4.20., Boş kazandaki takviyeler arasındaki fark

Şekil 4.21 ve şekil 4.22'de 1 bar'da 110 saat vakum altında kazanda oluşan sehim miktarı görülmektedir. Resimlerde ortadan çıkan domların her iki tarafından da çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Vakum altında oluşan sehim 12 mm, boş kazanda ise 4 mm ölçülmüştür. İçi boş olan kazan duvarında aynı bölgeden yapılan ölçümlerle 8 mm çökme olduğu tespit edilmiştir.

Boş ile vakum altındaki kazan arasında yapılan ölçümlerde 7 mm fark belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda kazana 1 bar basınç uygulandığında YG duvarının orta kısmında yaklaşık 7 mm sehim oluşacaktır. Oluşan çökmeyi ip gerdirilerek yapıldığından çıkan sonuçları yaklaşık ±1 mm kabul edilmiştir.



Şekil 4.21., Bir bar vakumdaki kazanda oluşan sehim

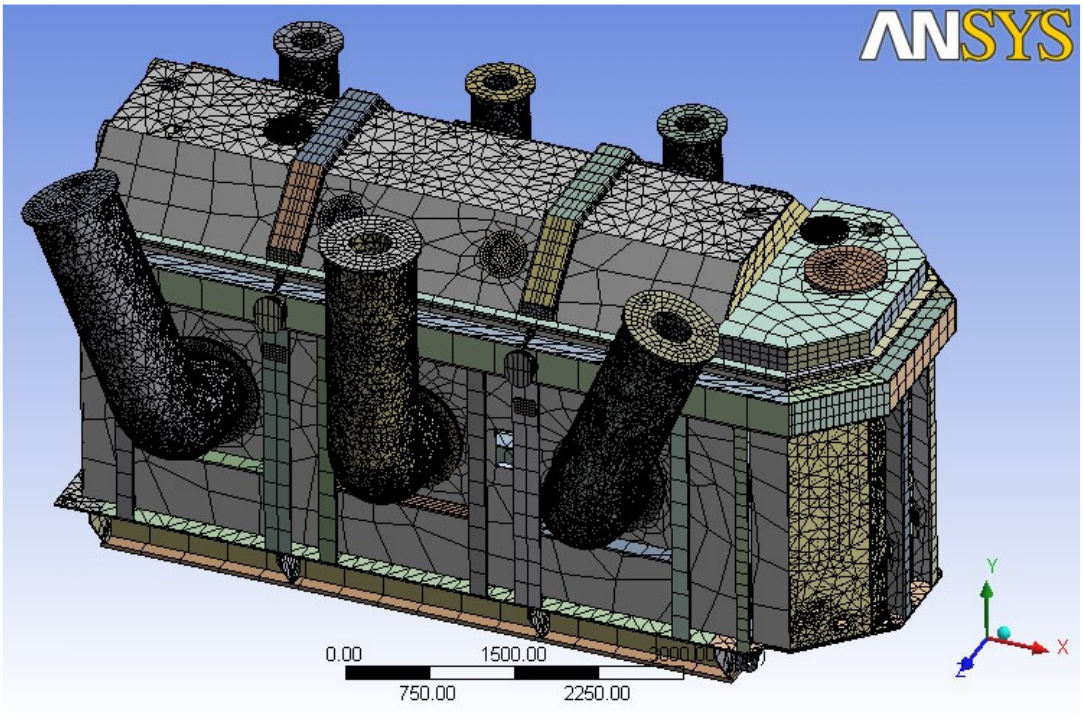


Şekil 4.22., Bir bar vakumdaki kazanda oluşan sehim

### 4.6.2 Üretilmiş Kazanın Bir Bar Basınçta Sonlu Elemanlar Analizi

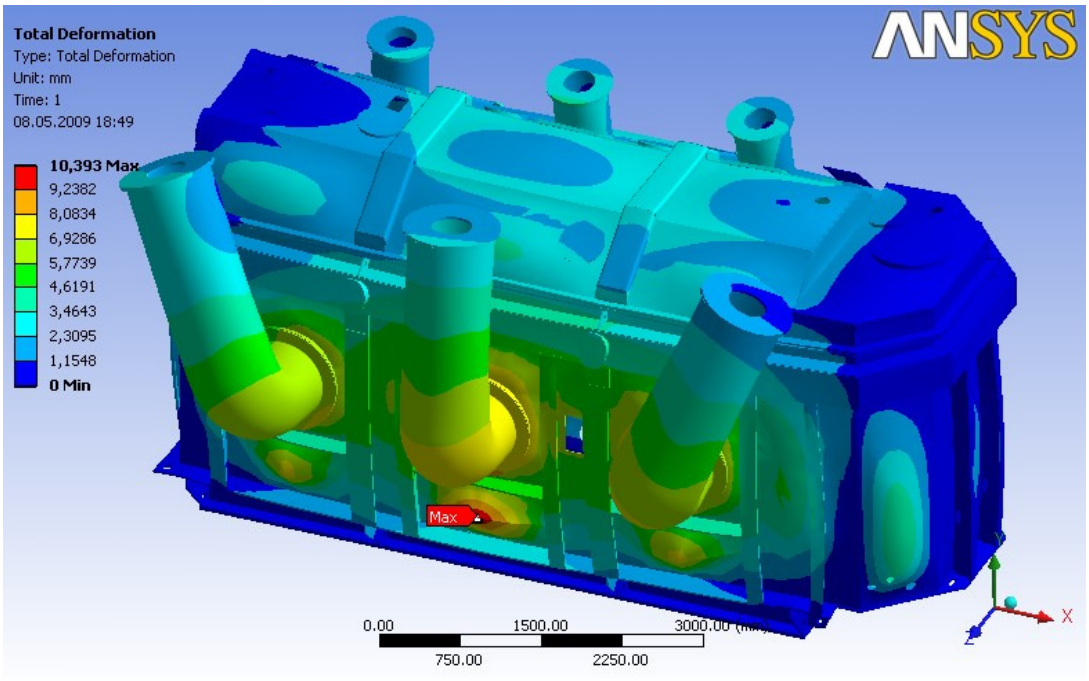
Bir bar vakuma göre kazanda tespit edilen çökmeleri ANSYS Workbench programı yardımıyla sonlu elemanlar analizinde kazanın iç kısmına 1 bar basınç uygulanarak çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Vakum ile basınç değerleri aynı kabul edilmektedir. Kazan duvarında ip gerdirilerek ölçüm yapıldığı kısım ile analiz sonucunda (aynı kısımda) çıkan sonuçlar değerlendirilecektir.

Şekil 4.23'de kazanın ANSYS Workbench'te kazan modelinin oluşturulmuş kafes yapısıdır. Kazan modeli toplam 282743 düğümden ve 102795 elemandan, kazan montaj ise toplam 215 parçadan oluşmuştur. Modelin ağırlığı ise 22891 kg'dır. Kafes yapısı programda otomatik olarak oluşturulmuştur ve dolayısıyla ideal bir yapı olarak kabul edilmiştir. Kafes yapısındaki düğümler ve elemanlar artırılırsa çözümü yapacak olan bilgisayarın ram'i yetersiz gelecektir.



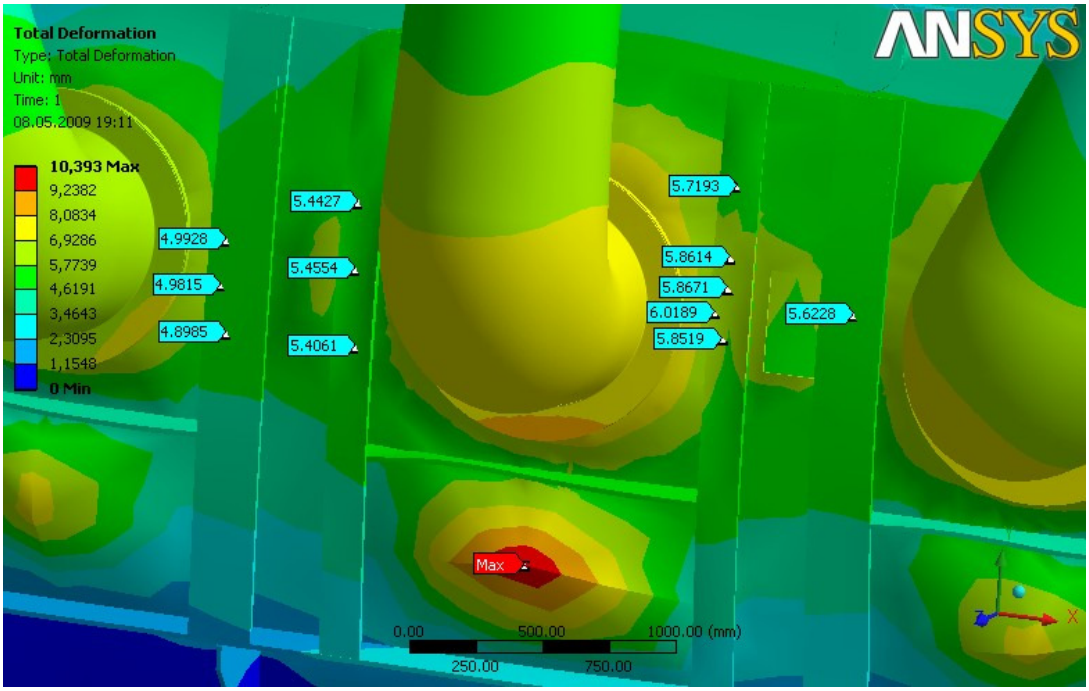

Şekil 4.23., Bir bar basınçtaki kafes yapısı

Trafo kazanına uygulanan basınç ve kuvvetler daha önce sınır koşullarında belirtilmiştir. İstenilen bilgileri elde etmek için eşdeğer gerilme, toplam sehim (deformasyon), X-eksenindeki sehim, Y-eksenindeki sehim ve Z-eksenindeki sehim bilinmesi yeterlidir. Şekil 4.24'de uygulanan 1 bar basınç ve şalter ağırlığından dolayı kapağa uygulanan 5000 N kuvvetten sonra oluşan deformasyon verilmiştir. Maksimum sehim kazan yapısının en zayıf yerinde (duvarın ortası ve YG dom'un altındaki bölge) oluşmuştur. Bu bölgeye basınç ve YG dom'un ağırlığı olması nedeniyle mukavemet azalmıştır. YG duvarında dom'un alt kısmında maksimum sehim oluşmuştur ve değeri 10,4 mm'dir.




Şekil 4.24., Bir bar basınçta oluşan toplam sehim

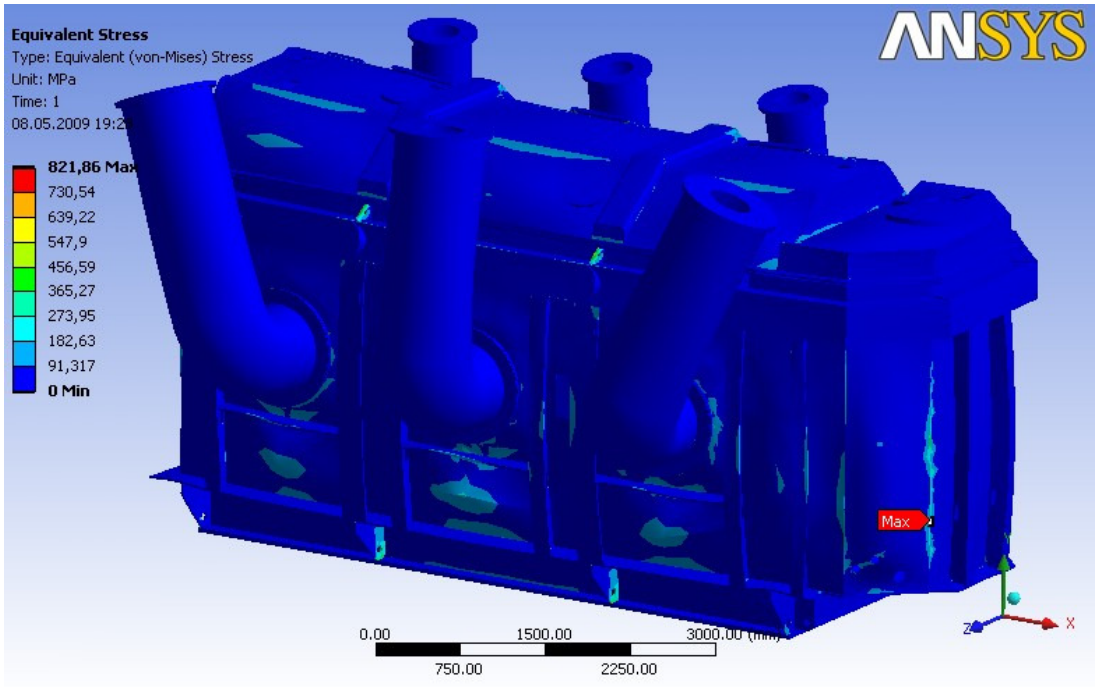
Analiz sonucunun çıkan sonuçlardan daha önce kazan üzerinde yapılan bölgelerden ölçüm noktaları alınmıştır (Şekil 4.25). Kazan duvarında zayıf bölgelere doğru gidildikçe sehim artmaktadır ve en fazla 6 mm'ye kadar çıkmıştır.




Şekil 4.25., Bir basınçtaki kazan duvarlarında oluşan sehim

Kazan duvarında ip gerdirilerek yapılan ölçümde maksimum sehim 7 mm'dir. Şekil 4.26'da yapılan sonlu elemanlar analizinde sehim yaklaşık olarak %85

oranında doğru çıkmıştır. Bu bilgilerle kazana 2 bar basınç uygulanarak yapılacak olan çalışmalar %15 sapma dikkate alınarak yapılacaktır.




Şekil 4.26., Bir bar basınçta oluşan eşdeğer gerilme

Oluşan maksimum eşdeğer gerilme miktarı da 821 MPa olarak hesaplanmıştır. Maksimum gerilme kazanın yan duvarında takviye ile desteklenmemiş kısımda oluşmuştur. Kullanılan malzemenin (S 235JR) çekme dayanımı 460 MPA olduğundan bu bölge kritik kabul edilmiştir. Kritik olan kısımları gidermek için çeşitli takviyeler ile desteklemeler yapılmıştır. Oluşacak deformasyon ve gerilmelere göre optimizasyon çalışmaları yapılması gerekmektedir.

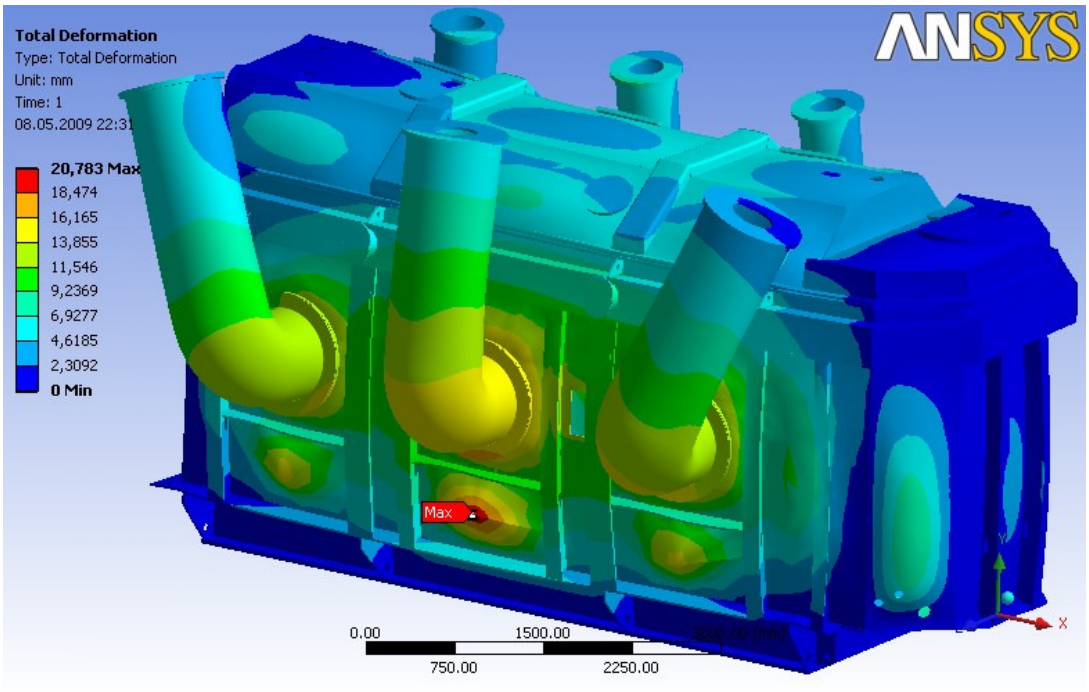
Üretilmiş ve çalışan trafo üzerinden yapılan ölçümler ile ANSYS Workbench'te sonlu elemanlar analizi arasında %15 fark çıkmıştır. Elde edilen bu kadar yakın sonuçlarla yapılacak olan alternatif kazan tasarımlarındaki analizler gerçek gibi kabul edilmiştir. Geliştirme çalışması için kullanılan kazan modelinde çıkan sonuçlar ile yapılan optimizasyon tasarımları karşılaştırılmıştır.

# 5 ANSYS WORKBENCH İLE KAZANIN OPTİMİZAYON

Transformatör kazan modelin basıncı 1 bar'dan 2 bar basınca çıkarmak için 8 tane alternatif kazan tasarımları yapılmıştır. Tasarımı yapılacak olan kazanın boyutları (uzunluğu, eni ve yüksekliği) değiştirilmeyecektir. Bu optimizasyonlarda duvar sac kalınlıkları, takviye kalınları ve takviye adetleri değiştirilerek çalışmalar yapılmıştır. Alternatiflerde yapılan sonlu elemanlar analizlerdeki sonuçlar ile mevcut trafoda yapılan analizlerde kullanılan çelik malzemenin çekme ve akma dayanımları dikkate alınarak en iyi optimum tasarım yapılmıştır.

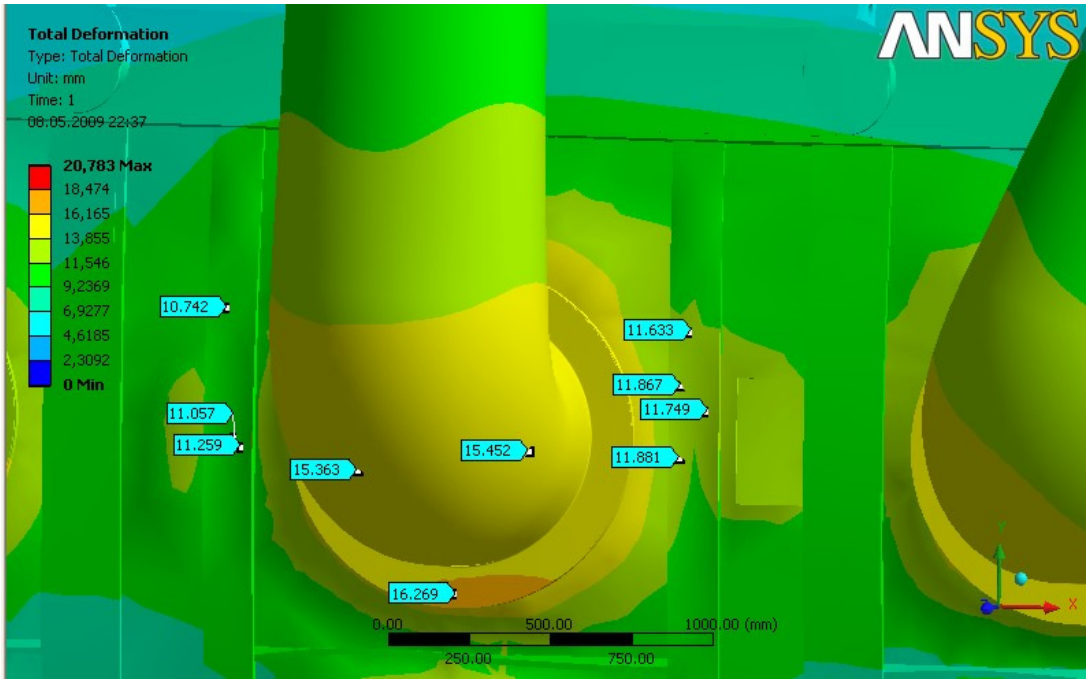
## 5.1 Birinci Alternatif Kazan Tasarımı

Bu alternatif kazan tasarımında 1 bar basınca göre üretilmiş kazanın yapısı değiştirilmeden basınç 2 bar'a (0,2 MPa) çıkartılmıştır. Öncelikle bu kazan üzerinde oluşacak etkileri tespit edilmiştir. Kafes yapısındaki düğüm ile eleman sayıları değişmemiştir. Kazana herhangi bir ilave yapılmadığından dolayı ağırlığı değişmemiştir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi 2 bar basınç uygulandıktan sonra oluşan maksimum sehim 20,8 mm'dir. Burada oluşan maksimum sehim 1 bar basınca göre iki katı olduğunda oluşan sehim de iki katıdır.




Şekil 5.1., Alternatif 1 kazan tasarımında oluşan toplam sehim

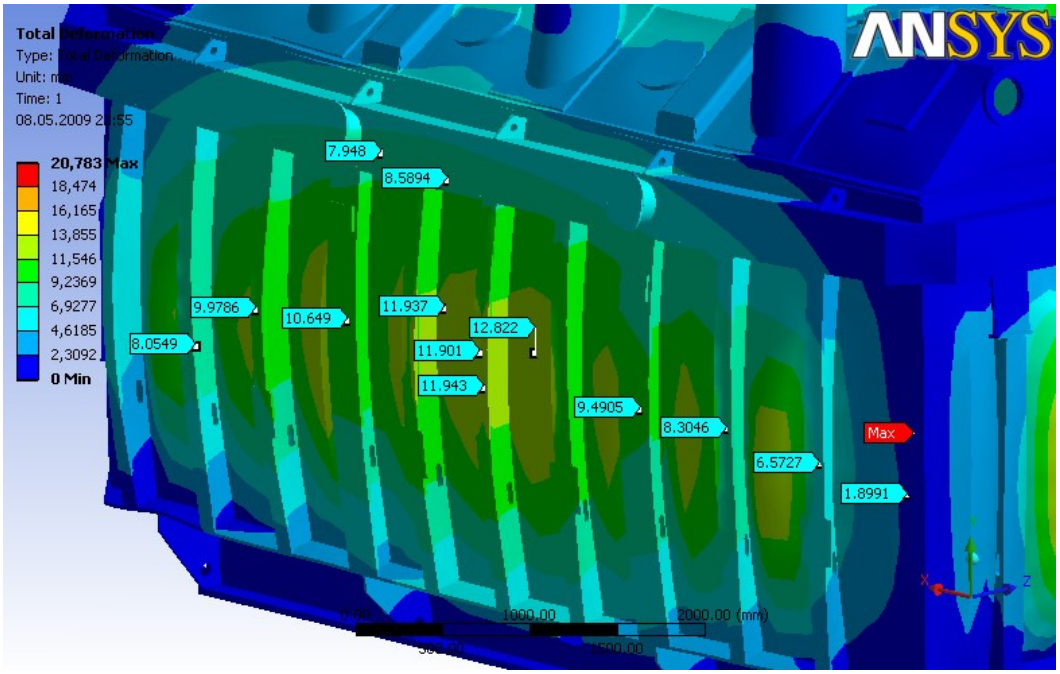
Şekil 5.2'de kazanın YG duvarında domların olduğu bölgelerde 1 bar basınçta bulunan değerin iki katı yani 11.9 mm oluşmuştur. Duvarın orta kısmındaki dom diğerlerine göre daha fazla yer değiştirdiğinden sehim 16,3 mm bulunmuştur.




Şekil 5.2., Alternatif 1 kazan tasarımında YG duvarında oluşan sehim

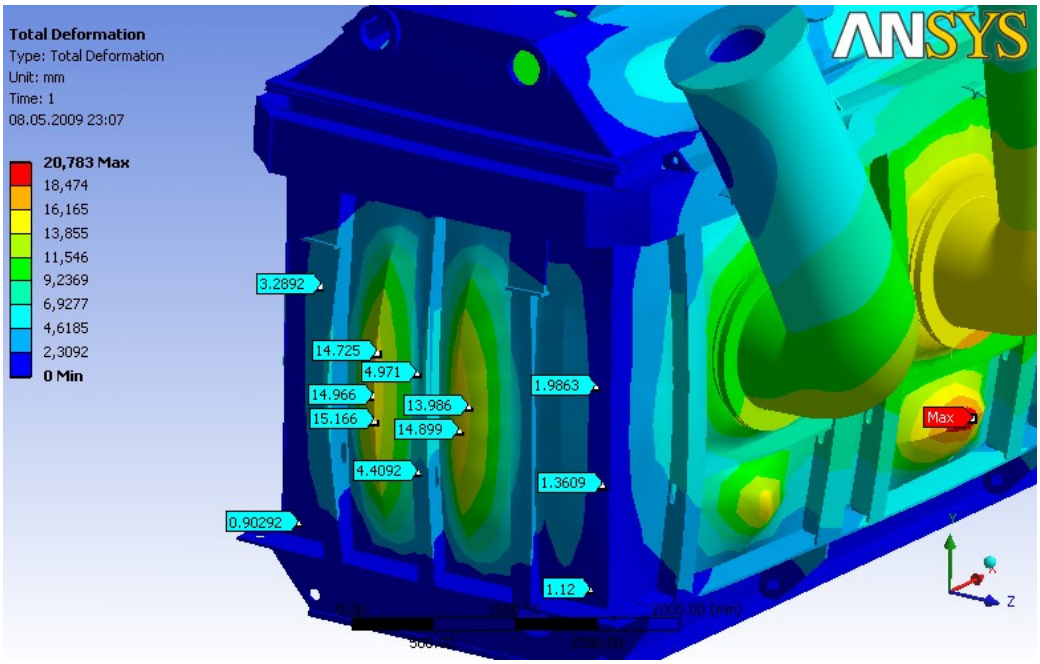
Kazanın alçak gerilim (AG) tarafındaki duvarda oluşan sehim çeşitli değerleri şekil 5.3'de görüldüğü gibi birkaç noktadan ölçüm alınmıştır. AG duvarı ile yan

duvarın birleştiği noktada sehim yaklaşık 1 mm, orta kısımlara gidildikçe 12 mm'ye kadar artmaktadır. Ayrıca buradaki sehimler kazan altı ile üst kısmın ortalarında oluşmaktadır. Duvar kalınlıkları 8 mm'dir.



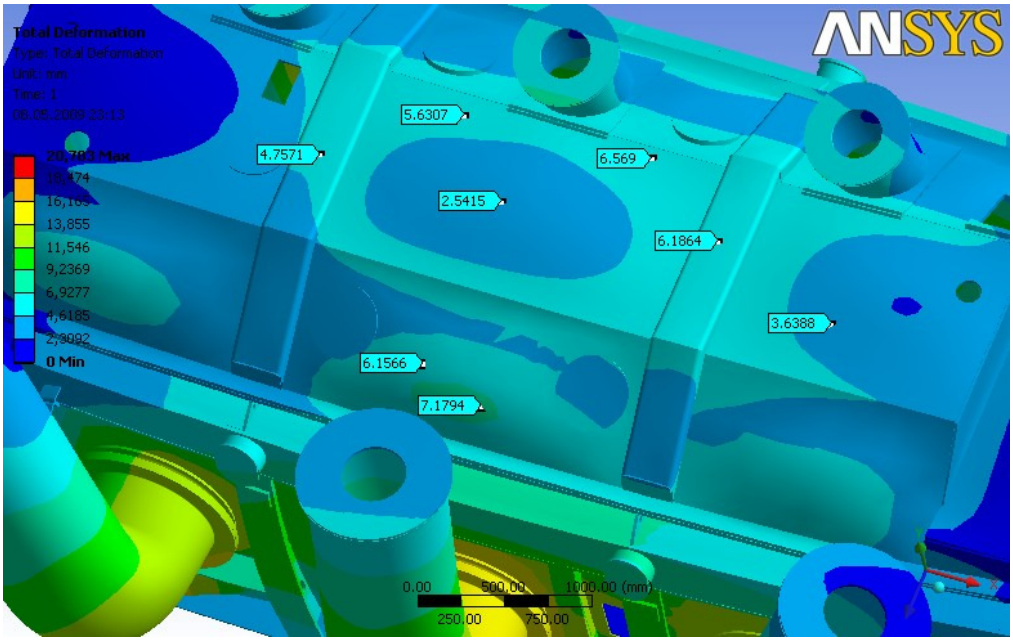

Şekil 5.3., Alternatif 1 kazan tasarımında AG duvarında oluşan sehim

Şekil 5.4'de kazanın yan duvarında oluşan sehim orta kısımlarında 15,2 mm'ye kadar çıkmaktadır. Duvarın orta kısmında bulunan takviyeden dolayı sehim 5 mm'ye kadar düşmüştür.



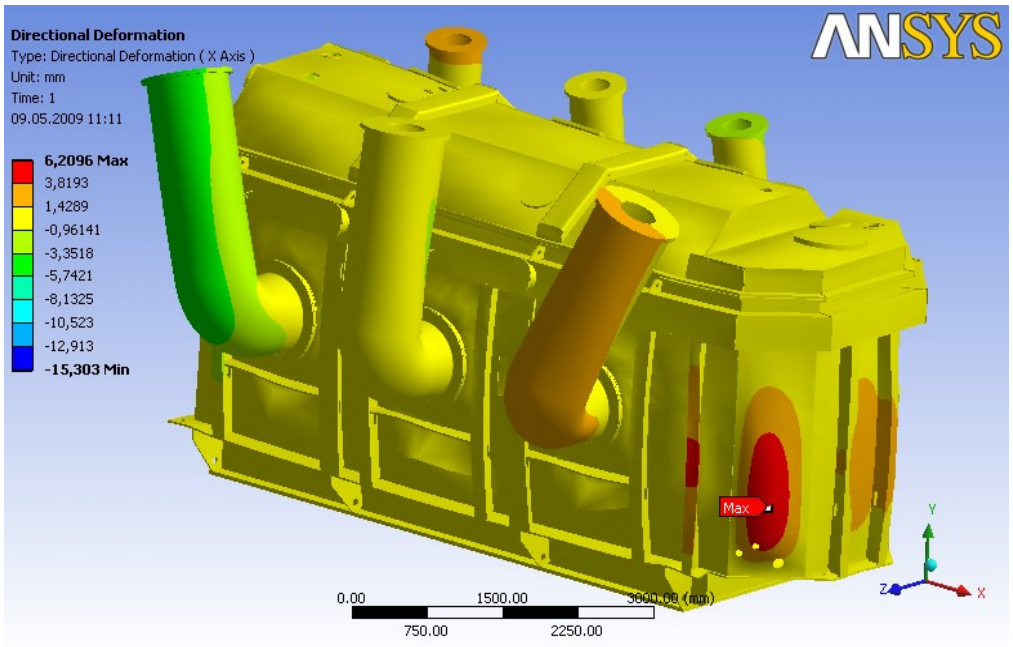

Şekil 5.4., Alternatif 1 kazan tasarımında yan duvarda oluşan sehim

Kapak üzerinde oluşan sehim maksimum 7 mm'ye kadar çıkmıştır. Kapak sacın kalınlığı 16 mm'dir ve duvarlarda çıkan sehim miktarlarından düşüktür. Kapak üzerine konulan U-takviyeler mukavemeti arttırmıştır.



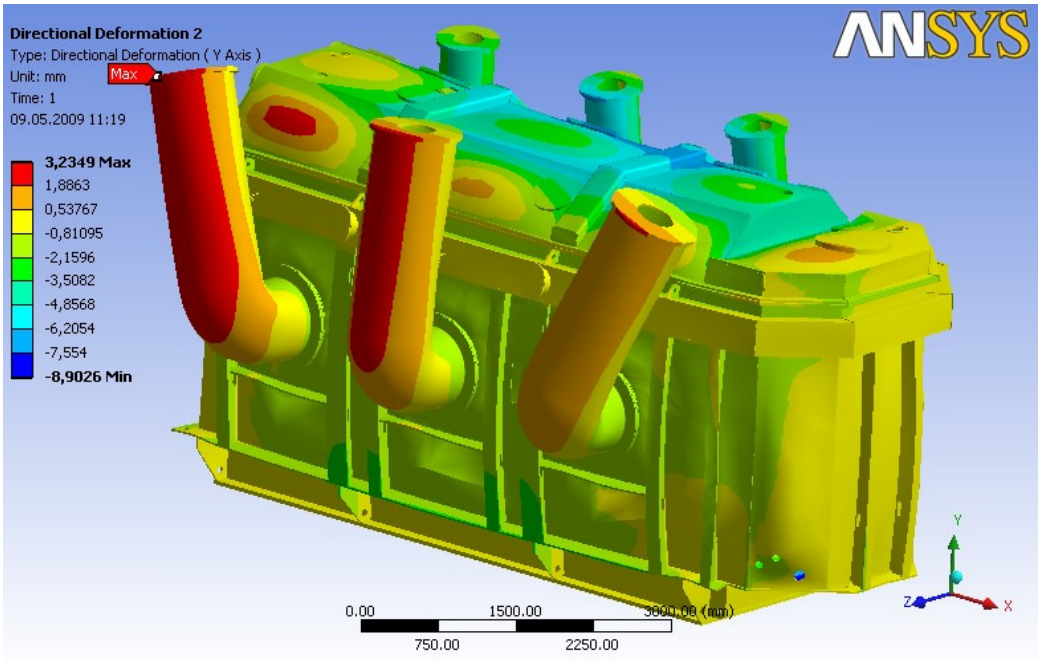

Şekil 5.5., Alternatif 1 kazan tasarımında kapakta oluşan sehim

Toplam sehim hangi eksen yönlerinde oluştuğunu görmek için her üç eksen yönünde sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. X-ekseni yönünde oluşan sehim maksimum 5,2 mm'dir. En yüksek değerini Şekil 5.6'da görüldüğü gibi yan duvardaki takviyenin olmadığı kısımda gerçekleşmiştir.



