



**BORU HATLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI
HESAPLAMAYA YÖNELİK BİR GÜVENİRLİK MODELİ
OLUŞTURULMASI**

Levent SÖZEN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Levent SÖZEN

12/01/2022

BORU HATLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI HESAPLAMAYA YÖNELİK BİR GÜVENİRLİK MODELİ OLUŞTURULMASI

(Doktora Tezi)

Levent SÖZEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Boru hatları, kimyasalları bir noktadan diğerine aktarmak için kullanılan ve güvenilir olduğu kabul edilen basınçlı ekipmanlardır. Buna rağmen boru hatlarında bir bütünlük kaybı söz konusu olduğunda, hat içerisinde aktarımı yapılan kimyasal ziyan olacağı gibi söz konusu kimyasal tehlikeli ise insan ve çevre sağlığı açısından telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğuracaktır. Bu durumun önüne geçebilmek için boru hatlarının kabul edilebilir bir güvenilirlik düzeyinin üzerinde işletilmesi önem arz etmektedir. Bu araştırma kapsamında, boru hatlarının güvenilirliği yorulma etkisi dikkate alınarak öngörülme çalışılmıştır. Yorulmaya bağlı hasarların, güvenilirlik açısından daha hassas olan kritik noktalarda meydana geldiği bilinmektedir. Kaynaklı birleştirmeler, göçükler, korozyon oyukları ve üretime bağlı iç yüzey kusurları bu çalışma özelinde kritik noktalar olarak kabul edilmiş olup kritik noktalar için gerilme konsantrasyonları sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kusur geometrisini oluşturan değişkenlere bağlı olarak gerilme konsantrasyon faktörlerini hesaplayan bağıntılar türetilmiştir. Problem dâhilinde rastlantısal olduğu kabul edilen geometrik ve mekanik değişkenlere bağlı olarak hasar olasılığı, Monte Carlo benzetimi yöntemi ve gerilme-dayanım girişim teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, boru hatlarında kritik noktalar için zamana bağlı olarak hasar olasılığı hesaplanmış ve elde edilen veriler grafik olarak sunulmuştur. Araştırma kapsamında önerilen modelin uygulaması gerçek bir boru hattı üzerinde gerçekleştirilmiş olup elde edilmiş olan hasar olasılığı verisi kullanılarak söz konusu boru hattı için risk bazlı bir muayene planlaması tavsiye edilmiştir.

Bilim Kodu : 91433

Anahtar Kelimeler : Güvenirlik, hasar olasılığı, yorulma, sonlu elemanlar yöntemi, Monte Carlo benzetimi, risk bazlı muayene

Sayfa Adedi : 154

Danışman : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

DEVELOPMENT OF A RELIABILITY MODEL TO CALCULATE FATIGUE FAILURE PROBABILITY IN PIPELINES

(Ph. D. Thesis)

Levent SÖZEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

Pipelines are pressurised equipment that is considered reliable for transferring chemicals from one point to another. However, if there is a loss of integrity in the pipelines, the chemical transferred will be wasted. Moreover, if the chemical in pipeline is dangerous, it will cause irreversible results in terms of human and environmental health. In order to prevent this situation, it is important to operate the pipelines above an acceptable level of reliability. Within the scope of this research, the reliability of pipelines has been predicted by considering the fatigue. It is known that fatigue-related damages occur at hot points that are more sensitive in terms of reliability. Welded joints, dents, corrosion pits and fabrication-related internal surface defects were accepted as hot points in this study, and stress concentrations for hot points were obtained using the finite element method. Within the scope of the study, the equations that calculate the stress concentration factors are derived depending on the variables constituting the defect geometry. The probability of fracture, depending on the geometric and mechanical variables considered to be random in the problem, was calculated using the Monte Carlo simulation method and the stress-strain interference theory. As a result of the study, the probability of fracture for hot points in the pipelines was calculated depending on time and the results were presented graphically. The case study of the proposed model was carried out on a real pipeline, and a risk-based inspection planning was recommended for the pipeline by using the fracture probability data obtained.

Science Code : 91433

Key Words : Reliability, fracture probability, fatigue, finite element method, Monte Carlo simulation, risk-based inspection

Page Number : 154

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında tüm bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşmayı esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a, araştırma sürecinde her türlü desteği veren ve yol gösteren kıymetli tez izleme komisyonu üyeleri Prof. Dr. Can ÇOĞUN ve Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a, hayatımın her aşamasında her türlü zorlukta bana destek olan annem Neriman SÖZEN ve babam Güngör SÖZEN'e, tez çalışmasını tamamlamam için beni her koşulda motive eden sevgili eşim Songül SÖZEN ve ailesine, gülen gözleriyle bana umut aşılayan sevgili kızım Öykü SÖZEN'e teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. YÖNTEM.....	15
2.1. Gerilme – Dayanım Girişim Teorisi	18
2.1.1. Normal dağılım	20
2.1.2. Weibull dağılımı.....	21
2.1.3. Üstel dağılım	22
2.1.4. Lognormal dağılım.....	24
2.2. Monte Carlo Benzetimi	25
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi	26
2.4. Risk Bazlı Muayene Yöntemi	29
2.5. Manyetik Kaçak Akı (MFL) Yöntemiyle Boru Hattı Muayenesi	32
2.6. Basıncılı Borular için Gerilme Analizi.....	34
2.7. Çalışma Kapsamında Önerilen Model	35
3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ	39

Sayfa

3.1. Gerilme Dağılımının Tahmini.....	39
3.1.1. Gerilme konsantrasyon faktörünün analitik yöntemle elde edilmesi.....	40
3.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmesi.....	41
3.1.3. Gerilme dağılımının elde edilmesi	45
3.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini.....	48
3.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi.....	52
3.4. Uygulama Sonuçları.....	55
4. GÖÇÜKLERDE YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ.....	59
4.1. Gerilme Dağılımının Tahmini.....	60
4.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması.....	60
4.1.2. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması.....	64
4.1.3. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi.....	71
4.1.4. Gerilme dağılımının elde edilmesi	74
4.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini.....	76
4.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi.....	77
4.4. Uygulama Sonuçları.....	78
5. KOROZYON OYUKLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ	81
5.1. Gerilme Dağılımının Tahmini.....	81
5.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması.....	82
5.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi.....	85
5.1.3. Gerilme dağılımının elde edilmesi	89

	Sayfa
5.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini.....	91
5.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi.....	92
5.4. Uygulama Sonuçları.....	93
6. İÇ YÜZEY KUSURLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ	97
6.1. Gerilme Konsantrasyon Faktörünün Tahmini.....	97
6.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması.....	99
6.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi.....	101
6.2. Hasar Olasılığının Tahmini	106
7. ÖNERİLEN MODELLE ÖRNEK BİR BORU HATTI ÜZERİNDE MUAYENE PLANLAMASI GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	107
7.1. Gerilme Dağılımının Tahmini.....	111
7.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini.....	114
7.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi.....	115
7.4. Uygulama Sonuçları.....	117
8. TARTIŞMA.....	121
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	127
EKLER.....	134
EK-1. Alın kaynaklı birleştirme için GKF_w ' nin analitik olarak elde edilmesi	135
EK-2. Ortalama mutlak yüzde hata hesaplaması ve yorumlaması	138
EK-3. Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi	139
ÖZGEÇMİŞ	153

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Olası sonuçların alan bazlı seviyeleri.	31
Çizelge 2.2. Hasar olasılığı seviyeleri.....	31
Çizelge 3.1. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^3)$	41
Çizelge 3.2. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının analitik sonuçlar ile karşılaştırılması.	44
Çizelge 3.3. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması. ..	45
Çizelge 3.4. Örnek boruya ait geometrik ve mekanik özellikler.	46
Çizelge 3.5. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.....	46
Çizelge 3.6. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.	54
Çizelge 4.1. Birinci deneye ait numune özellikleri.....	65
Çizelge 4.2. İkinci deneye ait numune özellikleri.....	68
Çizelge 4.3. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^3)$	72
Çizelge 4.4. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması. ..	72
Çizelge 4.5. Regresyon modeli özeti.	73
Çizelge 4.6. Varyans analizi.	73
Çizelge 4.7. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.....	75
Çizelge 4.8. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.	78
Çizelge 5.1. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^2)$	86
Çizelge 5.2. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması. ..	87
Çizelge 5.3. Regresyon modeli özeti.	88
Çizelge 5.4. Varyans analizi.	88
Çizelge 5.5. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.....	90
Çizelge 5.6. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.	93

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Analizi gerçekleştirilen modellere ait geometrik özellikler ve elde edilen gerilme konsantrasyonları	101
Çizelge 6.2. Taguchi deney tasarımı $L_9(3^4)$	103
Çizelge 6.3. Vekil modellere ait geometrik özellikler ve hesaplanan GKF_Y	104
Çizelge 6.4. Regresyon modeli özeti.	104
Çizelge 6.5. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması. .	105
Çizelge 6.6. Varyans analizi.	105
Çizelge 7.1. Örnek boru hattına ait geometrik ve mekanik özellikler.	110
Çizelge 7.2. Muayene neticesinde tespit edilen iç yüzey kusurları.	112
Çizelge 7.3. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.....	113
Çizelge 7.4. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.	117
Çizelge 7.5. API 581'e göre hasar olasılığı seviyeleri ve örnek uygulama için muayene zamanları.....	119

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan değişkenler.	7
Şekil 2.1. Gerilme ve dayanım rastgele değişkenlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonları.	19
Şekil 2.2. Farklı standart sapma (σ_{st}) değerleri için normal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.	20
Şekil 2.3. Farklı şekil parametrelerine (β) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\eta = 2$).	21
Şekil 2.4. Farklı ölçek parametrelerine (η) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\beta = 2$).	22
Şekil 2.5. Farklı konum parametrelerine (γ) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\beta = 2, \eta = 2$).	23
Şekil 2.6. Üstel dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği ($\lambda_0 = 0,1$).	23
Şekil 2.7. Farklı standart sapma (σ_{st}) değerlerine sahip lognormal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri.	25
Şekil 2.8. Sonlu elemanlar ağı oluşturma (Solda 41 elemanlı kaba, sağda 192 elemanlı ince ağ).	27
Şekil 2.9. Yay elemanı.	29
Şekil 2.10. Risk bazlı muayene planlaması.	30
Şekil 2.11. Risk matrisi.	32
Şekil 2.12. Manyetik kaçak akı yöntemiyle yüzey kusuru tespiti.	33
Şekil 2.13. Boru cidarında gerilme durumu.	34
Şekil 3.1. Değişken basınç etkisiyle kaynak bölgesinde çatlak oluşumu.	39
Şekil 3.2. Alın kaynak geometrisi.	40
Şekil 3.3. Yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.	42
Şekil 3.4. Büyüklüğü 6 mm olan ağ çalışması.	43
Şekil 3.5. Kaynaklı birleştirme için eksen yönündeki en büyük normal gerilme.	44

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cidar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: Eksantriklik δ_m (mm), d: Basınç P (MPa)).	47
Şekil 3.7. Gerilme için benzetim sonucu (a: Analitik, b: SEA).	47
Şekil 3.8. Kaynaklı birleştirme için S-N eğrisi ($m = 3$, $\log a = 12.164$).	49
Şekil 3.9. Kaynaklı birleştirmede dayanım için benzetim sonucu ($N = 5 \times 10^4$ çevrim için hesaplanan).	50
Şekil 3.10. Boru gövdesi için S-N eğrisi.	52
Şekil 3.11. Kaynakta eksen yönünde gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk dağılımları.	53
Şekil 3.12. Boru gövdesinde çevresel yönde gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk dağılımları.	53
Şekil 3.13. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı $N = 5 \times 10^4$ olarak kabul edilmiştir).	56
Şekil 3.14. Monte Carlo benzetimi yakınsama çalışması.	57
Şekil 4.1. Geometrik değişkenler.	60
Şekil 4.2. Göçük bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.	61
Şekil 4.3. 5 mm boyutunda ağ uygulanmış kabuk model.	62
Şekil 4.4. Gerilme-gerinim eğrisi.	63
Şekil 4.5. Boru modeli üzerinde oluşturulan göçük.	63
Şekil 4.6. Göçük bölgesi için iç basınca bağlı eşdeğer gerilme durumu.	64
Şekil 4.7. Deney numunesi üzerinde gerinim ölçer yerleşimi.	65
Şekil 4.8. Bir numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.	66
Şekil 4.9. İki numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.	66
Şekil 4.10. Dört numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.	67
Şekil 4.11. Göçük bölgesi dışındaki bir ölçüm noktası için gerinim değerleri karşılaştırması.	67
Şekil 4.12. Deney numunesine ait gerilme-gerinim eğrisi.	68

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Deney numunesi üzerinde gerinim ölçer yerleşimi.	69
Şekil 4.14. Eksen yönünde yüzde gerinim karşılaştırması.	70
Şekil 4.15. Çevresel yönde yüzde gerinim karşılaştırması.	70
Şekil 4.16. Model üzerinden çevresel yönde alınan gerinim ölçümleri.....	71
Şekil 4.17. GKF_G için ana etki grafiği.	74
Şekil 4.18. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cidar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: Kalıp Çapı D_t (mm), d: Göçük Derinliği d (mm)).	75
Şekil 4.19. Göçük kusuru için gerilme dağılımı.	76
Şekil 4.20. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.	78
Şekil 4.21. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “ $N = 3650$ ” olarak kabul edilmiştir).	79
Şekil 5.1. Boru cidarında korozyon oyuğu.	81
Şekil 5.2. Korozyon oyuğu geometrisi.	82
Şekil 5.3. Oyuk bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.....	83
Şekil 5.4. Ağ uygulanmış model (a: Tüm model, b: Oyuk detayı).	84
Şekil 5.5. Sınır koşulları (A: $u_z = 0$, B: $u_y = 0$, C: $u_x = 0$).	84
Şekil 5.6. Oyuk bölgesi için çevresel yönde en büyük normal gerilme.....	85
Şekil 5.7. GKF_K 'nin oyuk derinliğine bağlı olarak değişimi.	86
Şekil 5.8. GKF_K için ana etki grafiği.	89
Şekil 5.9. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cidar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: d/t , d: r_o/t).	90
Şekil 5.10. Oyuk kusuru için gerilme dağılımı.	91
Şekil 5.11. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.	93
Şekil 5.12. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “ $N = 1825$ ” olarak kabul edilmiştir).	94

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Basınçlı boru iç yüzey kusuru geometrisi.....	97
Şekil 6.2. Boru iç yüzey kusuru geometrisi (a: Üst görünüş, b: Eksen yönünde kesit görünüşü, c: Çevresel yönde kesit görünüşü).....	98
Şekil 6.3 Problemin geometrisi ve sınır koşulları.....	99
Şekil 6.4. Kusur bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.....	100
Şekil 6.5. Ağ oluşturma çalışmasına ait detaylar.	101
Şekil 6.6. Kusur bölgesi için çevresel yönde en büyük normal gerilme.....	102
Şekil 6.7. GKF _Y 'nin kusur derinliğine bağlı olarak değişimi.	103
Şekil 6.8. GKF _Y için ana etki grafiği.	106
Şekil 7.1. Önerilen yöntemin akış şeması.....	108
Şekil 7.2. Değişkenlere ait histogramlar.	113
Şekil 7.3. İç yüzey kusuru için gerilme dağılımı.	114
Şekil 7.4. Boru gövdesi için S-N eğrisi.	115
Şekil 7.5. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.	116
Şekil 7.6. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “N = 240” olarak kabul edilmiştir).....	118

