

## Buhar Devreleri Boru Tasarımı ve Boru Gerilme Analizi

Ahmet Dursun Çetin<sup>1</sup>, İsmail Bayer<sup>2</sup>

ahmetdursuncetin@gmail.com<sup>1</sup>, bayer@yildiz.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

### Özet

Boru hatları çok geniş bir alanda ve çok değişik basınç ve sıcaklıklardaki gaz ve sıvı akışkanların taşınmasında kullanılır. Boru hatları üzerinde çalışılırken, optimum boru çapının belirlenmesi, optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi ve gerilmelerin en ekonomik biçimde alınmasına çözüm aranılır. Boru tasarımı da esas olarak gerilme analizine bağlıdır. Proses boruları ve güç boruları boru stres mühendisleri tarafından rotalama, nozul yükleri, desteklerin doğru yerleştirildiğini ve seçildiğini, izin verilen boru farklı yükler durumunda izin verilen değerlerin aşılmadığını doğrulamak için kontrol edilir. Boru hatları Endüstriyel / Uluslararası Kodlar ve Standartlar tarafından yönetilir. Bu çalışmada da bu standartlardan biri olan ASME B31.1 koduna istinaden, enerji gemisi üzerinde bulunan buhar türbini borulamasındaki esneklik özelliklerini, ekipman nozuluna gelen yükleri ve boru yer değiştirmelerinin nedenleri ve etkilerini incelemektedir. Aynı zamanda boru gerilmeleri hesaplama yöntemlerini, sonlu elemanlar boru gerilme analizi programı ile enerji gemisi üzerinde bulunan buhar devresi borulamasının üzerindeki sürekli yüklerin, ara sıra oluşan yüklerin ve termal durumdaki yüklerin iki farklı boru tasarımı için hesaplamaları yapılmıştır. İnceleme neticesinde boru tasarımının boru gerilme analizine bağlı olduğu belirlenmiştir ve sonlu elemanlar boru gerilme analizi programları yardımıyla yapılan analizler boru üzerindeki gerilmeler hakkında net bir resmin elde edilmesini sağladığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Boru tasarımı, Borularda gerilme, Borularda gerilme analizi, ASME B31.1

# Steam Systems Pipe Design and Pipe Stress Analysis

Ahmet Dursun Çetin<sup>1</sup>, İsmail Bayer<sup>2</sup>

ahmetdursuncetin@gmail.com<sup>1</sup>, bayer@yildiz.edu.tr<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Faculty of Naval Architecture and Maritime, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

## Summary

Pipelines are used for transporting gas and liquid fluids in very wide areas and at very different pressures and temperatures. When working on pipelines, a solution is sought to determine the optimum pipe diameter, determine the optimum insulation thickness and take the stresses in the most economical way. Pipe design mainly depends upon stress analysis. Process piping and power piping are checked by pipeline stress engineers to verify that the positioning, nozzle loads, supports are correctly positioned and selected, and that the permissible pipe is not exceeding the permissible values for different loads. Pipelines are governed by Industrial / International Codes and Standards. In this study, in reference to ASME B31.1 code which is one of these standards, the study examines the elastic properties of the steam turbine piping on the powership, the causes and effects of the loads on the equipment nozzle and the pipe displacements. At the same time, methods of calculating pipe stresses were calculated, which is a finite element pipe stress analysis program, and for two different pipe designs for sustained loads, occasional loads and thermal loads on the steam cycle piping on the power ship. As a result of the investigation, it was determined that the pipe design depends on the pipe stress analysis, and analysis with the aid of finite element pipe stress analysis programs has provided a clear picture of the stresses on the pipe.

**Keywords:** Pipeline design, Pipe stress, Pipe stress analysis, ASME B31.1

## Sembol Listesi

D: Nominal boru çapı

D1: Yer değiştirme

E: Elastiklik Modülü

e: Sıcaklığa bağlı birim doğrusal termik genleşme

E<sub>c</sub>: Oda sıcaklığında elastikiyet modülü

f: Borunun ısınma ve soğuma sayısına (N) bağlı olarak müsaade edilebilir gerilimi azaltıcı yönde kullanılan faktör

H1: Yay Kuvveti

S<sub>sus</sub>, S<sub>i</sub>: Sürekli gerilmeler

- i: Yoğunluk faktörü
- k: Ara sıra oluşan yüklerin faktörü
- L: İki sabit nokta arasındaki borunun açınım uzunluğu
- M<sub>A</sub>: Sürekli (birincil) yükler nedeniyle oluşan moment
- M<sub>B</sub>: Ara sıra yükler nedeniyle oluşan moment
- M<sub>C</sub>: Genleşme yüklerine bağlı olarak oluşan momentler
- M1: Boru Model1
- M2: Boru Model2
- P1: İç Basınç
- S<sub>h</sub>: B31.1 Kodundaki Ek A uyarınca sıcak (çalıştırma) sıcaklıkta izin verilen temel malzeme gerilmesi.
- S<sub>E</sub>: Genleşme gerilimi aralığı
- S<sub>A</sub>: İzin verilen genleşme gerilmesi
- S<sub>C</sub>: B31.1 Kodunun Ek A'sına göre, soğuk (kurulum) sıcaklığa izin verilen temel malzeme gerilmesi
- S<sub>occ</sub>: Ara sıra oluşan gerilmeler
- T1: Sıcaklık
- y: Boru sistemi tarafından absorbe edilen termik genleşme hareketlerinin toplam değeri (mm)
- U: İki sabit noktayı birleştiren doğrunun uzunluğu (Sabit noktalar arası mesafe)
- W: Ağırlık (Boru + İzolasyon + Akışkan)
- WW: Ağırlık (Boru + Su)
- Z: Boru Kesit Modülü

## 1. Giriş

Boru tasarımı esas olarak gerilme analizine bağlıdır. Yüksek gerilimli boru hatlarının boru sistemlerini işletme üzerindeki etkisi dramatik ve masraflı olabilir. İyice analiz edilen bir yapı daha uzun süreli ve daha düşük maliyetli olacaktır. Borunun ağırlığının ve sıcak borunun ısıl genleşmesinin etkisinin göz ardı edilmesi önemli bakım problemlerine neden olabilir. Proses boruları ve güç boruları boru stres mühendisleri tarafından, rotalama, nozul yükleri, askılar ve desteklerin doğru yerleştirildiğini ve seçildiğini, izin verilen boru gerilmesinin, sürekli yükler, işletim yükleri, basınç testi gibi farklı yükler durumunda izin verilen değerlerin aşılmadığını doğrulamak için kontrol edilir.