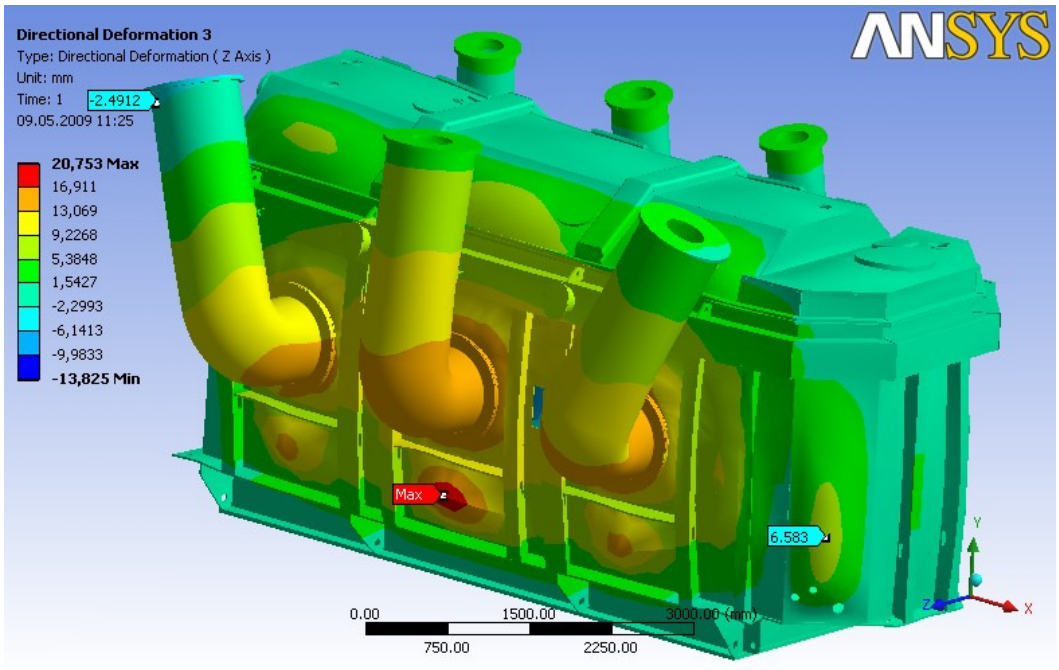

Şekil 5.6., Alternatif 1 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönünde oluşan sehim maksimum 3,2 mm ve şekil 5.7'de görüldüğü gibi YG dom'un üst kısmında oluşmuştur.



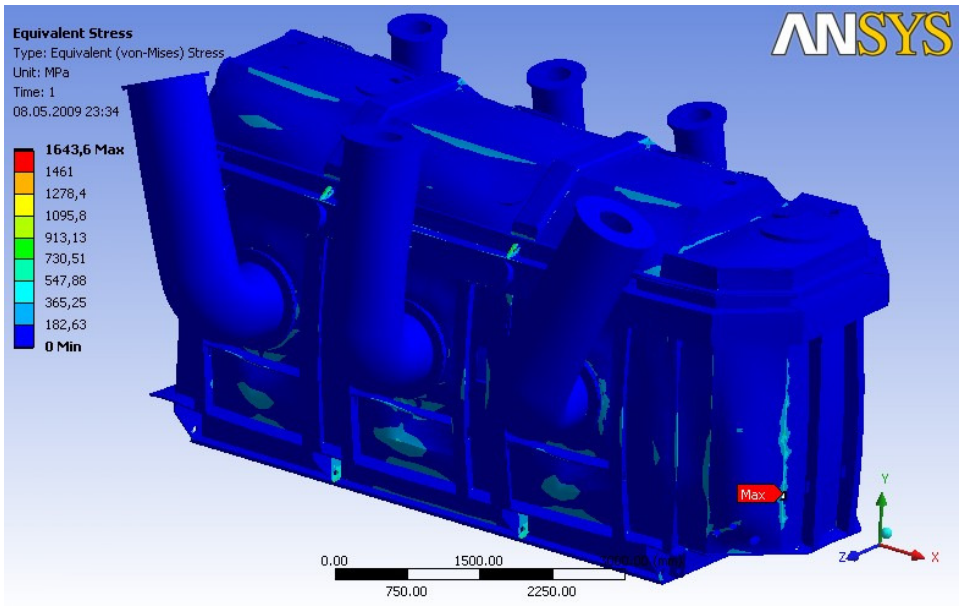

Şekil 5.7., Alternatif 1 kazan tasarımında Y-ekseni yönünde oluşan sehim

Z-ekseni yönündeki sehim maksimum 20,7 mm'dir ve toplam sehim YG duvarında orta dom'un alt kısmında oluşmuştur. Toplam sehim Z-ekseninde gerçekleşmiştir.



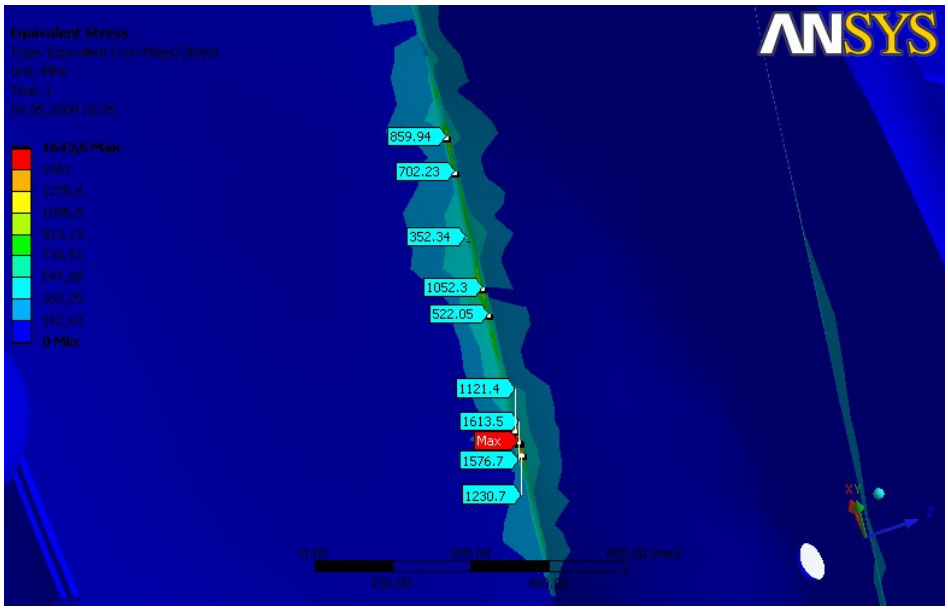

Şekil 5.8., Alternatif 1 kazan tasarımında Z-ekseni yönünde oluşan sehim

Şekil 5.9'da kazanda oluşan eşdeğer gerilme maksimum 1643 MPa ve yan duvarda takviyesiz olanı kısımda oluşmuştur. 2 bar basınç'ta oluşan eşdeğer gerilme 1 bar basınca göre iki katına çıkmıştır. Duvardaki sacların kalınlıkları 8 mm olduğundan basınç iki katına çıkması ile oluşan eşdeğer gerilme de iki katına çıkmıştır. Bu gerilme malzemenin çekme dayanımından çok fazla olduğundan yapılacak geliştirmeler bu kazanda oluşan sonuçlara göre yapılacaktır.



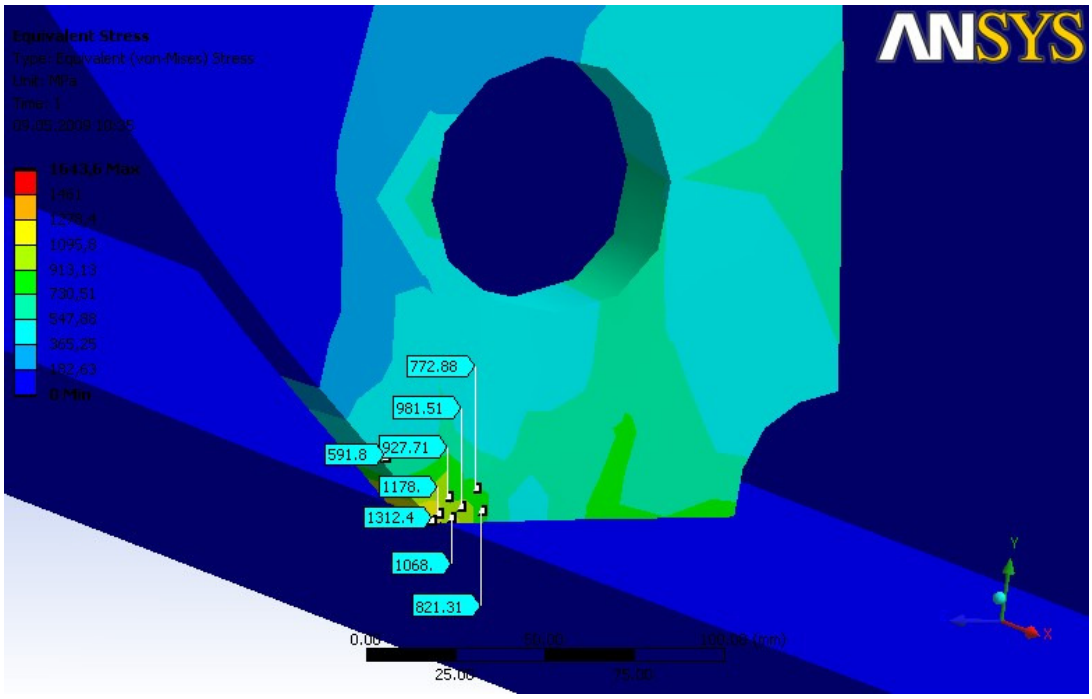

Şekil 5.9., Alternatif 1 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

Maksimum gerilme kazanın iç kısmında zayıf olan kısımda oluşmuştur. Şekil 5.10'da maksimum gerilmenin oluştuğu bölgeden birkaç noktadan ölçümler gösterilmiştir. Yan duvarda saca herhangi bir destek yapılmadığından bu bölgede oluşmuştur. Gerilme malzemenin çekme sınırını geçtiğinden kalıcı şekil değiştirmeler ve kırılmalar oluşur. Bu bölgenin güçlendirilmesi gerekir.



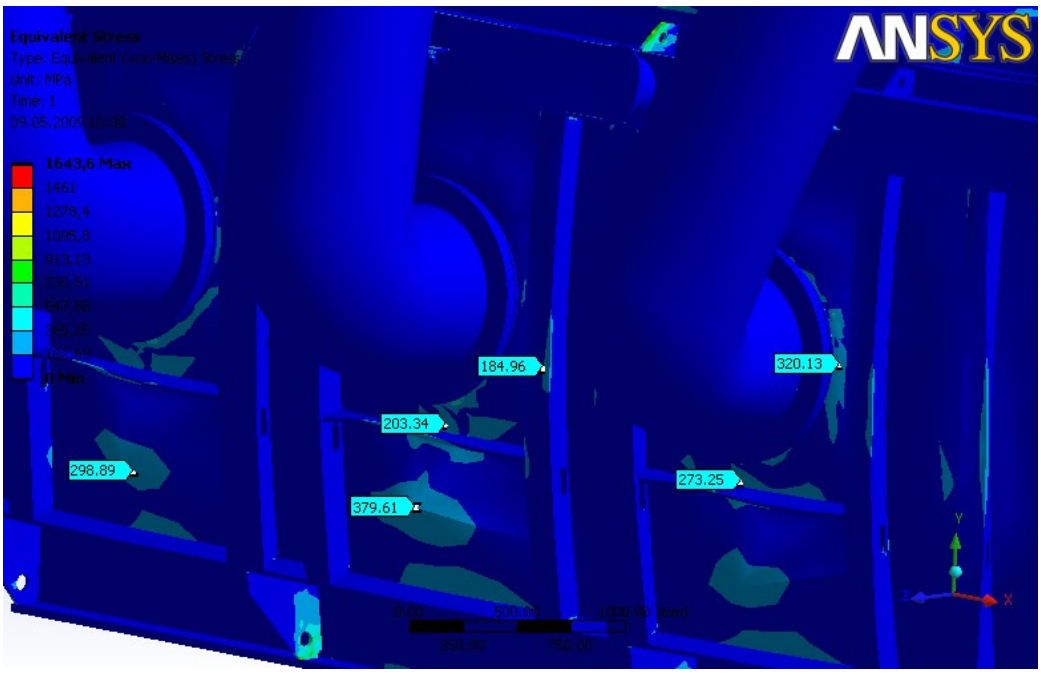

Şekil 5.10., Alternatif 1 kazanda oluşan maksimum gerilme bölgesi

Şekil 5.11'de taban ile alt bölme arasındaki 20 mm kalınlığındaki takviyede oluşan gerilme miktarı 600 ile 1300 MPa arasında değişmektedir. Takviyenin uç kısmına gidildikçe gerilme artmaktadır. Takviyenin köşesinde tekil gerilme (bir cisme uygulanan gerilme uç kısımlarında temas ettiği yüzey azaldığından gerilme artmaktadır ve bu bölgelerde oluşan gerilmedir) oluştuğundan gerilme artmaktadır. Tekil gerilmenin oluştuğu kısımlardaki gerilmeler gerçek sonuçlar içermediğinden bu bölgelere yakın yerlerdeki gerilmeler kabul edilmiştir. Bu takviye ucunda tekil gerilme olduğundan eşdeğer gerilme 821 MPa'dir. Bu gerilme de malzemenin çekme gerilmesinin üstünde olduğu için iyileştirme yapılmalıdır.



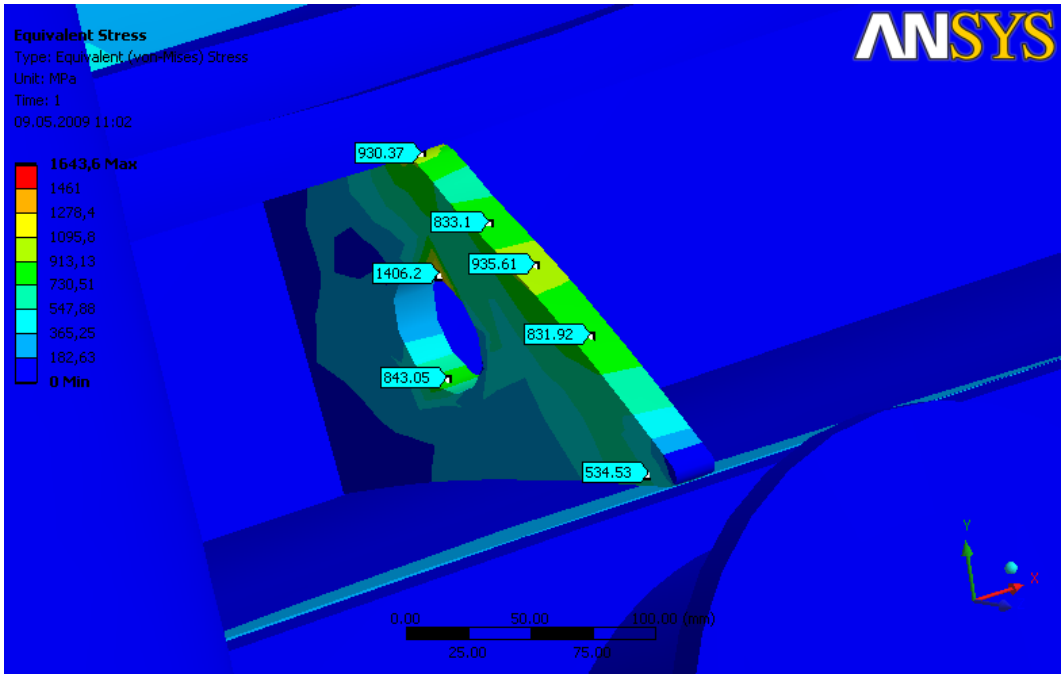

Şekil 5.11., Alternatif 1 kazanın alt taban takviyesinde oluşan gerilme dağılımı

Kazanın ön duvarındaki YG domları çıktığı kısımda gerilme 380 MPa'a kadar çıkmaktadır. Buradaki gerilme çekme malzemesinden küçük olduğundan kritik kabul edilmemiştir. Fakat bu kısımda maksimum sehim oluştuğu için iyileştirilme yapılması gerekmektedir.




Şekil 5.12., Alternatif 1 kazanın ön duvarında oluşan gerilmeler dağılımı

Şekil 5.13'de kazan kapağı altındaki 20 mm kalınlığındaki takviyede oluşan gerilme dağılımı 535 MPa ile 1406 MPa arasında değişmektedir. Takviyenin ortasındaki delik mukavemeti azalttığı için gerilme artmıştır. Alt ve üst kısımda basınçtan dolayı uygulanan gerilmeler bu takviyeyi zorlamaktadır. Buradaki gerilme değerleri de kritik değerlerde olduğundan güçlendirilmesi gerekmektedir.

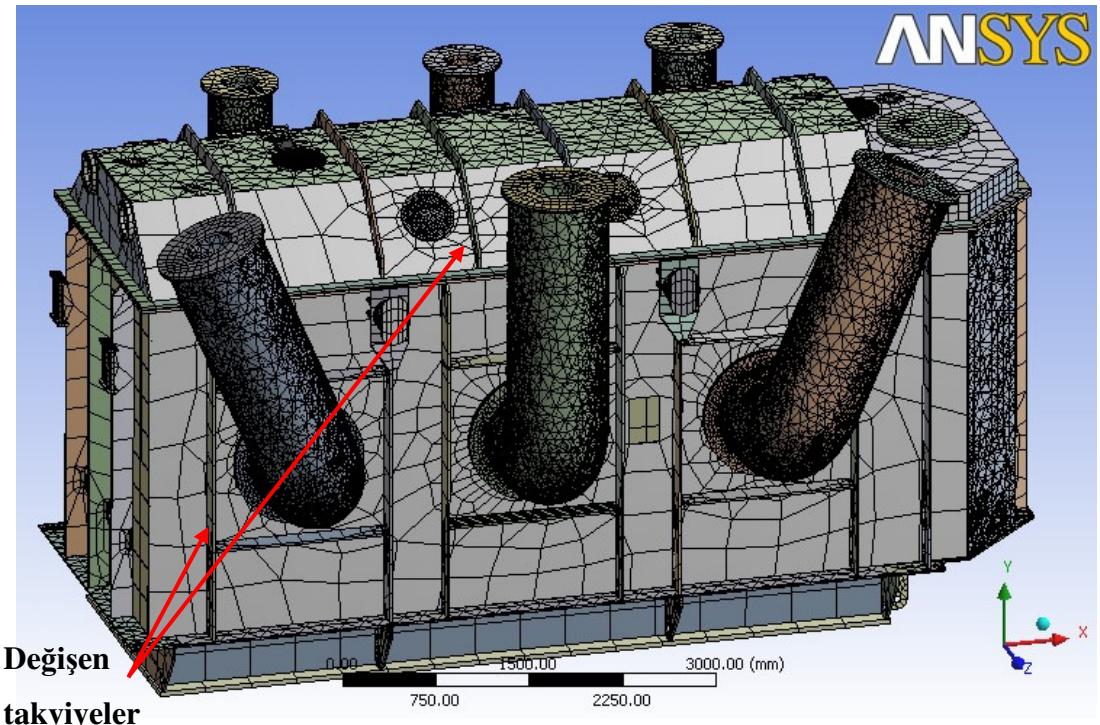



Şekil 5.13., Alternatif 1 kazanın kapak altındaki takviyede oluşan gerilme

Var olan kazana 2 bar basınç uygulanırsa analiz sonucunda duvarların, alt ve üst kısımlardaki takviyelerin yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Kritik görülen bölgelere destek takviyeler konulması ve/veya sac kalınlıkları arttırılması gerekir.

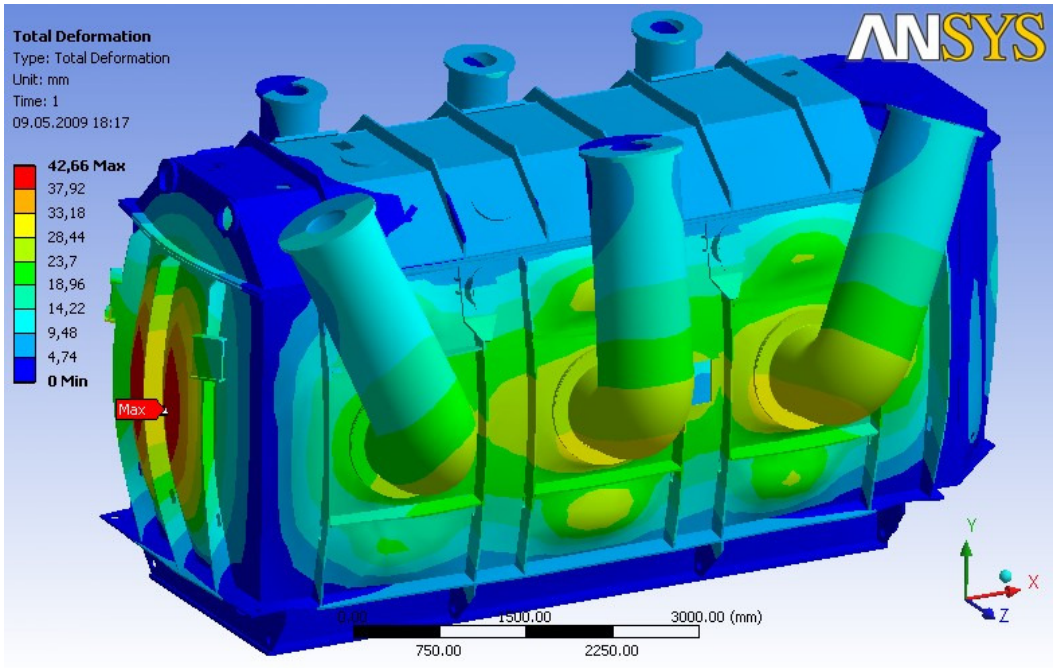
## 5.2 İkinci Alternatif Kazan Tasarımı

Üretilen transformatör kazan duvarlarındaki kuşağın etkisini incelemek için kaldırılmıştır. Bununla birlikte T-takviye yerine de I-takviye kullanılmıştır. I-takviye kapak kısımına kadar uzatılmıştır. Kazan yapısı toplam 165 parçadan oluşmuştur ve toplam ağırlığı da 19317 kg'dır. Kafes yapısı şekil 6.14'de görüldüğü gibi düğüm sayısı 281780 ve elamanların sayısı da 105789'dur. Birinci alternatif kazan tasarımına göre daha az parçadan oluşmuştur. Düğüm sayısı da daha az olmasına karşın eleman sayısı artmıştır.



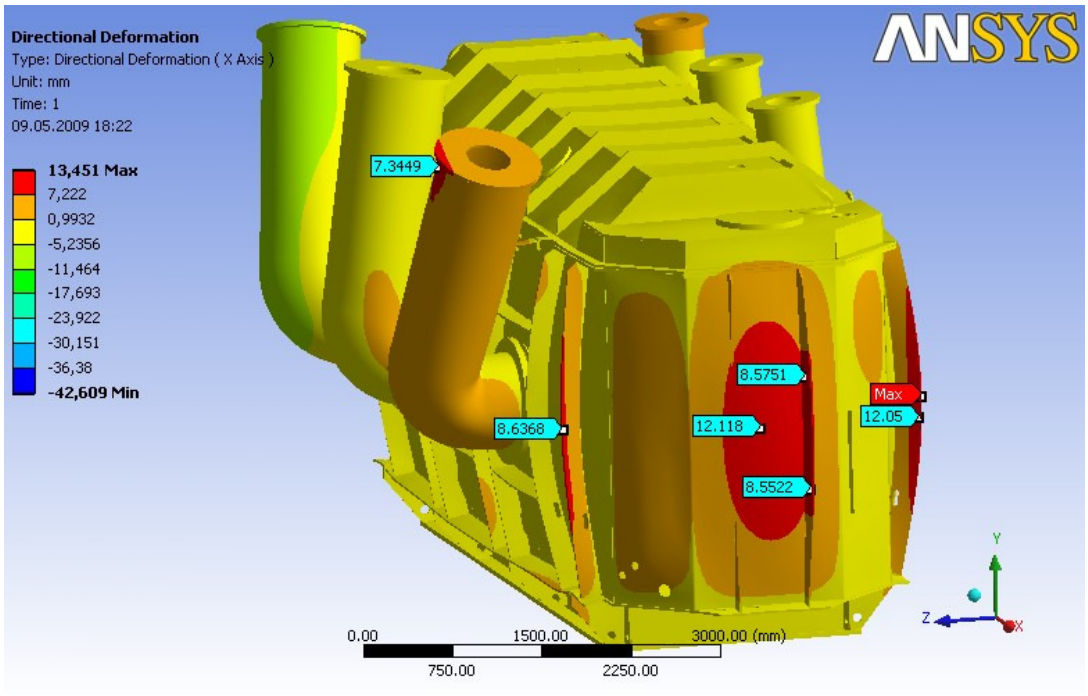

Şekil 5.14., Alternatif 2 kazan tasarımının kafes yapısı

Bu tasarımda kazanda oluşan toplam sehim dağılımı şekil 5.15'te gibi maksimum 42,6 mm'dir ve yan duvarda iki takviye arasında oluşmuştur. Bu sehim kritiktir ve çoğunluğu kalıcı şekil değişikliği yapar.



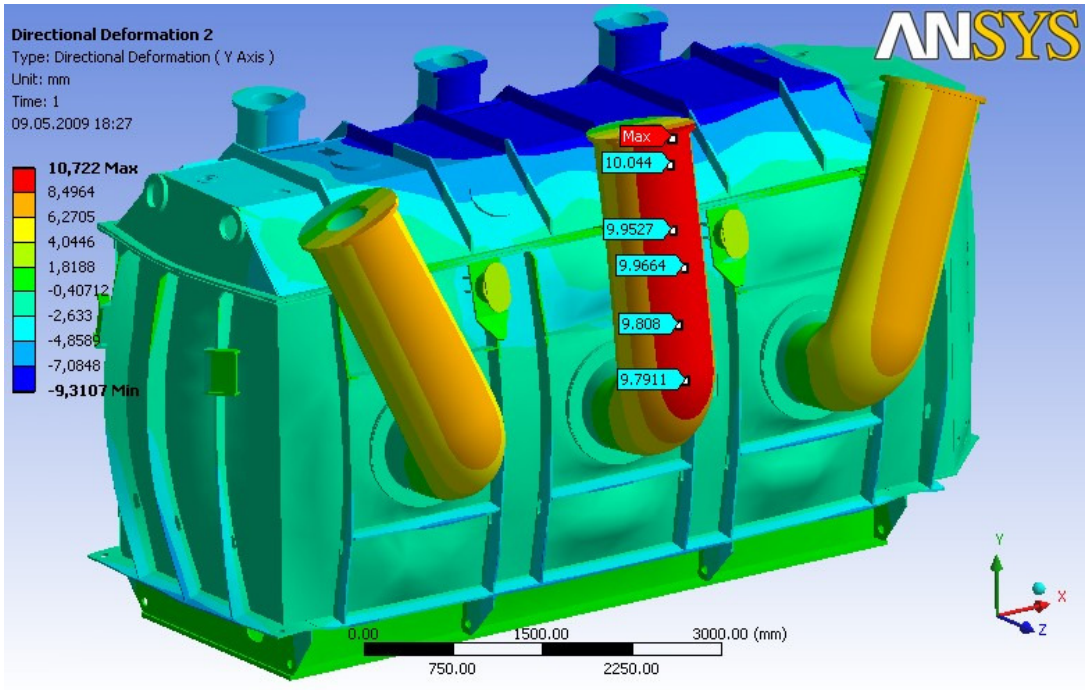

Şekil 5.15., Alternatif 2 kazan tasarımında toplam sehim

X-ekseni yönünde oluşan maksimum sehim 13,4 mm ve şalterin olduğu yan duvarlarda gerçekleşmiştir. Bu bölgede kullanılan I-takviyenin bir etkisi olmamıştır.



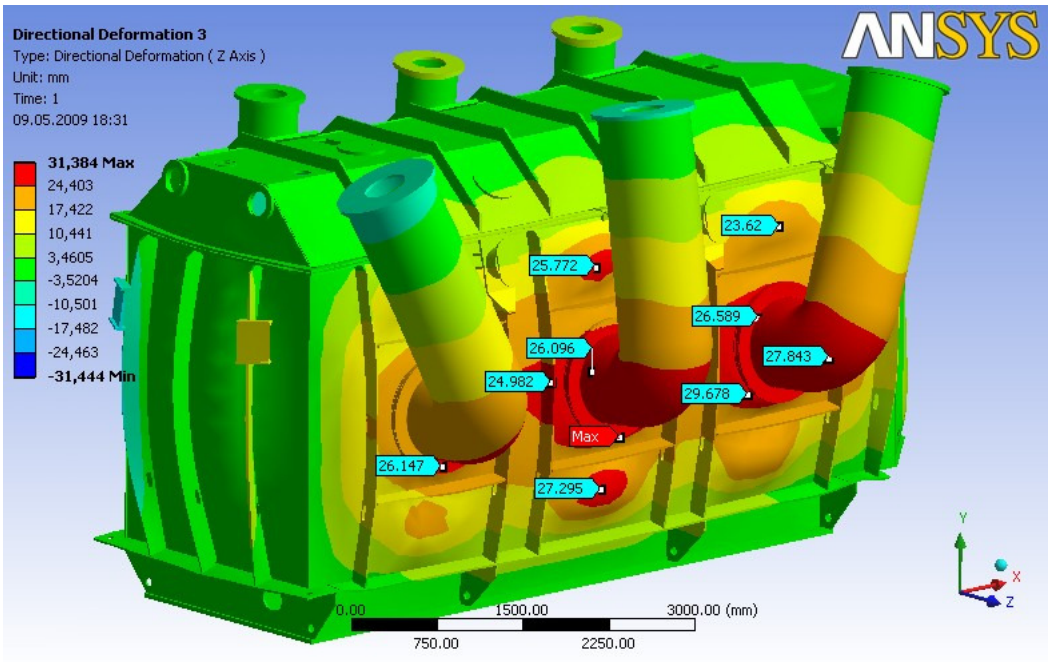

Şekil 5.16., Alternatif 2 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönündeki maksimum sehim 10,7 mm ve YG duvarındaki orta dom'da oluşmuştur. Domun üst kısımlarına doğru gidildikçe sehim artmıştır.



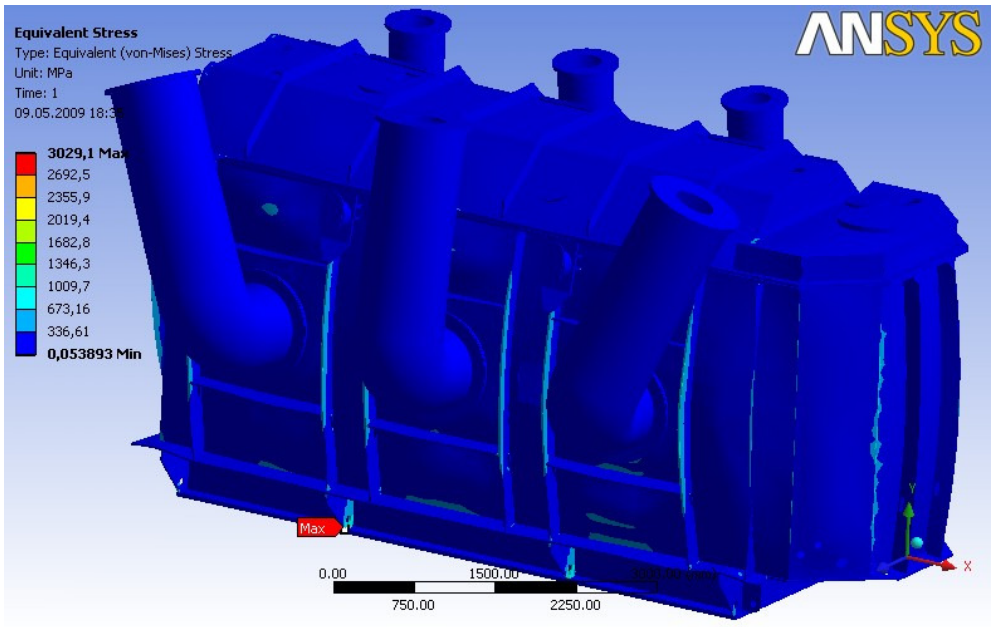

Şekil 5.17., Alternatif 2 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim

Z-ekseni yönünde oluşan sehim da 31,4 mm ve kazanın YG duvarındaki domların çıkış yerlerinde oluşmuştur. Toplam sehim en fazla Z-eksini doğrultusunda oluşmuştur.