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. PIG kovanı.	33
Resim 4.1. Üzerinde göçük oluşmuş bir boru elemanı.	59
Resim 7.1. Muayene planlaması yapılan boru hattı.	109
Resim 7.2. Muayenede kullanılan MFL-PIG.....	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Malzeme Sabiti
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
A	Kesit Alanı
A_h	Delik Çapı
A_t	Gerçek Değer
C	Olası Sonuçların Büyüklüğü
C^a_f	Anlık Salınım İçin Yangından Etkilenen Alan
C_d	Boşalma Katsayısı
C_f	Yangından Etkilenen Alan
C_p	Sabit Basıncıdaki Isı Sığası
C^s_f	Sürekli Salınım İçin Yangından Etkilenen Alan
C_v	Sabit Hacimdeki Isı Sığası
D	Çap
d	Yüzey Kusurlarının Derinliği
D_a	Birikimli Yorulma Hasarı
D_i	İç Çap
D_t	Kalıp Çapı
e_i	Gerçek Değer ile Tahmin Değeri Arasındaki Fark
E	Elastik Modül (Young Modülü)
E_{eff}	Enerji Verimliliği Düzeltme Katsayısı
F^a	Eksen Yönünde Kuvvet
F^N	Birim Uzunluğa Düşen Eksen Yönlü Kuvvet
g_c	Kütle Çekim Sabiti
H	Hasar Olasılığı
h	Kusur Derinliği ile Taban Yarıçapı Farkı
$H(t)$	Zamana Bağlı Hasar olasılığı

Simgeler**Açıklamalar**

k	İdeal Gaz Isı Sığası Oranı
k_a	Yüzey Faktörü
k_b	Boyut Faktörü
k_c	Yük Faktörü
k_e	Yay Sabiti
kg	Kilogram
K_v	Viskozite Düzeltme Faktörü
L	Kusur Genişliği
l	Uzunluk
L_d	Sızıntı Süresi
l_e	Elastik Uzunluk
L_p	Boru Uzunluğu
L_w	Kaynak Genişliği
m	S-N Eğrisinin Eğiminin Negatifi
m²	Metrekare
m³	Metreküp
m_a	Anlık Salınım Kütlesi
m_{ekip}	Ekipman İçerisindeki Kütle
mm	Milimetre
m_t	Salınabilecek Toplam Kütle
M_x	Bölgesel Eğilme Momenti
N	Çevrim Sayısı
N_i	Gerilme Düzeyi İçin Çevrim sayısı
n_h	Gerinim Sertleşme Üsteli
N_s	Monte Carlo Benzetimi Veri Sayısı
P	Basınç
P_{atm}	Atmosfer Basıncı
P_{dng}	Denge Buhar Basıncı
P_{geç}	Geçiş Basıncı
P_{işl}	İşletme Basıncı
P_r	Olasılık

Simgeler**Açıklamalar**

R	Kusur İç Yüzey Yarıçapı
r	Kusur Taban Yarıçapı
R²	R-kare Değeri
R_e	Güvenirlilik
R_{fd}	Tespit ve Sınırlandırma Sistemi Değeri
R_{fm}	Baskılama Sistemi Değeri
R_g	Evrensel Gaz Sabiti
r_o	Oyuk Yarıçapı
r_s	Eksenden Cidar Ara Yüzeyine Kadar Olan Yarıçap
s	Saniye
S_e	Sonsuz Ömür Limiti
S_f	Yorulma Dayanımı
S_{ut}	Çekme Dayanımı
S_y	Akma Dayanımı
t	Cidar Kalınlığı
T_s	İşletme Sıcaklığı
u	Yer değiştirme
v	Poisson Oranı
W	Kusur Genişliği
W_c	Salınım Hızı
W_m	Elastik Kesit Modülü
W_s	Çıkış Hızı
X	Gerilme Rastgele Değişkeni
Y	Dayanım Rastgele Değişkeni
Z_n	Rastgele Sayı
β	Şekil Parametresi
γ	Konum Parametresi
δ_m	Ortalama Eksantriklik
ε	Gerinim
η	Ölçek Parametresi
λ₀	Sabit Hasar Oranı

Simgeler**Açıklamalar**

μ	Dağılıma Ait Ortalama
ξ	İndirgenmiş Koordinat
ρ	Yoğunluk
σ	Normal Gerilme
σ_a	Gerilme Genliği
σ_a^a	Eksen Yönünde Gerilme Genliği
σ_a^h	Çevresel Yönde Eşdeğer Gerilme Genliği
σ_b	Eğilmeden Doğan Normal Gerilme
σ^h	Çevresel Yönde Gerilme
σ_a^h	Çevresel Yönde Gerilme Genliği
σ_m^h	Çevresel Yönde Gerilme Ortalaması
σ_m	Gerilme Ortalaması
σ_{st}	Dağılıma Ait Standart Sapma
σ_T	En Büyük Normal Gerilme

Kısaltmalar**Açıklamalar****ANOVA**

Varyans Analizi

GKF

Gerilme Konsantrasyon Faktörü

GKF_G

Göçük Gerilme Konsatrasyon Faktörü

GKF_K

Korozyon Gerilme Konsatrasyon Faktörü

GKF_w

Kaynak Gerilme Konsantrasyon Faktörü

GKF_Y

İç Yüzey Kusuru Gerilme Konsatrasyon Faktörü

GPa

Gigapaskal

KO

Kareler Ortalaması

KT

Kareler Toplamı

MA

Molekül Ağırlığı

MFL

Manyetik Kaçak Akı

MPa

Megapaskal

OMYH

Ortalama Mutlak Yüzde Hata

Pa

Paskal

PIG

Boru Muayene Cihazı

SCADA

Merkezi Denetim ve Veri Toplama

SD

Serbestlik Derecesi

SEA

Sonlu Elemanlar Analizi

St.Sap

Standart Sapma

1. GİRİŞ

Boru hatları sıvı veya gaz fazındaki kimyasalların kayıpsız bir şekilde transfer edilmesi amacıyla kullanılan basınçlı ekipmanlardır. Boru hatları kullanılarak gerçekleştirilen nakil işlemleri kimya, akaryakıt, doğalgaz ve ilişkili sektörlerde karşılaşılan ve oldukça kritik olan bir işletme aşamasıdır. Bu hatlar bir işletme bünyesindeki farklı tesisler arasında hammadde, ara ürün veya nihai ürün transferi amacıyla kurulabilmekle birlikte, farklı şehirlerde veya ülkelerde bulunan işletmeler arasında akaryakıt vb. transferi gerçekleştirebilmek amacıyla da kullanılabilmektedir. Söz konusu transfer işlemlerinin, borudan çevreye herhangi bir kimyasal sızıntısı veya döküntüsü meydana gelmeden gerçekleştirilmesi insan ve çevre sağlığının korunması açısından önem arz etmektedir. Meydana gelebilecek sızıntı veya döküntüler, çevre sağlığı üzerinde geri dönüşü olmayan hasarlar bırakabileceği gibi insanların yaşamını da doğrudan tehdit edebilmektedir. Bununla birlikte söz konusu istenmeyen olaylar, boru hattının onarım maliyeti, kullanım dışı kalan boru hattının bekleme maliyeti veya heba olan kimyasalın ikame maliyeti gibi doğrudan maliyetler yaratabilir. Ayrıca meydana gelmesi muhtemel iş kazalarından doğan tazminatlar, çevreye saçılan kimyasalın temizlenmesi için gereken çevre temizliği maliyeti veya yerel otoritelerin uygulayabilecekleri idari yaptırımlar gibi dolaylı maliyetlere de neden olabilmektedir. Anılan bu gerekçelerden dolayı boru hatlarının bütünlük kayıplarına mahal vermeden güvenle işletilmesi oldukça önemlidir. Hatların yeterli bir güvenilirlik düzeyinin üzerinde işletilmesi, hatları kullanan işletmeler için dikkate alınması gereken önemli bir problemidir.

Konunun tanımı

Çalışma kapsamında ele alınan probleme giriş yapmadan önce güvenilirlik kavramı tanımlanmalıdır. Literatürde güvenilirlik için birbirinden farklı tanımlar mevcuttur. Bu tanımlamaların birinde güvenilirlik, bir ekipmana veya sisteme ait performansın belirlenmiş bir süre boyunca kullanıcısının beklentilerini karşılama kapasitesi olarak belirtilmiştir [1]. Başka bir kaynakta ise güvenilirlik, bir ekipmanın veya sistemin, yaşam döngüsü koşullarında belirli bir süre boyunca amaçlandığı şekilde performans gösterme kabiliyeti olarak tanımlanmıştır [2]. Genel anlamda güvenilir bir ekipman, zamana karşı bütünlüğünü ve sağlığını koruyan ekipmandır. Güvenirlik analizi üzerine teoriler Pierre-Simon Laplace'ın, Laplace Dönüşümü'nü geliştirmesinden ve "Theorie Analytique Des Probabilities" çalışmasını 1812'de yayınlamasından sonra başlamıştır. Daha sonra Andrei

Andreevich Markov ise 1880'de rastlantısal (stokastik) süreçler ile ilgili olarak Markov Zincirlerini geliştirmiştir [3]. Modern teknolojinin gelişmesiyle hem ticari hem de askeri alanlarda güvenilir ürünlere ihtiyaç artmıştır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı yıllarında askeri ekipmanların etkinliğini arttırmak için güvenilirlik mühendisliği kavramı ortaya çıkmıştır [4]. Böylelikle güvenilirlik araştırmaları 1950'lerin sonlarına doğru hız kazanmıştır. Güvenirlik analizleri, başta otomotiv, havacılık, uzay olmak üzere birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Mekanik ve hidrolik sistemler [5], dişli kutuları [6], otomobil aktarma elemanları [7], rüzgâr türbini kanatları [8] gibi birçok unsur veya sistemin güvenilirlik analizlerinin gerçekleştirilmiş olduğu somut çalışmalar literatürde karşımıza çıkmaktadır. Özellikle yorulmanın güvenirliliğe olan etkisi bu alanda çalışan birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir [7, 9].

Geçmişte güvenilirlik analizinde kullanılmak üzere birçok yöntem geliştirilmiştir. Yapısal bileşenlerin güvenirliliğinin analizinde yararlanılan yaygın uygulamalardan birisi olasılıklı yaklaşımdır [10, 11]. Bu yöntem literatürde gerilme-dayanım girişim teorisi olarak da adlandırılmaktadır [12]. Problemdeki gerilme ve dayanım değişkenlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonları biliniyorsa güvenilirlik bu yöntemle elde edilebilir. Değilse güvenirliliği tahmin edebilmek için problemin sınır değer fonksiyonunu veya diğer adıyla performans fonksiyonunu elde etmek gerekmektedir. Birinci mertebeden veya ikinci mertebeden güvenilirlik yöntemleri sınır değer fonksiyonunu analitik olarak elde edebilmek için geliştirilmiş yaklaşımlardır [13, 14]. Yakın tarihe gelindiğinde, güvenilirlik analizinde benzetim kullanımı da hız kazanmıştır. Monte Carlo benzetimi ile güvenilirlik tahmini [3], yanıt yüzey tahmin yaklaşımı ile güvenilirlik analizi [15] ve güvenilirlik analizinde sonlu elemanlar yönteminden yararlanılması [16] bu alandaki örnekler arasında gösterilebilir.

Tasarımları, ürünleri veya sistemleri karşılaştırmak ve daha güvenilir seçeneğe karar verebilmek adına çeşitli risk değerlendirmesi yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Hata modları ve etkileri analizi yönteminin (FMEA) kullanıldığı çalışmalar buna örnek olarak gösterilebilir. [6, 17]. Bir sistemi oluşturan her bir unsurun hata olasılığı biliniyorsa, sistemin hata olasılığını hesap edebilmek için hata ağacı analizi (FTA) yönteminin kullanımı da mümkündür [18].

Ortaya atılan bu tez çalışmasında incelenen problem boru hatlarının güvenli bir şekilde işletilebilmesi ile alakalıdır. Bu amaçla hattın güvenirliliğinin analiz edilmesi gerekmektedir.

Boru hatlarının güvenilirliği, boru bileşenlerinin üretiminden kaynaklı bazı kusurlardan etkilenebileceği gibi hattı oluşturan boru bileşenlerinin yetersiz montajı da hattın güvenilirliğini etkilemektedir. Bunlarla birlikte, boru bileşenlerinde çevresel etkilerden kaynaklı meydana gelmesi muhtemel yüzey kusurları da boru hattının güvenilirliğini uzun vadede etkileyen problemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu bağlamda son yıllarda gerçekleştirilmiş olan yayınlar incelendiğinde, boru hatlarındaki yüzey kusurlarının, boru hatlarının mekanik davranışına olan etkilerini inceleyen çalışmaların artmakta olduğu görülmektedir. Örneğin; boru hatları dış yüzeyinde meydana gelen korozyonun boru hattının yorulma dayanımına olan etkisini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu disiplinde, termal etki altındaki basınçlı borular üzerinde meydana gelen farklı ölçülerdeki oyuk geometrili korozyonun boru hattının yorulma dayanımına olan etkisi araştırılmıştır [19]. Basınçlı borular üzerinde darbeler sonucu meydana gelen göçüklerin yarattığı mekanik davranışlar ve göçüklerin oluşturduğu gerilme konsantrasyonu deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir [20]. Farklı göçük geometrileri, göçük boyutları, boru çapları ve basınç değerleri için parametrik olarak gerçekleştirilmiş bir benzetim çalışması ve deneysel çalışma da mevcuttur [21]. Korozyon oluşmuş boru bölümleri için darbe sonucunda meydana gelen göçüklerin borunun mekanik davranışına olan etkisini inceleyen çalışmalar da mevcuttur [22]. Yüzey kusurlarının boru güvenirliliğine olan etkisi de araştırılmış olup bu kapsamda yapılan bir yayında, korozyona bağlı yüzey kusuru olan bir borunun güvenirliliğini tahmin etmek üzerine bir yaklaşım önerilmiştir. Korozyon geometrisini oluşturan değişkenlere göre gerilme konsantrasyonu tahmin edilmiş, korozyon derinliğine ve korozyon ilerleme mekanizmasına bağlı olarak güvenirlilik tahmini yapılmıştır [16]. Boru hatlarının da dâhil olduğu basınçlı ekipmanların güvenirliliği, ekipmanın üretiminde kullanılan malzeme ile de doğrudan ilişkili bir kavramdır. Bu sebeple, henüz tasarım aşamasındayken üretimde kullanılacak malzemenin doğru seçimi de güvenirliliği etkileyecek bir husus olarak dikkate alınmalıdır. Literatürde basınçlı ekipmanlar için ekipmanın kullanım koşullarına göre en uygun malzemenin seçimine yönelik geliştirilen karar destek sistemlerini öneren bir çalışma da mevcuttur [23].