ASME B31, EN 13480 veya diğer ilgili kodlar ve standartlar tarafından borulardaki gerilme öngörülebilir. Normal yükler (iç basınç ve termal gerilimler) altında, yüksek rüzgâr, deprem veya özel titreşim gibi ara sıra ve aralıklı yükleme durumları altında boruların mekanik davranışını değerlendirmek gerekir (Peng ve Peng, 2009). Bu değerlendirme genellikle hesaplama yöntemleri olsa da özel bir sonlu elemanlar boru gerilme analizi bilgisayar programı yardımıyla gerçekleştirilir.

Sonlu elemanlar boru gerilme analizi bilgisayar programları, karmaşık sistemlerin tasarımı ve kapsamlı analizi için geliştirilen iki yönlü yazılımdır. Bu yazılım, hidrostatik yük durumu, kalıcı yük durumu, ısı genleşme durumunda yük durumu, çalışma şartlarında yük durumu veya istenilen şartlardaki çalışma durumu gibi farklı durumlarda, boru düzenindeki tüm düğüm noktalarında istenilen analizleri istenilen kod standartlarına (ASME B31, EN 13480 v. b.) göre gerçekleştirir. Bu analizler hesaplanmış gerilmeleri, kod uygunluk gerilmelerini, eleman kuvvetlerini ve momentleri ilgili koordinatlarda bulmak için sonlu elemanlar yöntemlerinden yararlanır.

Bir boru sisteminde boru gerilmesinin birçok nedeni vardır. En yaygın olanları ise ağırlık ve ısı nedenleridir. Bu iki sebep aynı zamanda ekipman nozullarındaki yüklerin en yaygın nedenidir (Hunt, 1993).

Stres mühendisinin karşılaştığı üç temel sorun vardır. Bu üç problem, aşırı gerilimli boru bileşenleri, aşırı gerilme uygulanmış bağlantılar ve ekipman üzerindeki aşırı yüklenilmiş bağlantı nozullarıdır. Bu üç tip problem çoğunlukla boru hattı yerleşiminde değişikliklerin ana nedenleridir (Hunt, 1993). Boru sistemleri, boru hareketleri ve desteklerin hareketlerini karşılayacak kadar esnek olmaması durumunda aşırı gerilim/ yorgunluğa bağlı akma, bağlantı noktalarında sızıntı, borulardaki hareketlerden kaynaklı bağlantı teçhizatı üzerindeki tahrip edici yükler ve aşırı itme, boru desteklerinde kopmaya sebep olur (Sivanagaraju vd., 2015).

Boru devrelerinde gerilme analizi için farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar, basitleştirilmiş yaklaşık hesaplama yöntemleri ve analitik hesaplama yöntemidir. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri genellikle iki boyutlu (yani düzlemsel) sistemlerin hesaplanmasında kullanılır (Can, 2017). Üç boyutlu basit birtakım konfigürasyonlar için de yaklaşık hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Ancak karmaşık ve bilhassa branşmanlı sistemlerde analitik hesap yöntemine başvurmak gerekir. Bu hesap yöntemi çok uzun ve zahmetli olduğu için bu konuda bilgisayarlı çözümlere başvurulur.

Bu çalışmada enerji gemisi üzerinde bulunan buhar türbini boru bağlantısı tasarımı ve boru tasarımının boru üzerindeki gerilmelere uygunluğu araştırılmıştır. Boru tasarımının boru üzerindeki gerilmeleri karşılayacak yapıda olmaması masraflı ve trajik kazalara sebep olabilmektedir (Hunt, 1993). Bu sebeple mevcut tesis üzerindeki borulama için gerekli analizler yapılmış ve bu analizler sonuçlarına göre alternatif bir boru tasarımı da yapılarak analiz verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan alternatif boru tasarımında boru üzerindeki gerilmeler istenilen seviyeye çekilmiş olsa da türbin bağlantısı üzerinde meydana gelen yükler istenilen değerleri bir miktar aştığı görülmektedir.

Bu makalenin hazırlanmasında Mumbai Üniversitesinde hazırlanan boru gerilme analizi raporu, GLA Üniversitesinde hazırlanmış olan Proses boru tesisleri üzerine yapılmış bir makale çalışması, analiz kısmının hazırlanmasında ise Çalık Enerji grubunun bir santral için hazırlanmış olduğu yüksek güç buhar ve baypas hattı borulaması boru gerilme analizi raporu referans olarak merkez alınmıştır.

## 2. Boru gerilme analizi

### 2.1. Boru gerilmesinin nedenleri

Bir boru sisteminde boru gerilmesinin birçok nedeni vardır. En yaygın olanları ise ağırlık ve ısı nedenleridir. Bu iki sebep aynı zamanda ekipman nozullarındaki yüklerin en yaygın nedenidir.

Ağırlık, borunun sarkmasına neden olur. Boru desteklerin uygun şekilde yerleştirilmesi ve tasarımı ve ağır yüklerle özen gösterilmesi, ağırlık problemlerinin çoğunu karşılar (Hunt, 1993).