Şekil 5.18., Alternatif 2 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim

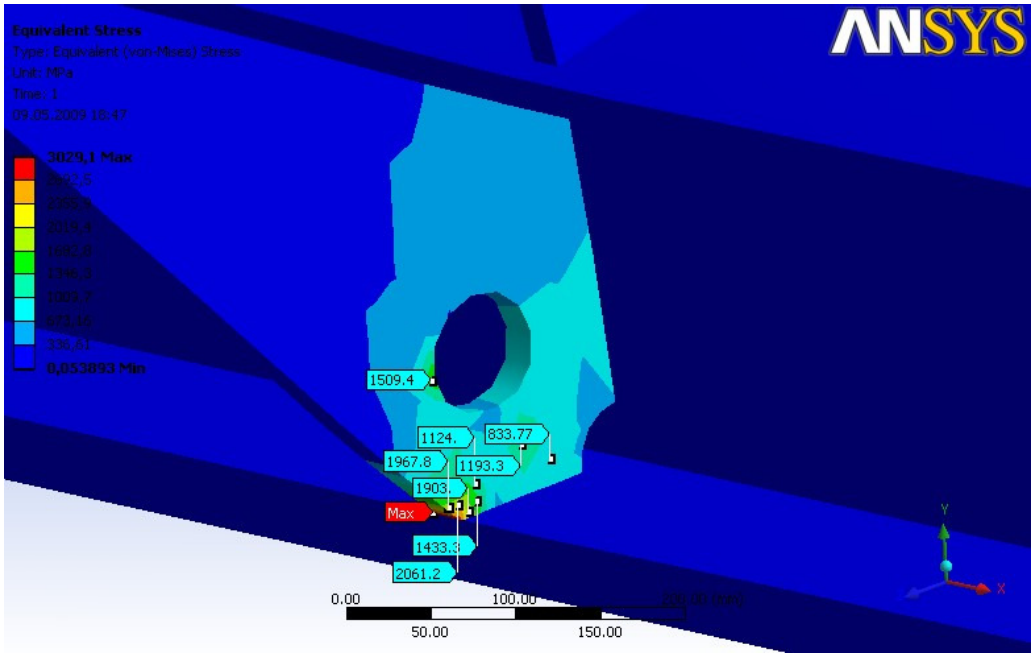
Kuşaksız ve I-takviyeli 2. tasarımdaki kazanda oluşan eşdeğer gerilme şekil 5.19'da gösterilmiştir. Oluşan maksimum eşdeğer gerilme 3029 MPa ve taban ile alt bölme arasında bulunan takviyelerde oluşmuştur.




Şekil 5.19., Alternatif 2 kazan tasarımındaki eşdeğer gerilme dağılımı

Takviyede oluşan eşdeğer gerilme uç kısımlara doğru gidildikçe artmıştır (3029 Mpa). Uç kısımlarda tekil gerilme oluştuğu için dikkate alınmamıştır. Bu uç

kısma en yakın olan bölgedeki gerilme 1433 MPa kabul edilmiştir. Malzemenin çekme dayanımının çok üstünde olduğundan bu takviye risklidir.

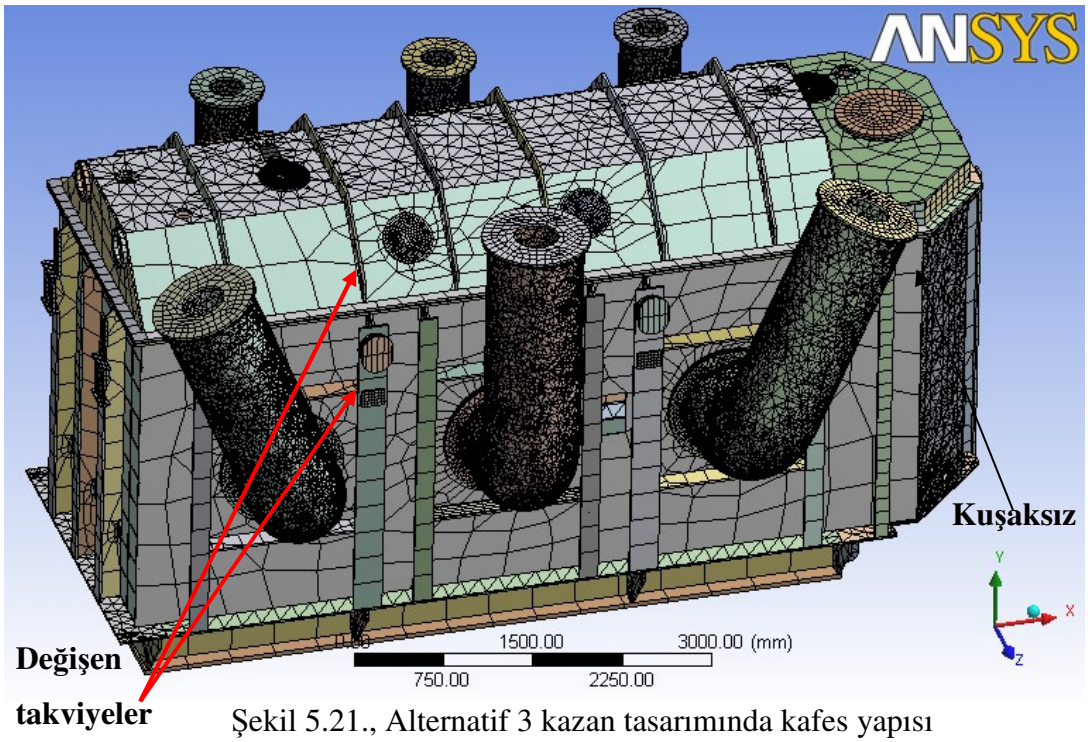



Şekil 5.20., Alternatif 2 kazan tasarımında taban takviyesindeki gerilme dağılımı

İkinci alternatif kazan tasarımında yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda oluşan sehimler ve eşdeğer gerilmeler birinci alternatif kazan tasarımna göre daha fazla çıkmıştır. Kuşağın olmaması ve takviyelerin I tipi olması bu kazan yapısının mukavemetini çok düşürmüştür.

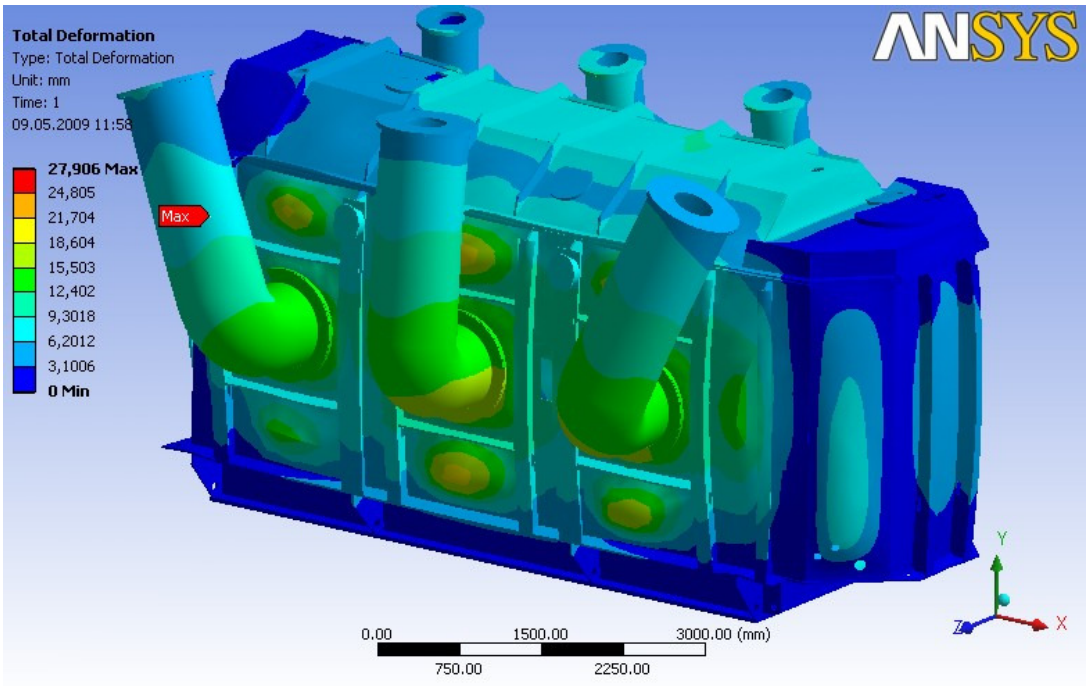
## 5.3 Üçüncü Alternatif Kazan Tasarımı

Bu tasarımda daha önceki kazan tasarımında kullanılan I-takviyeler yerine T-takviye kullanılmıştır. Kazan modeli toplam 173 parçadan oluşmuştur, toplam ağırlığı ise 20517 kg'dır. Kafes yapısındaki düğüm sayısı 278951 ve elamanların sayısı 105296'dır (Şekil 5.21). Üretilen kazana göre daha az düğümden oluşmuştur, düğüm sayısı azalmasına rağmen eleman sayısı artmıştır. Kapaktaki takviyelerin artması ve duvardaki T-takviyelerin uzaması sonucunda eleman sayısına sebep olmuştur.



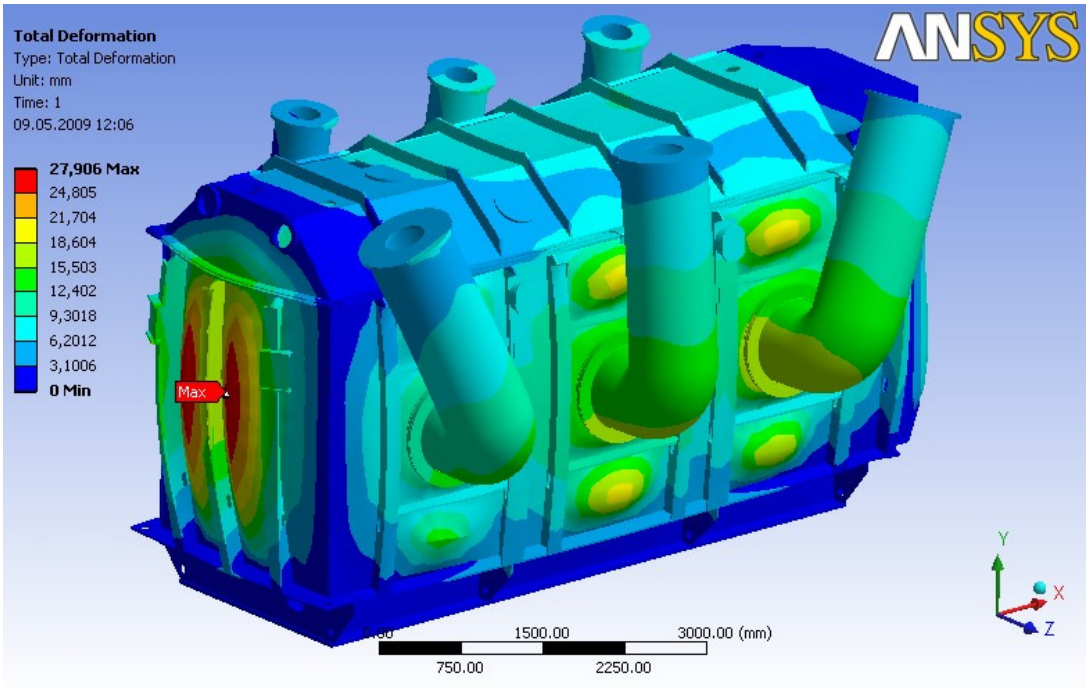

Şekil 5.21., Alternatif 3 kazan tasarımında kafes yapısı

Şekil 5.22'de duvarların üst kısmında kuşak olmaması ve bunun yerine takviyeleri boyu uzatılmıştır. Bu tasarımda statik analiz sonucunda oluşan sehim 27,9 mm ve yan duvarda meydana gelmiştir. YG duvarında oluşan sehim 24 mm'ye (renk ayırımına göre belirlenmiştir) kadar çıkmıştır.



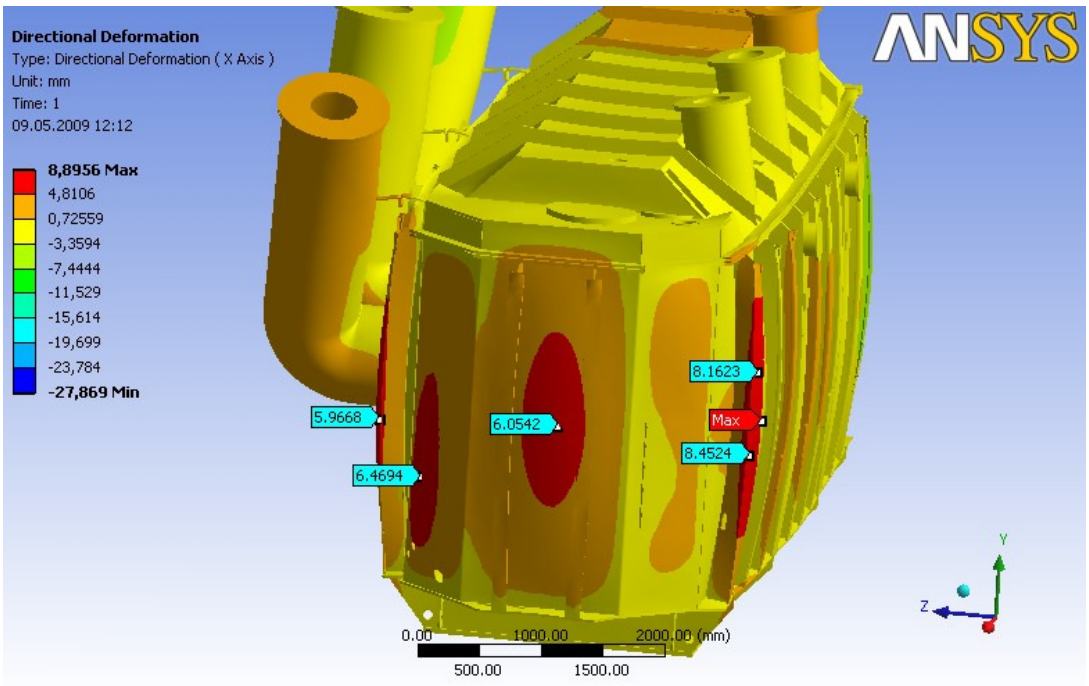

Şekil 5.22., Alternatif 3 kazan tasarımında toplam sehim

Toplam sehimin maksimum bölgesi şekil 5.23'de gibi kazanın yan duvarında oluşmuştur. İki takviye arasında boş kalan bölgede sehim maksimum değerine ulaşmaktadır. Maksimum sehim ise 27,8 mm'dir.



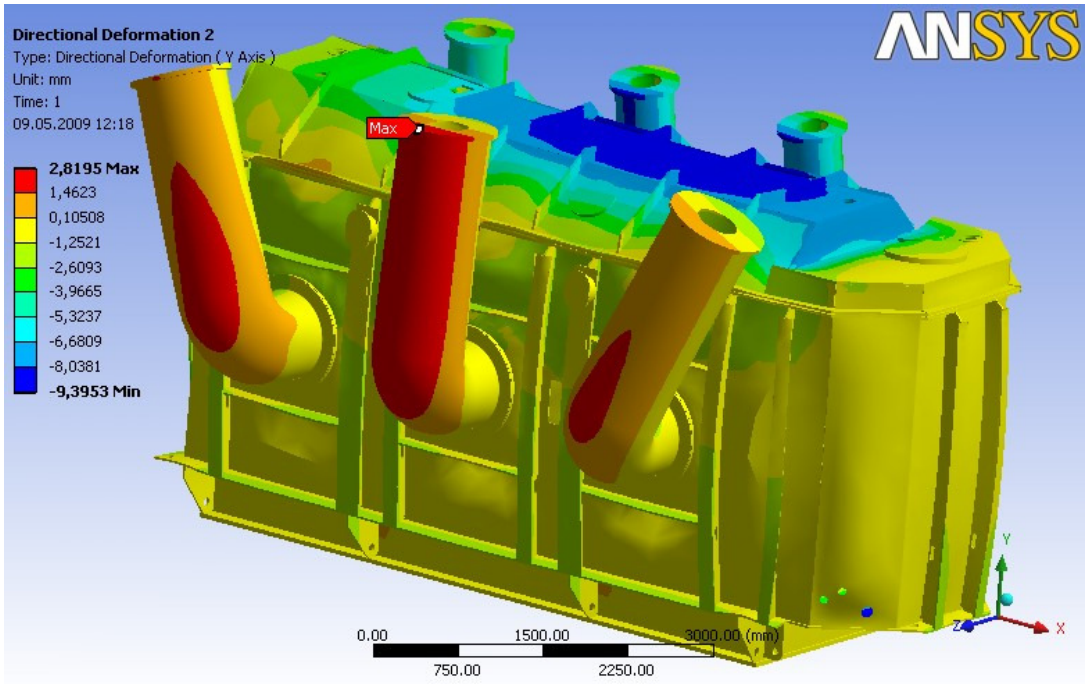

Şekil 5.23., Alternatif 3 kazan tasarımında yan duvarda oluşan sehim

X-ekseni yönünde oluşan maksimum sehim 8,9 mm'dir. Şalterin bulunduğu taraftaki yan duvarda ve takviyelerde oluşmuştur.



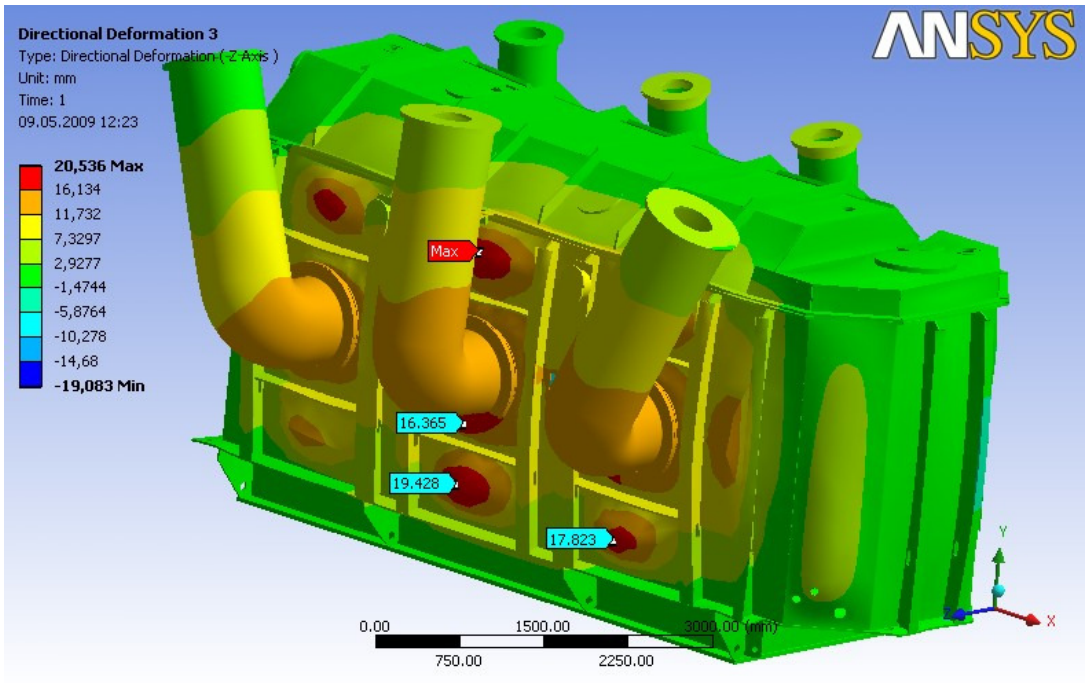

Şekil 5.24., Alternatif 3 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönünde oluşan maksimum sehim 2,8 mm'dir. Kazanın ön duvarındaki (YG duvarı) domlarda oluşmuştur ve orta domda daha fazla gerçekleşmiştir.



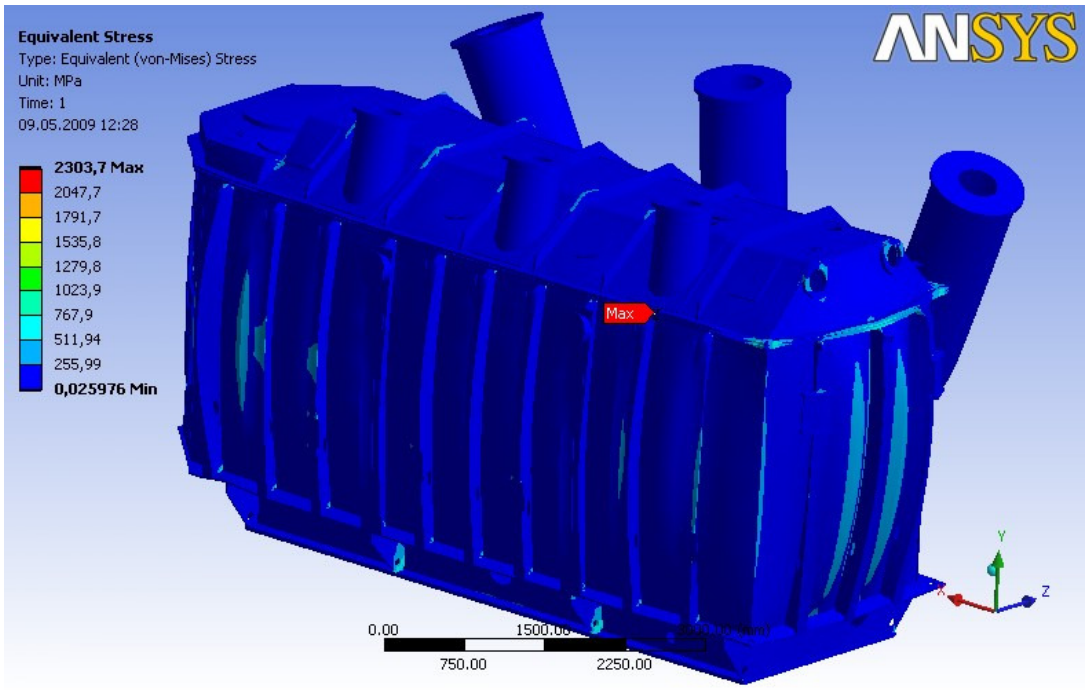

Şekil 5.25., Alternatif 3 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim

Z-ekseni yönünde oluşan maksimum sehim 20,5 mm'dir. Ön duvarlarda takviyelerin olmadığı kısımlarda maksimum sehim oluşmuştur.




Şekil 5.26., Alternatif 3 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim

Alternatif 3 kazan tasarımında oluşan maksimum sehim şekil 5.27'de görüldüğü gibi maksimum 2303 Mpa'a kadar çıkmıştır. T-takviyelerin kapak ile birleştiği yerlerde oluşmuştur. Kapaktan gelen zorlanmalardan dolayı bu kısıma gelen yük artmıştır.



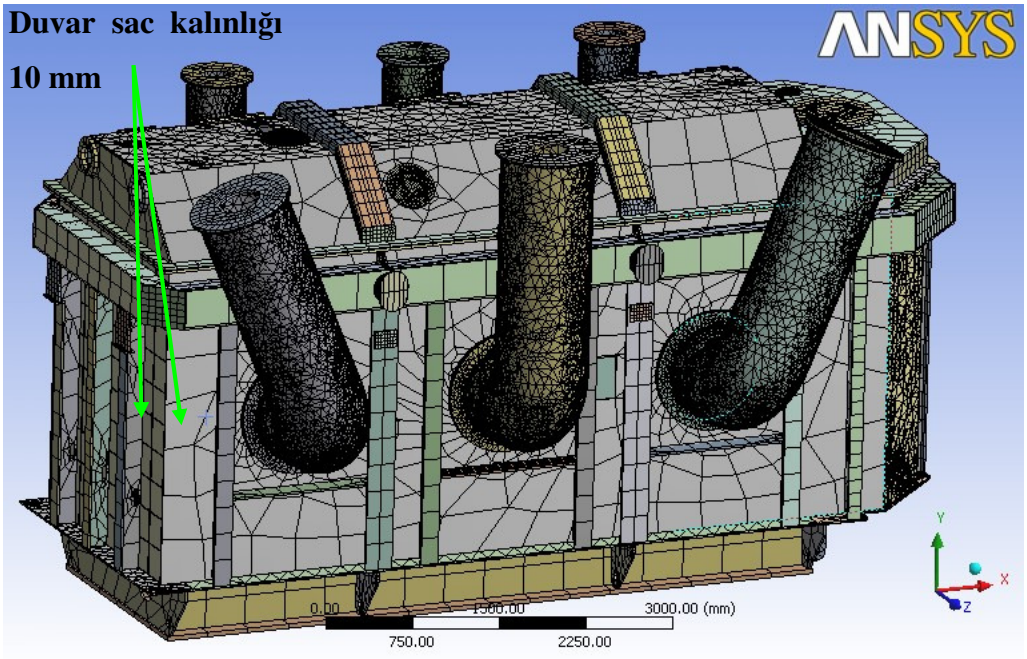

Şekil 5.27., Alternatif 3 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı

Bu tasarımda yapılan sonlu elemanlar analiz sonucunda sehim ve oluşan eşdeğer gerilme değerleri oldukça fazla bulunmuştur. Bulunan bu sonuçlar çok fazla olmasından dolayı bu kazan tasarımında oluşan sorunları incelenmesine gerek duyulmamıştır. Kuşağın ve T-takviyenin yapılması ile kazan yapısının mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir.

## 5.4 Dördüncü Alternatif Kazan Tasarımı

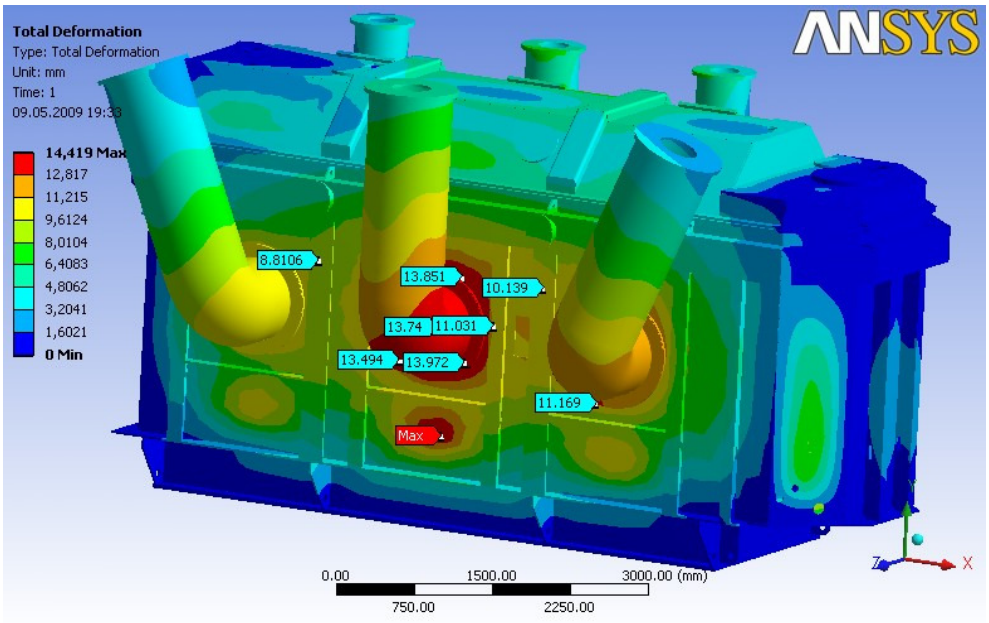
Alternatif 1 kazan tasrımında 2 bar basınç uygulanarak yapılan analiz sonucunda sehimler ve eşdeğer gerilmeler oldukça fazla bulunmuştur. Bu tasarımda kazan duvarındaki sac kalınlıkları 8 mm'den 10 mm'ye çıkartılmıştır. Duvar sac kalınlığı arttırılmakla oluşacak etkiyi tespit etmek için duvarlara ilave takviye yapılmamıştır. Bu yapıda toplam parça parça sayısı 215 ve toplam ağırlığı 23666 kg olarak hesaplanmıştır. Kazan duvarındaki sacın arttırılması ile 775 kg ilave gelmiştir.

Şekil 5.28'de duvar sacın kalınlığı arttırılması ile oluşan kafes yapısı gösterilmiştir. Bu kazan modeli 294012 düğümden ve 106619 elamandan oluşmuştur. Sac kalınlığı arttırılması ile düğüm ve eleman sayısı da artmıştır.



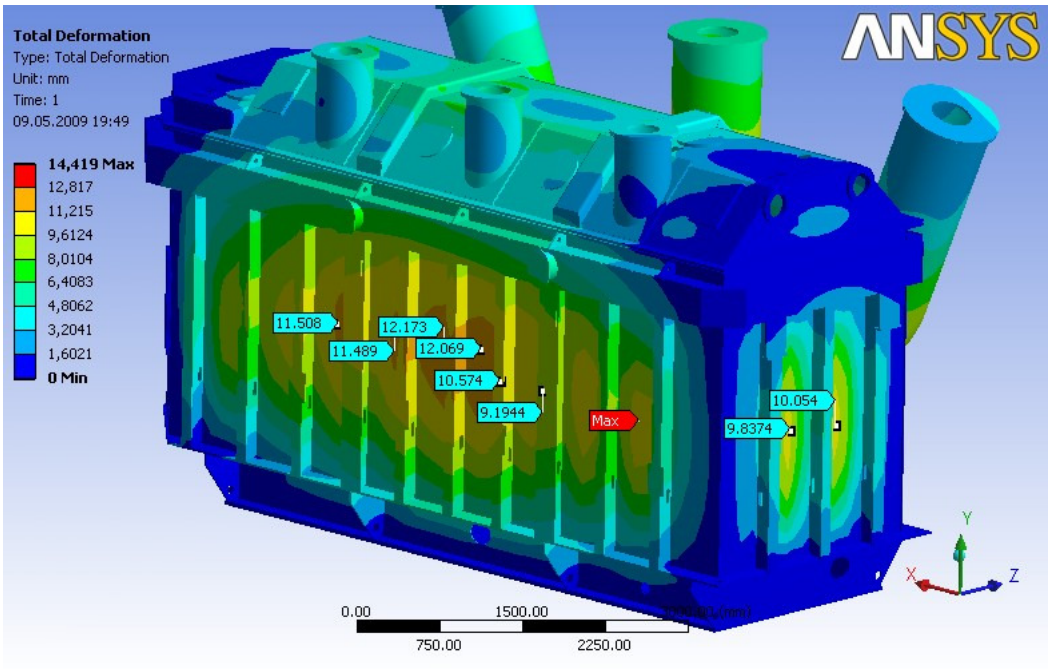

Şekil 5.28., Alternatif 4 kazan tasarımında kafes yapısı

Şekil 5.29'da duvar sac kalınlığı 10 mm olan kazandaki toplam sehim statik analiz sonucu verilmiştir. Burada oluşan maksimum sehim 14,4 mm ve YG duvardaki domun çıktığı alt kısmında oluşmuştur. Çıkan sonuç birinci alternatif tasarıma göre 6,4 mm azalmıştır.