Boru hatlarını oluşturan boru elemanları alın kaynak yöntemi kullanılarak birbirleriyle birleştirilmektedir. Bu alın kaynaklı birleştirmeler de boru hatlarının güvenirliliği açısından kritik noktalar olarak kabul edilmiş olup söz konusu alanlardaki gerilme durumunu inceleyen çalışmalar da karşımıza çıkmaktadır. 2002 yılında gerçekleştirilmiş olan bir

çalışmada, alın kaynak yöntemiyle yapılmış olan birleştirmelerde yorulmaya bağlı çatlak oluşumu incelenmiştir. Çatlak oluşumunda kaynak geometrisi ve kalıcı gerilmelerin etkisi araştırılmıştır. Kaynaklı birleştirme için yorulma dayanımının kaynak geometrisi ve kalıcı gerilmelerden etkilendiği çıkarımı yapılmıştır [24]. Kaynak bölgesindeki kalıcı gerilmelerin boru çapından ne şekilde etkilendiği de araştırılmış olup ince cidarlı borularda boru çapının boru iç yüzeyindeki kalıcı gerilme değerini etkilediği anlaşılmıştır [25]. 2014 yılında deniz üstü platformları sabitleyen kazıklardaki kaynaklı birleştirmeler üzerine bir yayın yapılmıştır. Söz konusu kazıklar dairesel kesitli olup tıpkı borular gibi alın kaynak metodu ile birleştirilmektedir. Kazıkları oluşturan elemanlar bir araya getirilirken, çapa ve daireselliğe bağlı olarak eksen kaçıklıkları söz konusu olabilmektedir. Bu durum kaynak bölgesinde gerilme konsantrasyonu yaratmaktadır. Söz konusu araştırma hem çekme hem eğilme koşulları altında çalışan kaynaklı birleştirmeler için gerilme konsantrasyon faktörünü sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak tespit etmeye çalışmıştır [26]. 2020 yılına gelindiğinde, normal koşullarda toprak altında gömülü olan boru hatlarının bir sebeple askıda kalması fenomeni incelenmiştir. Bu senaryoda; sel, toprak kayması vb. doğa olayları neticesinde boru hattının tabanındaki toprağın kaydığı ve boru hattının bir bölümünün askıda kaldığı öngörülmüştür. Bu durumun kaynaklı birleştirmeler üzerinde yarattığı gerilme konsantrasyonu sayısal yöntemlerle elde edilmeye çalışılmıştır [27]. Son yıllarda yapılan başka bir çalışmada ise kaynak dikişi taşlamasının kaynak bölgesindeki çatlak oluşumuna etkisi incelenmiştir. Bu uygulamanın kaynak bölgesi için yorulma dayanımını arttırdığı sonucuna varılmıştır [28]. Geçmişte araştırmacılar kaynak dikişlerindeki olası kusurları da incelemişlerdir. Bu çalışmalardan birinde, oyuk geometrili bir kaynak kusurunun kaynak bölgesinin maksimum dayanımına olan etkisi, kusurun konumu ve geometrisine bağlı olarak araştırılmıştır. Kabul edilebilir kusur boyutu ve kusur geometrisi için bir tavsiyede bulunulmuştur [29]. Anılan kusurların tahribatsız muayene aşamasında tespit edilebilmesi de kritik bir husustur. Manyetik kaçak akı (MFL) yöntemi ile elde edilen sinyallerin, yapay sinir ağları kullanılarak işlenmesiyle kusurlu kaynaklı birleştirmelerin tespitini öneren bir yayın da mevcuttur [30].

İncelenen ve atıf yapılan bu çalışmaların çoğunun ortak noktası basınçlı boru hatlarındaki yüzey kusurları ve kaynaklı birleştirmeler olup söz konusu çalışmalar bu hassas kısımların borunun mekanik davranışına ve güvenilirliğine nasıl etki ettiği sorusuna cevap bulma amacını taşımaktadırlar. Çalışmalar göstermektedir ki yüzey kusurları ve kaynaklı birleştirmeler boru hatları için kritik noktalardır. Bu kritik noktalar gerek yorulmanın

etkisiyle gerekse de çeşitli korozyon mekanizmalarına bağlı olarak zamanla borunun güvenilirliğini olumsuz etkileyecektir. Bu durum da hatta bir bütünlük kaybı olasılığını artıracaktır. Bu şekilde istenmeyen bir durumun meydana gelmesini önlemek amacıyla boru hatlarının periyodik olarak muayeneye tabi tutulması gerekmektedir. Bu muayeneler genellikle tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Söz konusu muayeneler sabit zaman aralıklarında gerçekleştirilebileceği gibi muayene sıklığı veya önceliğine, hasar olasılığı ve hasarın muhtemel sonuçları göz önüne alınarak gerçekleştirilen bir risk değerlendirmesi neticesinde de karar verilebilir. Böylelikle özellikle boru hattı gibi muayenelerin maliyetli olduğu basınçlı ekipmanlarda, muayene sıklığına ve önceliğine daha verimli bir şekilde karar verilebilir. Literatürde söz konusu yaklaşım risk bazlı muayene yöntemi olarak tanımlanmaktadır.

Risk bazlı muayene yöntemi, muayenelerin düşük maliyetli ve kabul edilebilir bir risk seviyesinin altında gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Geleneksel muayene yöntemlerinden farklı olarak risk bazlı muayene yöntemi, ekipmanın bulunduğu işletmenin fiziksel ve çevresel koşulları, ekipmanın maruz kaldığı operasyon kimyasalları ile işletmedeki kullanım sıklığı gibi göreceli değişkenleri hesaba katmaktadır. Bu yüzden yöntem işletmeye özgü olarak uygulanmaktadır ve sistematiktir. Literatürde yöntemin ne şekilde uygulanacağını gösteren çeşitli standartlar ve uygulama rehberleri mevcuttur. Bunlardan en bilinenleri, Amerikan Petrol Enstitüsüne ait API 581 [31] rehberi, Norveç merkezli bir onaylı kuruluş olan Det Norske Veritas'a (DNV) ait RP-G101 [32] ve DNV GL'ye ait RP-C210 [33] uygulama rehberleridir. Söz konusu kaynaklarda, risk bazlı muayene yönteminin farklı tipte ekipmanlar için yine farklı kullanım koşulları altında ne şekilde uygulanması gerektiği sistematik bir şekilde ele alınmış ve çeşitli örnek uygulamalar üzerinde açıklanmıştır. Yine benzer amaçla kullanılabilecek bir diğer rehber BS 7910 ise metalik yapılar üzerinde oluşan çatlakların kabul edilir seviyede olup olmadığının değerlendirilmesi için hazırlanmış bir diğer önemli standarttır [34]. Literatürde yöntemin ilk uygulamalarının 90'lı yıllara dayandığı ve güvenilirlik temelli periyodik muayene planlaması tanımıyla yapısal bileşenlere uygulandığı görülmektedir. Söz konusu uygulamalarda yapısal bileşenler için yorulmaya bağlı hasar olasılığı elde edilmekte ve bu olasılıklar kullanılarak muayene planlaması yapılmaktadır [35] [36] [37] [38]. 2000'li yıllara gelindiğinde, hasarların olası sonuçların da değerlendirilmeye alınmasıyla yöntem risk bazlı muayene planlaması olarak adlandırılmaya başlamış ve Amerikan Petrol Enstitüsü bu alanda ilk rehberini yayınlamıştır [39]. Böylelikle yöntemin basınçlı ekipmanlar üzerinde uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Aynı yıllarda söz

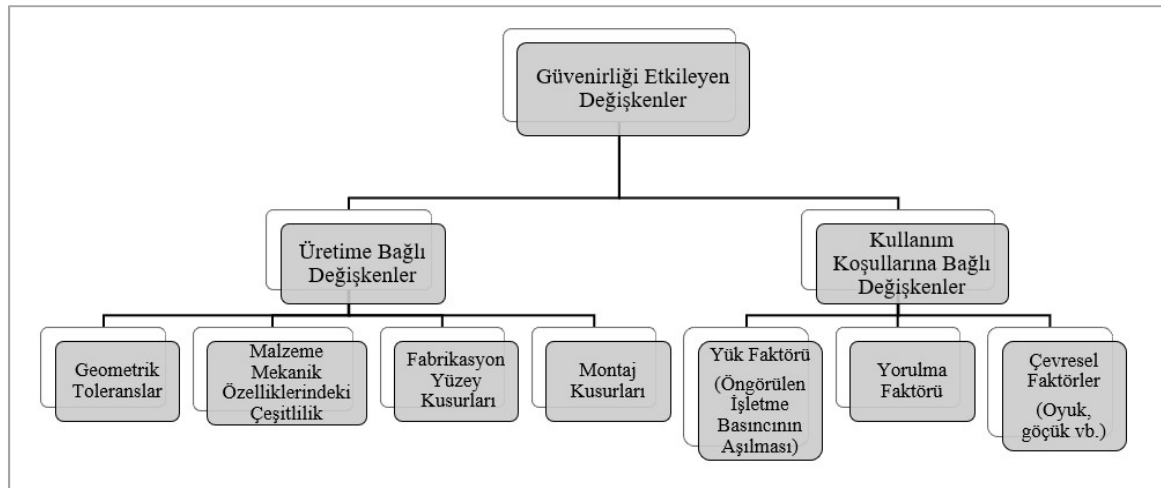
konusu yaklaşım petrol boru hatları üzerinde de çalışılmıştır [40]. Risk bazlı muayene planlaması başlangıçta yapısal bileşenler üzerinden yürütülüyor olsa da büyük yapısal sistemler için planlamada sistemin bir bütün olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunan çalışmalar da mevcuttur [41]. Yöntemin endüstrideki uygulamaları da gerçekleştirilmiş olup rafineri bünyesindeki bir birim içerisinde bulunan prosetteki bakım stratejisini değerlendirmek için risk bazlı muayene yönteminden yararlanılmıştır [42]. Singh ve Pokhrel ise yaptıkları çalışmada, karbon çeliğinden üretilmiş boru ve basınçlı kap gibi ekipmanlardaki mikrobiyolojik korozyon hızını tahmin etmek için bulanık mantık yönteminden faydalanmışlardır. Güvenirliğin tahmininde ise bulanık üyelik fonksiyonunu olabilirlik fonksiyonu olarak kullanmışlardır [43]. Son yıllarda yayınlanmış bir başka çalışmada; optimum bir muayene-onarım stratejisi geliştirebilmek için önceki muayene sonuçlarına bağlı olarak sistem güvenirliliğini hızlı bir şekilde hesaplayabilen dinamik bir Bayesian ağı yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen metodoloji yorulmaya maruz kalan yapısal bir sisteme uygulanmıştır ve metodolojinin yapısal sistemler için bütünlük bir risk bazlı muayene planlamasına olanak sağladığı gösterilmiştir [44]. Literatürde önemli bir yere sahip olan çalışmalardan bir diğeri ise deniz üzerinde kurulu petrol platformlarında meydana gelen yorulma hasarları üzerine odaklanmıştır. Yorulma güvenirliliği, deniz üzerindeki petrol platformlarının kaynaklı çelik parçaları için en önemli tasarım kriterlerinden birisidir. Tekrarlanan dalga yükü nedeniyle yorulma çatlakları, bu yapıların bütünlüğü için önemli olan kaynaklı birleştirmelerde başlayabilir ve büyüyebilir. Bu çalışmada, kaynaklı detaylarda yorulma çatlakları için risk bazlı muayene planlaması için metodoloji ve pratik hesaplamalar sunulmaktadır [45]. Benzer alanda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada yine deniz üzerindeki petrol platformlarına ait yapısal elemanların periyodik muayene aralıkları Monte Carlo benzetimi ve Markov zinciri modeli kurularak planlanmaya çalışılmıştır [46]. Literatürde bulunan akademik çalışmalar ve rehberler incelendiğinde, risk bazlı muayene yönteminin hem yapısal bileşenlere hem de basınçlı ekipmanlara uygulanabilme kabiliyetinin olduğu anlaşılmaktadır.

Anılan araştırmalardan anlaşıldığı üzere boru hatlarının güvenli bir şekilde işletilebilmesi işletmeler için göz ardı edilemez bir husustur. Bunun için de boru hattının güvenirliliğinin belirli bir mertebenin üzerinde olduğundan emin olunması gerekmektedir. Çalışmalar göstermektedir ki boru hattının güvenirliliğini etkileyen birden fazla etmen mevcuttur. Bunlar; boru bileşenlerini birbirine bağlayan alın kaynaklı birleştirmelerin kalitesi, boru yüzeyinde çeşitli faktörlerden kaynaklı meydana gelmiş olan yüzey kusurları, değişken

yüklerden dolayı oluşan yorulma, borunun üretim süreçlerinden kaynaklı olan kusurlar ve toleranslar ile işletme şartlarında öngörülemeyen basınç yükleri olarak sayılabilir. Sayılan bu etmenlere bağlı olarak güvenirliliğin doğru tahmin edilmesi ve mümkün olan en düşük maliyet ile en doğru zamanda muayeneye karar verilmesi bu alanda faaliyet gösteren işletmeler için önemli bir problem olup bu tez çalışmasının da çerçevesini oluşturmaktadır.

Araştırmanın amacı

Literatürde güvenilirlik tahmini üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Boru hatlarının güvenirliliği üzerinde ise sınırlı çalışma olmakla birlikte bazı hasar mekanizmaları için güvenilirlik incelemeleri yapılmış olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ele alınan problem ise, boru hatlarının güvenirliliğini daha bütüncül olarak ele alıp işletmeciler için en uygun muayene zamanına karar vermeye yöneliktir. Problemin çözümü içinse boru hatları üzerindeki kritik noktalara karar verilmesi, özellikle yorulma etkisi dikkate alınarak söz konusu kritik noktalar için güvenilirlik tahmini yapılması amaçlanmıştır. Konu güvenilirlik tahmini olduğundan birden çok değişkenin değerlendirmeye alınması gerektiği açıktır. Şekil 1.1.'de bu çalışma özelinde değerlendirmeye alınması amaçlanan değişkenler gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan değişkenler.

Söz konusu değişkenlerin muhtemel olan tüm değerlerinin çalışma kapsamında değerlendirmeye alınması hedeflenmektedir. Literatürde boru hatları özelinde bu çalışmaya benzer şekilde olasılıklı güvenilirlik çözümleri gerçekleştirilmiş olmakla birlikte bu kadar

farklı değişkenin bir arada değerlendirmeye alındığı tek çalışma olması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada elde edilen güvenilirlik değerlerinin boru hatlarının muayene planlamasında bir girdi olarak kullanılması da özgün bir yaklaşımdır. Literatürde boru hatlarının risk bazlı olarak muayene planlamasının yapıldığı çalışmalar elbette mevcuttur. Fakat söz konusu çalışmalarda kullanılan hasar olasılıkları genellikle gözleme dayalıdır ve geçmiş hasar, kaza ve kırımların bir ortalamasıdır. Bu çalışmada ise çok değişkenli ve tamamen olasılıklı bir sayısal çözüm önerilmekte ve bu haliyle çalışma literatürden ayrılmaktadır.

Çalışma kapsamında temel amaca ulaşabilmek için öncelikle boru hatlarının kritik noktalarının tanımlanması, daha sonra bu kritik noktalar için boru hattındaki iç basınca bağlı olarak gerilme artışının tespit edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla tez çalışmasındaki alt amaçlardan birisi kritik noktalar için gerilme konsantrasyon faktörlerinin elde edilmesidir.

Gerilme konsantrasyon faktörleri genellikle geometrik birçok değişkenden etkilenebilmektedir. Bu değişkenler boru çapı, et kalınlığı, muhtemel kusur büyüklüğü, kusur geometrisi vb. şeklinde çoğaltılabilir. Gerilme konsantrasyon faktörlerinin söz konusu geometrik değişkenlere göre alabileceği tüm muhtemel değerleri dikkate alacak bir benzetim gerçekleştirilmesi bir diğer alt amaçtır.

Boru hatlarında değişken iç basıncın etkisiyle uzun vadede yorulmadan kaynaklı olarak kritik noktalarda çatlak oluşumu meydana geleceği öngörülmektedir. Dolayısıyla çalışmada yorulma analizi yapılarak zamana bağlı bir güvenilirlik tahmini yapılmaya çalışılacaktır.

Zamana bağlı olarak elde edilen güvenilirlik verisi kullanılarak boru hatları için risk bazlı yaklaşımla bir muayene planlaması önerilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması neticesinde, boru hattı kullanan işletmelerin, kendi çalışma koşullarını dikkate almak suretiyle güvenilirlik analizi yapabilmeleri ve elde edilen güvenilirlik verileri ile kendi işletmelerine özgü olarak muayene planlaması gerçekleştirebilmeleri için bir model önerilmesi beklenmektedir.