Bir boru ısınırca genişler. Boru genişledikçe ve uzadıkça ekipman bağlantı nozuluna karşı kuvvet uygular. Boru destekleri de borunun hareketini engeller. Bu ısı büyümenin sınırlanması, borunun sınırlandırılmamış kısmında farklı yönlerde sapmasına neden olur. Bu "doğal olmayan" sapma boruda ek strese neden olur (Hunt, 1993).

Boru gerilmesi problemlerine en çok ilk iki tür sebep olur. Bunların haricinde boruya etki eden rüzgâr, bir boru sistemi üzerine büyük kuvvetler uygulayabilir. Aynı şekilde boru kodları, tesis için imalatçının depremlerden kaynaklanan yükleri dikkate almasını gerektirir.

### 2.2. Aşırı boru gerilmesinin etkileri

Stres mühendisinin karşılaştığı üç temel sorun vardır. Bu üç problem, aşırı gerilimli boru bileşenleri, aşırı gerilme uygulanmış bağlantılar ve ekipman üzerindeki aşırı yüklenilmiş bağlantı nozullarıdır. Bu üç tip problem çoğunlukla boru hattı yerleşiminde değişikliklerin ana nedenleridir.

Boru sistemleri, boru hareketleri ve desteklerin hareketlerini karşılayacak kadar esnek olmaması durumunda aşırı gerilim/ yorgunluğa bağlı akma, bağlantı noktalarında sızıntı, borulardaki hareketlerden kaynaklı bağlantı teçhizatı üzerindeki tahrip edici yükler ve aşırı itme, boru desteklerinde kopmaya sebep olur (Sivanagaraju vd., 2015).

Bir stres mühendisinin kaçındığı ilk şey, bir boru bileşenindeki aşırı gerilmedir. Boru üzerine etki eden kuvvet miktarına bağlı olarak boru üzerinde değişim meydana gelir. Boru sapması ne kadar büyük olursa, boru malzemesinde gerilme o kadar yüksek olur. Borudaki gerilme bir kez maksimuma ulaştığında, sapma kalıcı hale gelir ve sapmanın nedeni kaldırıldığında boru orijinal haline geri dönmeyecektir (Hunt, 1993). Bu olgu akma noktası olarak adlandırılır ve kaçmak istenilen şey de budur.

Çalışma sırasında bir boru bileşeninde akma dayanımından kaçmak için, stres mühendisi boru sisteminin düzenini ve boru destek yerleşimini değiştirir. Amacı, boru gerilmesini ANSI / ASME B31'de belirtilen sınırların altında tutmaktır (Peng and Peng, 2016).

Stres mühendisinin önlemeye çalıştığı ikinci tip sorun, aşırı gerilimli bağlantılardır. Bir boru tekrar soğuktan sığağa, sıcaktan soğuğa dönerken bağlantı noktasında itme ve çekme oluşturur. Bu kuvvet yüklemesinde birçok tekrar boru duvarında çatlamaya neden olabilir (Hunt, 1993).

### 2.3. İlgili standart (Kod) tarifleri

Borulama sistemlerinin güvenlik gereksinimlerini karşılamak için belirlenen kodlara ve standartlara göre projelendirilmeli ve inşa edilmelidir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, Makine Mühendisleri Birliği (ASME), Boru Hattı Kanunu'nu geliştiren komitelerin kurulmasına öncülük etmiştir. Boru hattı sistemi, boru tesisat sistemlerinin doğru ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan bir takım şartlardan oluşur.

ASME B31 kodu, izin verilmeyen gerilmeleri, tasarımı, imalatı, montajı, testleri, yorulma direncini ve nükleer olmayan boru sistemleri için çalışma şartlarını tanımlar. Bu çalışma için ASME B31.1 koduyla ilgileniyoruz.

ASME B31.1 Güç Borusu: Buharın süreç içinde kullanıldığı yerlerde enerji santralleri veya rafineriler gibi buhar üretimini kullanan tesisler içindir. Kullanılan güvenlik faktörü, borunun nihai dayanımına karşı yaklaşık 3,5'tir (Woods ve Baguley, 1997).

ASME B31.1 Güç Borusu Kodundan esneklik, ısı genleşme ile ilgili temel tasarım esaslarının yer aldığı önemli kısımlara yer verilmektedir.

### 2.3.1 Sürekli yükler

Boru sistemlerinde sürekli gerilme, ağırlık, basınç ve herhangi bir sabit yükten kaynaklanır (Bradshaw, 2013). ASME B31.1 (2012)'ye göre sürekli yükler için (2) numaralı ifadedeki koşullar sağlanmalıdır.

$$S_{sus} = S_l = \frac{0.75M_A i}{Z} + \frac{Pd_o}{4t} \leq S_h \quad (2)$$

$S_{sus}$ ,  $S_l$ : Sürekli gerilmeler

$i$ : Yoğunluk faktörü

$M_A$ : Sürekli (birincil) yükler nedeniyle oluşan moment

$Z$ : Boru kesit modülü

$P$ : Basınç

$d_o$ : Boru dış çapı

$t$ : Boru et kalınlığı

### 2.3.2 Isıl genleşme

Termal genleşme genellikle yorulmaya neden olur, bu nedenle sistemin bütünlüğü gerilme aralığına ve çalışma çevrimlerinin sayısına bağlıdır (Bradshaw, 2013). ASME B31.1 (2012), ısı genleşme gerilmelerini değerlendirmek için (3) numaralı ifadeyi verir.

$$S_E = iM_c \leq S_A = f(1.25S_c + 1.25S_h - S_l) \quad (3)$$

$S_E$ : Termik Gerilme

$M_c$ : Genleşme yüklerine bağlı olarak oluşan momentler

$i$ : Yoğunluk faktörü

$S_h$ : B31.1 Kodundaki Ek A uyarınca sıcak (çalıştırma) sıcaklıkta izin verilen temel malzeme gerilmesi.