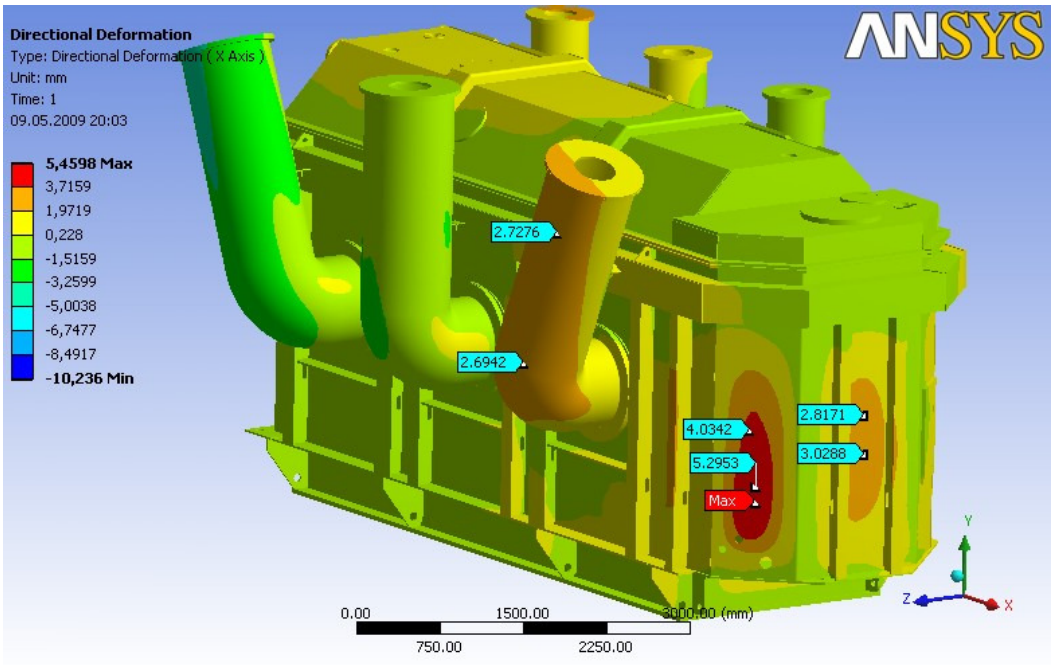

Şekil 5.29., Alternatif 4 kazan tasarımında toplam sehim

Kazanın AG duvarındaki sehim orta kısımlara doğru gidildikçe artmıştır ve 12,173 mm'ye kadar ulaşmıştır. Yan duvarda ise iki takviye arasındaki kısımda artmıştır ve 10 mm'ye kadar çıkmıştır. Bu bölgelerde duvar sac kalınlıkları artırılması ile çok fazla bir değişiklik olmamıştır.



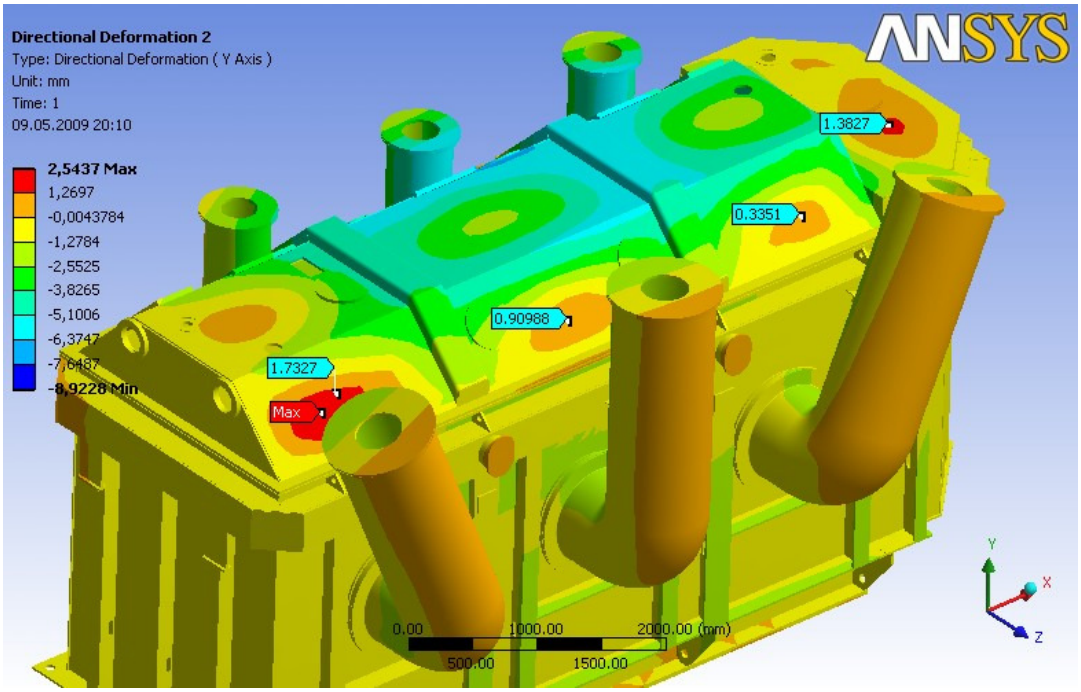

Şekil 5.30., Alternatif 4 kazan tasarımında AG duvarındaki sehim

X-ekseni doğrultusunda oluşan sehim şekil 5.31'de görüldüğü gibi 5,5 mm'ye kadar çıkmıştır. Şalterin bulunduğu taraftaki yan duvarda oluşmuştur.



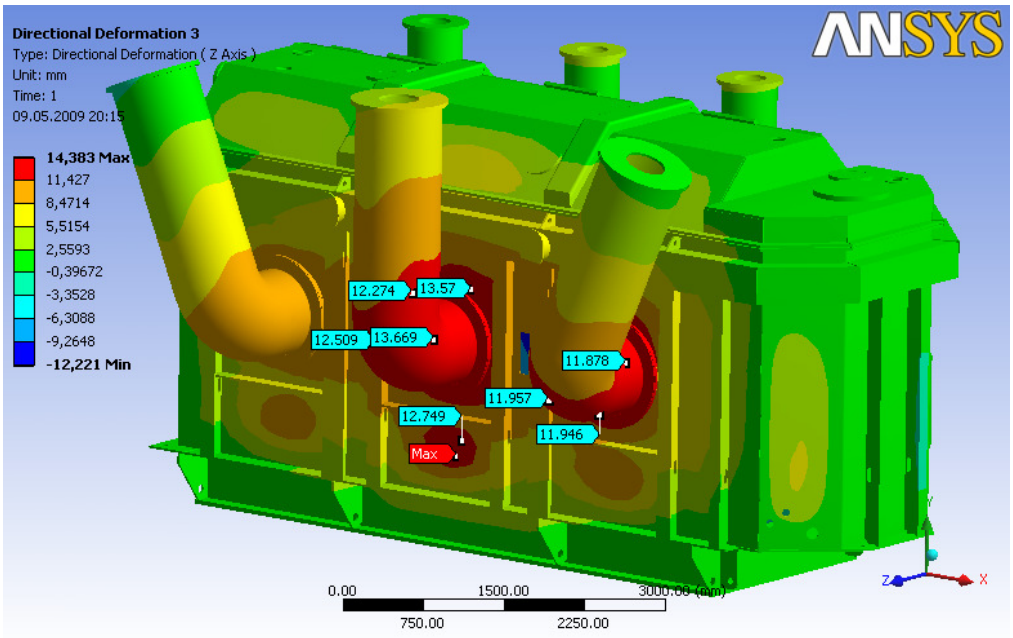

Şekil 5.31., Alternatif 4 kazan tasarımında X-ekseni doğrultusundaki sehim

Y-ekseni doğrultusunda oluşan sehim şekil 5.32'de görüldüğü gibi maksimum 2,54 mm'dir. Sehim kapakta daha fazla oluşmuştur, fakat değeri düşük olduğundan kritik kabul edilmemiştir.



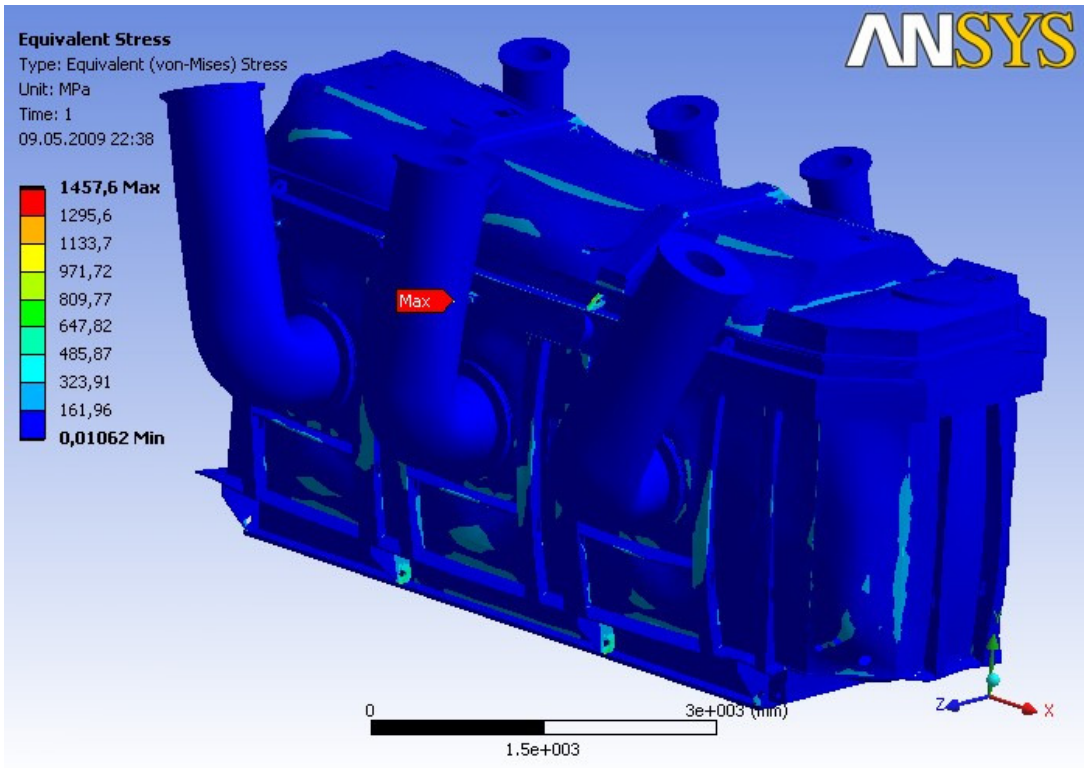

Şekil 5.32., Alternatif 4 kazan tasarımında Y-ekseni doğrultusundaki sehim

Z-ekseni doğrultusunda oluşan sehim şekil 5.33'de görüldüğü gibi maksimum 14,4 mm'ye kadar çıkmıştır. YG domların olduğu kısımda ve domun alt kısmında oluşmuştur.

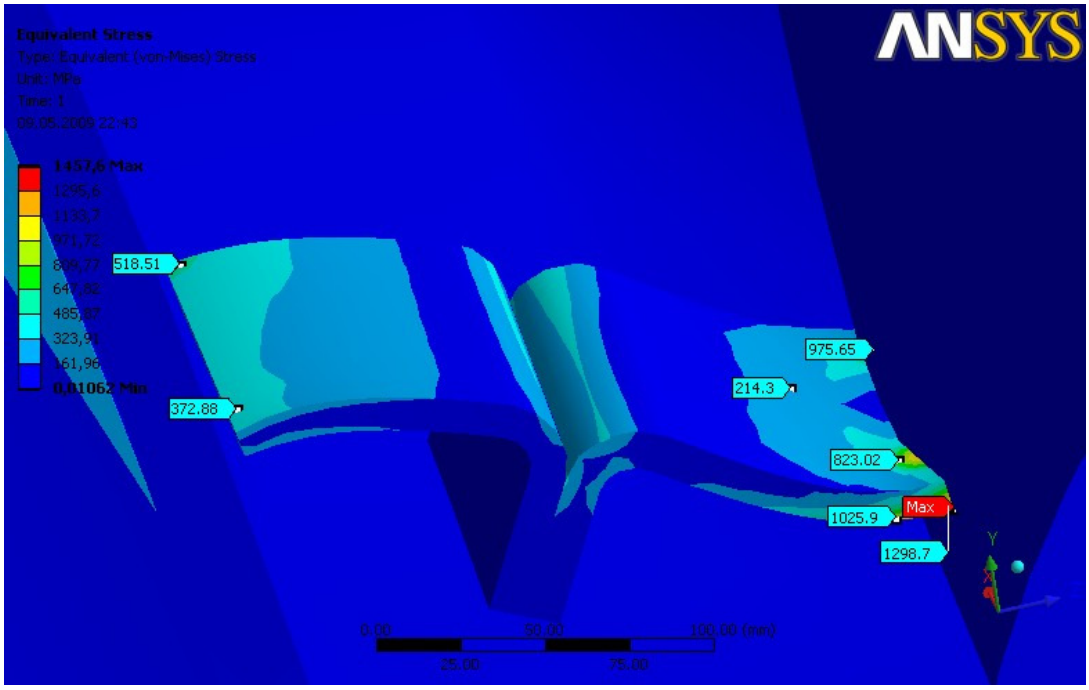



Şekil 5.33., Alternatif 4 kazan tasarımında Z-ekseni doğrultusundaki sehim

Kazan duvarların kalınlıkları 10mm'ye arttırılarak yapılan bu tasarımda statik analiz sonucunda oluşan eşdeğer gerilme şekil 5.34'te gösterilmiştir. Oluşan maksimum eşdeğer gerilme 1457 MPa ve YG duvarında orta domdaki destek tutucuda oluşmuştur (Şekil 5.35).



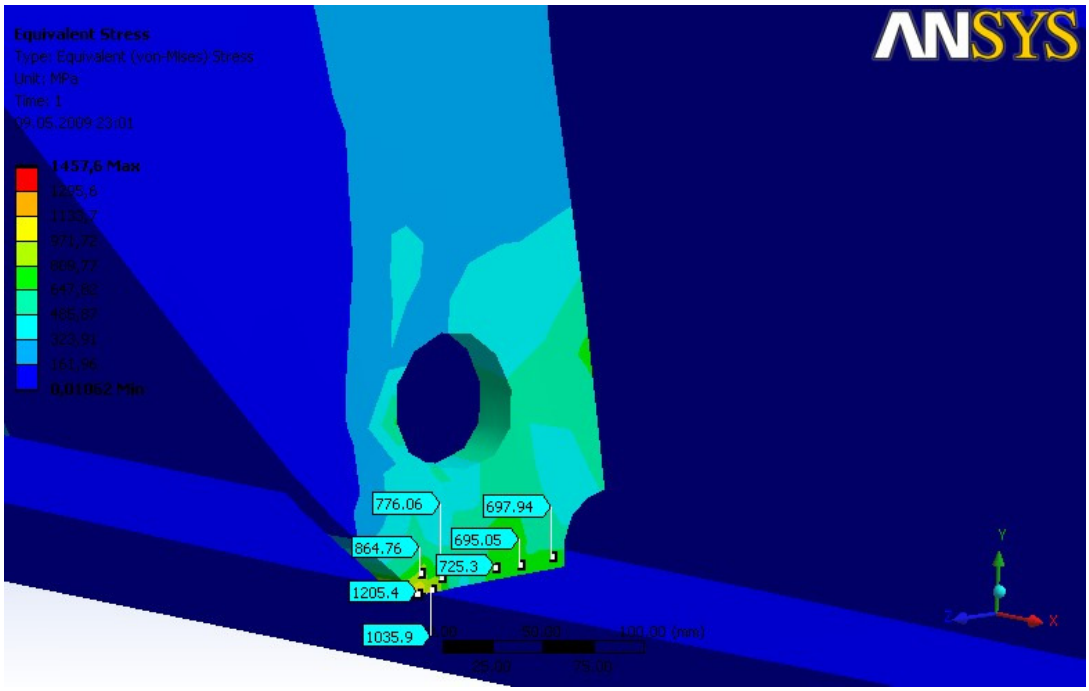

Şekil 5.34., Alternatif 4 kazan tasarımında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı




Şekil 5.35., Alternatif 4 tasarımında YG dom tutucusundaki gerilme dağılımı

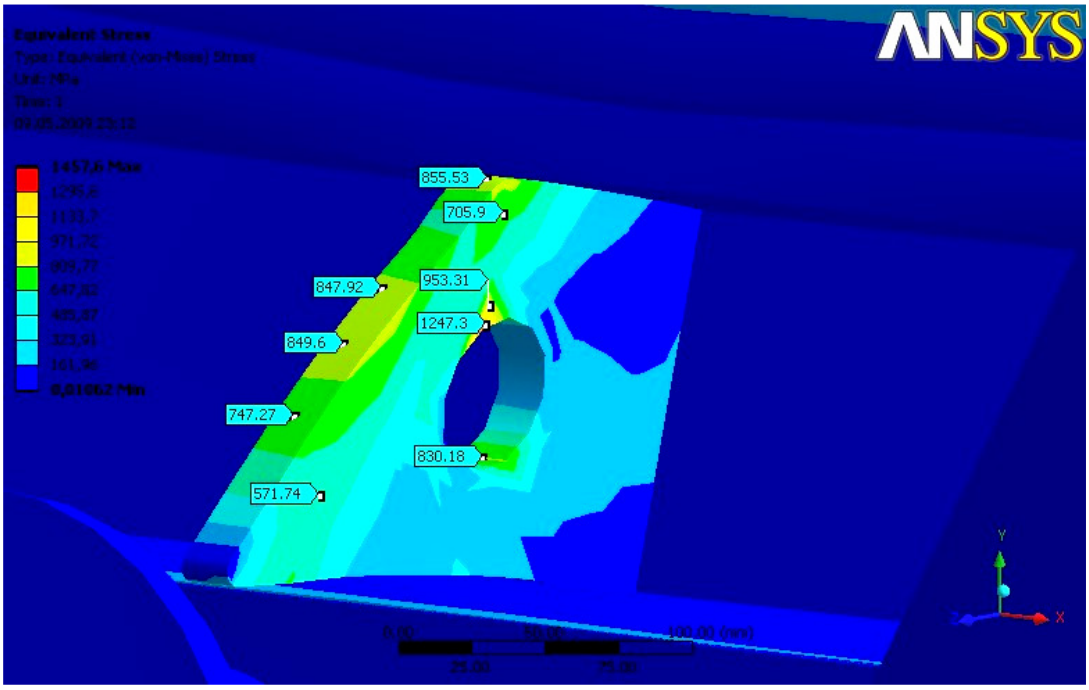
YG domlarını desteklemek için kullanılan tutucu parçaların saç kalınlıkları 10 mm ve enleri 120 mm'dir. Bu tutuculardaki oluşan eşdeğer gerilme çok artmıştır. Oluşan fazla gerilme malzemenin çekme dayanımını geçtiği için parçaların kırılması sebep olur. Basıncın 2 bar'a çıkması ile bu noktalara gelen yük artmıştır.

Şekil 5.36'da kazanın tabanı ile alt bölme arasındaki takviyede oluşan eşdeğer gerilme 1205 MPa'a kadar çıkmıştır. Alternatif 1 kazan tasarımında bu takviyede eşdeğer gerilme 1300 MPa bulunmuştur. Oluşan bu yüksek gerilmeleri gidermek için destek takviyelerin yapılması gerekir.



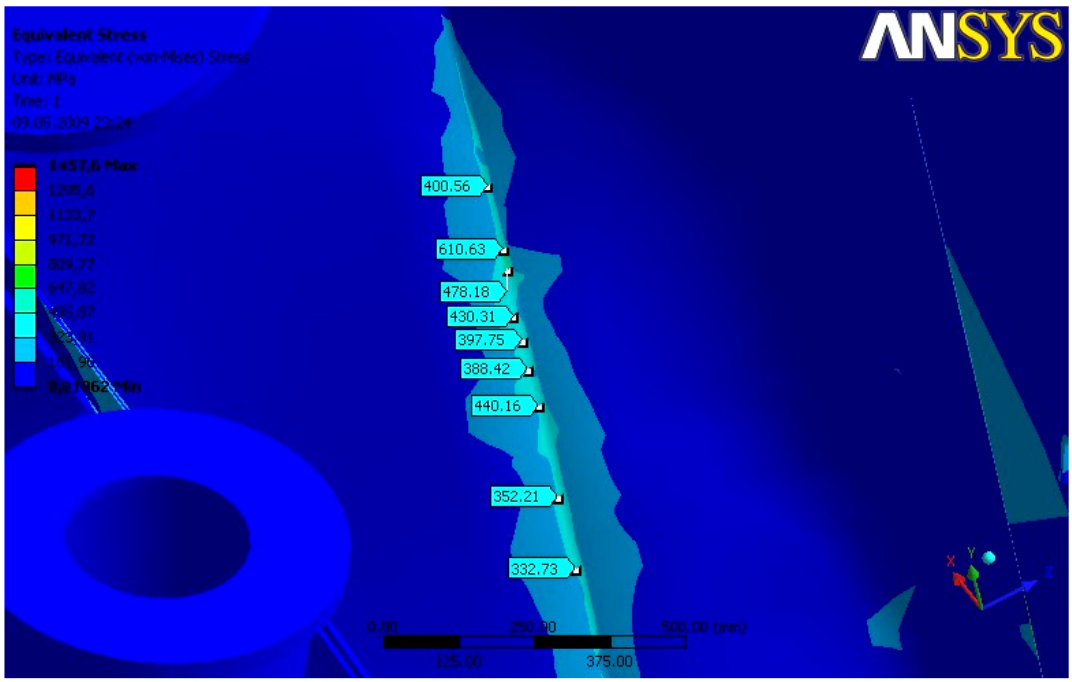

Şekil 5.36., Alternatif 4 tasarımında taban takviyesindeki gerilme dağılımı

Kapak altındaki takviyede oluşan eşdeğer gerilme şekil 5.37'de gösterilmiştir. Takviyede oluşan eşdeğer gerilme dağılımı 855 MPa'a kadar çıkmıştır. Takviyede oluşan eşdeğer gerilme uç kısımlarına doğru gidildikçe artmıştır. Parçada bulana delik o kısımlardaki mukavemeti azaltmıştır. Alternatif 1 tasarıma göre bu takviyedeki eşdeğer gerilme değeri 75 MPa azalmıştır. Bu takviyede oluşan eşdeğer gerilme malzemenin çekme dayanımı üstünde olduğundan yetersiz kabul edilmiştir.




Şekil 5.37., Alternatif 4 tasarımda kapak altındaki takviyede gerilme dağılımı

Şalter tarafındaki yan duvarda bükülmüş kısımda oluşan eşdeğer gerilme 1646 MPa civarına kadar çıkmıştır. Duvar sac kalınlığı 10 mm'ye çıkartıldığında oluşan eşdeğer gerilme şekil 5.38'de görüldüğü gibi 610 MPa'dır. Duvar kalınlığın arttırılması ile bu bölgedeki gerilme önemli miktarda azalmıştır. Kritik bölgedeki gerilmenin azalması ile istenilen değere ulaşmamıştır.



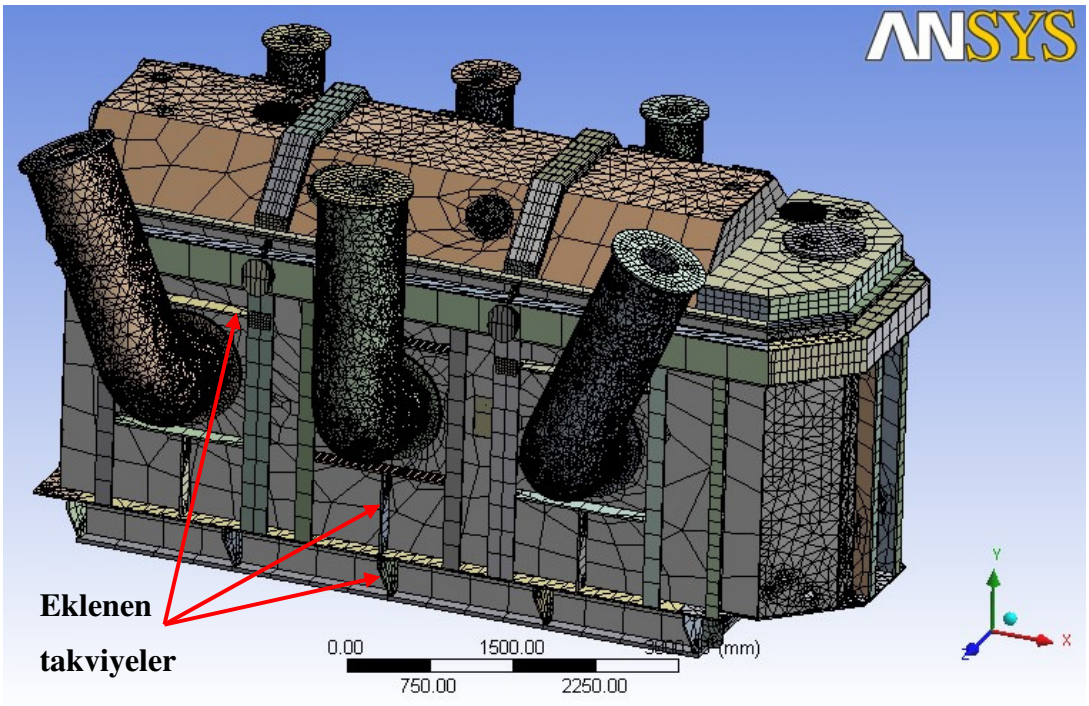

Şekil 5.38., Alternatif 4 tasarımda yan duvarda oluşan gerilme dağılımı

Bu tasarımdaki kazan duvar sac kalınlıkları 10 mm'ye çıkartılarak yapılan sonlu elemanlar analiz sonucunda önemli derecede iyileşme oluştuğu görülmüştür. Çıkan sonuçlar malzemenin çekme dayanımı ütünde olduğu için kazan duvarlarına ilave destek takviyeler yapılması gerekmektedir. YG dom tutucularında oluşan gerilme fazla olduğundan tutucuların iyileştirilmesi gerekir.

## 5.5 Beşinci Alternatif Kazan Tasarımı

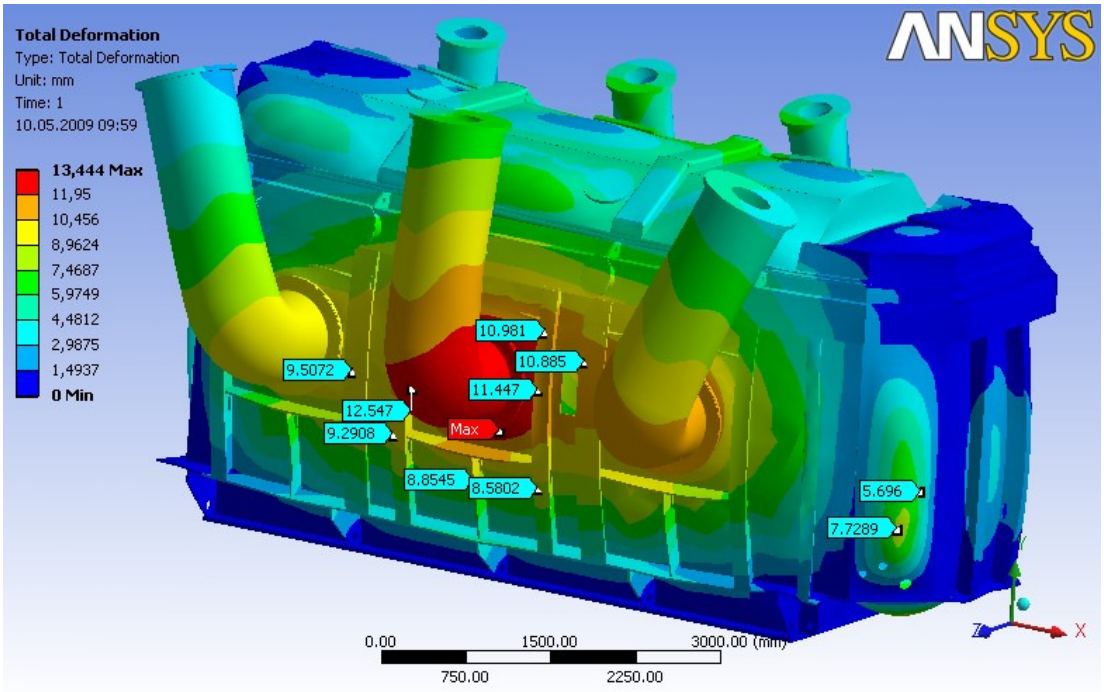
Bu tasarımda bir önceki kazan tasarımda oluşan etkileri gidermek için takviyeler arttırılmıştır. Kazan duvarlarında takviye artışı ile ANSYS Workbench yardımıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Takviye artışı ile toplam parça sayısı 223'e çıkmıştır. Alternatif 4 kazan tasarımına göre 8 tane takviye ilave edilmiştir. Takviye ilavesi sonucunda kazan yapısının ağırlığı 23895 kg'a çıkmıştır.

Şekil 5.39'de ANSYS'te oluşan kazan kafes yapısı gösterilmiştir. Bu yapı toplam 296248 düğümden ve 106387 elamandan oluşmuştur. Takviyelerin artması ile birlikte düğüm ve eleman sayısını da artmıştır.



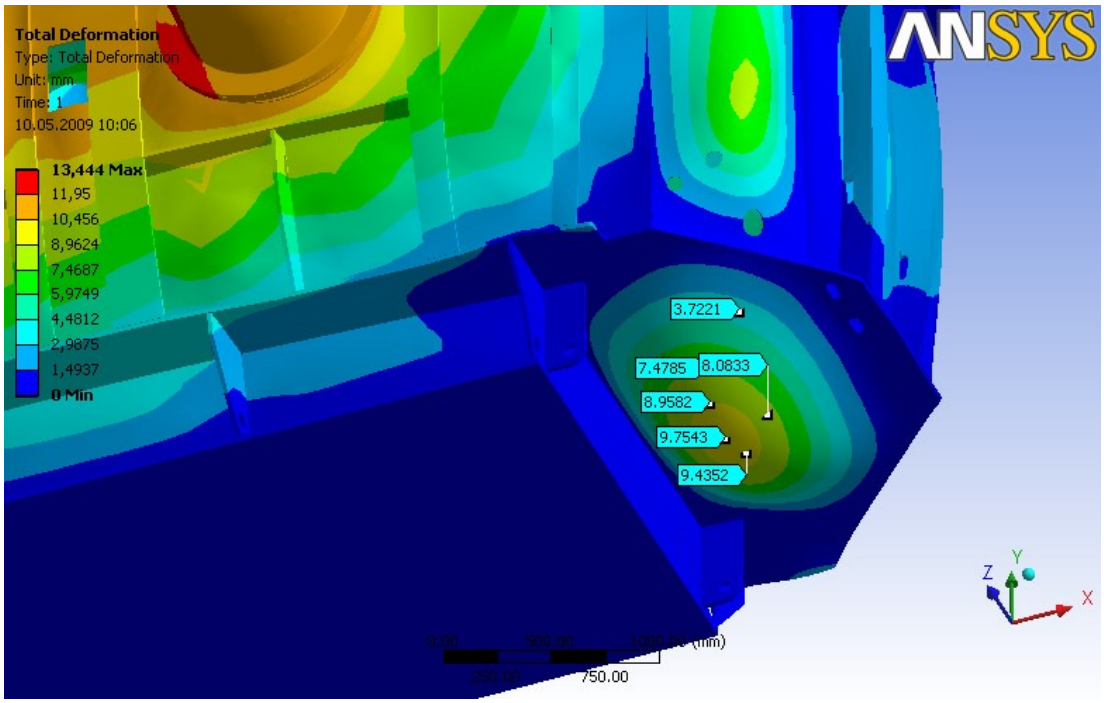

Şekil 5.39., Alternatif 5 kazan tasarımında kafes yapısı

Kazanın YG duvarından çıkan domların alt bölgesine şekil 5.40'da görüldüğü gibi birer adet takviye ilavesi yapılmıştır. Bu durumda oluşan maksimum 13,4 mm'dir. Duvarın orta kısımdaki dom üzerinde maksimum sehim oluşmuştur. Domların alt kısmına konulan takviyeler sehimi 14,4 mm'den 8,8 mm'ye kadar düşürmüştür. Buralara konulan takviye kalınlıkları 20 mm'dir.



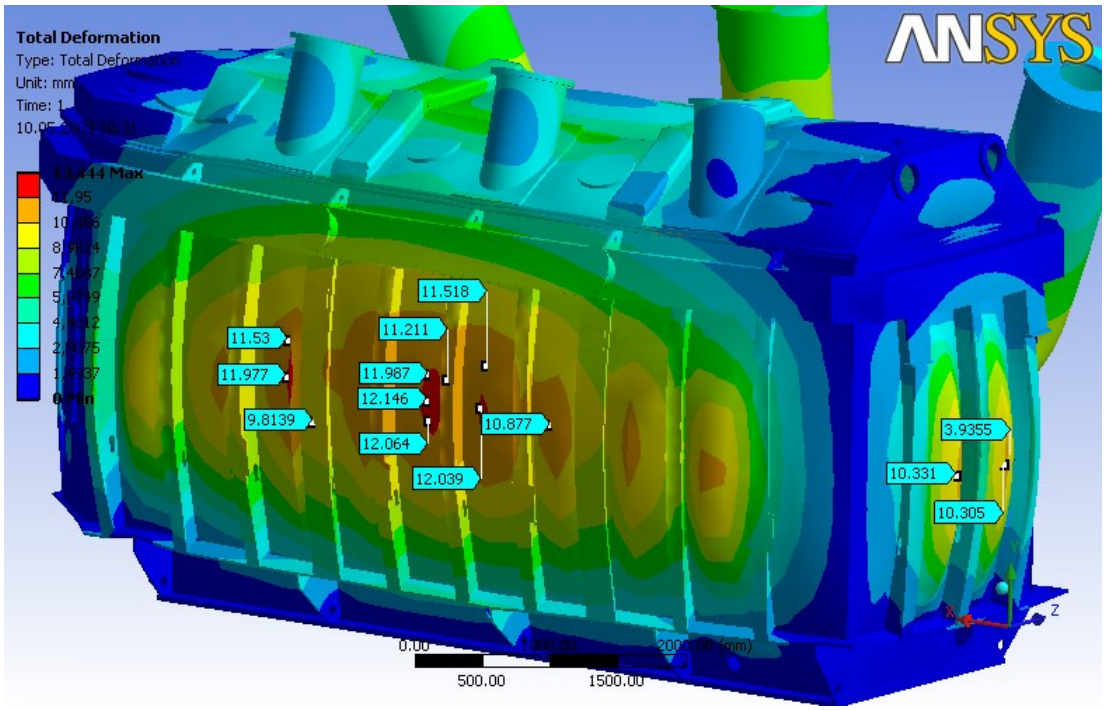

Şekil 5.40., Alternatif 5 kazan tasarımında toplam sehim

Şalterin olduğu taraftaki yan duvarın alt tabanda şekil 5.41'de görüldüğü gibi sehim oluşmuştur. Tabanın orta kısmına gidildikçe sehim 8.95 mm'ye kadar çıkmıştır. Taban sac kalınlığı 20 mm'dir.