Araştırmanın önemi

Boru hatlarının sıvı veya gaz transferi amacıyla kullanılması diğer transfer yöntemlerine nazaran daha emniyetli bir operasyondur. Boru hatları ile transferde, transferi gerçekleştirilen kimyasalın normal koşullar altında işletme çalışanları veya çevredeki diğer insanlar ile teması söz konusu değildir. Ayrıca diğer transfer yöntemlerinde olduğu gibi kimyasalın taşıma araçlarının birinden diğerine aktarımı da gerekli değildir. Bu avantajlara rağmen boru hatlarında da çeşitli iş kazaları olabilmektedir. Bu iş kazaları genellikle boru hattında meydana gelen bir bütünlük kaybı neticesinde vuku bulmaktadır. Boru hatlarında bütünlük kayıpları, yetersiz yapılmış montajlamadan kaynaklı olabileceği gibi dış etkilere kaynaklı olarak da meydana gelebilir. Hatalı yapılmış kaynak işlemleri veya uygun olmayan mesnet kullanımı hatalı montajlamaya örnek gösterilebilir. Çevresel etkiler ise boru hattının bulunduğu ortamdan kaynaklı oluşabilecek etkilere darbe, titreşim, sel, vb. çevresel etkilere maruz kalabilir. Boru hattı toprak altında dahi olsa toprak kayması, erozyon veya korozyona bağlı olarak da hasar alabilmektedir. Sayılanlara ek olarak boru hattı içerisinde transferi gerçekleştirilen kimyasalın da boru hattının hasar almasında rolü olabilmektedir. Uzun yıllar boyunca sıvı transferi boru hattını aşındırabileceği gibi korozyona neden olabilecek bir kimyasal kullanımı da boru hattının ömrünü kısaltabilir. Söz konusu hasar mekanizmalarına bağlı olarak boru hattında bir bütünlük kaybı meydana gelirse, boru hattında transferi yapılan kimyasal kontrolsüz olarak çevreye saçılacaktır. Boru hatlarında, bilhassa yanıcı ve parlayıcı nitelikte kimyasalların transfer edildiği göz önüne alındığında, bu tarz yayılımlar yangın, parlama veya patlama gibi ikincil olaylara neden olma potansiyeline sahiptir. Çevreye yayılan bir kimyasal çevre için zehirli özellik gösteriyorsa, transferi gerçekleştiren firmaya çevreye verdiği zararlar dolayısıyla idari yaptırım uygulanabileceği gibi yetkili kişiler özelinde hukuki olarak da sorumluluk doğmaktadır. Hatlardaki transfer işlemleri basınç altında yapıldığından bu ve benzeri istenmeyen durumların etkileri geniş alanlar üzerinde de görülebilmektedir.

Açıklanan bu gerekçelerden dolayı boru hatları mekanik bütünlük anlamında güvenilir olmalıdır. Hattın güvenilir olduğundan emin olmanın en etkili yolu da hattı muayene etmektir. Boru hatlarının bir bölümünün yer altında olduğu, bir bölümünün de uzun mesafeler kat ediyor olduğu göz önüne alındığında periyodik olarak muayene edilmesi hem zaman hem de maliyet açısından külfetli olmaktadır. Bu kontrollerin tahribatsız muayene

yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi esastır. Bu yüzden doğru zamanda ve doğru noktalardan kontrol yapılması hattın işletmecileri için önem arz etmektedir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, çok değişkenli bir güvenilirlik analizi yapılarak hattın mekanik bütünlük açısından güvenilirliğini zamana bağlı olarak öngörmeye yönelik bir yöntem tavsiye edilmektedir. Böylelikle işletmeci kendi işletme koşullarını değerlendirecek ve boru hattı üzerinde bir güvenilirlik analizi yapmak suretiyle boru hattı için en düşük maliyetli ve en güvenli kontrol zamanına karar verebilecektir.

Bu alanda önceden yapılmış olan araştırmalar incelendiğinde, boru hatlarında oluşabilecek birbirinden farklı hasar mekanizmalarının değerlendirmeye alınmış olduğu görülmektedir. Buna rağmen, birden çok hasar mekanizması etkisinde kalan boru hatları özelinde bir güvenilirlik analizi çalışmasının eksikliği görülmektedir. Ayrıca çok değişkenli güvenilirlik analizi yapılarak, boru hatları için kontrol planlaması öneren bir araştırma da söz konusu değildir.

Boru hatları ve güvenilirlik üzerine yapılan literatür araştırması, bu alanda sahip olunan mesleki tecrübe ve sektörde görev alan yetkililer ile yapılan birebir görüşmeler neticesinde, bu konu hakkında bilgi eksikliği olduğu, özellikle boru hatlarının muayene planlaması yönünden ulusal mevzuat dışında kullanılabilir veri eksikliği bulunduğu ve bu konuda yapılmış kapsamlı bir akademik çalışma olmadığı değerlendirilmesine varılmıştır. Bu nedenlerle başlık, tez konusu haline getirilerek araştırılmıştır.

Varsayımlar

Çalışma kapsamında boru hatlarında zamana bağlı hasar mekanizması olarak yorulma durumu değerlendirmeye alınmıştır. Boru hatlarında yorulma çeşitli sebeplerle meydana gelebilmektedir. Bunlar; hattın operasyon sayısına bağlı olarak sıfırdan basınçlandırılması, basınçta oluşabilecek ani dalgalanmalar, titreşim, akışın sınırlandırılıp tekrar serbest bırakılması ve yetersiz mesnet kullanımına bağlı tekrarlı salınımlar vb. olarak çoğaltılabilir. Bu çalışma kapsamında, boru hattının operasyon sayısına bağlı olarak sıfırdan basınçlandırılması ve akışın sınırlandırılıp tekrar serbest bırakılması hattaki yorulmanın temel sebepleri olarak varsayılmıştır. Diğer gerekçeler daha düşük gerilme genlikleri yarattığından etkileri sınırlıdır. Bununla birlikte hatların bulunduğu işletmelere özgü ve

gözleme dayalı olarak tespit edilebilecek gerekçelerdir. Dolayısıyla değerlendirme dışı bırakılmıştır. Operasyon sayısına bağlı gerçek çevrim sayıları ve gerilme genlikleri tespiti için ise işletme özelinde takip ve ölçüm gerekmektedir. Bu çalışma her işletmeye uygulanabilir genel geçer bir yöntem önerdiğinden örnek uygulamalardaki çevrim sayıları ve işletme basınçları için varsayım yapılmıştır.

Korozyonun boru hatları üzerinde zayıflatıcı etkisi bulunmaktadır. Özellikle toprak altında bulunan boru hatları için takip edilmesi gereken bir husustur. Bu çalışma kapsamında hasar mekanizması olarak yorulma seçildiğinden, korozyonun boru hattı dış yüzeyinde yaratacağı oyukların boru cidarında oluşturacağı gerilme konsantrasyonu incelemeye alınmıştır. Araştırmalar göstermektedir ki bu oyuklar boru cidarında dikkate değer bir gerilme konsantrasyonu yaratmaktadır [19, 47, 48]. Söz konusu oyuklar borunun maksimum dayanımını düşürecek fakat daha önemlisi korozyon oyuğu çevresinde zamana bağlı olarak oluşacak yorulma çatlaklarıdır. Çalışma kapsamında yorulma hasarları değerlendirmeye alındığından korozyonun boru cidarında zamana bağlı olarak yaratacağı et kalınlığı değişimi ihmal edilmiştir.

Boru hatları kullanıldıkları ortam veya transferi gerçekleştirilen maddenin fiziksel/kimyasal özelliklerine bağlı olarak ısı etkiler altında kalabilmektedirler. Bu çalışma kapsamında doğalgaz ve akaryakıt boru hatları gibi ısı etkilerden uzak boru hatları incelendiğinden boru cidarındaki ısıl gerilmeler ihmal edilmiştir.

Boru cidarında iç basınçtan kaynaklı oluşan gerilme analiz edilirken, eksen yönünde ve çevresel yönde gerilme durumu değerlendirmeye alınmıştır. Radyal yönde gerilme diğerlerine nazaran çok küçük olduğundan ihmal edilmiştir.

Sınırlılıklar

Yorulma zamana bağlı bir hasar mekanizmasıdır. Boru hatlarında yorulmanın etkisi kritik noktalardaki çatlakların takip edilmesiyle tespit edilebilir. Fakat söz konusu çatlakların tespit edilebilir ölçüde büyümesi yıllar alan süreçlerdir. Maalesef ülkemizde hiçbir işletme bu tarz bir veriyi kayıt altına almamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında öngörülen yorulma hasarları, literatürdeki yorulma hasar teorileri kullanılarak hesaplanmaktadır. Yorulma hasarlarının gerçek bir boru hattı üzerinde yapılan kontroller ile tespit edilmesi yıllar

alacağından, çalışma kapsamında elde edilen teorik sonuçların gerçek bir boru hattı üzerinden elde edilen yorulma hasarları ile doğrulanması mümkün olmamıştır.

Tanımlar

Araştırma kapsamında açıklanmasında yarar görülen kavramlar aşağıda tanımlanmıştır.

Çevrim Sayısı: Değişken yükleme koşulları söz konusu olduğunda yükteki tekrar sayısıdır.

Gerilme Dağılımı: Boru cidarındaki gerilmeyi etkileyen değişkenlerin farklı değerleri için elde edilen farklı gerilme değerlerinden oluşan dağılımdır.

Gerilme Genliği: Değişken gerilme durumunda en büyük gerilme ile gerilme ortalaması arasındaki mutlak farktır.

Gerilme Konsantrasyon Faktörü: Boru cidarında gerilme artışı yaratan muhtemel süreksizliklerin neden olduğu gerilme katsayısıdır.

Kritik Nokta: Yorulma etkisi yönünden hassas olan ve yorulmaya bağlı çatlakların öncelikli olarak oluştuğu noktalardır.

Gerilme Ortalaması: Değişken gerilme durumunda en büyük gerilme ile en küçük gerilmenin ortalamasıdır.

Risk: Mevcut tehlikeden kaynaklı kayıp veya zararlı sonuç meydana gelme ihtimalidir.

Risk Değerlendirmesi: Mevcut tehlikelerin gerçekleşmesi durumunda meydana getirebileceği kaybın büyüklüğü ile gerçekleşme olasılığının birlikte değerlendirilmesiyle riskin tespit edilmesidir.

Veri Sayısı: Monte Carlo benzetimi sırasında her bir değişkenin aldığı farklı değerlerin sayısıdır.

Yorulma Dayanımı Dağılımı: Boru malzemesinin mekanik özelliklerindeki çeşitliliğe bağlı olarak elde edilen yorulma dayanımı değerlerinden oluşan dağılımdır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada, yorulma etkisindeki boru hatlarında güvenilirlik tahmini bir problem haline getirilmiş ve çözümü için bir yöntem önerilmiştir. Problemin tanımı ve çalışmanın amacı bir önceki bölümde detaylıca anlatılmıştır. Bu bölümde problem biraz daha teknik boyutuyla ele alınacak ve çözümünde kullanılacak yöntemler özet olarak anlatılacaktır. Ayrıca problemin çözümünden elde edilen çıktıların boru hatlarının muayene planlamasında nasıl değerlendirileceği açıklanacaktır. Çalışmanın ilerleyen bölüm başlıkları altında hangi alt problemlere çözüm arandığı da özet şekilde anlatılacaktır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan boru hatları atmosferik basıncın üzerinde iç basınca sahip hatlardır. Boru yüzeyindeki gerilmenin kaynağı da söz konusu bu iç basınçtır. Bu iç basınç akışın fiziksel durumuna göre boru üzerinde hem eksen yönünde hem çevresel yönde gerilmeye sebebiyet vereceğinden söz konusu iki gerilme durumu da değerlendirmeye alınmıştır. Yine çalışma kapsamında yorulmaya sebep olacak gerilme genliği ve çevrim sayısının söz konusu iç basınçta oluşacak muhtemel değişimler olduğu kabul edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan boru hatlarının yüzeyinde çeşitli kusurlar mevcuttur. Boru yüzeyinde gerilme konsantrasyonu yaratan her oluşum yüzey kusuru olarak kabul edilmiş ve boru hattı için kritik nokta olarak değerlendirmeye alınmıştır. Bu kritik noktalar yorulma çatlaklarının başlangıç gösterdiği noktalardır ve yorulma hasarlarının bu bölgelerde oluşması beklenmektedir. Çalışmada her bir yüzey kusuru için bir bölüm ayrılmıştır.

Çalışma güvenilirlik hesaplama iddiasında olduğundan, sonucunda bir hasar olasılığı sunmalıdır. Bir olasılık elde edileceğine göre sonucu etkileyecek değişkenler rastgele olmalıdır. Çelik boruların geometrik özellikleri bir değişkendir ve üretim toleransları problemi rastgele yapan sebeplerden birisidir. Yüzey kusurlarının geometrik özellikleri de başka bir etkidir ve boru hattı yüzeyinde farklı adet ve büyüklükte ortaya çıkabilecekleri göz önüne alındığında bir diğer rastgele değişkendir. Bu tarz yüzey kusurlarının bir veya birden fazlasıyla yeterli uzunlukta bir boru hattı üzerinde binlerle ifade edilecek sayılarda karşılaşılabılır. Hattın her noktası sürekli gözlem altında tutulamayacağına göre bu durum da problemde dikkate değer bir çeşitlilik yaratmaktadır. Boru hatları için belirlenmiş bir işletme basıncı söz konusudur. Fakat işletmedeki operasyona bağlı olarak söz konusu basınç da değişkenlik gösterebilir ve bu durum da başka bir rastgele değişken olarak karşımıza

çıkılmaktadır. Anılan bu rastgele değişkenlerin hepsi boru cidarındaki gerilmenin büyüklüğünü etkileyecek olup problemdeki gerilme dağılımını oluşturacaktır. Problemdeki bir diğer rastgele değişken ise borunun üretildiği malzemenin mekanik özellikleridir ve bu durum borunun yorulma dayanımını doğrudan etkilemektedir. Mekanik özellik rastgele değişkeni problemde yorulma dayanımı dağılımı olarak tanımlanmıştır. Güvenirlik anılan bu rastgele değişkenlerin her birinin değerlendirmeye alınmasıyla hesaplanmalıdır.

Güvenirlik yorulmaya bağlı olduğundan zamanla değişmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen çıktılar muayene planlaması amacıyla kullanılacağından elde edilen sonuçların hasar olasılığı olarak sunulması uygun görülmüştür. Zamana bağlı olarak değişen hasar olasılığı, hattın riskini zamana bağlı olarak değiştirmektedir. Bu riskin hesaplanmasıyla da en uygun muayene zamanına karar verilebilir.

Çalışmanın Üçüncü Bölümü'nde kaynaklı birleştirmeler değerlendirmeye alınmıştır. Kaynaklı birleştirmeler boru hatlarındaki kritik noktalardan birisidir. Aslında kaynaklı birleştirme bir kusur değil olağan bir uygulamadır. Fakat kaynaklı birleştirme noktalarında meydana gelen boru eksenli eksantrikliği bir montaj kusuru olarak değerlendirilebilir. Bu montaj kusuru boru yüzeyinde gerilme artışına sebebiyet verdiği için bu çalışma kapsamında bir yüzey kusuru gibi değerlendirmeye alınmıştır. Bu durum güvenilirliği etkileyen üretim kaynaklı değişkenler kapsamında değerlendirilmiştir. Gerilme konsantrasyon faktörü çok değişkenli olarak tahmin edilmiş ve güvenilirlik analizi yapılarak yorulmaya bağlı hasar olasılığı elde edilmiştir. Tahmin, benzetim gerçekleştirilerek yapılmış olup literatürdeki analitik çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde dikkate alınan gerilme konsantrasyon faktörü, çalışmanın diğer bölümlerinden farklı olarak eksen yönündeki gerilme ile ilişkilidir. Her ne kadar iç basınç kaynaklı çevresel yönde gerilme daha büyük olsa da kaynak dikişleri boru eksenine dik olduğundan dikkate alınması gereken gerilme eksen yönlüdür.