$S_A$ : İzin verilen genleşme gerilmesi

$S_c$ : B31.1 Kodunun Ek A'sına göre, soğuk (kurulum) sıcaklığa izin verilen temel malzeme gerilmesi

$S_l$ : Sürekli gerilmeler

$f$ : Borunun ısınma ve soğuma sayısına ( $N$ ) bağlı olarak müsaade edilebilir gerilimi azaltıcı yönde kullanılan faktör.

### 2.3.3 Ara sıra oluşan yükler

Ara sıra meydana gelen baskılar, su çekimleri, depremler ve rüzgâr gibi ani olaylardan kaynaklanır (Bradshaw, 2013). ASME B31.1 (2012)'ye göre aşağıdaki denklemdaki koşullar sağlanmalıdır.

$$S_{occ} = \frac{0.75M_A i}{Z} + \frac{0.75M_B i}{Z} + \frac{Pd_o}{4t} \leq kS_h \quad (4)$$

$M_A$ : Sürekli (birincil) yükler nedeniyle oluşan moment

$M_B$ : Ara sıra yükler nedeniyle oluşan moment

$M_C$ : Genleşme yüklerine bağlı olarak oluşan momentler

$Z$ : Boru kesit modülü

$i$ : Yoğunluk faktörü

$P$ : Basınç

$d_o$ : Boru dış çapı

$t$ : Boru et kalınlığı

$S_{occ}$ : Ara sıra oluşan gerilmeler

$k$ : Ara sıra oluşan yüklerin faktörü

$S_h$ : B31.1 Kodundaki Ek A uyarınca sıcak (çalıştırma) sıcaklıkta izin verilen temel malzeme gerilmesi.

### 2.3.4 Esneklik

Boru hattında meydana gelen en yüksek termik gerilmelerin hesabında sadece borunun düz kısımlarında meydana gelen gerilmeler değil aynı zamanda dirsek ve T gibi parçalardaki gerilim yoğunlaşma faktörleri de göz önüne alınmalı ve bu kısımların da emniyetli sınırlar içinde kalmasına özen gösterilmelidir.

ASME B31.1 (2012)'ye göre aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

$$\frac{Dy}{(L-U)^2} \leq 30 \frac{S_A}{E_c} \quad (5)$$

$D$ : Nominal boru çapı

$y$ : Boru sistemi tarafından absorbe edilen termik genleşme hareketlerinin toplam değeri

$U$ : İki sabit noktayı birleştiren doğrunun uzunluğu (Sabit noktalar arası mesafe)

$L$ : İki sabit nokta arasındaki borunun açınım uzunluğu

$S_A$ : İzin verilen genleşme gerilmesi

$E_c$ : Oda sıcaklığında elastikiyet modülü

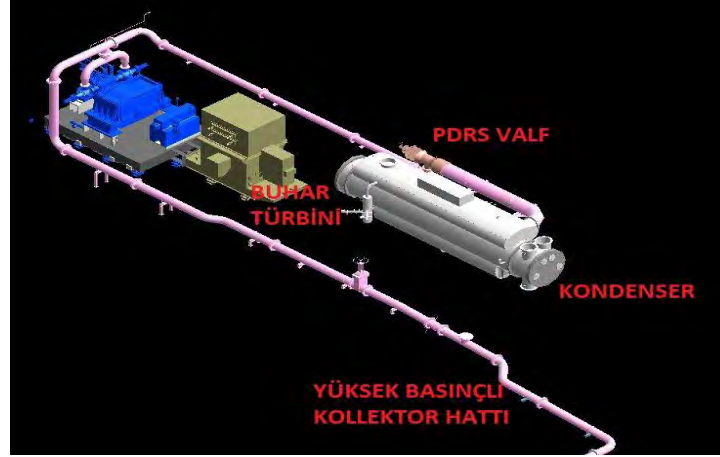
## 3. Sayısal hesaplama ve tartışmalar

Boru devrelerinde gerilme analizi için farklı hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar, basitleştirilmiş yaklaşık hesaplama yöntemleri ve analitik hesaplama yöntemidir.

Basitleştirilmiş hesap yöntemleri genellikle iki boyutlu (yani düzlemsel) sistemlerin hesaplanmasında kullanılır (Can, 2017) Bunların içinde en çok bilinenlerden biri boru tasarımcısı S. W. Spielvogel' in iki boyutlu sistemlerde elastik merkeze dayalı Spielvogel teoremidir. Bu yöntemde reaksiyon kuvvetlerinin

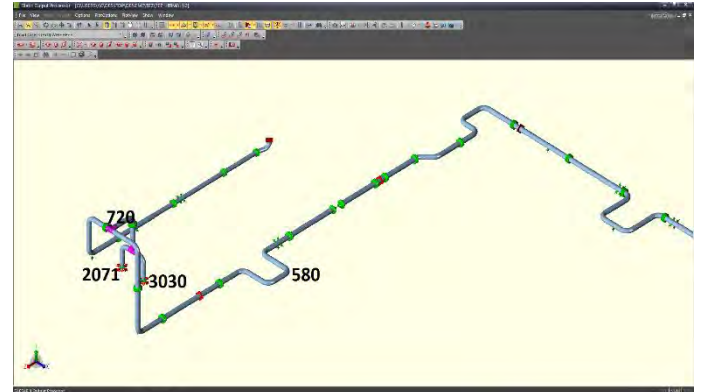
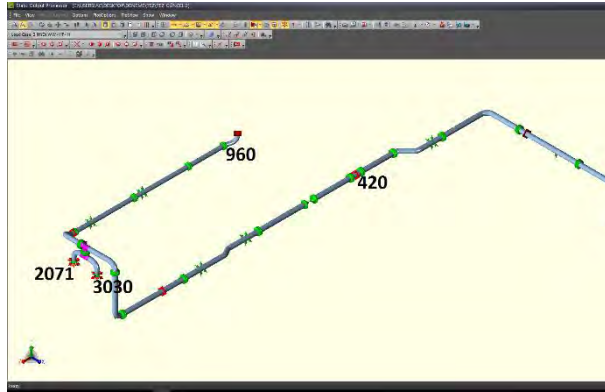