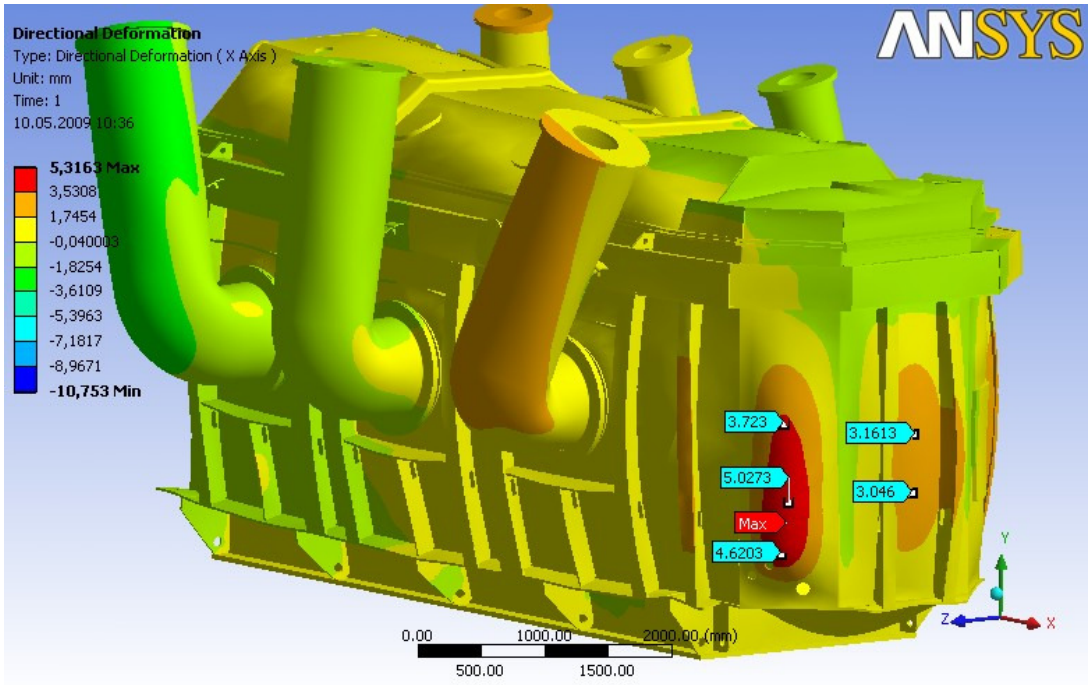

Şekil 5.41., Alternatif 5 kazan tasarımında şalter alt kısımda oluşan sehim

Şekil 5.42'de görüldüğü gibi kazanın AG (Alçak gerilim) duvarında sehim 12,15 mm'ye kadar çıkmıştır. Yan duvarda iki takviye arasında da 10,3 mm'lik sehim oluşmuştur. Zayıf olan bölgelerin takviye ile desteklenmesi gerekir.



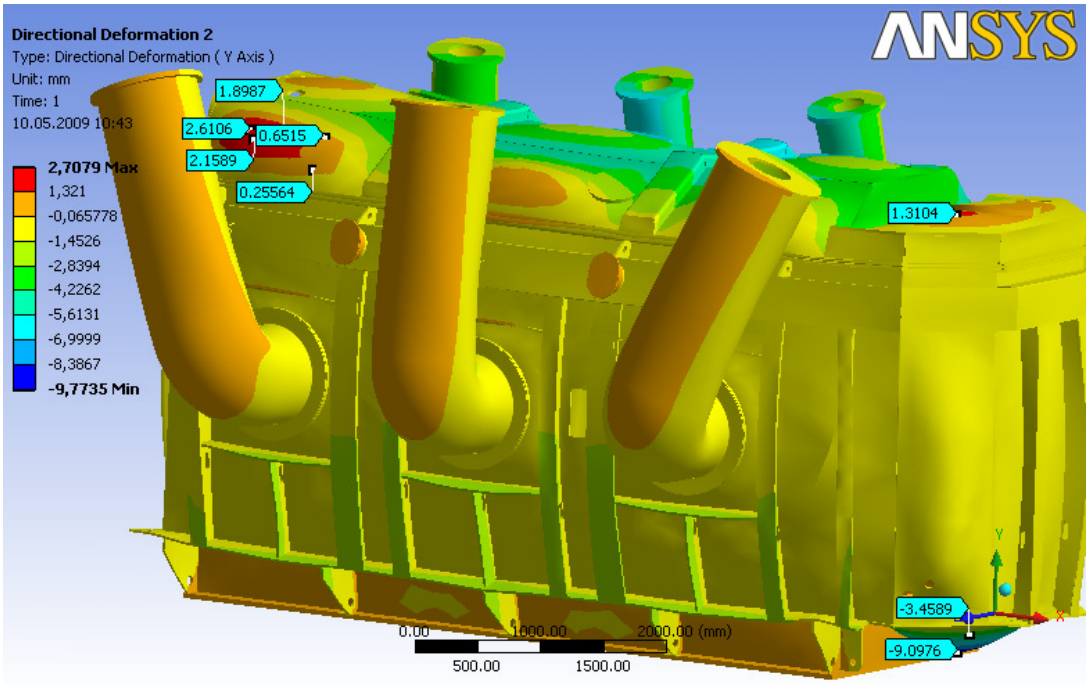

Şekil 5.42., Alternatif 5 kazan tasarımında AG duvarında oluşan sehim

X-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.43'te görüldüğü bölgede ve maksimum 5,3 mm oluşmuştur. Bu sehim normal olarak kabul edilmiştir.



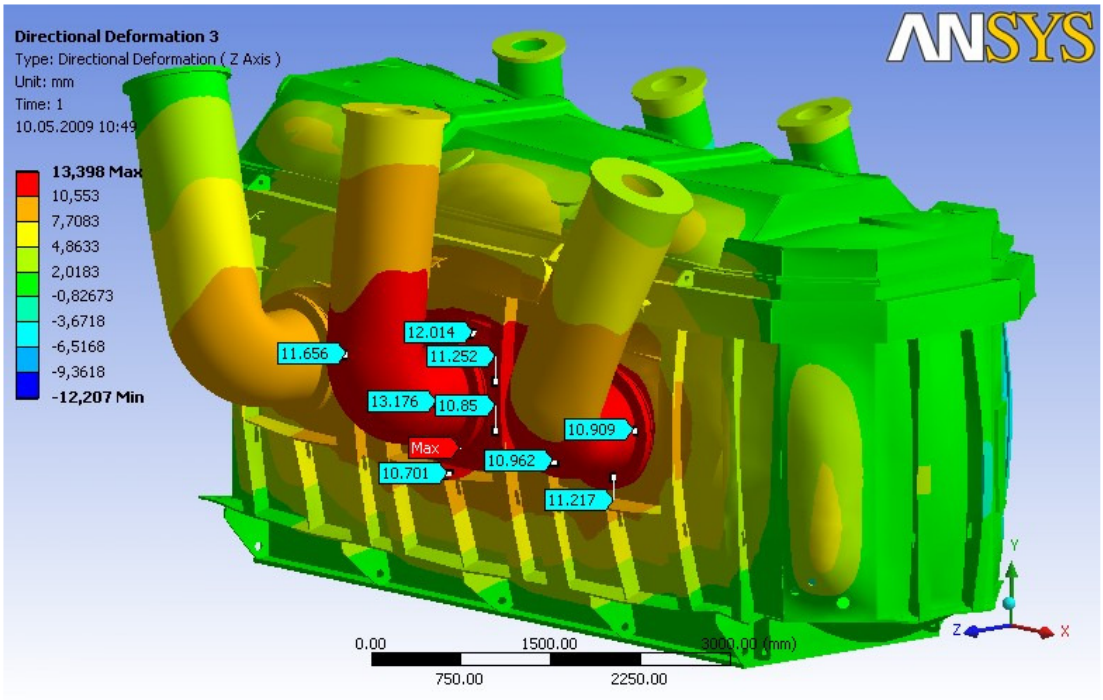

Şekil 5.43., Alternatif 5 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönünde oluşan sehim Şekil 5.44'te görüldüğü gibi kapağı üstünde ve alt tabanda oluşmuştur ve maksimum 9,7 mm'dir.



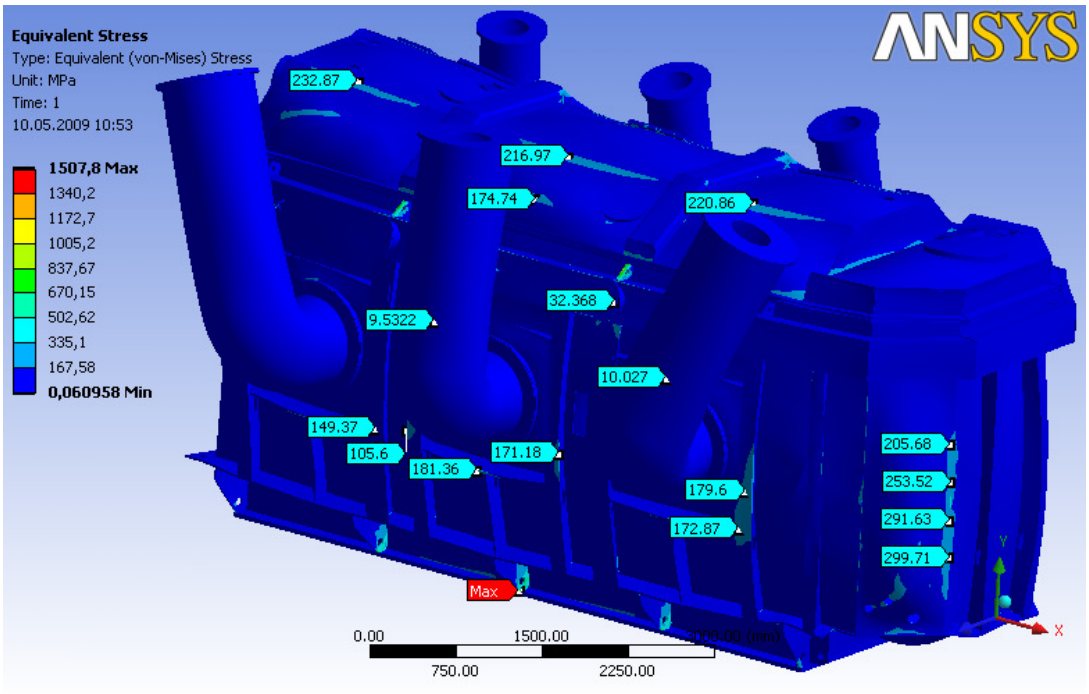

Şekil 5.44., Alternatif 5 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim

Z-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.45'te görüldüğü gibi domların çıktığı (YG duvarı) ve AG tarafında oluşmuştur. YG duvarındaki sehim 13,4 mm'ye ve AG duvarındaki sehim de 12,2 mm'ye kadar çıkmıştır.



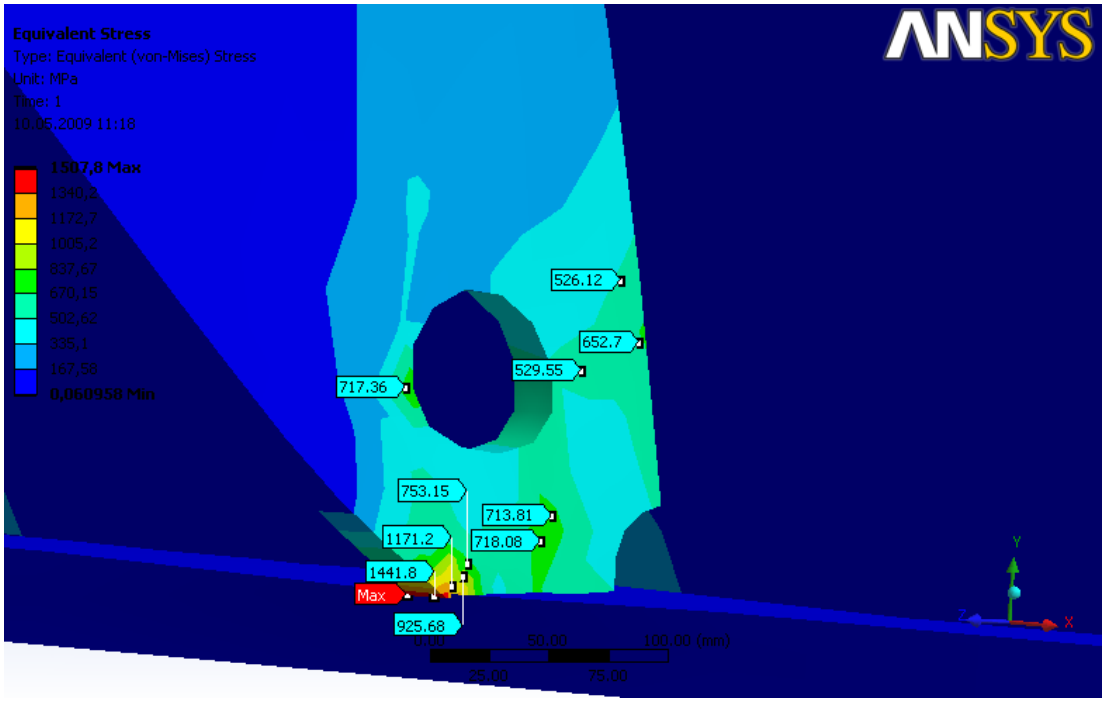

Şekil 5.45., Alternatif 5 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim

Taban ile alt bölme arasındaki kısa takviyelere her iki tarafa (YG ve AG duvarlarına) birer adet daha ilave edilmiştir. Şekil 5.46'da lineer statik analiz sonucunda oluşan eşdeğer gerilme verilmiştir. Analiz sonucunda oluşan maksimum eşdeğer gerilme takviyelerde ve 1507 MPa'dır. Takviye ilave edilmemiş kazanda (Alternatif 4 kazan tasarımı) oluşan gerilme ise 1457 MPa'dır ve buradaki gerilmeden düşüktür. Eşdeğer gerilmenin artması ile takviye üzerinde oluşmasının nedeni dom ağırlığı ve orta kısımda olmasıdır. Kazan duvarının üst kısmında domu tutan tutucalar yetersiz olmalarından dolayı dom ağırlığı taban takviye üzerine binmiştir. Tabanda kenar takviyelere doğru gidildikçe oralara uygulanan yük azaldığından takviye üzerindeki gerilme de azalmıştır.



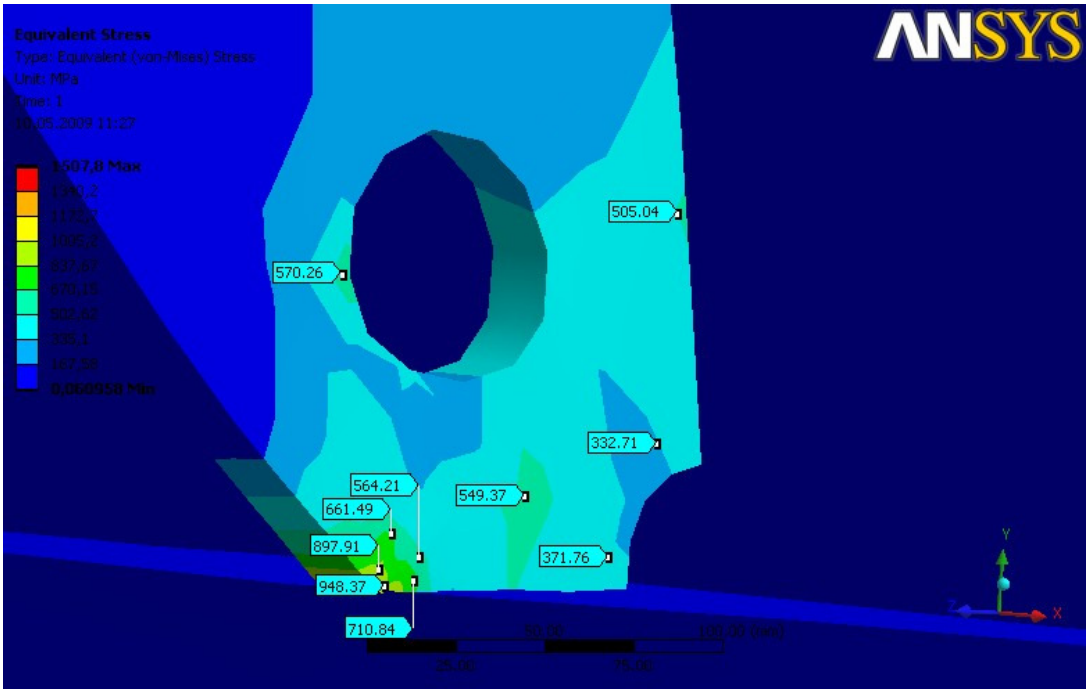

Şekil 5.46., Alternatif 5 kazan tasarımında eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 5.47'de taban takviyesinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Kazanın taban takviyesinde oluşan gerilme uç kısımda 1508 MPa'a kadar çıkarak artmıştır. Uç kısımlarda tekil gerilme oluştuğundan bu bölgeye en yakın olan bölgedeki gerilme dikkate alınmıştır. Bu kabul ile bu takviyede oluşan maksimum eşdeğer gerilme 925 MPa'dır.




Şekil 5.47., Alternatif 5 tasarımda taban takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı

Kazanın tabanın kenar kısımlarındaki takviyedeki eşdeğer gerilme dağılımı şekil 5.48'de gösterildiği gibidir. Takviyenin uç kısımlarında gerilme artmıştır. Tekil gerilmeden dolayı yakın bölgedeki gerilme dikkate alındığından 710 MPa'dır.



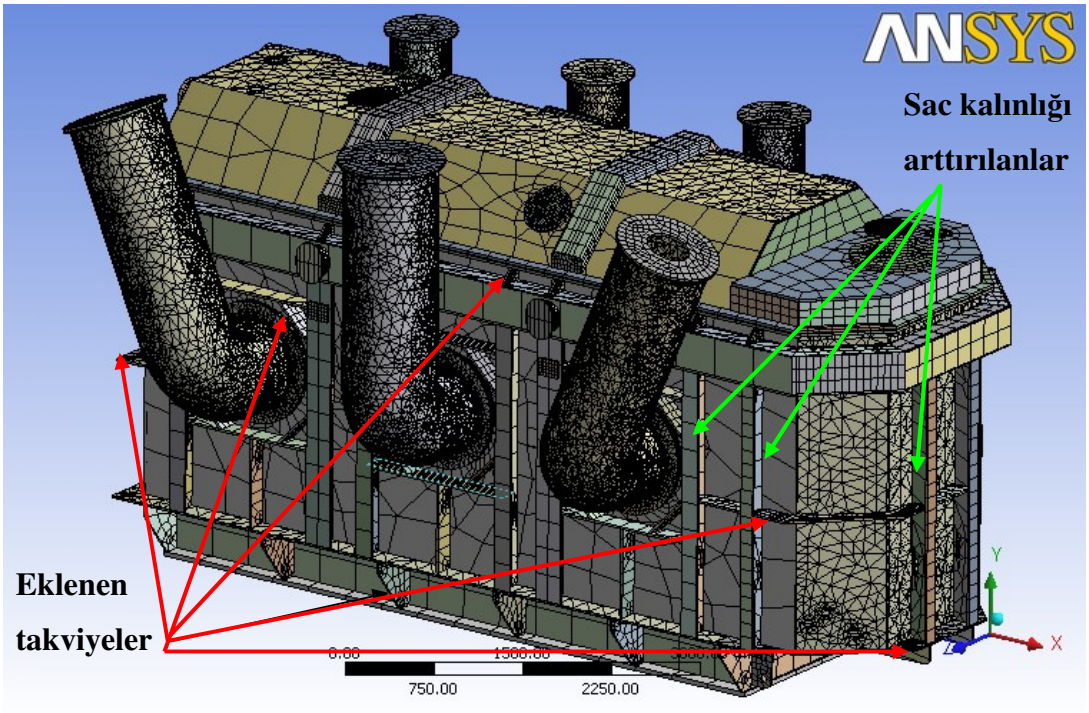

Şekil 5.48., Alternatif 5 tasarımda tabanın kenar takviyesindeki gerilme dağılımı

Kazan üzerinde yapılan bu takviye artışları ile sonlu elemanlar analizi sonucunda sehim ve eşdeğer gerilme malzemenin çekme dayanımı üstünde olduğundan yetersiz görülmüştür. Bu nedenle bu tasarımda kazan üzerine yapılan takviye ilaveleri yetersiz gelmiştir. Kritik görülen kısımlara ekstra ilaveler yapılması gerekir.

## 5.6 Altıncı Alternatif Kazan Tasarımı

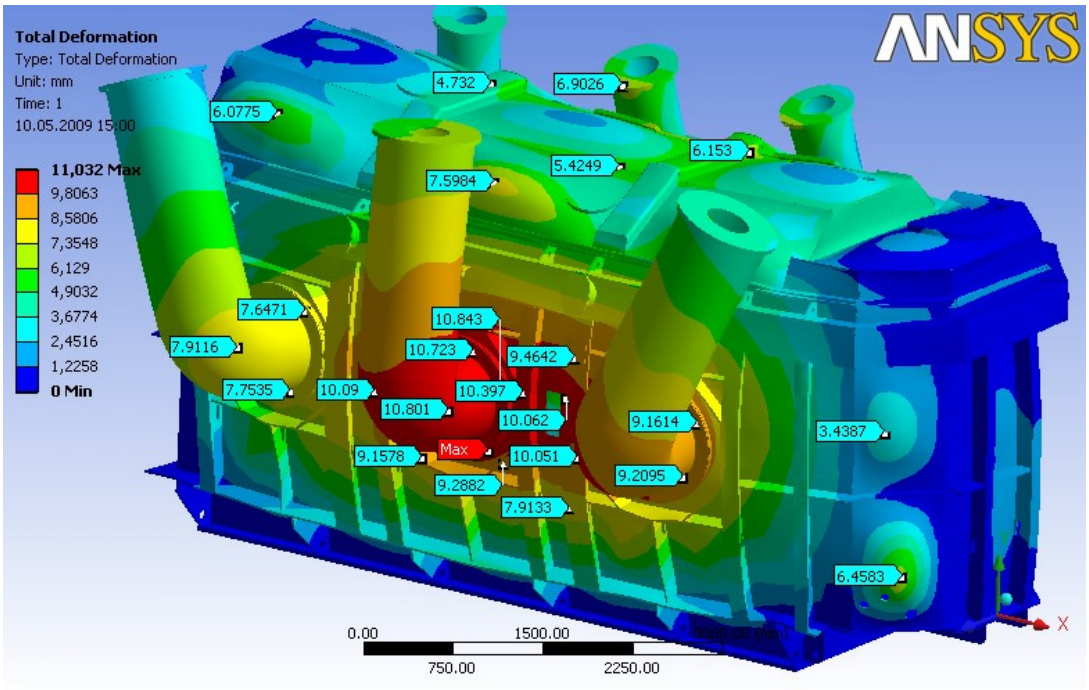
Bir önceki tasarımında kazan duvarlarında yapılan 8 adet takviye ilavesi yetersiz gelmiştir. Bu nedenle bu tasarımda takviye sayısı arttırılmıştır. Takviye ilavesi ile birlikte T-takviye sac kalınlıkları 16 mm'den 20 mm'ye çıkarılmıştır. Yapılan ilaveler sonucunda kazan yapısı toplam 263 tane parçadan oluşmuştur. Kazan modeline yapılan 48 tane takviye ilavesi ile birlikte takviye kalınlıkları artışı yapıldığında toplam ağırlığa 1144 kg ilave edilerek 24810 kg'a çıkarılmıştır.

Şekil 5.49'da takviye ilavesi ve kalınlıkların arttırılması oluşan kazan kafes yapısı verilmiştir. Analiz sonucundaki kafes yapısı toplam 307581 düğümden ve 107975 elamandan oluşmuştur. Bu tasarımda takviyelerin arttırılması ile birlikte düğüm ve eleman sayısı da artmıştır. Kazan tabanı ile kapak alt kısmımın her iki tarafına takviye ilavesi yapılmıştır.



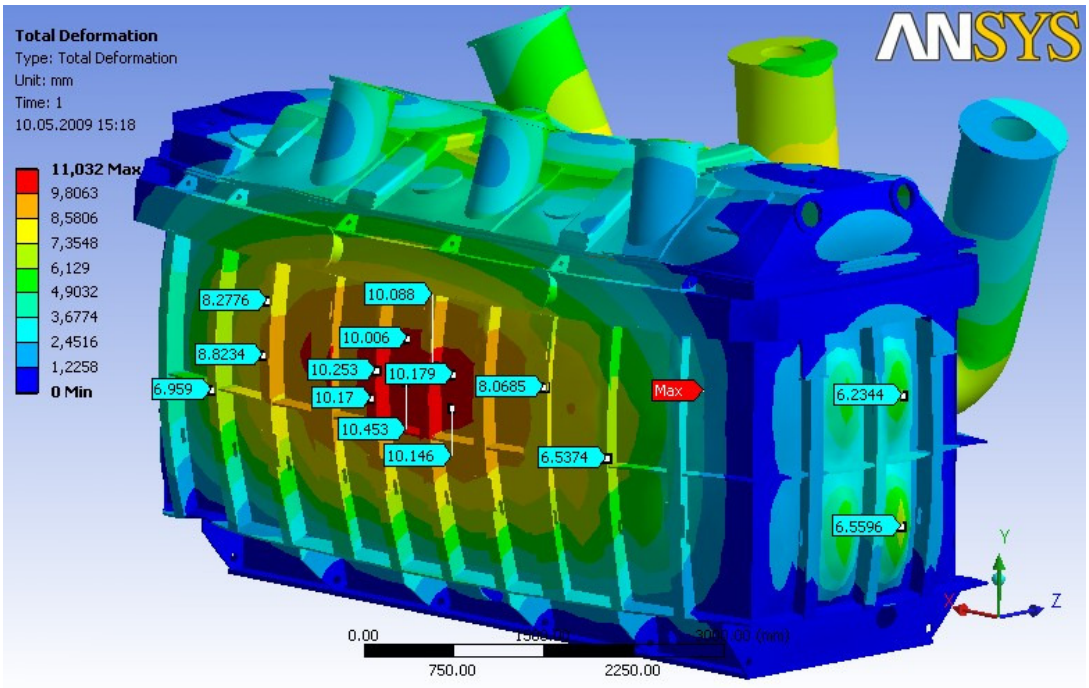

Şekil 5.49., Alternatif 6 kazan tasarımında kazan kafes yapısı

Altıncı tasarımda kazan duvarlarına yapılan 20 mm'lik takviye ilavesi ile oluşan sehimler şekil 5.50'de gösterilmiştir. Bir önceki çalışmada sehim değerinin fazla olduğu kısımlara takviyeler konulmuştur. Yapılan destekler sonucunda maksimum sehim 11 mm'ye kadar düşmüştür, oluştuğu bölge de ortadaki domda oluşmuştur. Dom çıkışlarına kenarlarına dört kenarına çapraz konulan 20 mm kalınlığındaki takviyeler sehimi azaltmıştır, fakat bu takviyeler de yeterli görülmemiştir. Şalter tarafındaki yan duvara konulan takviyeler bu bölgenin mukavemetini arttırmıştır. Kapak üzerinde oluşan sehim 7,6 mm'ye kadar çıkmıştır. kapak sac kalınlığı 16 mm olduğundan mukavemetini arttırmak için kalınlığın artması gerekir.



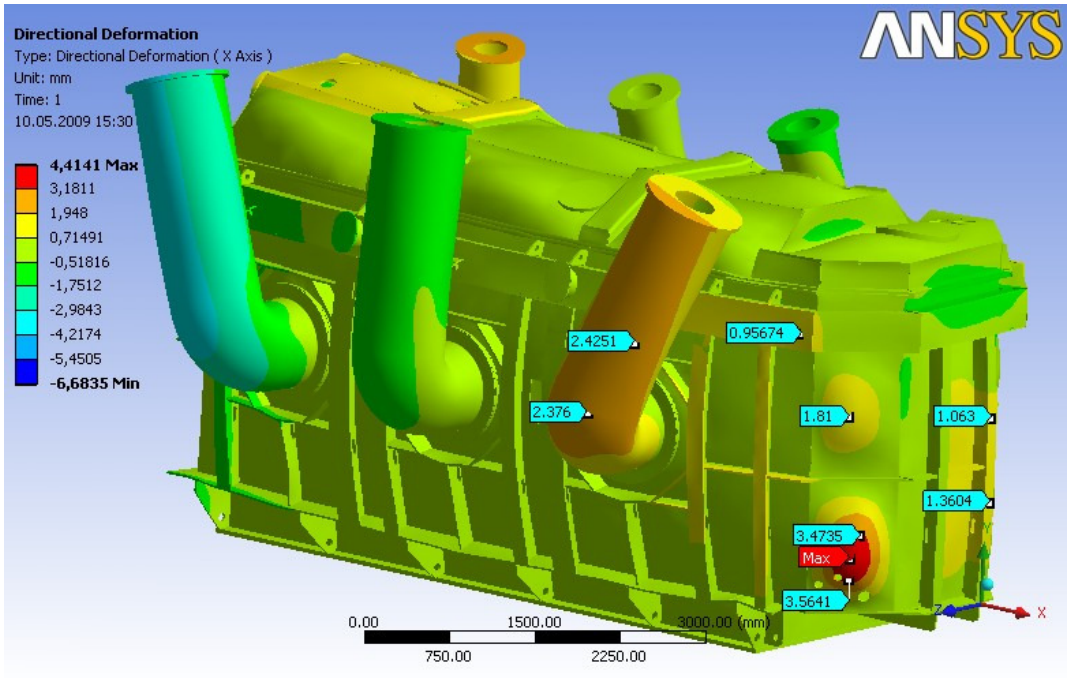

Şekil 5.50., Alternatif 6 kazan tasarımında toplam sehim

AG duvarındaki düşey takviyeler arasına 20 mm kalınlığında yatay takviyeler ile şekil 5.51'de görüldüğü gibi desteklenmiştir. Duvarda oluşan sehim 10 mm'ye kadar çıkmıştır. Bu kısımlara konulan takviyeler de yetersiz kabul edilmiştir.



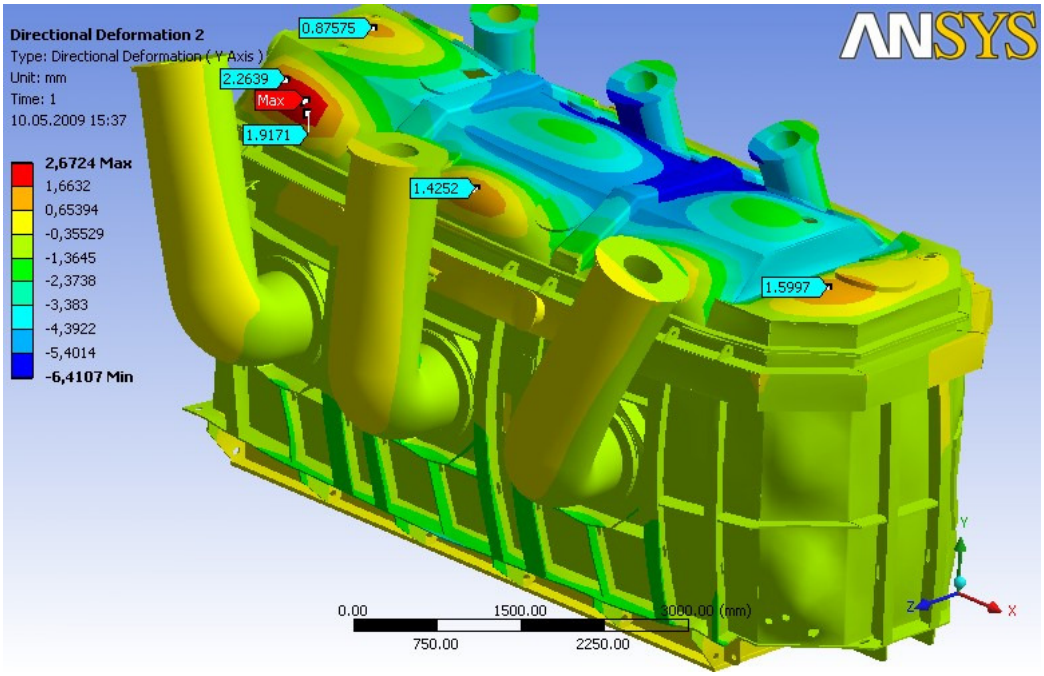

Şekil 5.51., Alternatif 6 kazan tasarımında AG duvarındaki sehim

X-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.52'de görüldüğü gibi miktarı 4,4 mm'dir. Bu bölgede oluşan bu sehim 10 mm'den düşük olduğu için emniyetli kabul edilmiştir.