Çalışmanın Dördüncü Bölümü'nde boru yüzeyindeki göçükler değerlendirmeye alınmıştır. Bu yüzey kusurları genellikle darbeler sonucu olduğundan güvenilirliği etkileyen çevresel koşullar başlığı altında değerlendirilmiştir. Göçükler de gerilme konsantrasyonu yaratmakta ve çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Göçük çapı ve derinliğinin söz konusu gerilme konsantrasyonunu etkilediği düşünülmektedir. Göçükler, özellikle yer üstü boru hatlarında çevresel faktörlere bağlı olarak çok sayıda meydana gelebilmektedir. Göçüklerin geometrik

özellikleri birbirinden farklı olacağından çok değişkenli bir güvenilirlik hesaplaması yapılarak yorulmaya bağlı hasar olasılığı tespit edilmiştir. Gerilme konsantrasyon faktörü tahmini için benzetim gerçekleştirilmiş olup sonuçlar literatürden deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Beşinci Bölüm korozyon ile ilişkilidir. Boru hatları için oldukça tehlikeli bir hasar mekanizmasıdır. Çevresel koşullara bağlı olarak dıştan oluşabileceği gibi hatta akan kimyasalın özelliklerine bağlı olarak iç yüzeyde de meydana gelebilir. Boru cidar kalınlığında incelmeye sebebiyet verebilir. Belirli aralıklarla yapılacak cidar kalınlığı ölçümleri ile düzenli olarak kontrol edilmelidir. Daha önemli olan ve bu çalışmada dikkate alınan etki ise noktasal olarak malzeme kaldırmak suretiyle cidarda oyuklar meydana getirmesidir. Bu oyuklar gerilme konsantrasyonu yaratır ve yorulma çatlaklarına zemin hazırlamaktadır. Literatürde sınırlı çalışma vardır ve gerilme konsantrasyonu tespitine yönelik deneysel çalışmaya rastlanmamıştır. Gerilme konsantrasyon faktörü tahmini için benzetim gerçekleştirilmiştir. Boru hattı boyunca küçüklü-büyük binlercesi oluşabileceği düşünüldüğünde çok değişkenli bir güvenilirlik hesaplaması yapılması elzemdir. Bu şekilde yorulmaya bağlı hasar olasılığı tahmini yapılarak sonuçlar ilgili bölümde sunulmuştur. Korozyon da yine güvenirliliği etkileyen çevresel faktörler kapsamında değerlendirmeye alınmıştır.

Çalışmanın Altıncı Bölümü'nde üretime bağlı olarak meydana gelmesi muhtemel iç yüzey kusurları incelemeye alınmıştır. Söz konusu kusurların dikişsiz çelik boruların üretimi aşamasında haddeleme sırasında meydana geldiği düşünülmektedir. Güvenirliliği etkileyen üretim kaynaklı değişkenler kapsamında değerlendirilmiştir. Bu kusurlar da korozyon oyuklarına benzer formasyondadır fakat oluşma mekanizmaları farklıdır. Boru iç yüzeyinde gerilme konsantrasyonu oluşturmaktadır ve çatlak gelişimi ihtimali mevcuttur. Bu çalışma kapsamında söz konusu yüzey kusurları için yorulmaya bağlı hasar olasılığı incelenmiş olup literatürde benzer bir araştırmaya rastlanmamıştır.

Yedinci Bölüm' de ise gerçek bir boru hattı üzerinde yöntemin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeye alınan boru hattı Türkiye'de faaliyet gösteren bir akaryakıt terminali ile rafineri arasında kuruludur. Uygulamada boru hattında gerçekleştirilmiş olan bir muayeneden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler ışığında yorulmaya bağlı hasar olasılığı hesaplanarak bir sonraki en uygun muayene zamanı kararlaştırılmıştır.

Çalışmanın ilgili bölümlerinde detaylandırılan, farklı yüzey kusurları için yürütülmüş olan güvenilirlik analizlerinin tümü bu çalışma kapsamında önerilen model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma kapsamında kullanılan tüm teorik ve pratik yöntemler ile önerilen model aşağıda anlatılmıştır.

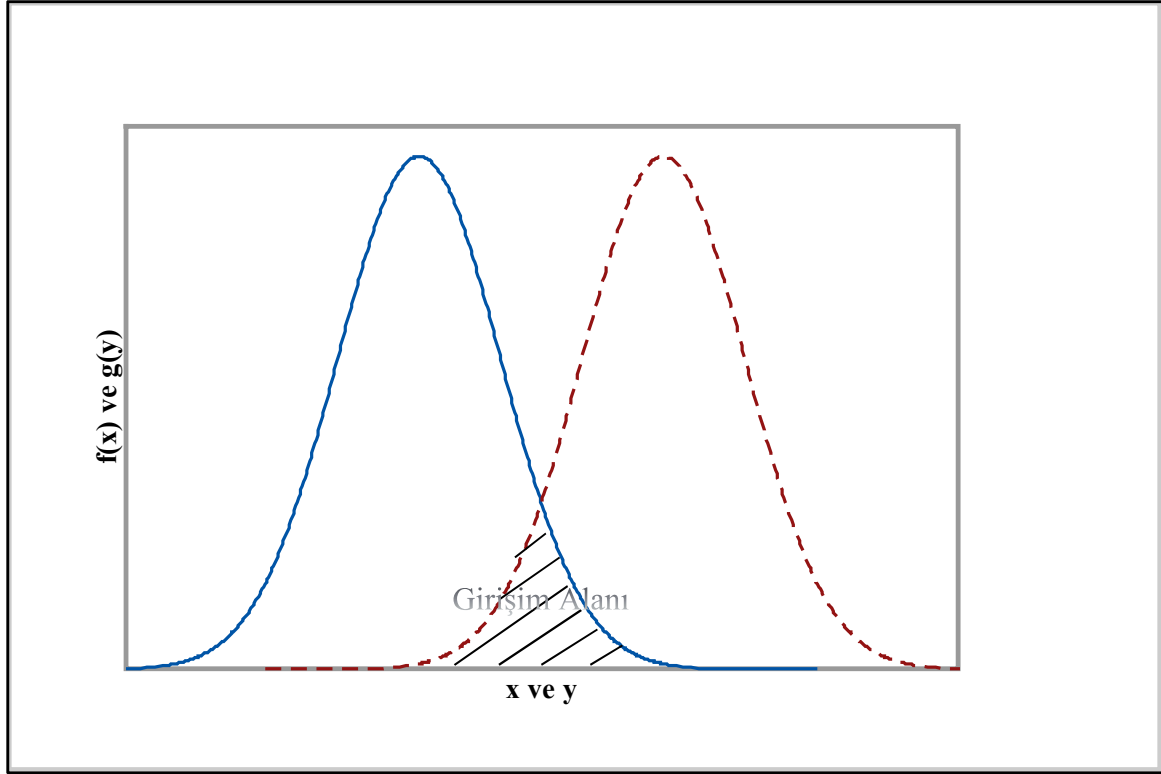
2.1. Gerilme – Dayanım Girişim Teorisi

Güvenilir bir tasarım gerçekleştirebilmek için kullanılan bu yaklaşım [10], güvenilirliği etkileyen değişkenlerin belirlenmesi ve gerilme – dayanım dağılımlarının tanımlanması suretiyle geliştirilmiştir [49]. Bu çalışmada ise hali hazırda tasarımı yapılmış bir ekipmanın doğasında bulunan veya kullanımı sırasında maruz kalabileceği rastgele faktörlerin etkisi ile güvenirliliğinin ne şekilde etkilendiğini tahmin edebilmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde güvenilirlik, dayanım değerinin gerilme değerini aşma olasılığı olarak tanımlanır. Gerilmenin dayanıma eşit olduğu veya aştığı koşulda ise hasar meydana gelmektedir.

$$\begin{aligned}
 R_e &= P_r[\text{Dayanım} > \text{Gerilme}] \\
 &= P_r[Y > X] \\
 &= P_r[Y - X > 0]
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Eş. 2.1 'de “Y” dayanım rastgele değişkeni ve “X” gerilme rastgele değişkeni olmak üzere, “ $f(x)$ ” ve “ $g(y)$ ” bu değişkenlere ait olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır. Şekil 2.1.'de normal dağılımlar için olasılık yoğunluk fonksiyonları grafik olarak sunulmuştur. “ $F(x)$ ” ve “ $G(y)$ ” rastgele değişkenlere ait birikimli dağılım fonksiyonları olmak üzere güvenilirlik Eş. 2.2 ile elde edilir [2].

$$\begin{aligned}
 R_e &= P_r[Y > X] \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} g(y) \left(\int_{-\infty}^y f(x) dx \right) dy \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} g(y) F(y) dy \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \left(\int_x^{\infty} g(y) dy \right) dx \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) (1 - G(x)) dx
 \end{aligned} \tag{2.2}$$



Şekil 2.1. Gerilme ve dayanım rastgele değişkenlerine ait olasılık yoğunluk fonksiyonları.

Bu çalışmada ulaşılmak istenen hasar olasılığı ise aşağıda gösterilen Eş. 2.3 ile elde edilir.

$$H = 1 - R_e \quad (2.3)$$

Güvenirliği veya hasar olasılığını hesaplamak için kullanılan farklı yaklaşımlar literatürde yer almaktadır. Bu yaklaşımların önemli bir bölümü sınır değer fonksiyonunu tahmin edebilmek üzerine odaklanmıştır [13, 14, 50, 51]. Yapılan bu çalışmada ise hasar olasılığının tahmininde Monte Carlo benzetimi yönteminden yararlanılmıştır.

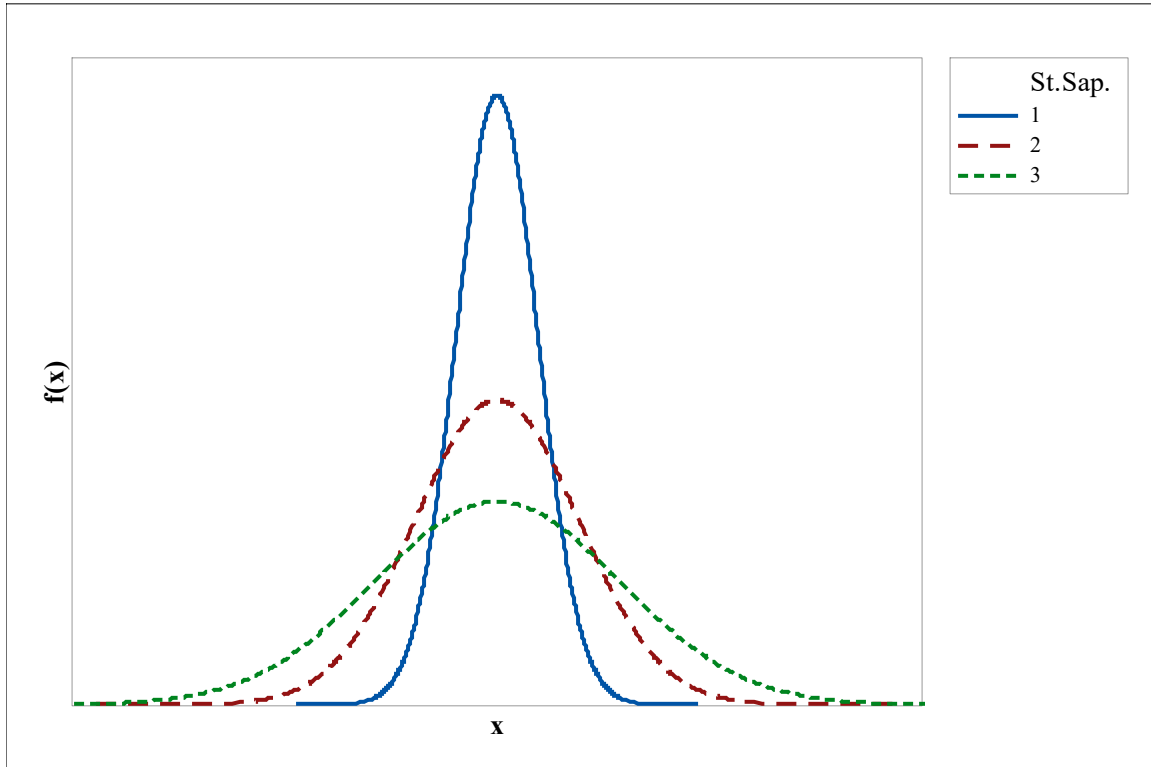
Bu çalışmada değişkenlerin sürekli dağılım gösterdikleri varsayılmıştır. Şekil 2.1.'de normal dağılım gösteren değişkenler için olasılık yoğunluk fonksiyonlarına ait grafikler gösterilmektedir. Fakat söz konusu değişkenlerin dağılımları farklı eğilimlere de sahip olabilmektedir. Aşağıda güvenlik analizinde sıklıkla kullanılan sürekli dağılım tipleri tanımlanmıştır [2].

2.1.1. Normal dağılım

Gauss dağılımı olarak da adlandırılmaktadır. Bir dağılım birden çok rastgele değişkenin toplamından etkileniyorsa normal dağılım göstermesi beklenmektedir. Normal dağılımda baskın olan bir değişkenin etkisi söz konusu değildir. Bir malzemenin mekanik özelliklerindeki çeşitliliğin, bir endüstriyel ürünlerdeki boyutsal çeşitliliğin veya ölçüm hatalarının normal dağılım göstermesi söz konusudur. Normal dağılım çeşitli sistemlerin mekanik, elektronik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini modellemek için kullanılabilmektedir. Normal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 2.4'te sunulmuştur.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{st}\sqrt{2\pi}} \exp \left[\left(-\frac{1}{2} \right) \left(\frac{x-\mu}{\sigma_{st}} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

Burada “ μ ” dağılıma ait ortalamayı, “ σ_{st} ” dağılıma ait standart sapmayı temsil etmektedir. Şekil 2.2. normal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonunun şeklini göstermektedir.



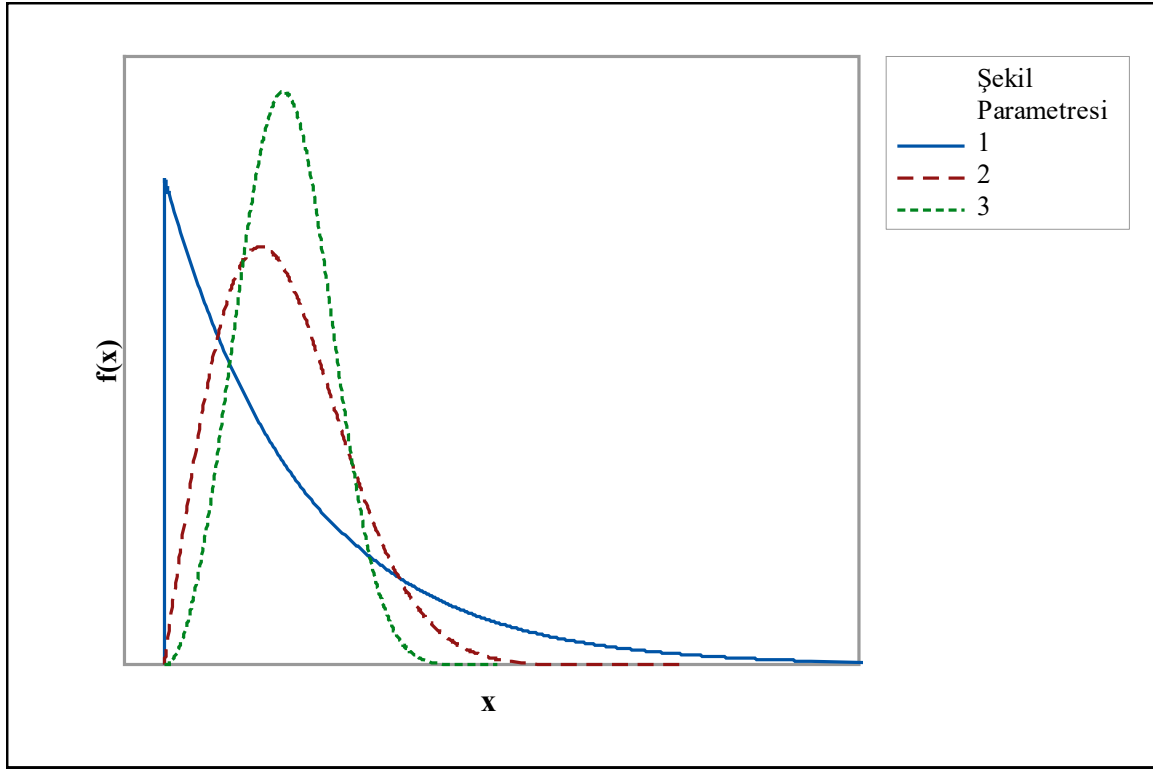
Şekil 2.2. Farklı standart sapma (σ_{st}) değerleri için normal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği.