**Şekil 2.** Ekipman ve Boru Yerleşim Modeli

Yukarıda anlatılan tek hat şeması borulaması için Şekil 3’te görülen iki farklı borulama (M1 ve M2) analiz sonuçlarının karşılaştırılması yapılacaktır. M1 durumu borulamanın en kısa ve yerleşime en uygun olduğu durum için tasarlanmış olup, M2 ise tesis yerleşimi göz önüne alınarak boru için yeterli esnekliği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Destek yerlerini optimize etmek için tekrarlanan analitik bir süreç benimsenmiştir. Şekil 3’te gösterilen model noktaları üzerindeki pozlandırılmış düğüm noktaları analiz sonucuna göre gerilme değerleri kritik olan noktalardır.



**Şekil 3.** M1 ve M2 için üç boyutlu model ve referans düğüm noktaları

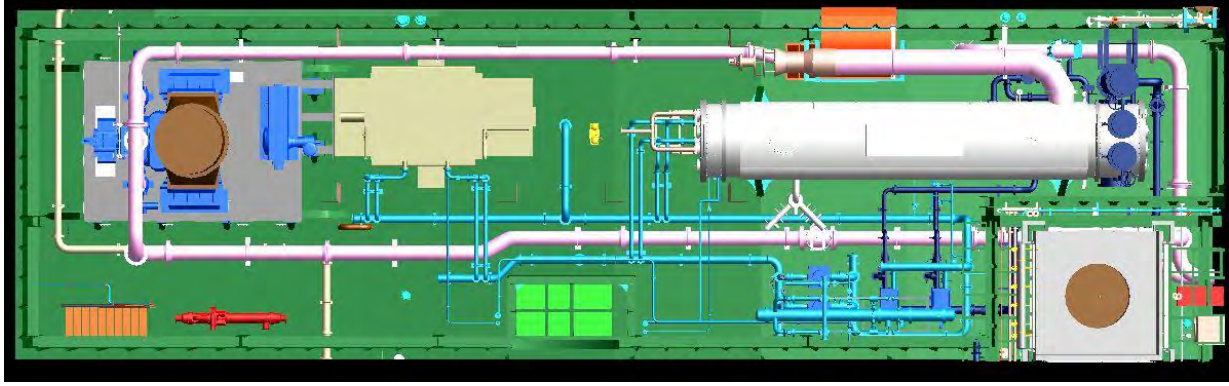
Boru hattı esnekliğinin tamamı ile ilgili çalışma ve rapor ASME B31.1 Güç Boru Hattı kodu ile uyumlu olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu hesaplamaların amacı;

- Boru bağlanan ekipmanlarla birlikte boru tesisatlarının güvenliğinin sağlanması.
- Boru destekleri için destek yükleri ve yer değiştirmelerin belirlenmesi.
- Ekipman bağlantı noktalarında boruya bağlı olarak iletilen yüklerin izin verilen değerler ile karşılaştırılmasıdır.

Boru esnekliğini sağlamak için aşağıdaki yük durumları dikkate alınmıştır.

- Ağırlık ( boru, izolasyon, akışkan madde)
- Hidrotest
- Isıl (Çeşitli çalışma kombinasyonları)



**Şekil 4.** M1 buhar hattı yerleşiminin üç boyutlu model görüntüsü üstten görünümü

### 3.1. Analiz için tanımlanan değerler

Analiz için normalde sıcaklık ve basıncın değişiklik gösterdiği farklı kabul değerleri alınarak tesisin güvende kalması amaçlanır. Bu çalışma için kabul edilen koşullar Tablo 1’de verilmiştir. Analiz için tek sıcaklık ve tek basınç değeri seçilmiş olup alınan değerler maksimum sıcaklık ve maksimum basınçta çalışma değerleridir.

**Tablo 1.** Sistem çalışma değerleri

Sıcaklık	320°C
Basınç	1370 kPa
Hidrotest Basıncı	2000 kPa
Boru Yoğunluğu	0.00785 kg./cu.cm.
İzolasyon Yoğunluğu	0 .00018 kg./cu.cm
İzolasyon Kalınlığı	130 mm

Bu çalışma boru, izolasyon ve suyun ağırlığının ve hidrostatik basıncın (tasarım basıncının 1,5 katı) etkilerini içermektedir. Hidrotest yükleri, boru desteklerinin yeterliliğini doğrulamak için kullanılır. İki boru yerleşimi için de mevcut tanımlanan değerler için yukarıda belirtilen yük durumlarına göre aşağıdaki Tablo 2’de yer alan kombinasyonlar için sonuçlar alınmıştır.