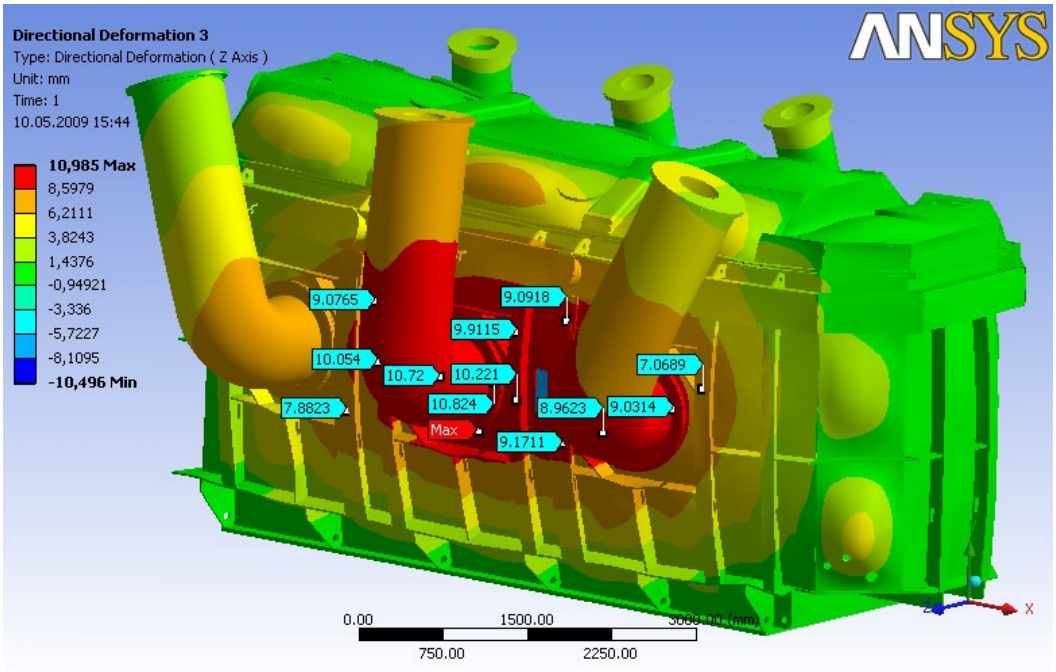

Şekil 5.52., Alternatif 6 kazan tasarımında X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönündeki oluşan sehim şekil 5.53'de görüldüğü gibi 2,7 mm'dir. Maksimum sehim kapak üzerinde ve arka kısımda oluşmuş ve emniyetli kabul edilmiştir.



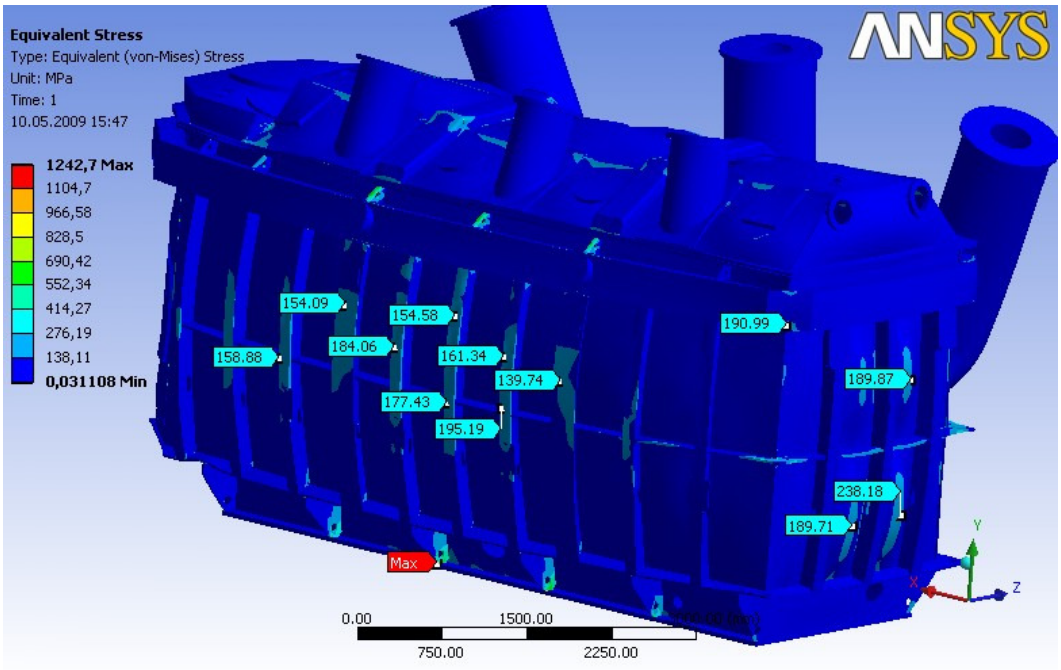

Şekil 5.53., Alternatif 6 kazan tasarımında Y-ekseni yönündeki sehim

Z-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.54'de görüldüğü gibi 2,7 mm'dir. Bu tasarımda kazanda oluşan en büyük sehim Z-ekseni yönünde oluşmuştur.



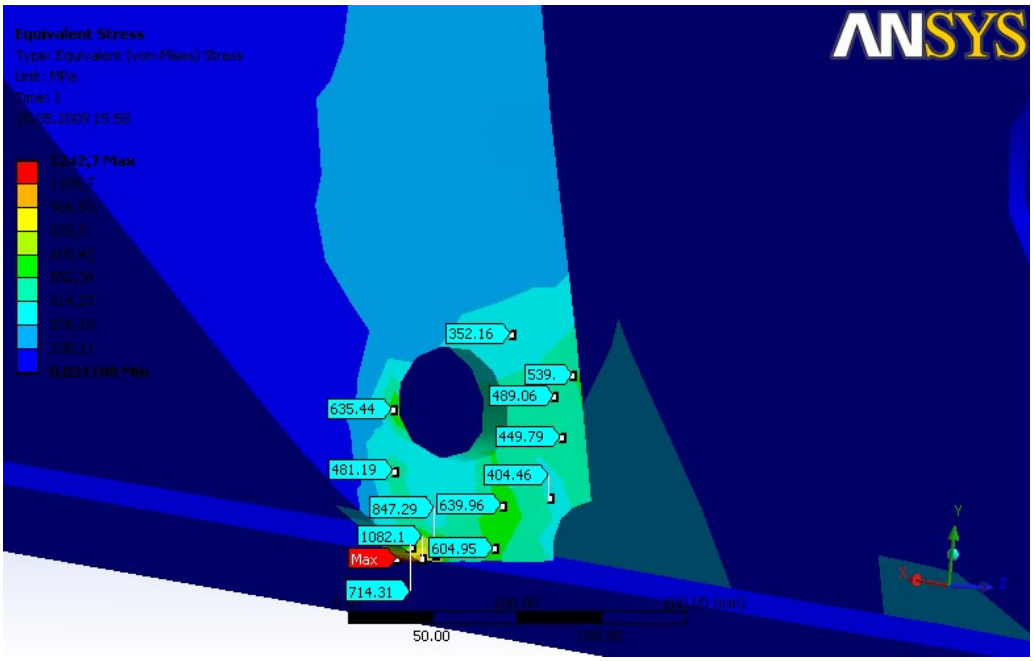

Şekil 5.54., Alternatif 6 kazan tasarımında Z-ekseni yönündeki sehim

Bu kazanda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı şekil 5.55'de görüldüğü gibi maksimum değeri 1243 MPa ve tabandaki takviyelerde oluşmuştur. Tabandaki takviyelere bir tane daha ilave edilmesi ile bu bölgede oluşan gerilmeyi azaltmıştır, fakat yeterli gelmemiştir.



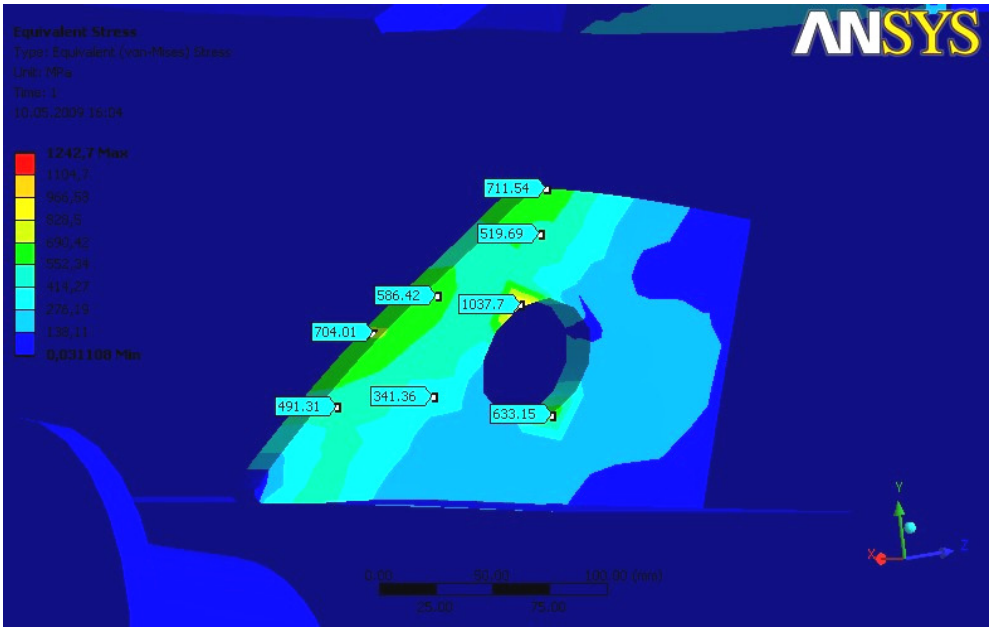

Şekil 5.55., Alternatif 6 tasarımda kazandaki eşdeğer gerilme dağılımı

Şekil 5.56'da kazan tabanı ile alt bölme arasındaki takviyede oluşan eşdeğer gerilme dağılımı gösterilmiştir. Takviyede maksimum eşdeğer gerilme uç kısımlarda oluşmuştur. Uç kısımlarda tekil gerilme oluştuğundan bu bölgeye yakın yerdeki gerilme kabul edilmiş ve 847 MPa'dır.




Şekil 5.56., Alternatif 6 tasarımında kazan taban takviyesindeki gerilme dağılımı

Kazan kapağı ile kuşak arasındaki takviyede oluşan eşdeğer gerilme de şekil 5.57'de gösterilmiştir. Delik ve kenarlarında tekil gerilme oluşmuştur. Bu nedenle bu takviyede maksimum gerilme 520 MPa'dır.



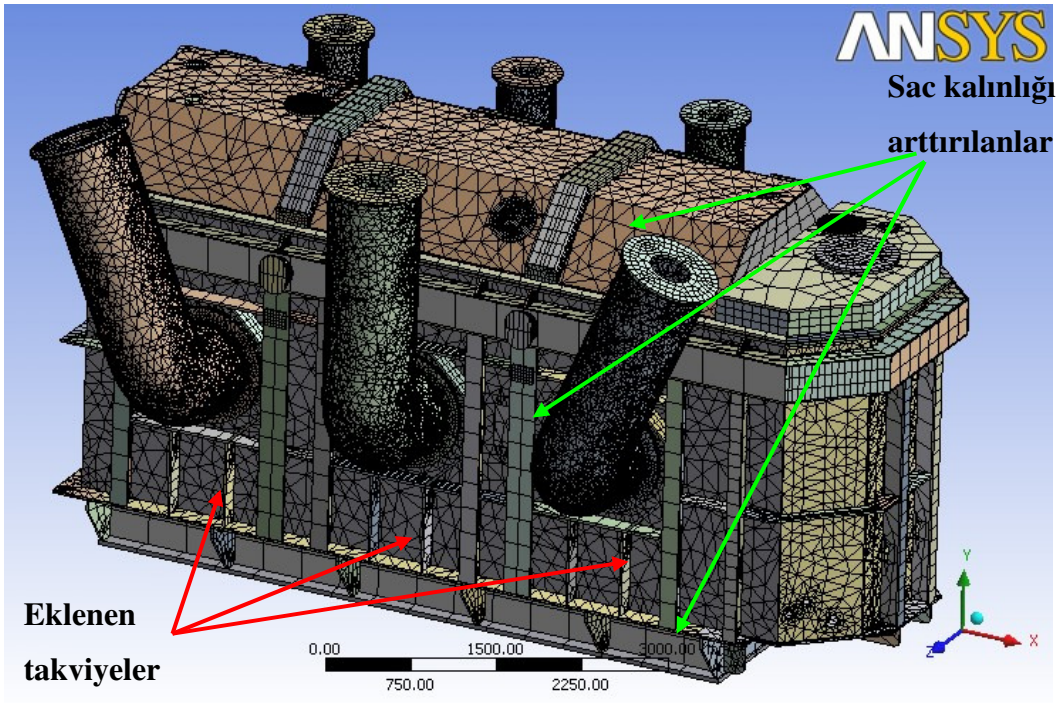

Şekil 5.57., Alternatif 6 tasarımda kapak takviyesindeki gerilme dağılımı

Bu tasarımda kazana yapılan 48 tane takviye ilavesi ve takviye kalınlık artışı ile sonlu elemanlar analiz sonuçları malzemenin çekme dayanımı üstüne çıkmıştır. Bu değerleri daha da minimize etmek için ilave edilen bazı takviyelerin kalınlıkları artırılması ve takviye ilave edilmesi gerekir.

## 5.7 Yedinci Alternatif Kazan Tasarımı

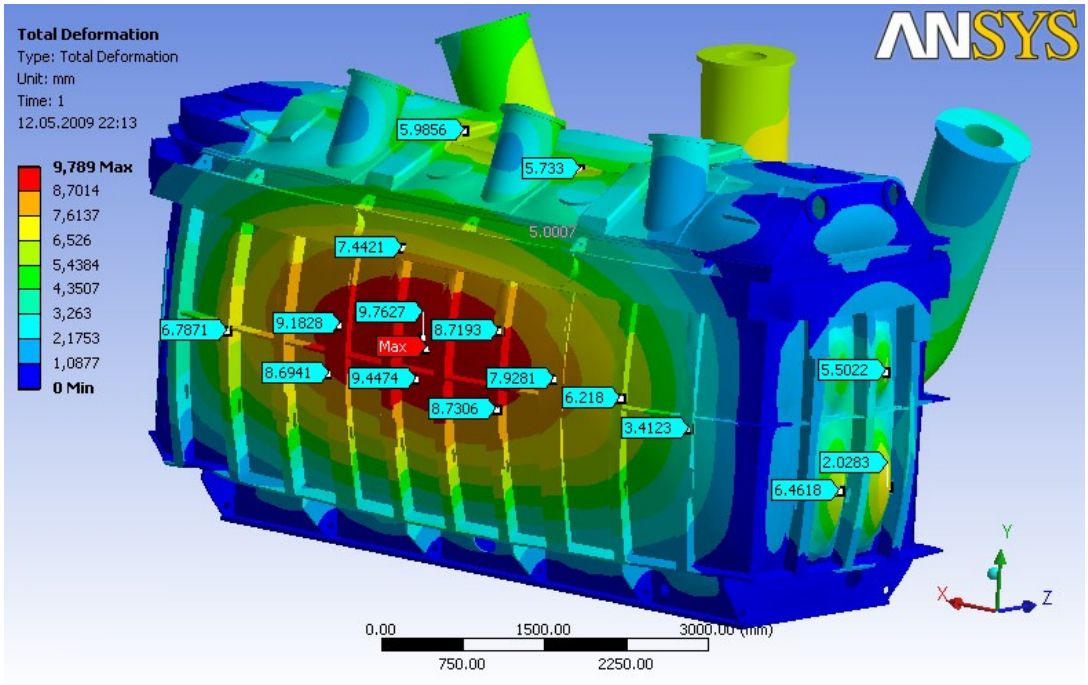
Bir önceki kazan tasarımında yapılan 48 tane takviye ilavesi ve takviye kalınlık artışları ile istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Bu tasarımda bir öncekine ilave olarak kaldırma boynuzların altında bulunan takviyelerin kalınlıkları 20 mm'den 25 mm'ye çıkartılmıştır. Kazan kapağında açılı duran kısımlardaki sac kalınlıkları 16 mm'den 20 mm'ye, kazanın alt bölme bulunan sacın kalınlığı da 20 mm'den 25 mm'ye çıkartılmıştır. Bu tasarımda bir önceki ilave olarak yapılan bu değişiklikler ile kazan yapısına 53 tane parça ilave edilerek parça sayısı 268 çıkmıştır. Kazan modelinin toplam ağırlığı da 25832 kg olmuştur.

Yedinci tasarımında kazanın kafes yapısı şekil 5.58'de gösterilmiştir. Kazan yapısı toplam 334872 düğümden ve 121806 elemandan oluşmuştur. Takviye ve kalınlık artışı ile birlikte düğüm ve elaman sayısı da artmıştır.



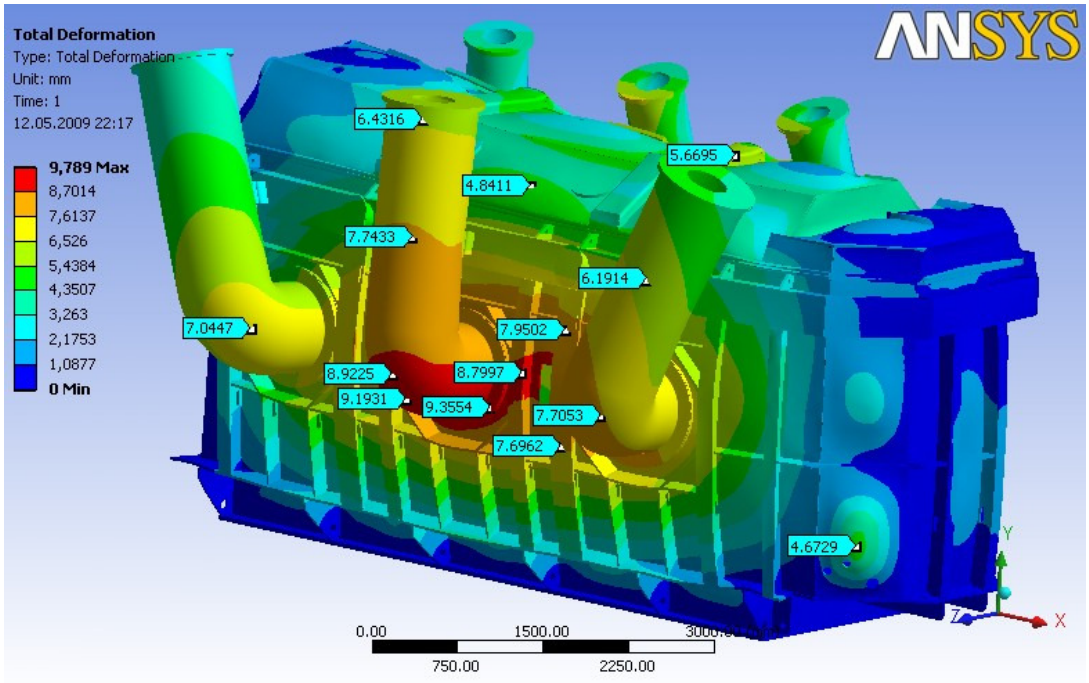

Şekil 5.58., Alternatif 7 tasarımda kazanın kafes yapısı

Kazanın AG tarafındaki duvarda oluşan sehim şekil 5.59'da görüldüğü gibi maksimum 9,8 mm'dir. Duvarın orta kısımlarına doğru gidildikçe sehim artmıştır.



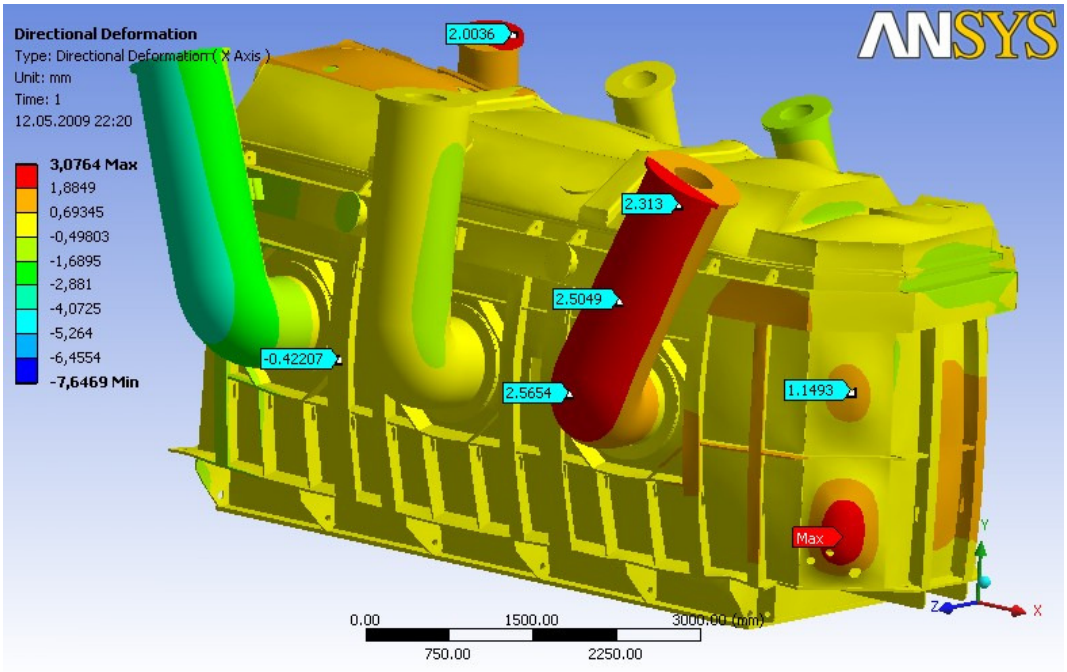

Şekil 5.59., Alternatif 7 tasarımında kazanın AG duvarında oluşan sehim

Şekil 5.60'da kazanın YG duvarında oluşan sehim gösterilmiştir. Yapıdaki maksimum sehim bu duvar üzerinde oluşmamıştır. Bu duvardaki sehim 9,4 mm'ye kadar çıkmıştır.



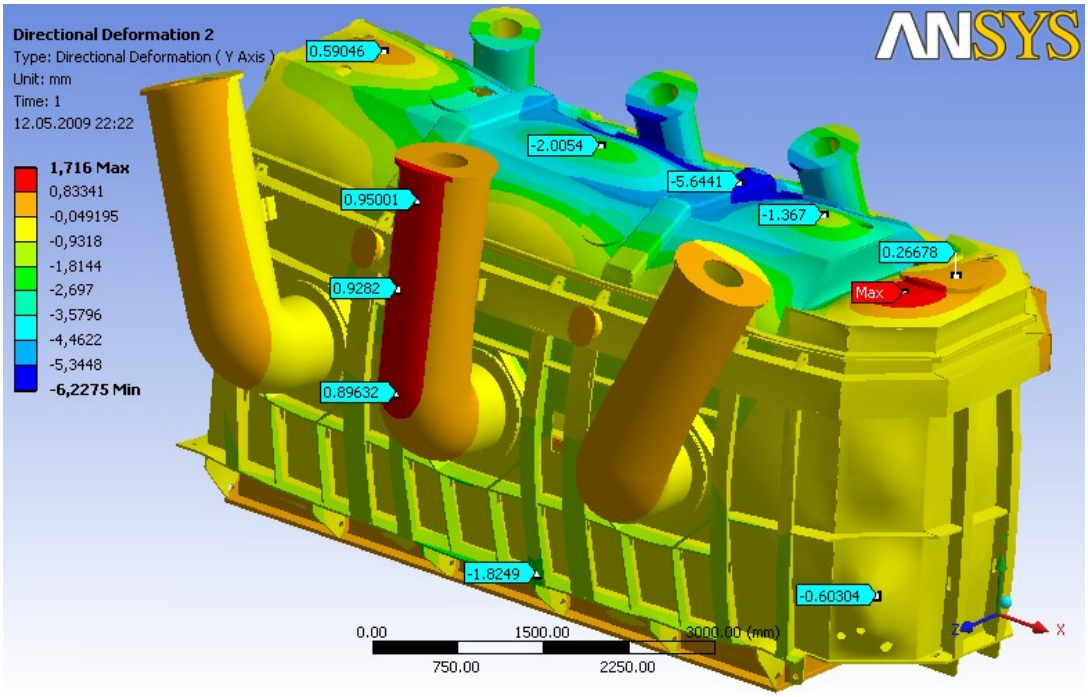

Şekil 5.60., Alternatif 7 tasarımında kazanın YG duvarında oluşan sehim

X-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.61'de görüldüğü gibi maksimum 3,1 mm'dir. Şalter tarafındaki duvarda ve YG domunda oluşmuştur.



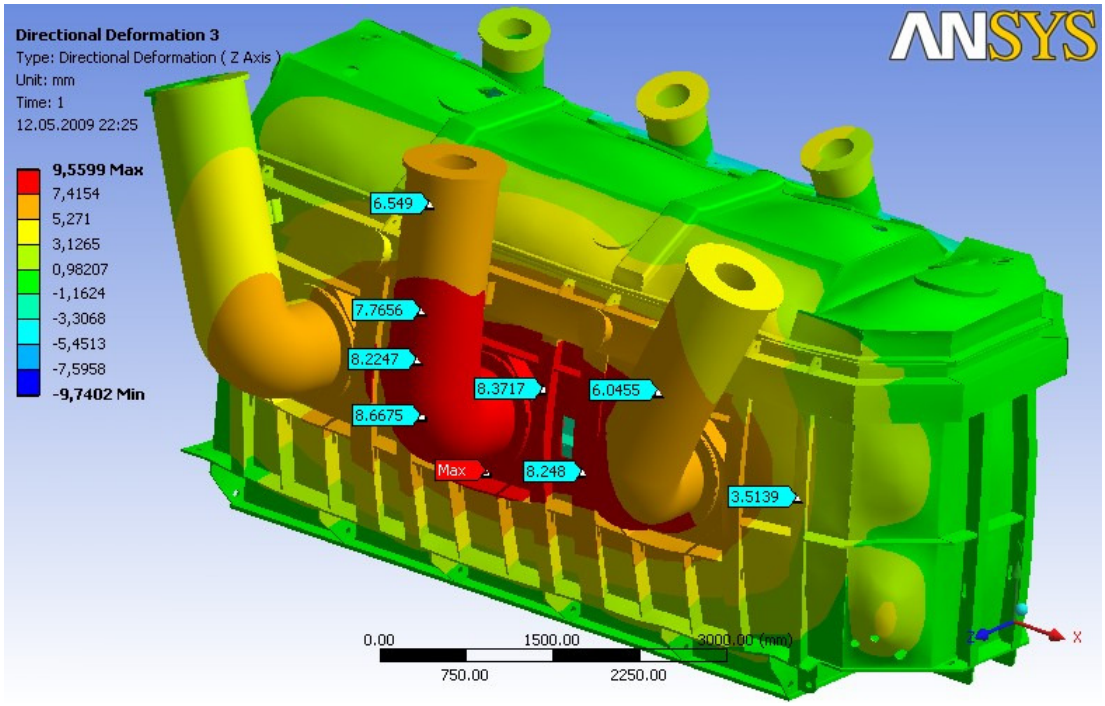

Şekil 5.61., Alternatif 7 tasarımında kazanın X-ekseni yönünde oluşan sehim

Y-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.62'de görüldüğü gibi maksimum 1,7 mm'ye kadar çıkmıştır. Bulunan bu sehim oldukça düşüktür.

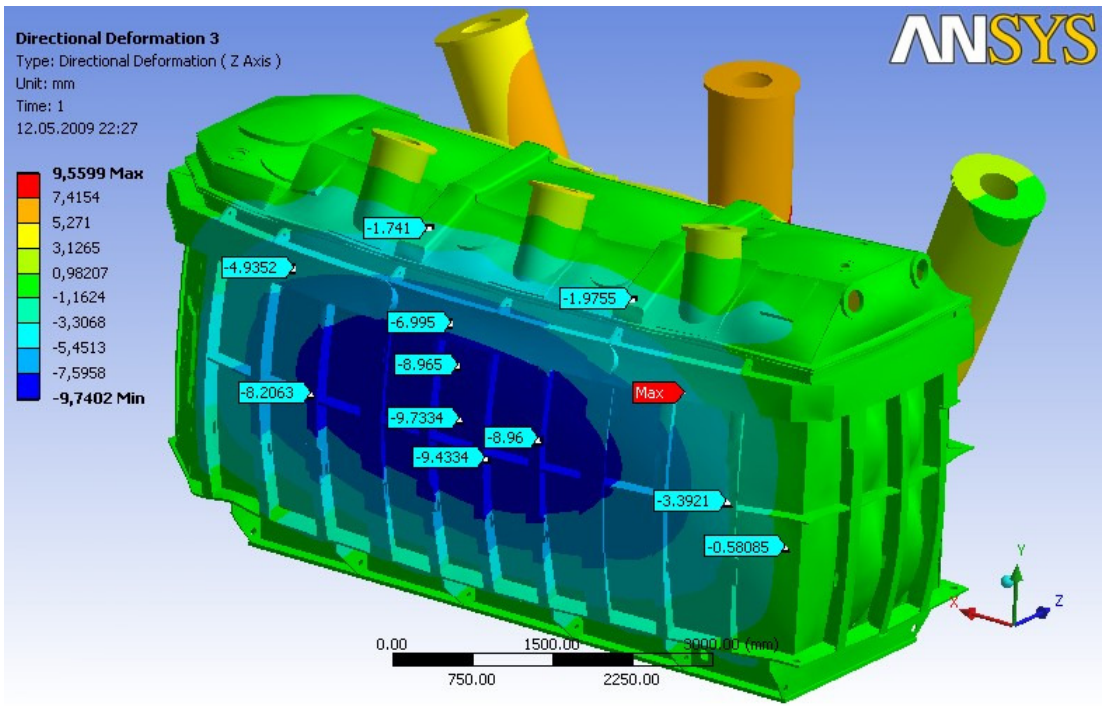



Şekil 5.62., Alternatif 7 tasarımda kazanın Y-ekseni yönünde oluşan sehim

Z-ekseni yönünde YG duvarında oluşan sehim 9,6 mm ve şekil 5.63'de görülen yerde oluşmuştur. AG tarafında oluşan sehim de 9,77 mm'ye kadar çıkmıştır (Şekil 5.64). Kazanda oluşan sehim en büyük kısmı Z-ekseni yönünde gerçekleşmiştir.