2.1.2. Weibull dağılımı

Weibull dağılımı, 1939 yılında Waloddi Weibull tarafından geliştirilmiş olan sürekli bir dağılımdır. 1951 yılında da yine kendisi tarafından detayları yayınlanmıştır [2]. Geniş çeşitlilikte hasar oranı eğrilerinin modellenmesine imkân tanıdığından Weibull dağılımı güvenilirlik analizinde sıklıkla kullanılır. Ayrıca Weibull dağılımı çeşitli mühendislik ürünlerinin ömür hesaplamalarında kullanılabileceği gibi güvenilirlik testleri, malzeme dayanımları tahmini ve garanti analizleri gibi alanlarda da kullanılabilmektedir. Weibull dağılımına ait üç parametrelilik olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 2.5'te sunulmuştur.

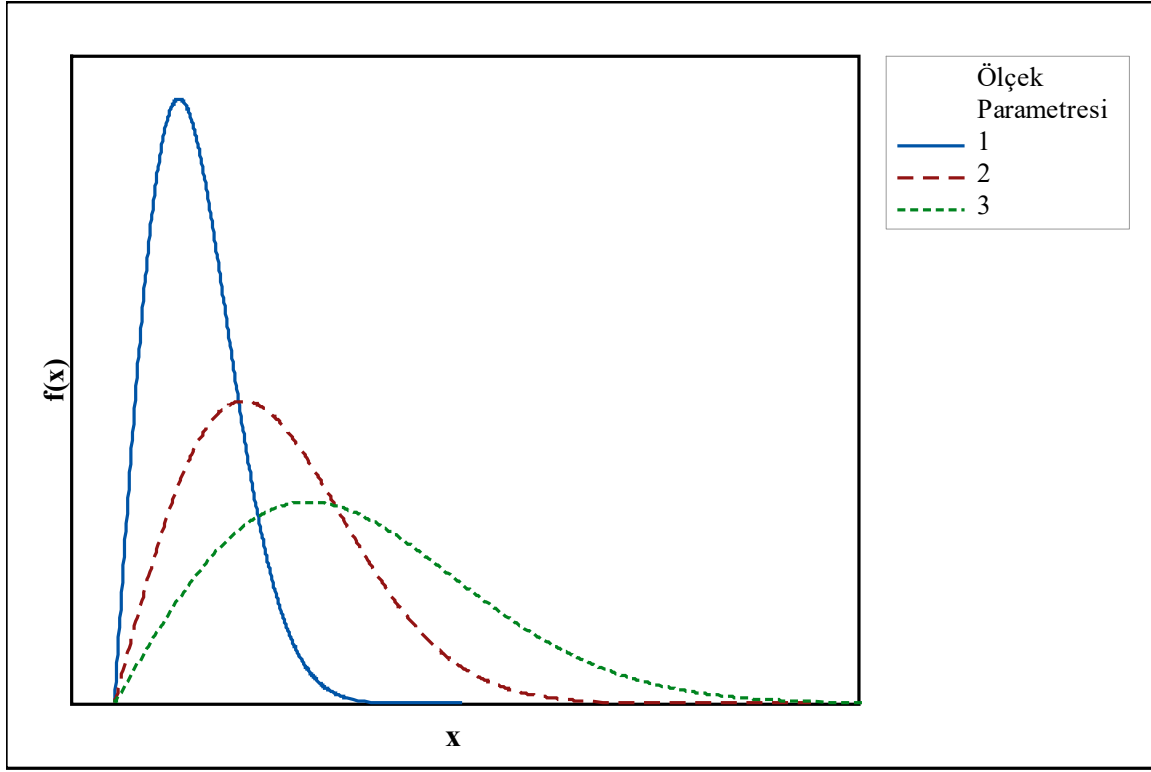
$$f(x) = \beta \eta^{-\beta} (x - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2.5)$$

Burada “ $\beta > 0$ ” şekil parametresi, “ $\eta > 0$ ” ölçek parametresi ve “ γ ” konum parametresi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.3.’te farklı şekil parametrelerine sahip Weibull dağılımları için olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri görülmektedir.



Şekil 2.3. Farklı şekil parametrelerine (β) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\eta = 2$).

Şekil 2.4.'te farklı ölçek parametrelerine sahip Weibull dağılımları için olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri görülmektedir. Şekil 2.5.'te ise farklı konum parametrelerine sahip Weibull dağılımları için olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri görülmektedir.



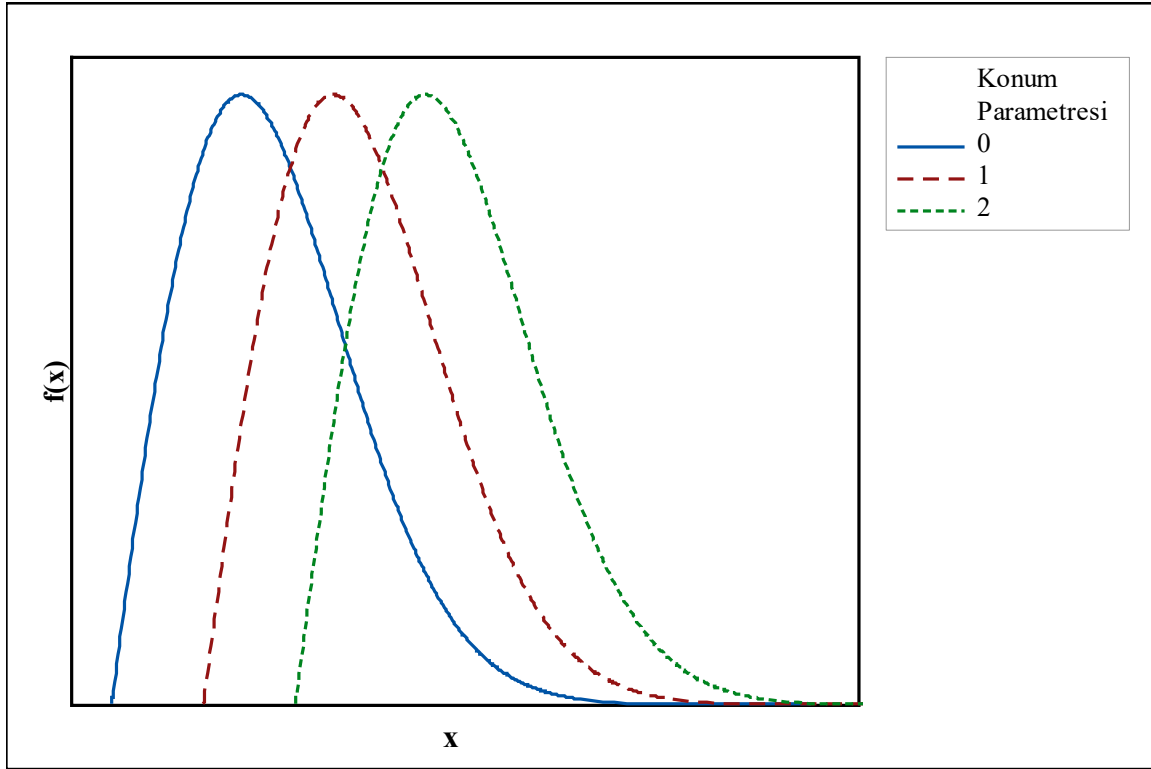
Şekil 2.4. Farklı ölçek parametrelerine (η) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\beta = 2$).

2.1.3. Üstel dağılım

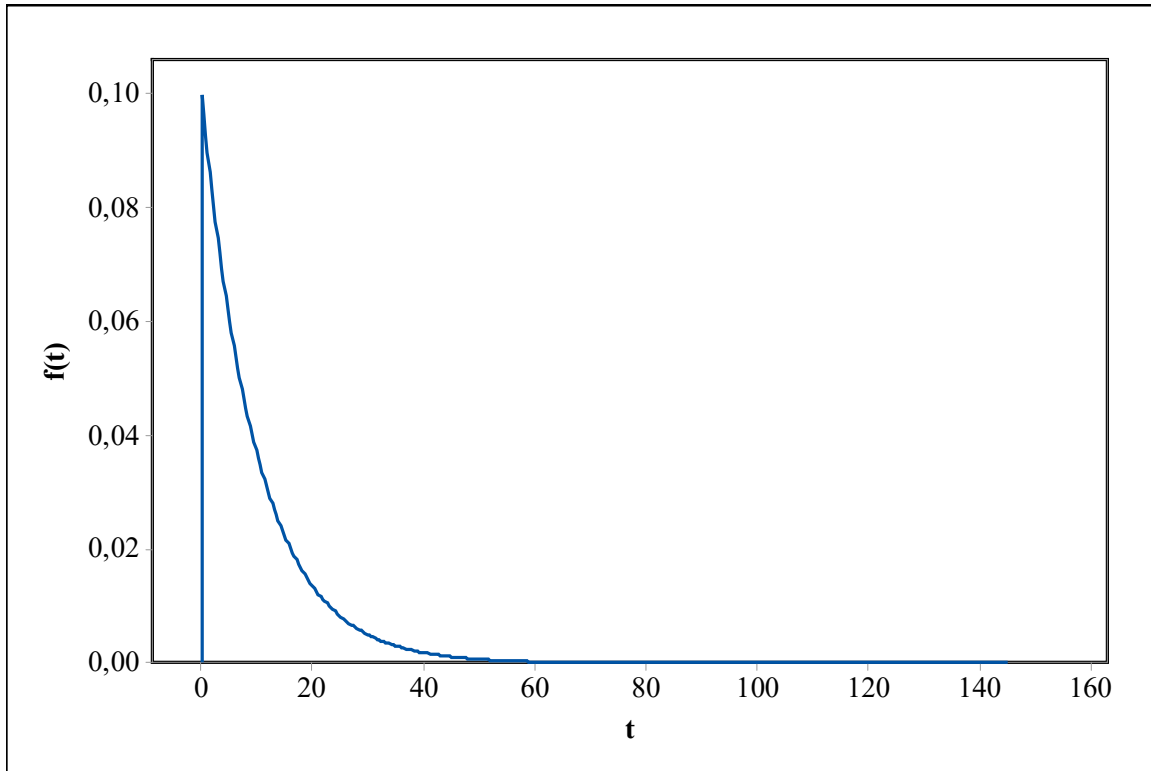
Üstel dağılım, Weibull dağılımındaki şekil parametresinin bir kabul edildiği ($\beta = 1$) özel bir durumu temsil eden tek parametrelili bir dağılımdır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 2.6'da görüldüğü gibidir.

$$f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}, t \geq 0 \quad (2.6)$$

Burada " λ_0 " çoğunlukla sabit hasar oranı olarak tanımlanan pozitif gerçek bir sayıdır. Şekil 2.6.'da üstel dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonuna ait grafik sunulmuştur.



Şekil 2.5. Farklı konum parametrelerine (γ) sahip Weibull dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri ($\beta = 2$, $\eta = 2$).



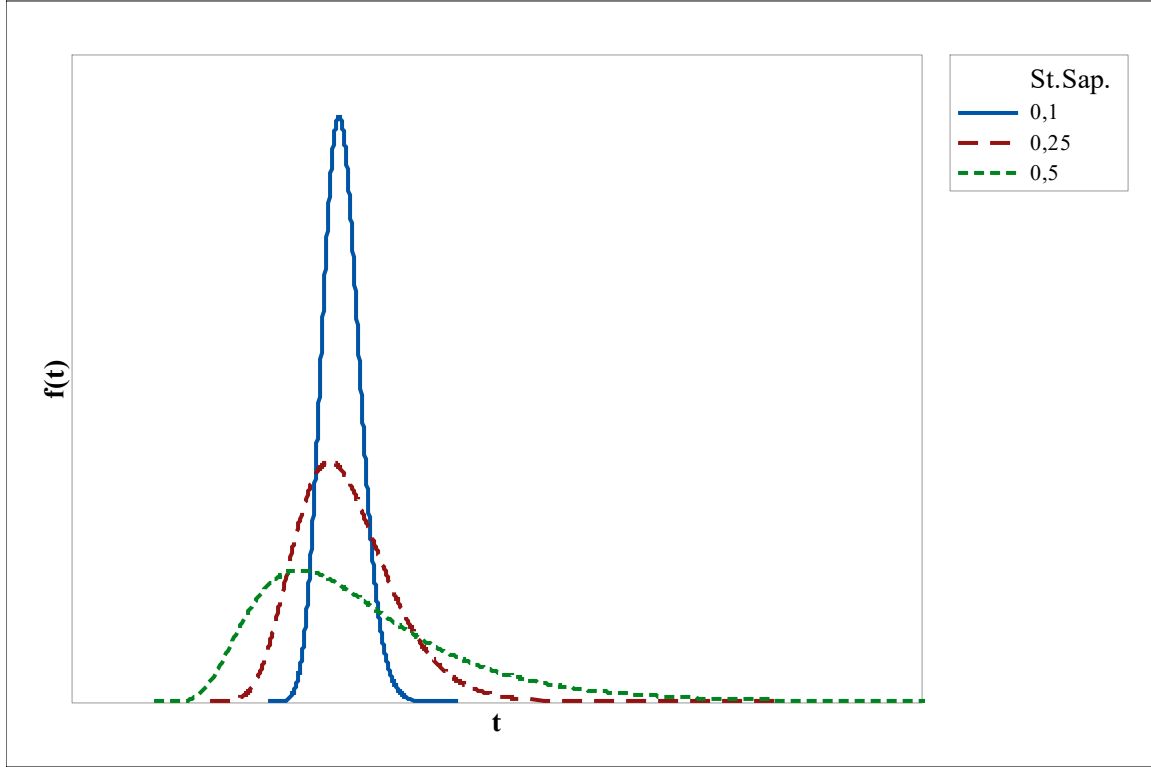
Şekil 2.6. Üstel dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu grafiği ($\lambda_0 = 0,1$).

2.1.4. Lognormal dağılım

Sürekli bir rastgele değişken, bir dizi rastgele değişkenin bir ürünü olarak ortaya çıkabilir. Lognormal dağılım, pozitif olarak çarpık bir dağılımdır ve büyük oluşumların aralığın sol kuyruk ucunda yoğunlaştığı durumları modellemek için kullanılmaktadır. Farklı müşteriler tarafından kullanılan elektrik miktarı, sistemlerin arızalı geçirdiği süreler, onarım süreleri veya ampullerin ışık yoğunlukları lognormal dağılımlara örnek olarak gösterilebilir. Örneğin, bir mekanik sistemdeki aşınma, sistemin üzerine etki eden yüklerin büyüklüklerinin çarpımı ile orantılı olabilir. Böylece bir rastgele değişken, her biri pozitif olan birçok bağımsız rastgele değişkenin çarpım ürünü olarak düşünülebilir. Lognormal rastgele değişken olarak modellenenebilir. Ayrıca mekanik elemanlarda yorulmadan kaynaklı hasarları tanımlamak amacıyla güvenilirlik mühendisliğinde lognormal dağılımlardan yararlanılabilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 2.7’de sunulmuştur.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_{st} t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma_{st}} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

Şekil 2.7.’de lognormal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri farklı standart sapma değerleri için sunulmuştur.