**Tablo 2.** Analiz hesaplamaları için kullanılan yük durumları

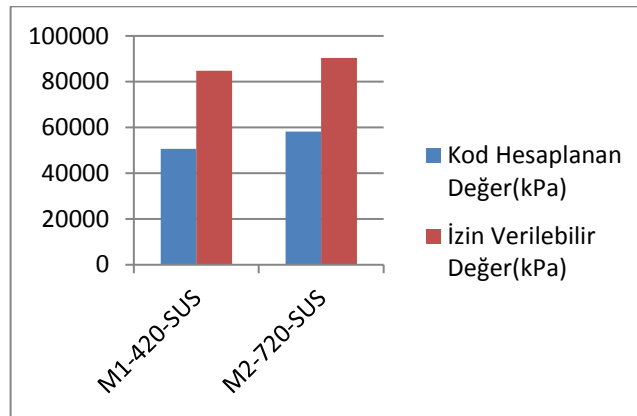
No	Gerilmeler	Yük Durumu	Açıklama
Durum 1	Hidrostatik Yükler(HYD)	WW+HP+H1	Hidrostatik test
Durum 2	Çalışma Sırasındaki Yükler(OPE)	W+T1+P1+D1+H1	Ağırlık, Sıcaklık, Basınç, Yer değiştirme, Önceden tanımlanmış askılar
Durum 3	Kalıcı yükler(SUS)	W+P1+H1	Ağırlık, basınç, Önceden tanımlanmış askılar
Durum 4	Isıl Yükler(EXP)	T1+D1	Sıcaklık, Yer değiştirme

Bu çalışma için deprem, rüzgâr gibi analiz sonucu etkileyen şartlar ihmal edilmiş olup, ağırlık ve ısı sebeplerden kaynaklı oluşabilecek gerilmeler için aşağıdaki yük durumları oluşturulmuş, maksimum sıcaklık ve maksimum basınç değeri için analiz yapılmıştır.

### 3.2. Analiz Sonuçları ve İyileştirme

Tablo 2’de belirtilen Hidrostatik Yükler (HYD), Çalışma Sırasındaki Yükler (OPE), Kalıcı yükler (SUS), Isıl Yükler (EXP) analiz sonuçlarının değerlendirildiği yük durumlarıdır. Bu yük durumlarından elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4’te M1 ve M2 model durumu için türbin bağlantı noktaları kuvvet ve moment analiz sonuç değerleri gösterilmiştir.

M2 borulamasında M1 den farklı olarak boru üzerinde oluşan gerilmeleri azaltmak için gerilme yoğunluğuna bağlı olarak U tipi genişleme noktaları eklenmiş ve yine türbin bağlantı nozullarındaki yük ve moment değerlerini istenilen seviyeye getirebilmek için borulama türbin çevresinde dolaştırılmıştır. Bu sayede boru üzerinden türbine iletilen yük ve momentin uzatılan boru üzerinde kalması istenmiştir.



Şekil 5. M1 ve M2 için boru üzerinde sürekli yüklerden (SUS) oluşan maksimum gerilme değerleri

Stres mühendisi için boru üzerindeki gerilme oranı azami %80 - %90 aralığında kalması boru ve tesis güvenliği için tercih sebebidir. Gerilme oranını istenilen seviyede tutabilmek için boru desteklerinin yerleşimi, borulama üzerinde belli aralıklarla U tipi borulama olan omega dengeleyicisi ya da lyra dengeleyicisi yapılması temel olarak esnekliği sağlamada maliyet açısından da ilk tercih sebebidir. Sonraki tercih olarak da boru üzerinde esnekliği sağlamak için kompensatör kullanılır.

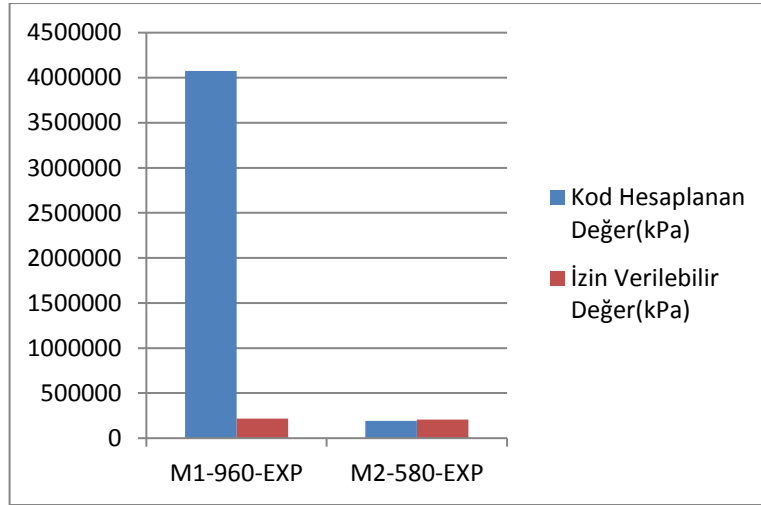
Tablo 3. M1 için hesaplanan türbin bağlantı noktaları kuvvet ve moment değerleri

Düğüm Noktaları	fa (N.)	fb (N.)	fc (N.)	Kuvvetler Kontrolü	ma (N.m.)	mb (N.m.)	mc (N.m.)	Momentler Kontrolü	
2071	Mutlak Metot								
	Limitler	6000	3000	3000		4000	5600	4000	
	3(HYD)	6504	-353	108	10.841	-78	245	9	0.438
	4(OPE)	18936	-32434	11787	108.113	7432	3568	25785	64.462
	5(SUS)	4345	816	88	7.242	-61	199	-552	1.381
	6(EXP)	14591	-33250	11699	110.833	7492	3369	26337	65.843

**Tablo 3. (devam)**

Düğüm Noktaları		fa (N.)	fb (N.)	fc (N.)	Kuvvetler Kontrolü	ma (N.m.)	mb (N.m.)	mc (N.m.)	Momentler Kontrolü
3030		Mutlak Metot							
	Limitler	6000	3000	3000		4000	5600	4000	
	3(HYD)	5395	632	-449	8.991	186	-167	-414	1.034
	4(OPE)	51005	173298	20741	577.661	-9161	10193	-130172	325.430
	5(SUS)	3263	-539	-336	5.439	142	-115	153	0.384
	6(EXP)	47742	173837	21077	579.457	-9304	10308	-130325	325.813

Şekil 5'te, M1-420 ve M2-720 düğüm noktaları için sürekli yüklerin (SUS) uygulandığı durum için analiz sonuçlarına göre maksimum gerilmenin olduğu değerler gözükmemektedir. Hesaplanan değerler, izin verilen değerlerin altında olduğundan iki borulama modeli için de sürekli yüklerin uygulandığı durum için borunun esnekliği istenilen değer aralığında olduğu görülmektedir. Maksimum değerler düğüm noktaları M1-420 için gerilme oranı %59,7 iken M2-720 için gerilme oranı %64,3 tür.