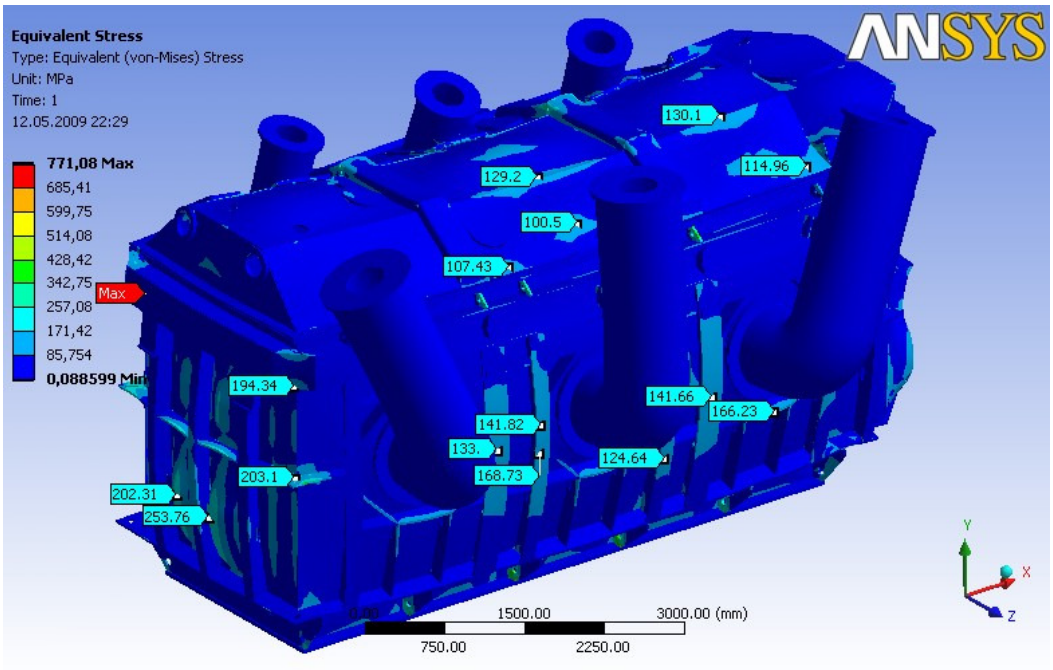



Şekil 5.63., Alternatif 7 tasarımda kazanın Z-ekseni yönünde YG duvarındaki sehim



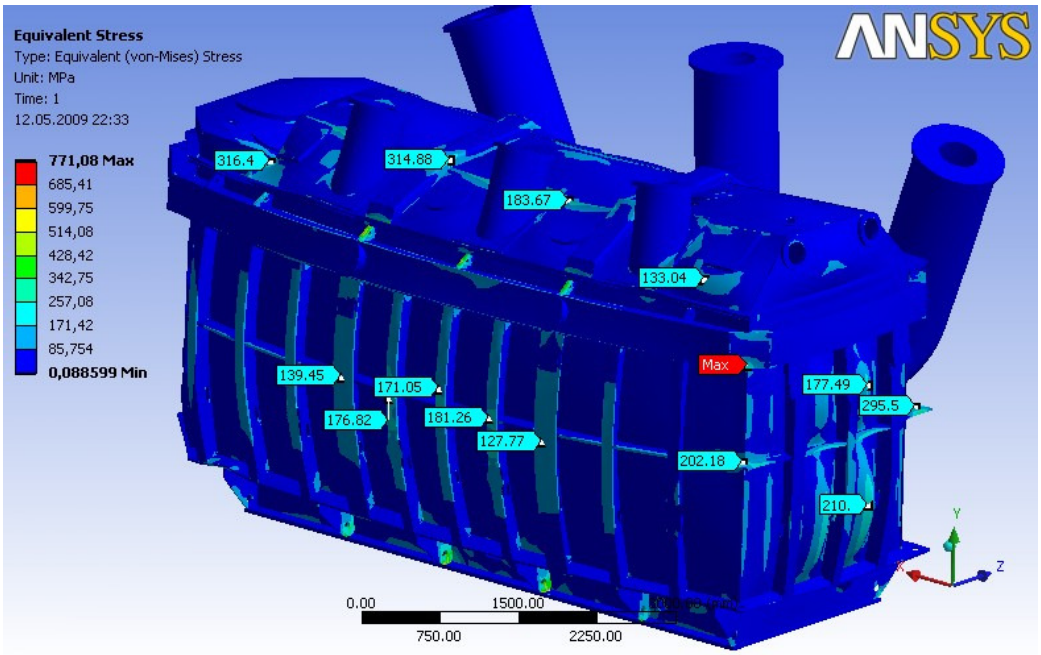

Şekil 5.64., Alternatif 7 tasarımda kazanın Z-ekseni yönünde AG duvarındaki sehim

Kazanda oluşan maksimum eşdeğer gerilme dağılımı şekil 5.65'te gösterilmiştir. Maksimum gerilme AG duvarı ile yan duvarın birleştiği noktadaki takviye üzerinde oluşmuş ve 771 MPa'dır. YG duvarında sehimin fazla olduğu bölgelerdeki eşdeğer gerilme 141 MPa'dır.



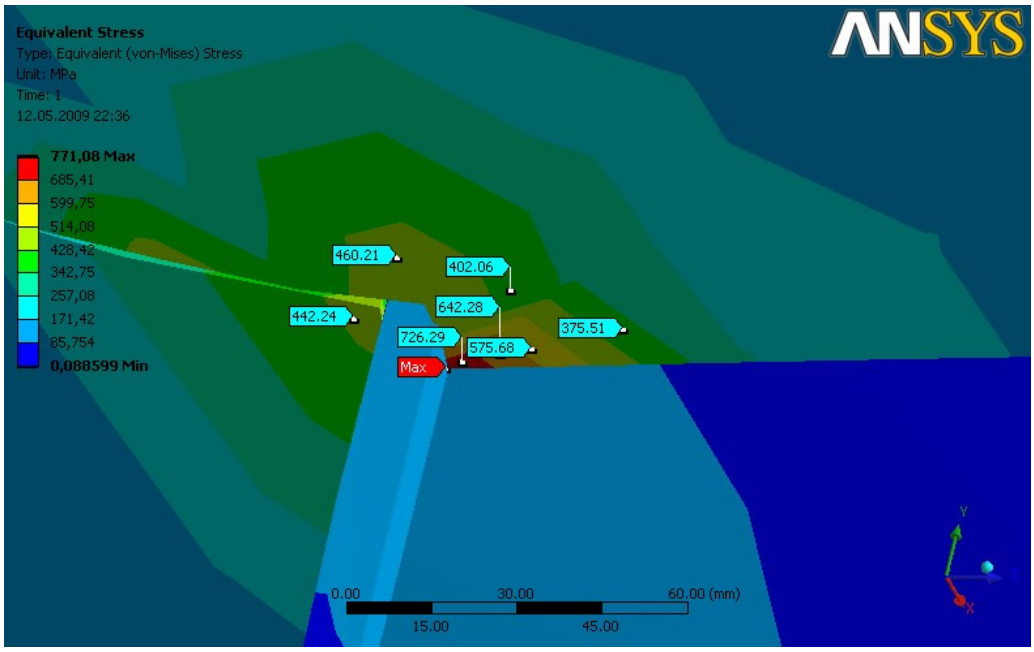

Şekil 5.65., Alternatif 7 tasarımda kazandaki eşdeğer gerilme dağılımı

AG duvarında ve kapakta oluşan eşdeğer gerilme şekil 5.66'da görüldüğü gibi maksimum 307 MPa'dır. Bu değer malzemenin çekme dayanımından düşüktür.



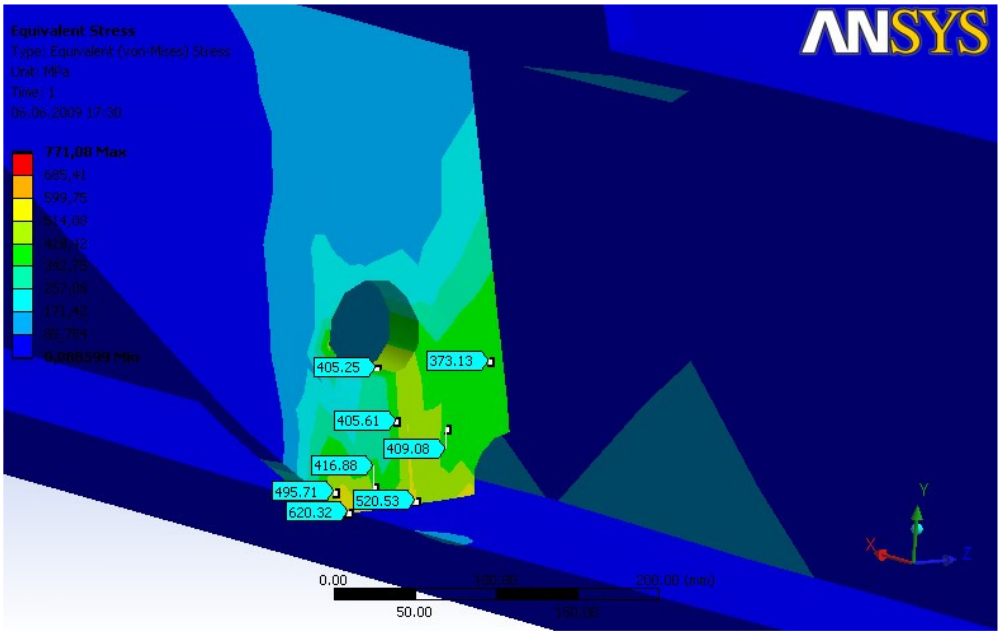

Şekil 5.66., Alternatif 7 tasarımında AG duvarındaki eşdeğer gerilme dağılımı

Maksimum eşdeğer gerilme şekil 5.67'de görüldüğü iki duvarın birleştiği kısımdaki takviyenin köşesinde oluşmuştur. Köşe noktalarda tekil gerilme oluştuğundan bu bölgenin yakınında bölge dikkate alınır. Yapılan bu kabul ile gerilme 402 MPa'a kadar çıkmıştır.



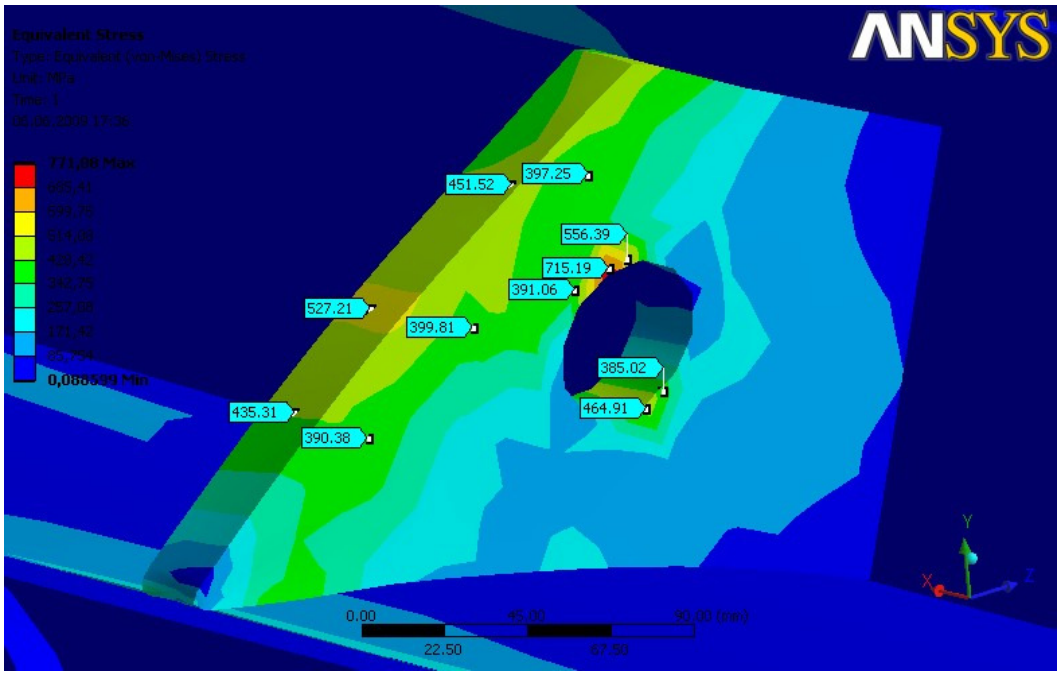

Şekil 5.67., Alternatif 7 tasarımında kazanın köşe takviyesindeki eşdeğer gerilme

Kazan tabanı ile alt bölme arasında orta kısımdaki takviyede oluşan gerilme uç kısımlarda artmıştır (Şekil 5.68). Bu uç kısımlardaki tekil gerilmeden dolayı eşdeğer gerilmeyi 417 MPa kabul edilmiştir.



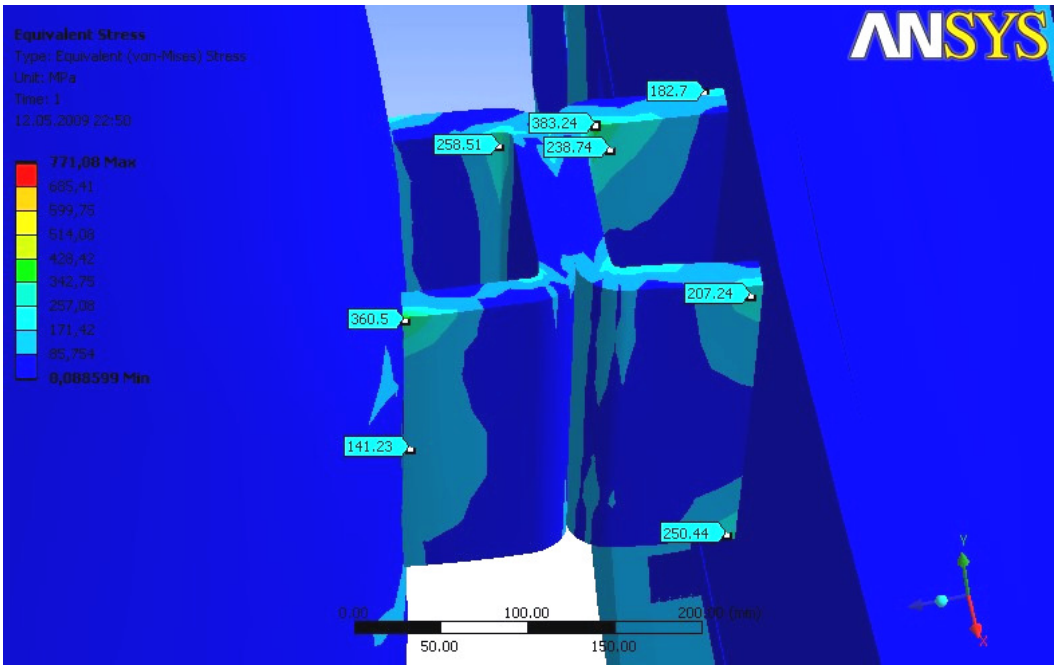

Şekil 5.68., Alternatif 7 tasarımda taban takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı

Kazan kapak ile kuşak arasında orta kısımdaki takviyede de oluşan gerilme dağılımı şekil 5.69'da gösterilmiştir. Kapaktaki takviye kalınlığı 25 mm'dir. Takviyenin delik çevresinde oluşan gerilme tekil ve ihmal edilir. Bu denenle en yakın bölgede oluşan eşdeğer gerilme 400 MPa kabul edilmiştir. Kazanın sadece YG ve AG duvarındaki kapakların altındaki orta kısımlarında bulunan birer takviyede bu kiritik değerler görülmüştür.




Şekil 5.69., Alternatif 7 tasarımda kapak takviyesindeki eşdeğer gerilme dağılımı

YG domlarını tutan tutucular ilk yapılan tasarımda L şeklindeydi ve tek noktada kuşağa kaynatılmıştır. L tutucu yetersiz olduğundan şekil 5.70'de görüldüğü gibi U tutucu tasarlanmıştır. Her iki tarafa (dom ve kazana) bu tutucular konulmuştur ve birbirlerine cıvata ile bağlanırlar. U-tutucunun oluşan eşdeğer gerilme dağılımında maksimum 355 MPa'a kadar çıkmıştır. Malzemenin çekme dayanımının altında olduğu için ideal kabul edilmiştir.



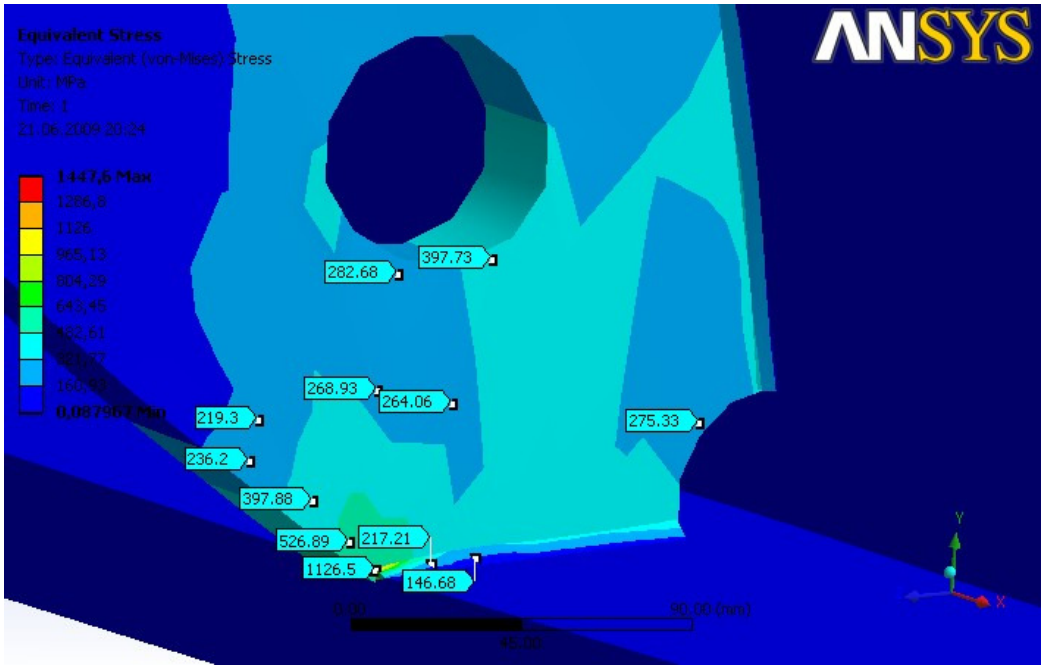

Şekil 5.70., Alternatif 7 tasarımda YG dom tutucusundaki eşdeğer gerilme dağılımı

Bu tasarımda maksimum sehim AG duvarında 9,8 mm ve YG duvarında da 9,5 mm oluşmuştur. Bu sehim miktarları trafo kazanlarında ideal olarak kabul edilmektedir. Eşdeğer gerilmenin maksimum 4 tane takviyenin, tabanda ve kapak kısımlarındaki orta takviyeler, uç kısımlarında oluşmuştur. Takviyelerin uç kısımlarında oluşan bu gerilme tekil olduğundan yok sayılmıştır. Ayrıca bu takviyeler temas ettikleri yüzeylere 4x45º köşe kaynağı yapıldığından oluşan gerilme azalacaktır. Takviyelerde oluşan maksimum eşdeğer gerilme yaklaşık 417 MPa'dır. Kullanılan S 235JR malzemesinin çekme dayanımından (460 MPa) olduğunda ideal tasarım kabul edilmiştir.

### 5.7.1 Takviyelerdeki Kaynağın Etkisi

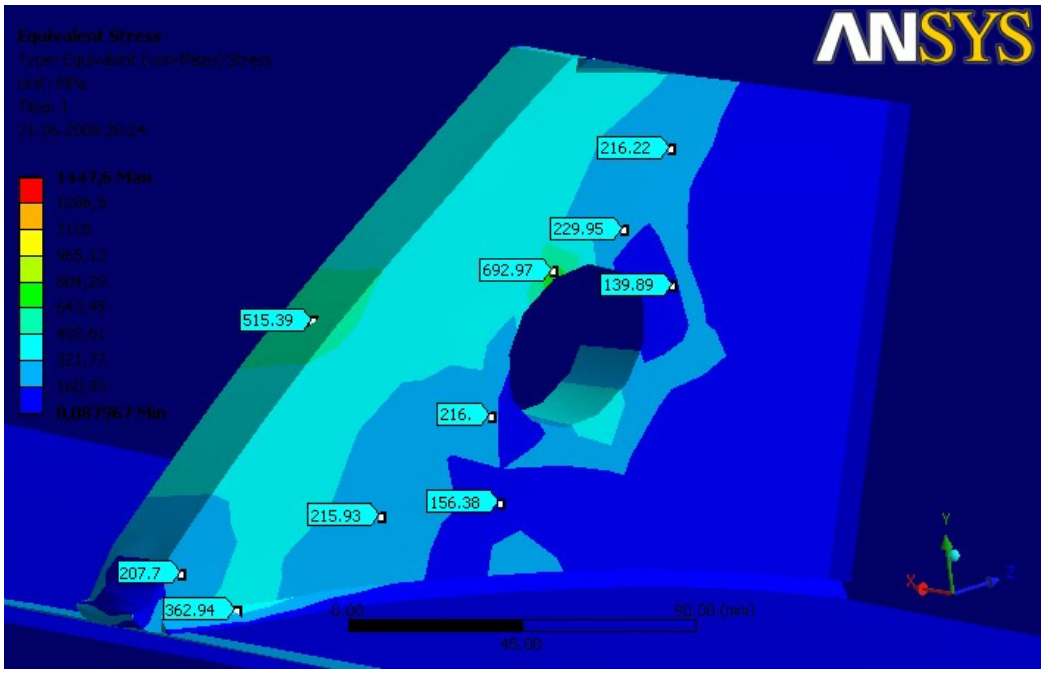
Bu Alternatif kazan tasarımında sonlu elemanlar analizinde çıkan sonuçlar kullanılan çelik malzemenin çekme dayanımına yakın çıkmıştır. Maksimum gerilmeler takviye kenarlarında oluşmuştur. Takviyelere diğer parçalar ile temas ettikleri yüzeylere 4x45º köşe kaynağı yapılmaktadır. Kaynağın etkisi ile takviyelerin köşelerinde mukavemet daha da artacaktır. Kaynak etkisi ile oluşacak gerilmeleri görmek için şekil 5.71'de görüldüğü gibi kaynak parça oluşturulmuştur.

Şekil 5.71'de kazanın tabanın orta kısımdaki takviyeye köşe kaynağı uygulandıktan sonra yapılan sonlu elemanlar sonucunda oluşan eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Tekil gerilme kabulü ile oluşan maksimum 220 MPa'dır. Kaynaksız yapılan sonlu elemanlar analizinde bu takviyedeki eşdeğer gerilme 417 MPa bulunmuştur. Uygulanan kaynak takviyede oluşan gerilmeyi oldukça düşürmüştür. Çıkan sonuç çelik malzemenin akma dayanımı (235 MPa) altına düşmüştür.



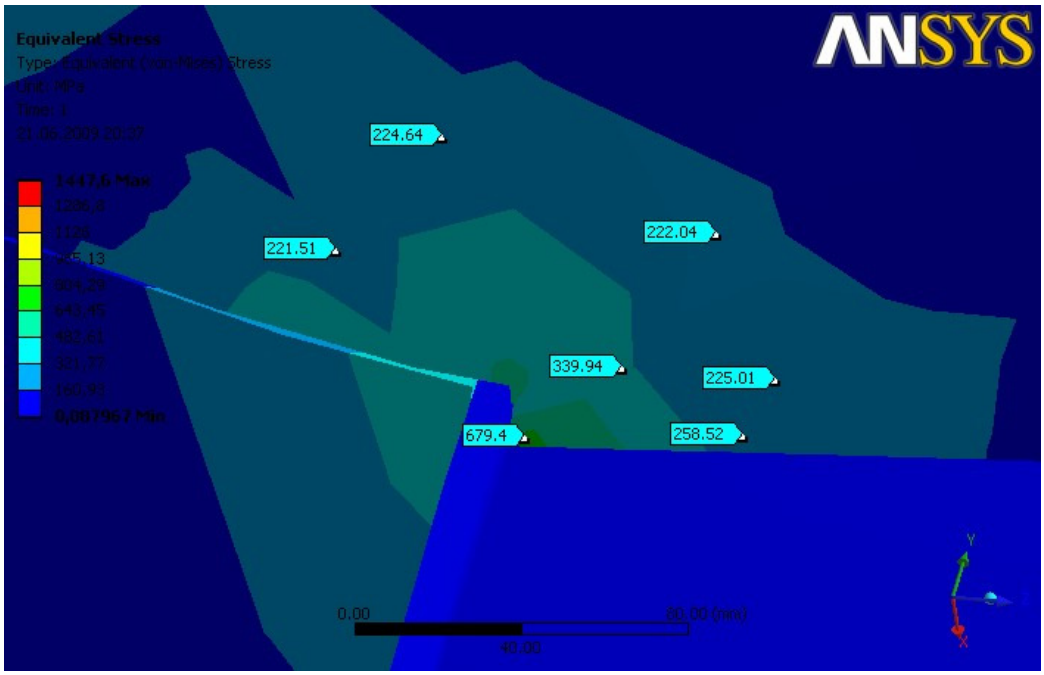

Şekil 5.71., Takviye kenarlarındaki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer gerilme

Şekil 5.72'de görüldüğü gibi kapak takviyesine uygulanan köşe kaynağın eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Bu takviyede oluşan maksimum gerilme tekil gerilmeden dolayı maksimum 230 MPa dır. Kaynaksız yapılan analiz sonucunda maksimum eşdeğer gerilme 400 MPa çıkmıştır. Bu takviyede oluşan gerilme çelik malzemenin akma dayanımı altındadır.




Şekil 5.72., Kapak takviyesindeki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer gerilme

Şekil 5.73'de kazanın AG ile yan duvarların birleştiği kuşak köşesinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Kaynağın etkisi ile oluşan maksimum eşdeğer gerilme tekil gerilmeden dolayı 225 MPa kabul edilmiştir. Kaynaksız yapılan analiz sonucunda eşdeğer gerilme 402 MPa çıkmıştır. Kaynak uygulandıktan sonra oluşan eşdeğer gerilme kullanılan çelik malzemenin akma dayanımı altına düşmüştür.

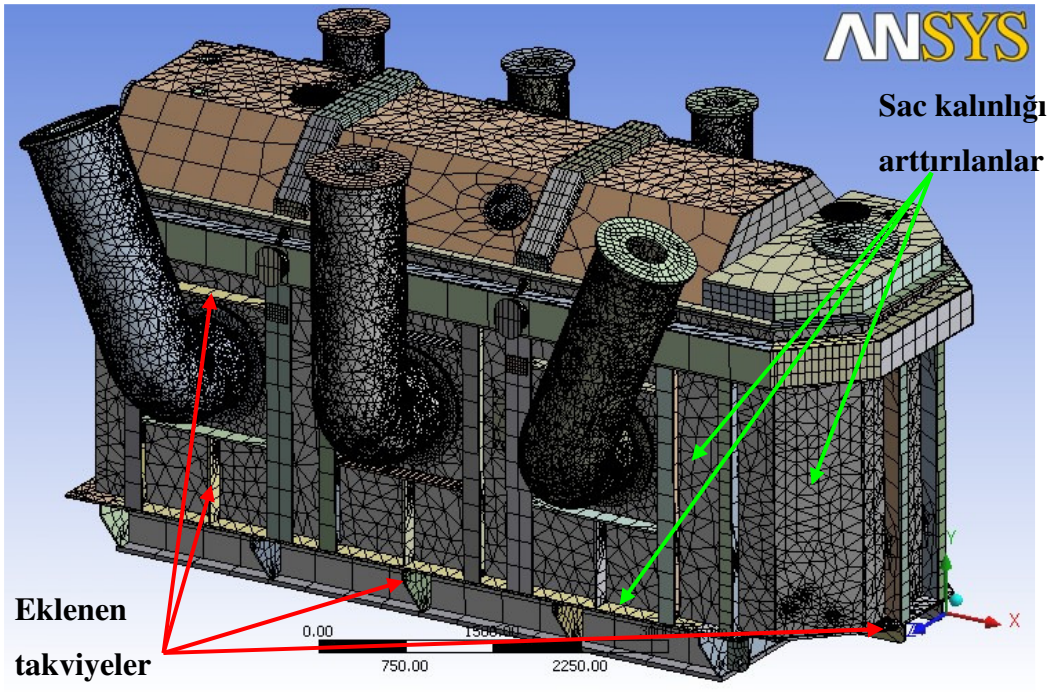



Şekil 5.73., Duvarların birleştiği kuşaktaki kaynak etkisi ile oluşan eşdeğer gerilme

## 5.8 Sekizinci Alternatif Kazan Tasarımı

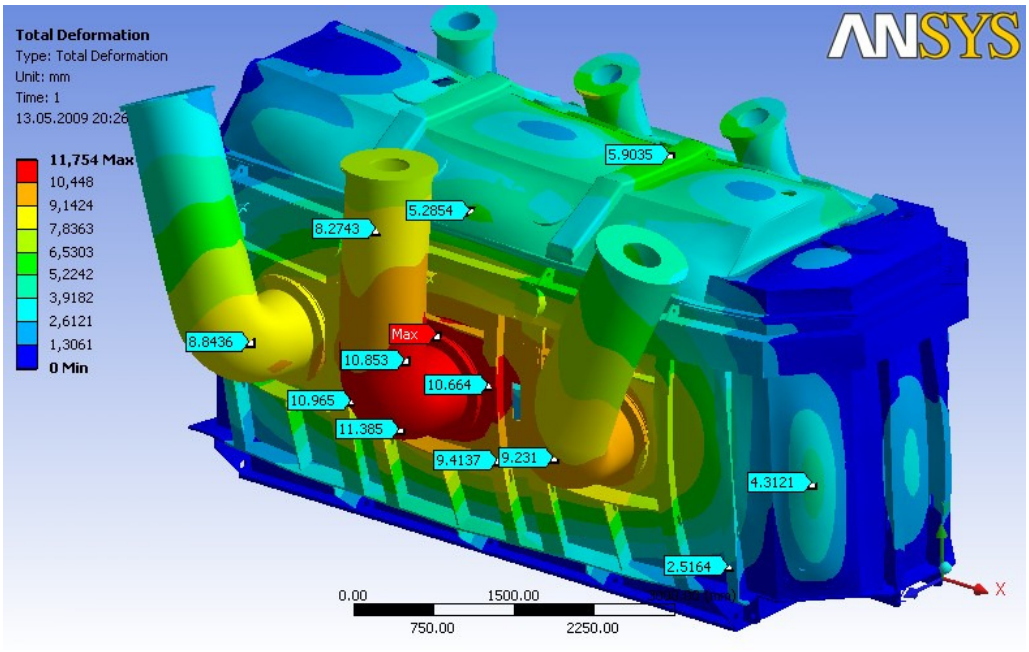
Bu tasarımda alternatif 5 kazan tasarımındaki kazanın duvar sac kalınlıklarını 10 mm'den 12 mm'ye çıkartılmıştır. Kazan kapağındaki ve tabandaki takviye kalınlıkları 20 mm'dir. Alt bölmedeki çerçevenin kalınlığı da 25 mm yapılmıştır. Kazan modeli toplam 223 parçadan oluşmuştur ve ağırlığı 25625 kg'dır.

Bu kazandaki kafes yapısı 323339 düğümden ve 120131 elamandan oluşmuştur (Şekil 5.74). Alternatif 4 kazan tasarımına göre daha fazla düğümden ve elemandan oluşmuştur.



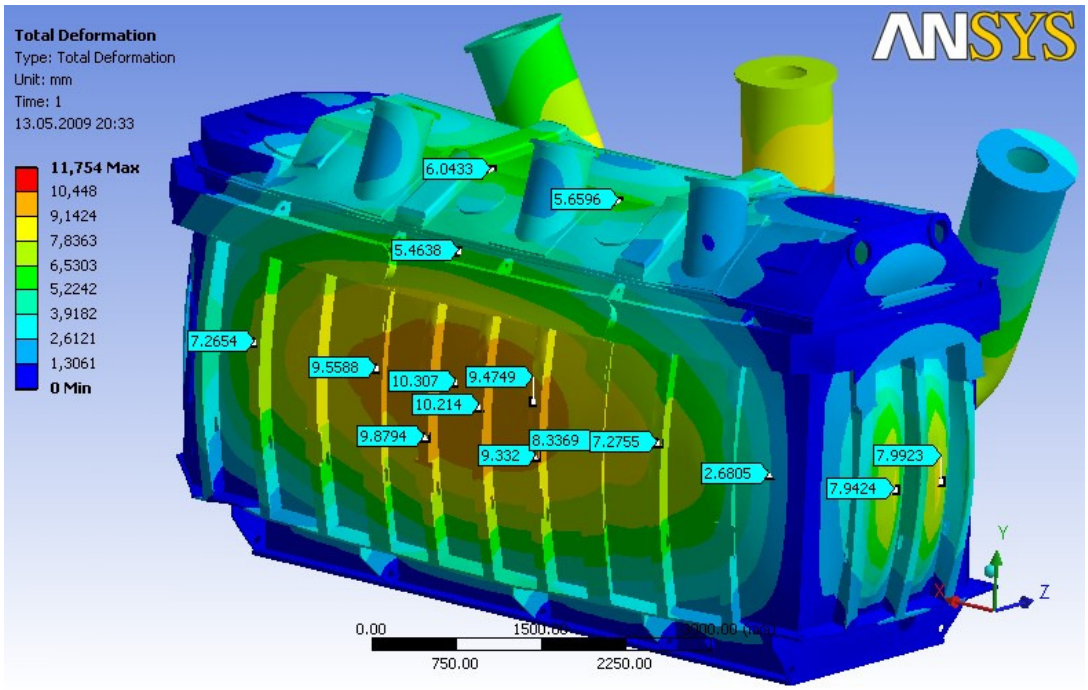

Şekil 5.714., Alternatif 8 tasarımında kazanın kafes yapısı

Statik analiz sonucunda toplam sehim şekil 5.75'de görüldüğü gibi 11,7 mm'ye kadar çıkmıştır. YG duvarının orta kısımdaki domda oluşmuştur. Şalter tarafındaki yan duvarda ve kapakta sehim düşüktür.