Şekil 2.7. Farklı standart sapma (σ_{st}) değerlerine sahip lognormal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu grafikleri.

2.2. Monte Carlo Benzetimi

Monte Carlo benzetimi, matematiksel fonksiyonların sonuçlarını tahmin etmek ve karmaşık sistemlere ait süreçleri taklit etmek üzere geliştirilen bir modelleme yöntemidir. Yöntem, İkinci Dünya Savaşı yıllarında nükleer silah geliştirme amacıyla ortaya çıkmıştır. İsmi Monako'da bulunan Monte Carlo Gazinosu'ndan esinlenilerek konulmuştur. Monte Carlo benzetimi analitik olarak çözümü çok zor olan, deney yapılması ise uzun zaman alan, maliyetli olan veya pratik olmayan problemlerin çözümleri için sık kullanılan bir bilimsel araçtır [52] [53]. Problemi tanımlayan fonksiyonun çözümü için ne kadar çok rastgele veri üretilirse sonuca o kadar yaklaşılmaktadır. Fakat gereğinden fazla veri kullanımı da hesaplama sürelerini uzatmaktadır.

Problem içerisindeki değişkenler olasılık yoğunluk fonksiyonları şeklinde tanımlanarak benzetime dahil edilir (Bkz. Şekil 2.1.). Bu çalışma kapsamında ele alınan problem için değişkenlerin normal dağılım gösteriyor olduğu kabul edilmiştir. Normal dağılıma ait olasılık yoğunluk fonksiyonu ilgili eşitlikte (Bkz. Eş. 2.4) sunulmuştur.

Benzetimdaki normal dağılımları elde edebilmek için (0-1) aralığındaki rastgele sayılara ihtiyaç duyulmaktadır. Problemde tanımlı değişkenler doğası itibariyle rastgele olmasına rağmen bunu bilgisayarların kendi kendine yapabilmesi pek olası değildir. Literatürde bu amaç için elektronik ortamda sahte rastgele sayılar üretilebilecek algoritmalar mevcuttur ve bunlar rastgele sayı üreticileri olarak anılmaktadırlar. En bilinen ve eski olanlarından birisi doğrusal eşlenik üreticidir. Bu yöntemde “n.” rastgele sayı “ Z_n ” olmak şartıyla bir sonraki rastgele sayı olan “ Z_{n+1} ” Eş. 2.8’de görüldüğü gibi elde edilebilir [53]. Eşitlikteki “a”, “c” ve “m” rastgele sonuçları üretmek için kararlaştırılan sabit sayılardır.

$$Z_{n+1} = (aZ_n + c) \bmod m \quad (2.8)$$

“X” sürekli bir rastgele değişken ve “F” bu değişkene ait dağılım fonksiyonu olmak üzere, Z (0,1) rastgele sayısı için Eş. 2.9’daki dönüşüm yapılırsa “X” rastgele değişkenine ait dağılım elde edilebilir.

$$F^{-1}(z) = X \quad (2.9)$$

Yürütülen bu çalışmada değişkenlere ait dağılımların normal dağılıma uygun olduğu varsayılmıştır. Problemdeki değişkenlerin normal dağılımları ise MINITAB yazılımının “Normal Dağılım” fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Problemdeki değişkenlerin bir bölümü gerilme normal dağılımını, bir bölümü ise dayanım normal dağılımını meydana getirmektedir. Elde edilen bu dağılımlardaki veriler kullanılarak Eş. 2.1 ve Eş. 2.3 çözümlerse probleme ait hasar olasılığı elde edilebilir.

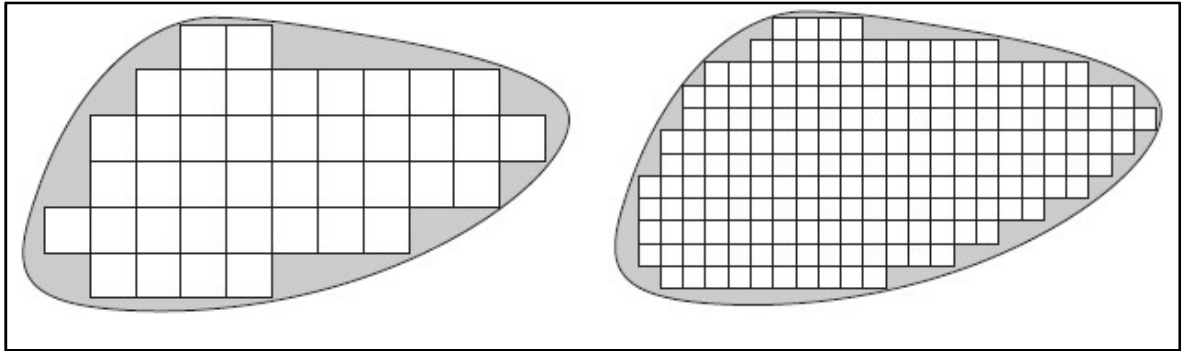
2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Düzgün geometrili şaft, kiriş, profil, çubuk vb. mekanik elemanların gerilme analizinde analitik çözümler yapmak görece daha kolaydır. Fakat gerçek hayattaki mühendislik problemleri daha karmaşık geometrili olarak karşımıza çıkmakta, daha pratik ve kabul edilir ölçüde yaklaşık sonuçlar üretme ihtiyacı doğmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi de bu ihtiyaca çözüm olabilmek amacıyla ortaya çıkmıştır.

Yöntem çubuk veya kiriş geometrili katı yapısal elemanlar üzerinde gerilme analizi gerçekleştirilerek 1940’lı yıllardan itibaren ilerlemiştir [54, 55, 56]. 1943’te burulma problemlerini modellemek için yeni bir yöntem olarak üçgen alt bölgelere ayrılmış parçalı

sürekli fonksiyonlar önerilmiş ve yöntem böylelikle yaygınlaşmıştır [57]. 1950'li yıllara gelindiğinde bilgisayarların da ortaya çıkmasıyla birlikte, mühendisler için katılık denklemlerini matris biçiminde yazmak ve çözmek pratik hale gelmiştir [58, 59]. Sonlu eleman terimi ilk kez 1960 yılında Clough tarafından düzlem gerilme analizi sırasında kullanılmış olup o zamandan beri yaygın olarak kullanılmaktadır [60]. 1960'lar ve 1970'lerde sonlu elemanlar yöntemi, levha ve kabuk yapılar için eğilme işlemlerine, basınçlı kaplara ve yapısal analizdeki genel üç boyutlu elastik problemlere uygulanmıştır [61, 62, 63, 64]. Daha sonra uygulama alanı akışkanlar mekaniği ve ısı transferi konuları üzerine genişletilmiştir [65, 66].

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislikte analitik veya deneysel olarak çözülmesi zor olan veya zaman alan sınır değer problemlerinin yaklaşık çözümlerini elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Sınır değer problemi ise, bir veya birden fazla bağımlı değişkenin, bağımsız değişkenler ile tanımlanmış bir alanın içindeki her yerde bir diferansiyel denklemi, alanın sınırında da belirli koşulları sağladığı matematiksel bir problemidir. Söz konusu alan çoğu kez fiziksel bir yapıyı temsil etmektedir. Alan değişkenleri, diferansiyel denklem tarafından yönetilen bağımlı değişkenlerdir. Sınır koşulları ise alan değişkenlerinin alanın sınırlarında aldığı özel değerleridir. Analiz edilen fiziksel problemin tipine bağlı olarak alan değişkenleri yer değiştirme, sıcaklık, ısı akısı veya akışkan hızı olabilir [67].



Şekil 2.8. Sonlu elemanlar ağı oluşturma (Solda 41 elemanlı kaba, sağda 192 elemanlı ince ağı).

Sonlu elemanlar yönteminde bir fiziksel alanı temsil etme işlemine ağı oluşturma denir. Ağı oluşturma aşamasında yaygın olarak kullanılan eleman geometrilerinin çoğu düz kenarlara sahiptir. Söz konusu alan doğrusal olmayan sınırlar içeriyorsa, fiziksel alanın tamamını eleman ağına dahil etmek genellikle imkansızdır. Bu durum Şekil 2.8.'de örneklenmiştir

[67]. Burada düzgün olmayan sınırlara sahip bir alan önce daha kaba kare elemanlar kullanılarak temsil edilmiştir. Daha sonra ise aynı tipte fakat daha küçük, daha çok sayıda eleman kullanılarak aynı alan iyileştirilmiş bir şekilde temsil edilmiştir. İyileştirilmiş ağın sonlu eleman analizinde önemli ölçüde daha fazla fiziksel alanı temsil ettiği ve doğrusal olmayan sınırlara daha çok yaklaştığı görülmektedir. Bu sebeple ağ eleman sayısı arttıkça çözüm gerçek sonuca yakınsamaktadır [67].

Sonlu elemanlar yöntemi, yaklaşık sonuç veren sayısal bir teknik olduğundan hatalar söz konusu olabilmektedir. Bu hatalar aşağıdaki gibi özetlenebilir [68].

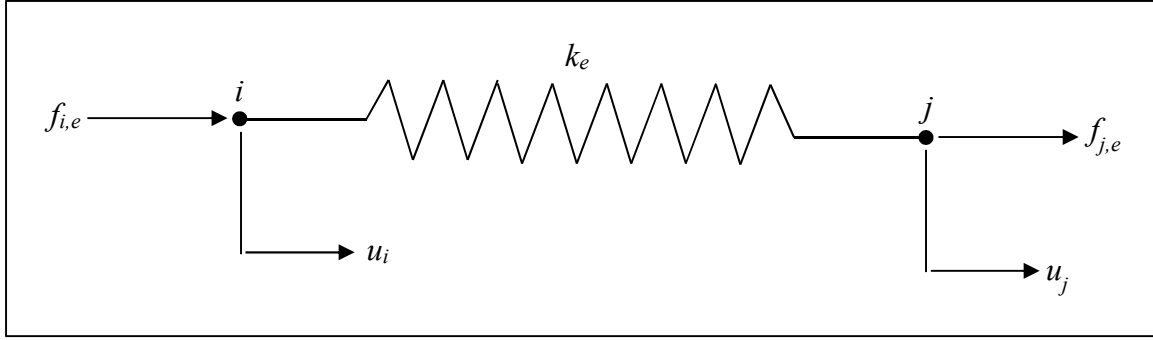
Hesaplama Hataları: Bilgisayar hesaplamalarından ve kullanılan sayısal entegrasyon şemalarının formüllerinden kaynaklanan yuvarlama hataları olarak tanımlanabilir. Çoğu ticari sonlu eleman kodu bu hataları azaltmaya odaklanır ve sonuç olarak analizi gerçekleştiren uzmana genellikle ayırıklaştırma etkisiyle ilgilenmek kalmaktadır.

Ağ Oluşturma Hataları: Gerçek bir yapının geometrisi ve yer değiştirme dağılımı değişiklik göstermektedir. Yapıyı modellemek için sonlu sayıda eleman kullanmak, elemanların doğasında bulunan matematiksel sınırlamalardan dolayı geometriyi ve yer değiştirme dağılımını temsil etmekte hatalara neden olmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi süreci basit tek boyutlu bir problem olan lineer kafes elemanı problemi üzerinden açıklanabilir. Bir kafes elemanı, çeki veya bası ile yüklenmiş bir çubuktur. Sabit kesit alanı “A”, uzunluğu “l” ve elastik modülü “E” olarak tanımlanmıştır. Temel kafes elemanının iki düğümü vardır ve tek boyutlu bir problem olduğundan her bir düğümün yalnızca bir serbestlik derecesi mevcuttur. Bir lineer kafes elemanı, yay sabiti Eş. 2.10’daki gibi olan basit bir doğrusal yay şeklinde modellenebilir [68].

$$k = \frac{AE}{l} \quad (2.10)$$

Şekil 2.9.’da “i” ve “j” olmak üzere iki düğüme sahip, yay sabiti “k_e” olan bir yay elemanı gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yay elemanı.

Sağa yönlü olan tüm “F” kuvvetlerinin ve “u” yer değiştirmelerinin pozitif olduğu varsayıldığında, her bir düğümdeki kuvvetler Eş. 2.11’deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} f_{i,e} &= k_e(u_i - u_j) = k_e u_i - k_e u_j \\ f_{j,e} &= k_e(u_j - u_i) = -k_e u_i + k_e u_j \end{aligned} \quad (2.11)$$

Söz konusu iki eşitlik matris şeklinde Eş. 2.12’deki gibi yazılabilir.

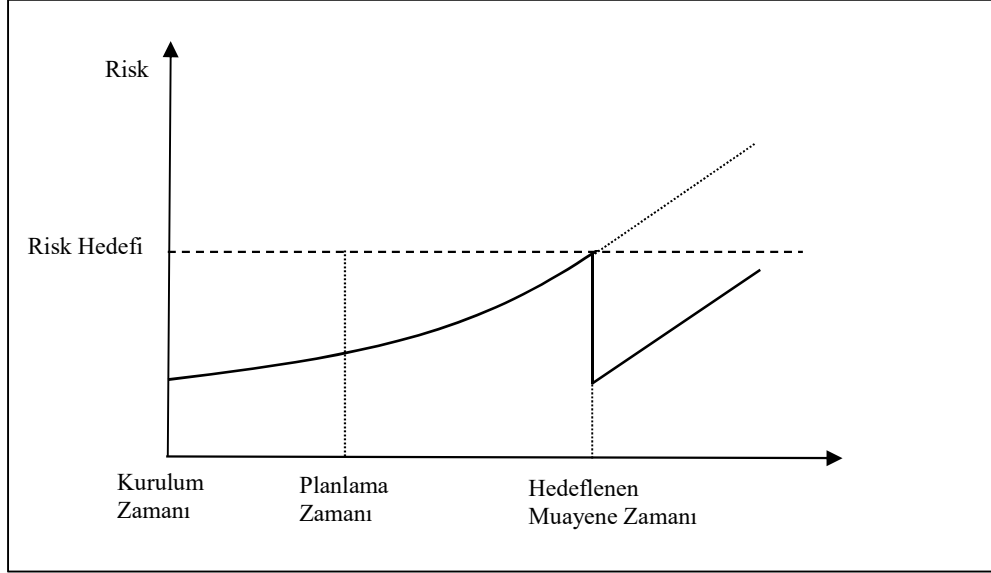
$$\begin{bmatrix} f_{i,e} \\ f_{j,e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_e & -k_e \\ -k_e & k_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Görüldüğü gibi matris formuna getirilerek basitleştirilen ve çoğaltılan denklemler bilgisayar ortamında kolaylıkla çözülebilir. Bu şekilde doğrusal olmayan mekanik problemler için yaklaşık sonuçlar elde edilebilir.