**Şekil 6. M1 ve M2 için boru üzerinde ısıll yüklerden oluşan maksimum gerilme değerleri**

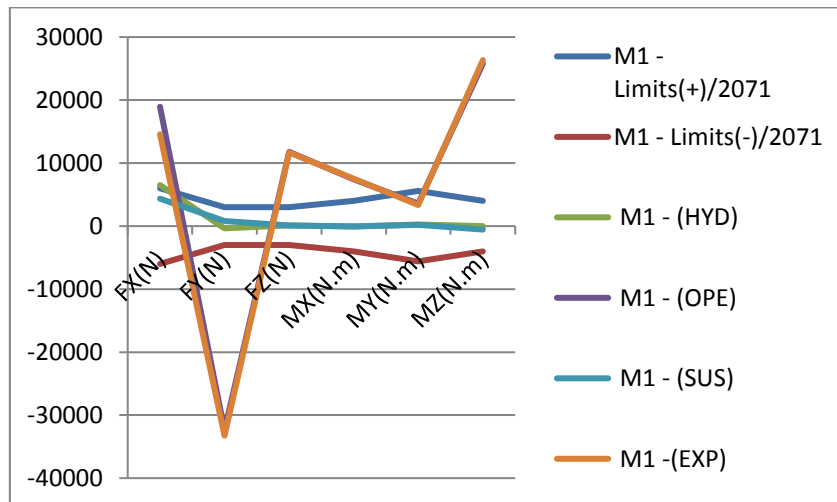
Ancak Şekil 6'da iki model durumu için ısıll yükler(EXP) uygulandığı durumda M1-960 düğüm noktası için hesaplanan değeri ile izin verilebilir değer arasında ciddi fark olduğu gözükmemektedir. M2-580 noktası için ise hesaplanan gerilme değeri izin verilen değerinin altında gözükmemektedir. M1 için sistem borulaması ısıll yükler için uygun bir borulama oluşturmazken, M2 için sistem borulamasının yeterli esnekliğe sahip olduğu gözükmemektedir. Maksimum değerler için M1-960 için gerilme oranı %1870,4 iken M2-580 için gerilme oranı %93,8'dir.

M1 için boru üzerindeki gerilme oranının bu kadar yüksek çıkmasının sebebi boru tasarımının mevcut yerleşim içerisinde en az maliyetli ve en düzgün borulamaya sahip olmak amacı ile yapılmasıdır.

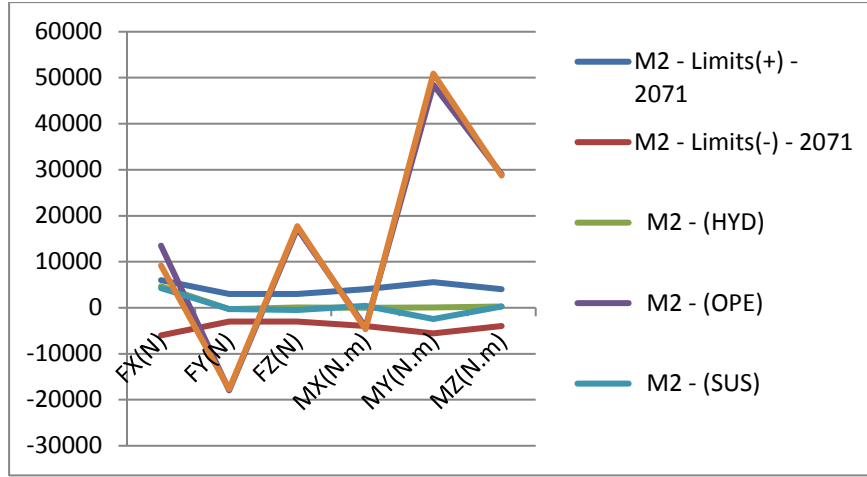
**Tablo 4.** M2 için hesaplanan türbin bağlantı noktaları kuvvet ve moment değerleri tablosu

Düğüm Noktaları		fa (N.)	fb (N.)	fc (N.)	Kuvvetler Kontrolü	ma (N.m.)	mb (N.m.)	mc (N.m.)	Momentler Kontrolü
2071		Mutlak Metot							
	Limits	6000	3000	3000		4000	5600	4000	
	3(HYD)	4661	-298	24	7.769	-8	-117	257	0.643
	4(OPE)	14085	-17835	2037 5	67.916	-5308	57939	28764	103.463
	5(SUS)	4259	-268	-464	7.098	416	-2357	270	4.210
	6(EXP)	9826	-17566	2083 9	69.463	-5725	60296	28494	107.672
3030		Mutlak Metot							
	Limits	6000	3000	3000		4000	5600	4000	
	3(HYD)	4661	205	-296	7.769	-21	-648	-190	1.158
	4(OPE)	8607	18502	1635	61.675	3586	26772	-30684	76.711
	5(SUS)	4259	40	-321	7.098	-403	-2120	-4	3.786
	6(EXP)	4349	18462	1956	61.540	3989	28893	-30680	76.700

Şekil 7’de M1-2071 düğüm noktası için türbin bağlantı noktasında hidrostatik yükler (HYD), çalışma sırasındaki yükler (OPE), kalıcı yükler (SUS), ısıll yükler (EXP) için hesaplanan kuvvet ve moment değerleri ile izin verilebilir kuvvet ve moment değerleri gözükmektedir. Hidrostatik yük ve sürekli yükler için nozul bağlantısı için izin verilen değerleri aşmazken, çalışma sırasındaki yükler ve ısıll yükler için izin verilen değeri kuvvet ve moment değerlerini fazlasıyla aşmaktadır.