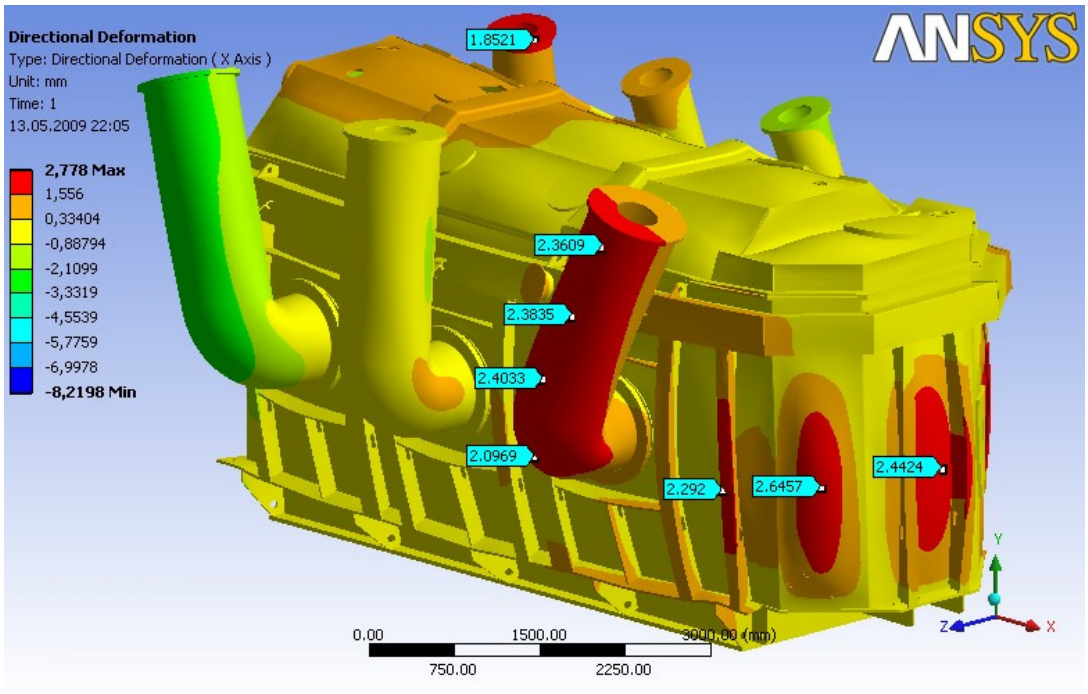

Şekil 5.725., Alternatif 8 tasarımında kazandaki toplam sehim

Trafonun AG duvarında oluşan sehim şekil 5.76'de görüldüğü gibi orta kısımlarda 10,3 mm'ye kadar çıkmıştır. Kapak ve yan duvardaki sehim 6 mm'ye çıkmıştır.



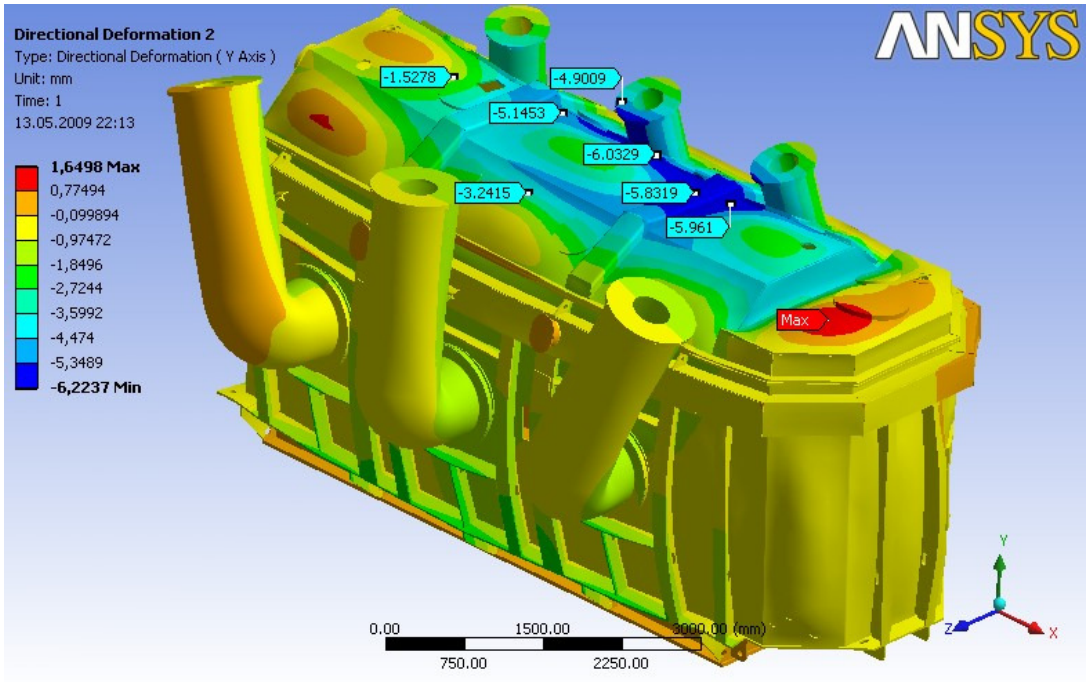

Şekil 5.76., Alternatif 8 tasarımında kazanın AG duvarındaki sehim

X-ekseni yönünde oluşan maksimum sehim şekil 5.77'de görüldüğü gibi 8,2 mm'dir ve bu yöndeki yan duvarlarda oluşmuştur.



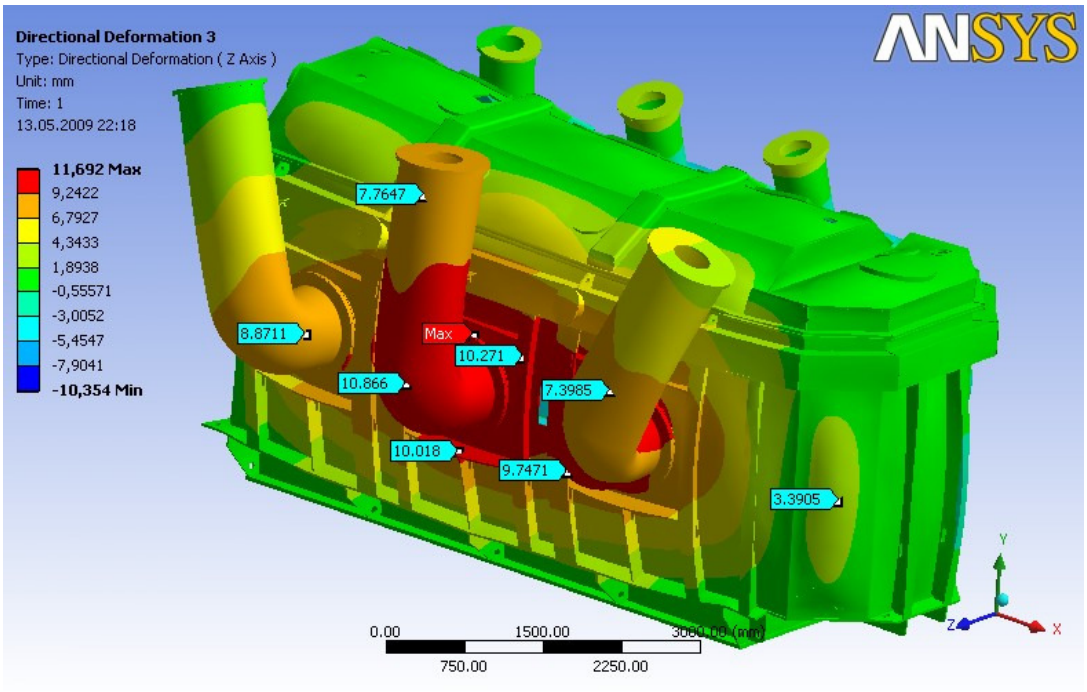

Şekil 5.737., Alternatif 8 tasarımında kazanın X-ekseni yönündeki sehim

Y-ekseni yönünde oluşan sehim şekil 5.78'te görüldüğü gibi maksimum 6 mm. Bu yönde oluşan en büyük sehim şalterin olduğu kapaktadır.



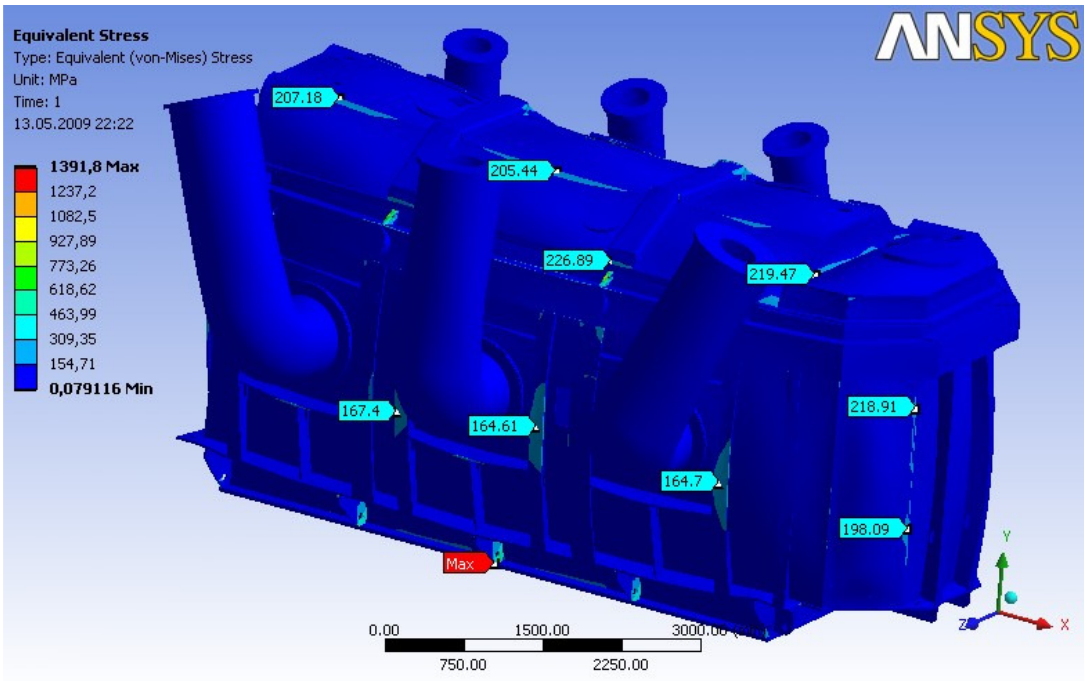

Şekil 5.748., Alternatif 8 tasarımında kazanın Y-ekseni yönündeki sehim

Z-ekseni yönünde oluşan sehim 12 mm'ye kadar çıkmıştır. Z-ekseni doğrultusunda YG duvarlarda maksimum sehim oluşmuştur (Şekil 5.79). Kazan yapısındaki toplam deformasyon en fazla Z-ekseni yönünde gerçekleşmiştir.



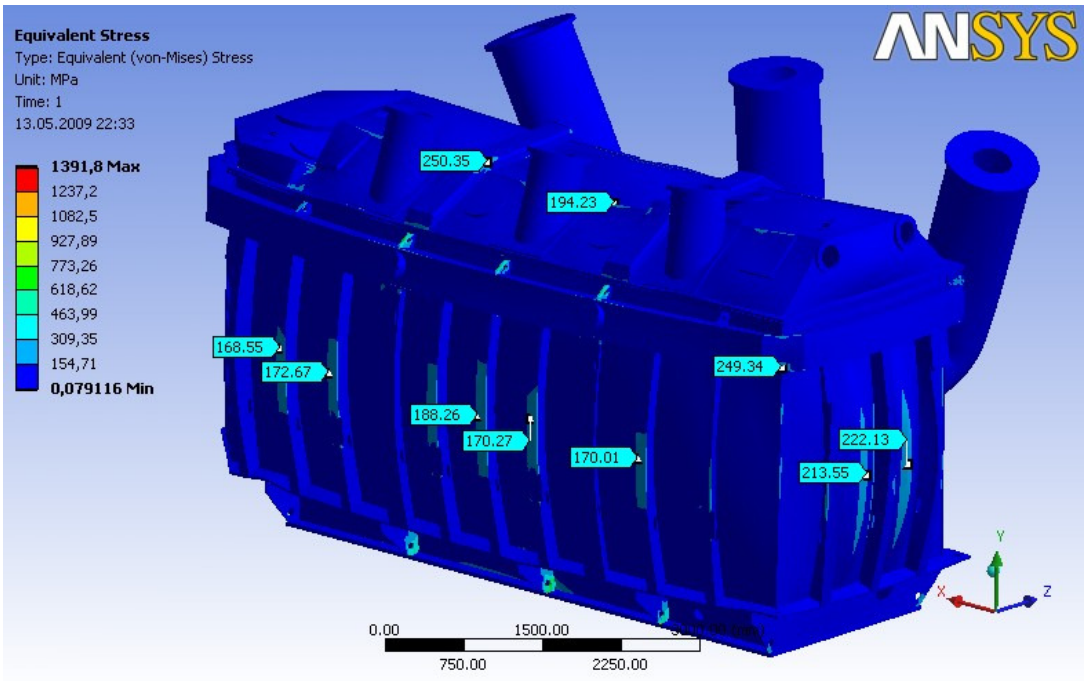

Şekil 5.759., Alternatif 8 tasarımında kazanın Z-ekseni yönündeki sehim

Kazanda oluşan maksimum eşdeğer gerilme 1391 MPa'dır ve tabandaki takviye üzerinde oluşmuştur. Kapak ve yan duvarlardaki gerilmeler düşüktür.



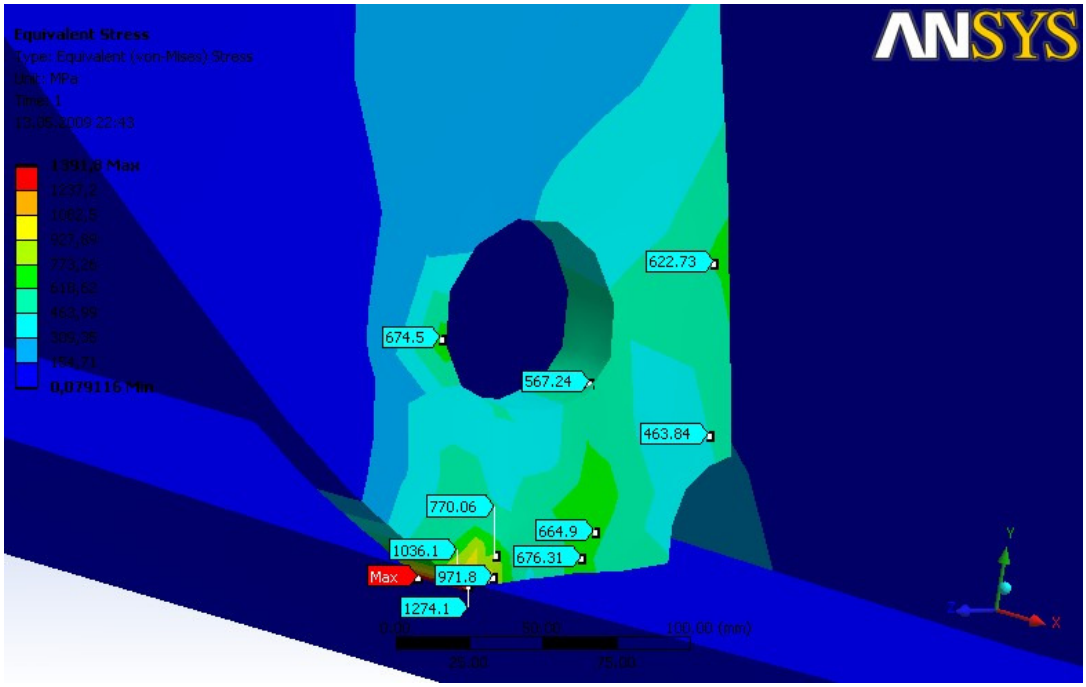

Şekil 5.80., Alternatif 8 tasarımında kazanın eşdeğer gerilme dağılımı

AG duvarında oluşan eşdeğer gerilme 250 MPa'a kadar çıkmıştır. Duvar üzerindeki takviyelerde eşdeğer gerilme ise 188 MPa'dır.




Şekil 5.81., Alternatif 8 tasarımında kazanın AG duvarındaki eşdeğer gerilme

Maksimum eşdeğer gerilmenin oluştuğu taban takviyesi şekil 5.82'da gösterilmiştir. Gerilme yükün fazla olduğu uç kısımlarda artmıştır. Uç kısımlarda tekil gerilme oluştuğundan en yakın bölgedeki gerilme 770 MPa'dır.




Şekil 5.82., Alternatif 8 tasarımında taban takviyedeki eşdeğer gerilme dağılımı

Transformatörün kazanın çevresindeki duvarların kalınlıkları 12 mm'ye çıkartıldığında yapılan sonlu elemanlar analiz sonucunda ideal sonuçlar elde

edilmemiştir. Sehim 12 mm'ye ve eşdeğer gerilme 770 MPa'a kadar çıkmasıyla malzemenin çekme dayanımının üstüne çıkmıştır. Bu tasarımda kazan üzerinde iyileştirmeler yapılarak istenilen sonuçlar elde edilebilir. Yapılacak olan ilaveler kazan ağırlığını alternatif 7 tasarımındaki kazan ağırlığı geçecektir.

## 5.9 Alternatif Tasarımların Analiz Sonuçları Değerlendirilmesi

Yapılan tasarımları değerlendirmek ve en uygun tasarımı seçmek için ANSYS Workbench ile yapılan statik analiz sonucunda çıkan değerleri bir arada görmek için tablo 5.1 hazırlanmıştır. Bu tablodaki sonuçlar tekil gerilmeye göre hazırlanmıştır. Tasarımlar arasında karşılaştırma yapabilmek için analiz sonucunda çıkan parça sayısı, katı modelin ağırlığı, kafes yapısında oluşan düğüm ve eleman sayısı, toplam sehim (deformasyon), maksimum eşdeğer gerilme, kazan iç yüzeylerine uygulanan basınç ve kazan duvarların sac kalınlıkları dikkate alınmıştır. Tablodaki eşdeğer gerilme değerleri kullanılan malzemenin akma dayanımından büyük çekme dayanımından da küçüktür. Çekme dayanımını geçmediğinden maksimum gerilmenin olduğu yerlerde malzemede kopma gerçekleşmez. Optimizasyon tasarımlarına başlamadan önce baz alınan trafo saha da çalış durumdadır. Bu trafoda yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda maksimum eşdeğer gerilme 822 MPa ve köşelerin birleştiği noktalar ile takviyede oluşmuştur.

Tablo 5.1., Tasarımlardaki sonlu elemanlar analiz sonuçların karşılaştırılması

| Yapılan Çalışma | Parça sayısı | Ağırlık (kg) | Düğüm sayısı | Eleman sayısı | Toplam Sehim (mm) | Eşdeğer Gerilme (Mpa) | Basınç (bar) | Duvar Sac Kalınlığı (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mevcut Trafo | 215 | 22891 | 282743 | 102795 | 10,4 | 822 | 1 | 8 |
| Alternatif 1 kazanı | 215 | 22891 | 282743 | 102795 | 20,8 | 1644 | 2 | 8 |
| Alternatif 2 kazanı | 165 | 19317 | 281780 | 105789 | 42,7 | 3029 | 1 | 8 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alternatif 3 kazanı | 173 | 20517 | 278951 | 105296 | 27,9 | 2304 | 1 | 8 |
| Alternatif 4 kazanı | 215 | 23666 | 294012 | 106619 | 14,4 | 1557 | 2 | 10 |
| Alternatif 5 kazanı | 223 | 23895 | 296248 | 106387 | 13,4 | 1508 | 2 | 10 |
| Alternatif 6 kazanı | 263 | 24810 | 307581 | 107975 | 11 | 520 | 2 | 10 |
| Alternatif 7 kazanı | 268 | 25823 | 334872 | 121806 | 9,8 | 417 | 2 | 10 |
| Alternatif 8 kazanı | 223 | 25625 | 232339 | 120131 | 11,7 | 770 | 2 | 12 |

Alternatif 1 kazan tasarımında üretilen kazanın hiçbir yerinde değişiklik yapılmadan 1 bar (0,1MPa) basınçtan 2 bar'a basınca çıkartılarak yapılan analizdir. Mevcut kazan üzerindeki basınç iki katına çıkarak hangi bölgelerde sehim oluştuğu gözlenmiştir. Kazan duvarlarında oluşan sehim ve eşdeğer gerilme 1 bar basınca göre iki katına çıkmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda oluşan sehim ve eşdeğer gerilme değerlerine göre hangi bölgelerde problem olduğunu tespit edilerek geliştirme yapılmıştır.

Alternatif 2 tasarımında kazan duvarlarındaki kuşak kaldırılmış ve duvarlarda I-takviye kullanılmıştır. Bu çalışmada sadece kuşak ve takviye değişmiştir, duvar kalınlıkları 8 mm olarak bırakılmıştır. Kuşaklı ve T-takviyeli kazana göre deformasyon ve eşdeğer gerilme iki katına çıkmıştır. Çıkan sonuçlar çok yüksek olduğundan bu tasarımdan vazgeçilmiştir.

Alternatif 3 tasarımında bir önceki tasarımda I-takviyeler yerine T-takviyeler kullanılmıştır. Bu tasarımda sehim ve eşdeğer gerilme bir öncekine göre azalmıştır. Bu etkilerin azalmasına rağmen ilk kazana göre 2,7 katı daha fazladır. Bu analiz sonucuna göre takviyelerin I veya T olması ile yeterli değerlere ulaşılamamıştır. Kuşak olmadan kazanın mukavemeti çok düşük çıkmıştır.

Alternatif 4 kazan tasarımında üretilen kazana göre sadece duvar sac kalınlıkları 10 mm'ye çıkartılmıştır. Kazanın dört tarafındaki duvar sac kalınlıkları

arttırılarak uygulanan 2 bar basınç sonucunda toplam sehim ve eşdeğer gerilme 8 mm'ye göre %30 civarında azaltmıştır. Tablo 5.1'de görüldüğü gibi sehim 14, 2 mm ve eşdeğer gerilme 1557 MPa bulunmuştur. Kullanılan S 235JR malzemesindeki çekme dayanımı 460 MPa olduğundan bu değer çok yüksektir. Bu nedenle dördüncü tasarım yetersiz gelmiştir.

Alternatif 5 kazan tasarımında duvar kalınlıkları 10 mm olan kazana YG dom çıkışlarına yapılan ilave destek takviye ile taban takviyelerin her iki tarafına birer adet eklenerek yapılmıştır. Yapılan takviye destekleri ile kazan yapısına 8 parça ilave edilmiştir. Bu takviyeler alternatif 4 kazan tasarımında yapılan statik analiz sonucunda en zayıf görülen yerlere konulmuştur. Bir önceki analizde maksimum sehimin oluştuğu bölgeye (ortadaki YG domun alt kısmı) takviye konulması ile sehim 8,8 mm'ye kadar düşürmüştür. Buna rağmen buradaki maksimum sehim dom çıkışın olduğu kısımda oluşmuştur. Maksimum eşdeğer gerilmesinin yüksek olması ile bu çalışma da yetersiz görülmüştür.

Alternatif 6 kazan tasarımında bir önceki tasarıma ilave olarak dom çıkışların dört kenarına takviye ilave edilmiştir. AG duvarında düşey takviyeler arasına destek yatay takviyelerde eklenmiş, kapak ve taban takviyeleri de arttırılmıştır. Duvardaki takviyelerin sac kalınlıkları da 16 mm'den 20 mm'ye çıkartılmıştır. Yapılan bu ilaveler ile kazan yapısına 48 tane paraça eklenmiştir. Statik analiz sonucunda toplam sehim bir öncekine göre 11 mm'ye kadar düşürülmüştür. Oluşan maksimum eşdeğer gerilme ise 520 MPa'a (tekil gerilmeden dolayı) kadar düşmüştür.

Alternatif 7 kazan tasarımında bir önceki çalışmaya ilave olarak YG dom altındaki bölgeye ve kapak ile kuşak arasına birer takviye eklenmiştir. Bunlara ilave olarak kaldırma boynuzlarının olduğu takviyedeki dom tutucuların yapı değişmiştir. Kazan alt bölmedeki çerçevenin kalınlığı 20 mm'den 25 mm'ye ve kapak sac kalınlığı da 16 mm'den 20 mm'ye çıkartılmıştır. Yapılan değişikliklerle ağırlık 25823 kg'a çıkmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonucunda masimum sehim 9,8 mm'ye ve maksimum eşdeğer gerilme 417 MPa'a kadar düşürülmüştür. Bulunan bu gerilme mevcut kazan statik analiz sonucunda çıkan değerden düşüktür. Maksimum sehim tabanda ve kapakta orta kısımda bulunan dört takviyede oluşmuştur. Bu tasarımda çıkan sonuçlar malzemenin çekme dayanımın altındadır. Takviyelerde yapılan kaynaklar ile o bölgelerdeki malzemenin mukavemeti artmıştır. Bu çalışmada çıkan

sonuçlar malzemenin akma dayanıma en yakın sonuçlar olduğundan takviyelere 4x45º kaynak parçaları ilave edilerek sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kaynak parçaları modelin sonlu elemanlar ağındaki eleman ve düğüm sayıları arttığından bilgisayarda analiz işlemi zorlaştırmaktadır. Kaynak uygulandıktan sonra oluşan gerilme kullanılan çelik malzemenin akma dayanımı altına (230 MPa) düşmüştür. Bu çalışmalarda istenilen sonuçlar elde edilmiştir.

Alternatif 8 kazan tasarımında alternatif 5 tasarımdaki kazana sadece duvar kalınlıklarını 12 mm'ye çıkartılmıştır. Duvar kalınlığı artması ile ağırlık 25625 kg'a yükselmiştir. Yapılan statik analiz sonucunda duvar kalınlığı 10 mm'ye göre maksimum sehim 12 mm'ye ve maksimum eşdeğer gerilmesi 770 MPa'a kadar düşürülmüştür. Çıkan sonuçlar kullanılan malzemenin çekme dayanımından yüksektir.

Yapılan optimizasyon çalışmalarında en ideal sonuçlara alternatif 7 ve 8'de çıkmıştır. Bu tasarımlarda takviyeleri uç kısımlarında tekil gerilmeler kabul edilerek yakın bölgedeki değerler alınmıştır. Alternatif 7 tasarımında kazan model ağırlığı mevcut kazana göre 22891 kg'dan 25823 kg'a çıkarak %13 artmıştır. Alternatif 8 kazan tasarımında diğer çalışmalara göre çıkan sonuçlar daha düşüktür. Son tasarımı daha iyi hale getirmek için takviyeler arasına destek takviye konulması gerekir. Takviye artışı ile kazan yapısını ağırlığı 25625 kg'dan daha fazla çıkacaktır. Bu artış yaklaşık %15 civarında olur. Mevcut trafoda yapılan statik anilizde maksimum eşdeğer gerilme 822 MPa bulunmuştur. Bu trafo kazan çalışma esnasında bir problem çıkmadığı göz önüne alınarak değerlendirme yapılmıştır. Sehim ve gerilme değerlerin yanında ağırlık artışı da dikkate alınırsa en uygun sonuçlar alternatif 7 kazan tasarımından elde edilmiştir.

Tekil gerilmeyi gidermek için malzemenin kafes (ağ) yapısını değiştirmek gerekir. Uç kısımlarda ve delik çevresinde oluşan kafes yapısını iyileştirmek için bu bölgeler yapını küçültmek gerekir. Bunların artması ile yapıdaki düğüm ve eleman sayıları artacaktır. Bu artışlar ile programın analiz çalışmasını zorlaştıracak veya ram yetersizliğinden dolayı yapmayacaktır.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenen ve lineer statik analizleri yapılan transformatörün 2 bar basınç için optimizasyon (alternatif kazan tasarımları) yapılmıştır. Yapılan bu tasarımlar ile kazanda oluşan sehim, eşdeğer gerilme dağılımı ve ağırlık kıstasları dikkate alınmıştır.

İki bar basınca arttırılacak kazan geliştirilmesinde baz alınan kazan üzerinde 1 bar vakum uygulanmıştır. Vakum sonucunda oluşan sehimler ölçülmüştür. Üretilen kazanın INVENTOR programı ile katı modeli oluşturularak ANSYS Workbench'e aktarılmıştır. Ölçüm yapılan kazan ile bilgisayar ortamındaki kazan modelinde oluşan sehimler karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde sonucunda oluşan sehim ile ölçüm yaptığımız sehim için aynı bölge dikkate alınmıştır. İki ölçüm arasındaki fark yaklaşık %15 görülmüştür. ANSYS'te bulunan sonuç %85 doğrulukta olduğu kabul edilerek diğer çalışmalara devam edilmiştir.

Bir bar basınca göre üretilen büyük ölçeklerdeki güç transformatörlerindeki kazan duvarlarında kullanılan kuşak ve takviye tipleri incelemesi yapılmıştır. Kuşak kullanılmadan yapılan statik analizler sonucunda kazan yapısını mukavemeti azaldığı tespit edilmiştir. Bu tasarımlar sonucunda kazan duvarlarında kuşaklı takviye konulması gerektiğine kabul edilmiştir.

Transformatör kazanın basıncını 1 bar'dan 2 bar'a çıkartıldığında kazan duvarlarındaki sac kalınlıkları da en az 10 mm yapılması gerektiği görülmüştür. Sadece duvar sac kalınlıklarını arttırmak yeterli gelmemiştir. Bu kalınlık artışı yanında duvarlarda yere dik olan T-takviyeler arasına da takviye atılması gerekmiştir. Kazan kapağında açılı ve yere paralel olan kısımlardaki sacların kalınlıkları minimum 20 mm yapılmalıdır.

Transformatör kazanın tasarım iyileştirmelerinde duvarlar kalınlıklarını arttırmanın yeterli gelmediği görülmüştür. Bu yapıların mutlaka takviye ve bezeri destek elemanları ile desteklenmesi gerektiği belirlenmiştir.

İleride yapılacak olan benzer çalışmalarda da sonlu elemanlar yöntemi optimum tasarım hesaplarında etkili olarak kullanılabilir. Örneğin transformatörlerde

kullanılan radyatörler, genleşme depoları ve borulardaki basınç artışlarında oluşan etkiler bu yöntemlerle incelenebilir. Ayrıca bu tez çalışmasındaki trafo gibi dikdörtgen ve kuşaksız kazanlarda basınç sonucu oluşan etkileri incelenmesi için bu yöntemlerden yararlanılabilir.

# KAYNAKLAR DİZİNİ


1) Peşint Adnan M., *Elektrik Santralleri Enerji İletimi ve Dağıtımı,* MEB Basımevi, Nisan, 1977

2) Boduroğlu T., *Elektrik Makinaları Dersleri,* Beta Basım Yayım Dağıtım, 6. Baskı, Ekim, 1988

3) Çetin İ., *Transformatör,* 3. Baskı, Ekim, 1987

4) Areva T&D, *Power Trasformers,* First Edition, August, 2008

5) ABB, *Transformer Handbook,* 2004

6) Martin J. Heathcote, CEng, FIEE, *The J&P Transformer Book,* Oxford OX2 8DP, Reed Educational and Professional Publishing, Twelfth Edition, 1998

7) Moser H.P., Dahinden V., *Transformerboard I,* Rapperswil, August, 1986

8) Moser H.P., Dahinden V., *Transformerboard II,* Rapperswil, 1987

9) Flanagan M. William, *Handbook of Transformer Design and Aplications*, First Edition, 1986

10) Flanagan M. William, *Handbook of Transformer Design and Aplications*, Second Edition, 1992

11) Lowdon Eric, *Practical Transformer Deign Handbook,* Second Edition, 1988

12) Rothbart A. Harold, *Mechanical Design and Systems Handbook,* 1964

13) Ozen Engineering, *ANSYS Workbench 11.0 Tutorial,* http://www.ozeninc.com/default.asp?ii=84, 2009

14) ANSYS, *ANSYSWorkbench 11.0 Documentation*

# ÖZGEÇMİŞ

Seyit Ali ŞENTÜRK, 1979 yılında Bulgaristan'ın Aytos kasabasında doğdu. Türkiye'ye 1993 yılında gelerek orta öğrenimine devam etti. Orta öğrenimini 1995 yılında tamamladı. 1995-1996 yılında Körfez Endüstri Lisesi makina ressamlığı bölümünde, 1996-1999 yılları arasında Kocaeli Teknik Lisesi makina bölümüne devam etti. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi makine mühendisliğini kazandı ve 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl ASKAM Kamyon İmalat ve Ticaret A.Ş.'de 'kalıp tasarım ve imalat mühendisi' olarak çalışmaya başladı. 2007 yılında G.Y.T.E., Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2007 yılında girdiği AREVA T&D Enerji Endüstrisi A.Ş., Mühendislik Departmanı'nda 'Mekanik Tasarım Mühendisi' olarak çalışma hayatına devam etmektedir.