**Şekil 7.** M1-2071 düğüm noktası için türbin bağlantı noktasında oluşan farklı durumlardaki yükler

Şekil 8'da, M2-2071 düğüm noktası için türbin bağlantı noktasında hidrostatik yükler (HYD), çalışma sırasındaki yükler (OPE), kalıcı yükler (SUS), ısı yükleri (EXP) için hesaplanan kuvvet ve moment değerleri ile izin verilebilir kuvvet ve moment değerleri gözükmektedir. Hidrostatik yük ve sürekli yükler için nozul bağlantısı için izin verilen değerleri aşmazken, çalışma sırasındaki yükler ve ısı yükleri için izin verilen kuvvet ve moment değerleri M1-2071 değerine göre çok daha iyi gözükse de izin verilen değerler aşılmıştır.



**Şekil 8.** M2-2071 düğüm noktası için türbin bağlantı noktasında oluşan farklı durumlardaki yükler

M1 model durumu için hem boru üzerindeki gerilmelerde hem de türbin nozul bağlantısındaki yük ve moment değerleri izin verilen değerlerin üzerindedir. M2 model durumu için ise boru üzerindeki gerilme oranları izin verilen değer aralığında yer alırken türbin bağlantısı üzerindeki yük ve moment değerleri izin verilen değerlere iki model durumu karşılaştırıldığında oldukça yaklaşmıştır ancak istenilen değerler yakalanamamıştır. İzin verilen değerlere ulaşmak için türbin bağlantısı üzerinde oluşan yükün sebebini bulmak gerekmektedir. M2 için yapılan çalışmalarda boru üzerine U tipi borulamalar eklenmiş ve boru destek yerleri olabildiğince boru üzerinden iletin yükün boru destekleri üzerinde kalacak şekilde yerleştirilmeye çalışılmıştır. Çözüm yolu da yine ilk başta belirtildiği gibi boru tasarımından geçmektedir.

#### 4. Değerlendirme ve sonuç

Buhar boru hattı, çalışma esnasındaki akışkan iç basıncının yanı sıra ek dış yüklerin de etkisine maruz kalan karmaşık bir yapıdır. Buhar hatları üzerinde oluşan gerilmeler boru tasarımı ve boru desteklerinin yerleşimine büyük ölçüde bağlıdır. Yani boru tasarımı esas olarak gerilme analizine bağlıdır. Çünkü tasarımın farklılaşması önemli ölçüde farklı gerilme durumlarına neden olmaktadır. Akış göz önüne alındığında, boru üzerindeki gerilmeler buhar hattının servis ömrü üzerindeki olumsuz etkileri bulunmaktadır ve bu gerilmelerin doğru bir şekilde belirlenmesi ve değerlendirme yapılması gerekmektedir.

Aynı devrenin iki farklı boru tasarımı için yapılan analiz sonucunda bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Sürekli uygulanan yük durumları için oluşan gerilmelerin koda belirtilen izin verilen sınırlar içerisinde olduğu iki model durumu için de görülmüştür. Borunun termal büyümesi sırasında oluşan genleşme gerilmeleri M2 için izin verilebilir aralıkta iken M1 için izin verilen değerler aşılmıştır. Türbin nozullarındaki

borudaki uzama nedeniyle oluşan yükler iki model durumu için de izin verilen değerlerin üzerinde çıkmıştır. Destekler iki model durumu için de sistemi taşıyacak kapasiteye sahip olup hesaplanan yük değerlerine karşılık gelen destek tipleri belirlenmelidir.

Sonlu elemanlar boru gerilme analizi programları yardımıyla yapılan analizler boru üzerindeki gerilimler hakkında net bir resmin elde edilmesini ve analiz edilen buhar hattı elemanlarının davranışının daha iyi değerlendirilmesini ve bileşenlerindeki kritik noktaların belirlenmesini sağlar.

### **Kaynakça**

American National Standards (ASME). (2012) "Code for Pressure Piping", B31.1-2012.

A. Sivanagaraju, A., Krugon, S. and Venkateswararao, M. (2015). "Stress Analysis of Process Pipe Line Systems (ASME B 31.3) In a Plant Using Caesar-II", Mechanical Department, Bapatla Engineering College, Bapatla, Guntur, India.

Bausbacher, E. and Hunt, R. (1993). "Process Plant Layout and Piping Design", pp. 389-410.

Bradshaw, C. (2013). "CAESAR II Statics Training".

Can, İ. (2017) Boru Sistemlerinde Termik Gerilmeler, Boral Mühendislik ve Taahhüt A.Ş. Kitaplığı, (Ref No:06-08-0012-0).

Joshi, A. A., Cherian, R. T. and Rao, G.R. (2000). "A Project Report on Pipe Stress Analysis", University of Mumbai.

Nayyar, M. L. (2000). "Piping Handbook, Seventh Edition", C3 pp. (C.83-C133), B4 pp. (B.107-B.214).

Peng, L.C. and Peng, T.L. (2009). "Pipe Stress Engineering", DOI: 10.1115/1.802854.

Sharma, P., Tiwari, M., and Sharma, K. (2014). "Design and Analysis of a Process Plant Piping System", Department of Mechanical Engineering, GLA University, Mathura, India.

Spielvogel, S.W. (1955). "Piping Stress Calculation Simplified", Fifth Edition, New York.

The M.W. Kellogg Company. (1941-1956). "Design of Piping System".

Woods, G. E. and Baguley, R. B. (1997). "Practical Guide to ASME B31.3 Process Piping", Alberta, CASTI Publishing Inc.