2.4. Risk Bazlı Muayene Yöntemi

Bu yöntem, akaryakıt, gaz veya kimyasal tankları, boru hatları, ısı değiştiriciler, emniyet vanası gibi basınçlı ekipmanların muayene planlamasını risk bazlı olarak gerçekleştirebilmek için sayısal bir prosedür önermektedir [31]. Risk bazlı muayene yönteminde riskin tespiti, başarısızlık olasılığı ile başarısızlığın olası sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle gerçekleştirilir. API 581’e göre başarısızlık, basınçlı ekipmandan çevreye yönelik bir sızıntıya neden olan bütünlük kaybı veya basınçlı bir bileşenin yarılması olarak tanımlanır. İşletim sırasında basınçlı bir ekipmanda hasar birikirse, başarısızlık riski

artar. Bir mertebeden sonra ise işletme risk toleransı veya risk hedefi aşılar ve ekipmanın hasar durumunu daha iyi ölçmek için bir periyodik muayene yapılması önerilir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Risk bazlı muayene planlaması.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta, muayene eyleminin kendisinin riski azaltmadığı sadece bilgi eksikliğini azalttığıdır. Böylece ekipmanda mevcut hasarın daha iyi ölçülmesine izin verilir [31]. Riskin büyüklüğü en basit ifadeyle aşağıda gösterilen şekilde hesaplanır.

$$Risk(t) = H(t) \times C \quad (2.13)$$

Eş. 2.13'te "H(t)" başarısızlık olasılığıdır ki çalışmanın geri kalan kısmında hasar olasılığı olarak ifade edilecektir. "C" ise olası sonuçların etkisinin büyüklüğüdür. Sonuçların etkisi ekipmanın bulunduğu işletmenin ortam koşulları, ekipmanda işlenen, bulundurulmuş veya taşınan kimyasalın fazı, sıcaklığı, basıncı, sağlık ve çevre açısından tehlikesi gibi hususlara bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte ne şekilde hesaplanabileceği veya risk değerlendirmesine ne şekilde dahil edileceği API 581 ve DNV-RP-G101 ve benzeri uygulama rehberlerinde gösterilmiştir. API 581'e göre olası sonuçların etkisi alan bazlı veya finansal bazlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada muhtemel sonuçların maliyeti dikkate alınmayacak olup alan bazlı fiziksel etki değerlendirmeye alınacaktır. Çizelge 2.1.'de olası sonuçların etkisi alan bazlı olarak seviyelere ayrılmıştır [31].

Çizelge 2.1. Olası sonuçların alan bazlı seviyeleri.

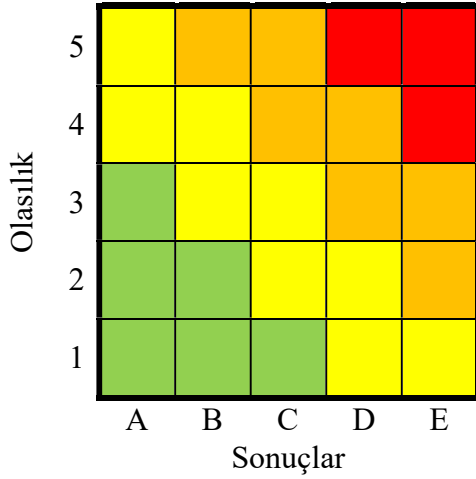
Seviye	Alan Etkisi C (m ²)
A	$C \leq 10$
B	$10 < C \leq 100$
C	$100 < C \leq 1\,000$
D	$1\,000 < C \leq 10\,000$
E	$C > 10\,000$

Hasar olasılığı “ $H(t)$ ” ise literatürdeki diğer örneklerde olduğu şekilde daha önceki işletme tecrübelerinden elde edilebilir. Bu çalışma kapsamında ise tamamen rastlantısal ve hesaplanabilir olduğu kabul edilmiştir. Böylelikle yorulmaya bağlı olarak hasar olasılığı hesaplanmış olup yöntem çalışmanın ilerleyen bölümlerinde örnekleriyle detaylandırılacaktır. Çizelge 2.2.’de API 581’göre kategorize edilmiş hasar olasılıkları gösterilmiştir [31].

Çizelge 2.2. Hasar olasılığı seviyeleri.

Seviye	Hasar Olasılığı $H(t)$
1	$H(t) \leq 3,0 \text{ E}^{-5}$
2	$3,0\text{E}^{-5} < H(t) \leq 3,0\text{E}^{-4}$
3	$3,0\text{E}^{-4} < H(t) \leq 3,0\text{E}^{-3}$
4	$3,0\text{E}^{-3} < H(t) \leq 3,0\text{E}^{-2}$
5	$H(t) > 3,0\text{E}^{-2}$

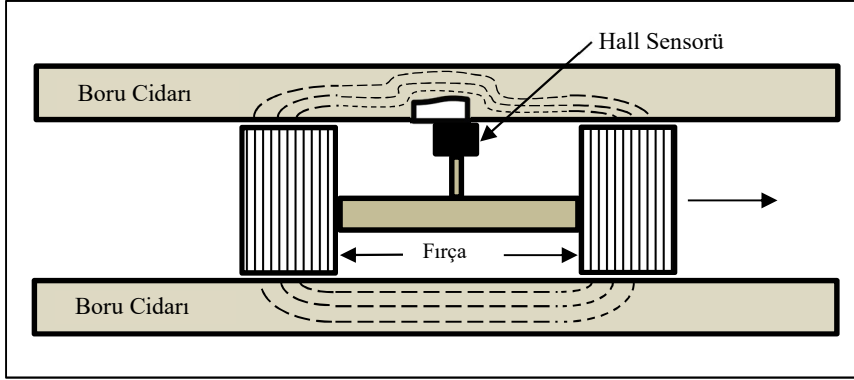
Riskin büyüklüğü Eş. 2.13 ile hesaplanabileceği gibi API 581 standardı uygulama kolaylığı açısından bir matris oluşturmuş olup Şekil 2.11.’de sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında hesaplanacak hasar olasılığı ile API 581 rehberinin sonuç analizi yöntemi ile hesaplanan olası sonuçların alan bazlı büyüklüğü kullanılarak Şekil 2.11.’de verilen risk matrisi üzerinden riskin büyüklüğü tespit edilebilir. Matriste yeşil renk düşük riski, sarı renk orta riski, turuncu renk orta-yüksek riski ve kırmızı renk yüksek riski temsil etmektedir. İşletme kendi risk toleransına göre muayeneyi gerçekleştireceği hedef riskine karar vermelidir.



Şekil 2.11. Risk matrisi.

2.5. Manyetik Kaçak Akı (MFL) Yöntemiyle Boru Hattı Muayenesi

Boru hatlarında muayenelerin hat işletmeye kapatılmadan tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmesi tercih edilmektedir. Bu amaçla en sık kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri; ultrasonik muayene, eddy akımı yöntemi ve manyetik kaçak akı yöntemleri olarak sıralanabilir [69]. Özellikle yeraltında uzun mesafeler kat eden boru hatlarının muayenelerinin boru hattı içinden yapılması tercih edilmektedir. Boru hattı muayene robotları (PIG – Pipe Inspection Gauge) boru hatlarının tahribatsız muayene yöntemleriyle hat içerisinden muayene edilebilmesini sağlayan cihazlardır [70]. PIG’ler boru hattı içerisindeki ürünün kinetik enerjisini kullanarak hareket etmektedirler [71]. Boru hatlarının temizlenmesi veya hat içerisinden farklı bir ürün transferi gerçekleştirilecekse ürünlerin karışmasının engellenmesi amacıyla kullanılan PIG’ler de mevcuttur. Manyetik kaçak akı yöntemiyle muayene yapanlar, MFL-PIG olarak adlandırılmaktadırlar. MFL-PIG’ler; üzerlerindeki fırçalar vasıtasıyla ferromanyetik boru üzerinde bir akı oluşturmakta, bu akı boru üzerinden geçerken borunun kusurlu olduğu alanda dirençle karşılaşmakta ve sapmalar yaratmaktadır. Söz konusu sapmalar MFL-PIG üzerindeki Hall Sensörleri tarafından kaydedilmekte, böylelikle de boru iç ve dış yüzeylerinde bulunması muhtemel kusurun konumu, büyüklüğü ve yaklaşık geometrisi elde edilebilmektedir. Bu şekilde boru üzerinde hem eksen yönünde hem de çevresel yönde ölçüm alınabilmektedir [72]. Yöntem malzeme kaybı kaynaklı yüzey kusurlarının tespitinde oldukça etkilidir. Manyetik kaçak akı yöntemi ile ölçümün nasıl yapıldığı Şekil 2.12.’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Manyetik kaçak akı yöntemiyle yüzey kusuru tespiti.

PIG'ler boru hatlarına Resim 2.1.'de gösterilen ve PIG kovanı adı verilen unsurlar ile yerleştirilir veya çıkarılır. PIG kovanları boru hatlarının giriş ve çıkış kısımlarında konumlandırılmışlardır.



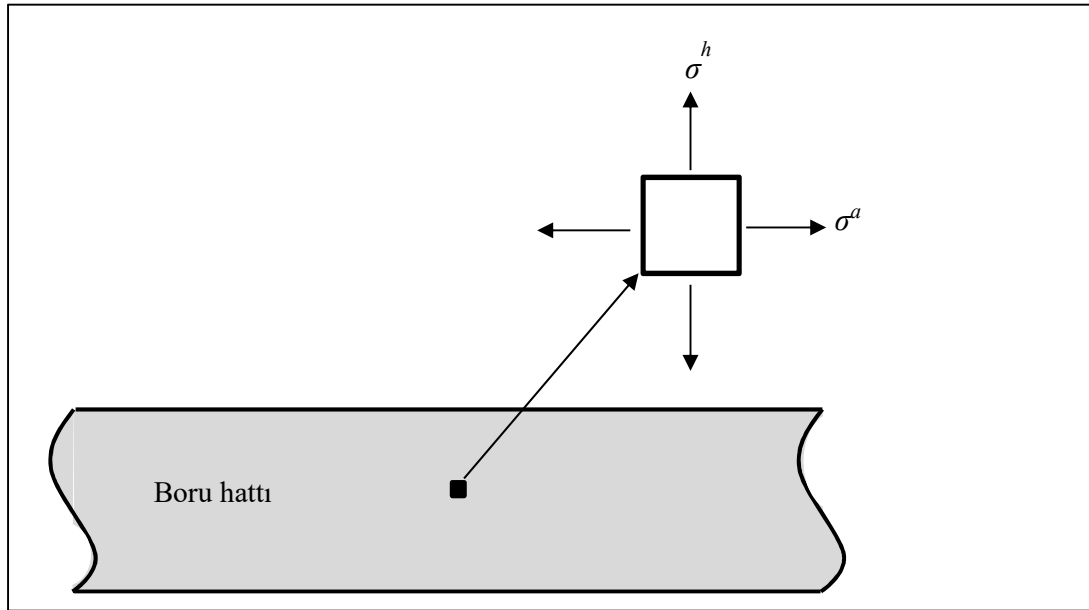
Resim 2.1. PIG kovanı.

2.6. Basıncılı Borular için Gerilme Analizi

Borularda iç basıncın etkisi ile boru cidarında çevresel yönde normal gerilme durumu oluşmaktadır. Boru tasarımı bu gerilmenin büyüklüğü dikkate alınarak yapılmaktadır. Söz konusu gerilme durumu literatürde “membran stres” olarak da adlandırılmaktadır. Boru hatlarında akış kesintiye uğramadığı sürece iç basınçtan kaynaklı eksen yönünde gerilme oluşmadığı kabul edilir. Akışın kesintiye uğradığı koşulda (end-cap effect) ise iç basınç etkisiyle eksen yönünde normal gerilme dikkate alınmalıdır [73, 74]. Radyal yöndeki normal gerilme diğerlerine göre çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Eksen ve çevresel yöndeki gerilme büyüklükleri borular için Eş. 2.14 ve Eş. 2.15 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\sigma^a = \frac{PD}{4t} \quad (2.14)$$

$$\sigma^h = \frac{PD}{2t} \quad (2.15)$$



Şekil 2.13. Boru cidarında gerilme durumu.

Burada “ σ^a (MPa)” eksen yönünde normal gerilme, “ σ^h (MPa)” çevresel yönde normal gerilme, “ P (MPa)” iç basınç, “ D (mm)” çap ve “ t (mm)” cidar kalınlığıdır. Şekil 2.13.’de iç basınç etkisi altındaki borunun cidarındaki gerilme durumu gösterilmiştir. Boruda akışın sınırlandırılmış olduğu varsayılmış olup bu sebeple eksen yönünde gerilme durumu da

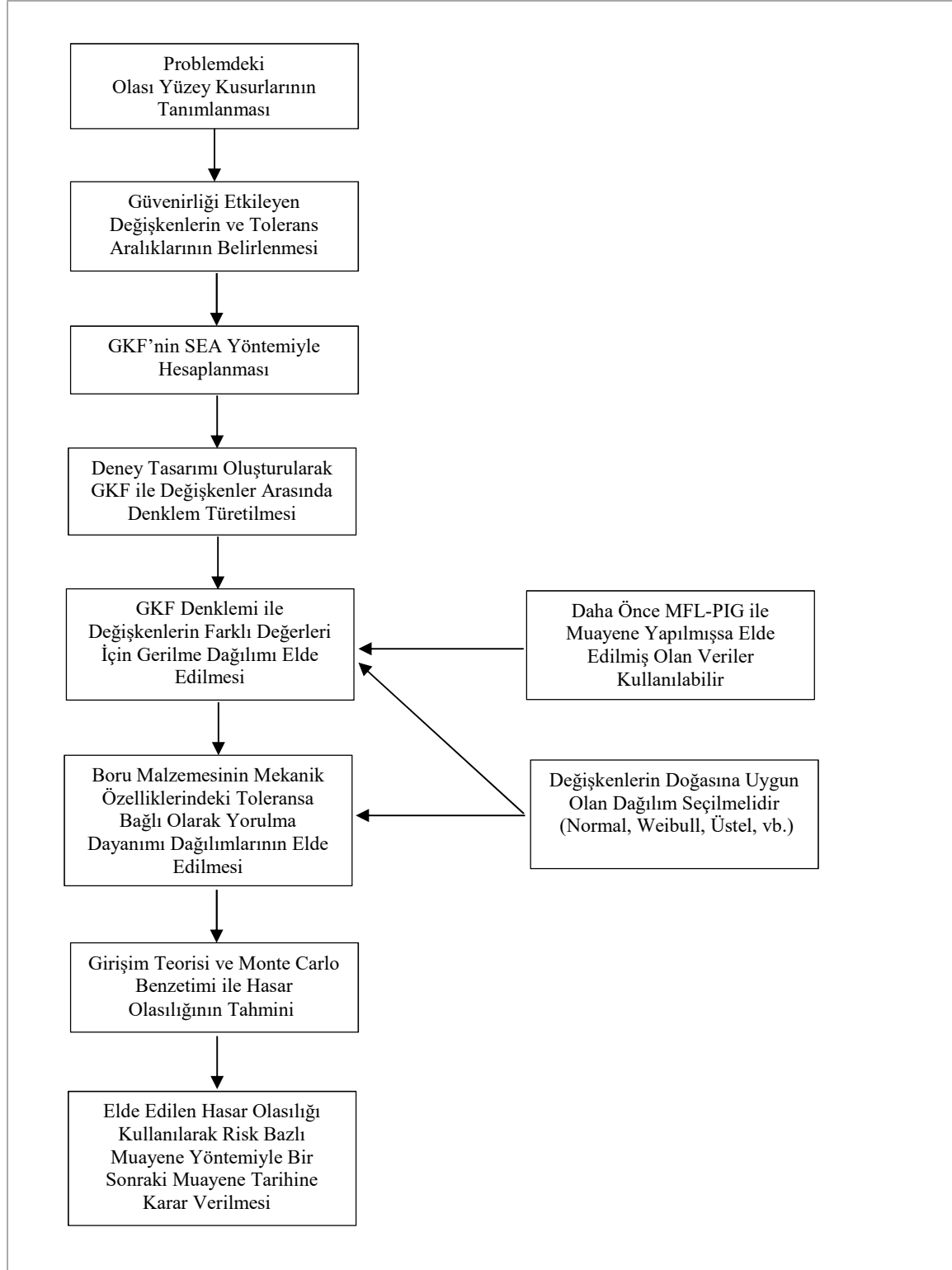
gösterilmiştir. Radyal yönde ise gerilme oluşmadığı kabul edilmiştir. Çalışmanın sonraki bölümlerinde problemin fiziksel koşullarına göre eksen, çevresel veya her iki yöndeki gerilme durumları hesaplamalarda dikkate alınacaktır.

2.7. Çalışma Kapsamında Önerilen Model

Bu bölüm dahilinde açıklanan yöntemlerin her biri bu çalışma kapsamında amaçlanan neticeye ulaşabilmek adına belirli bir plan dahilinde uygulanmıştır. Yöntemlerin her biri literatürdeki farklı güvenilirlik analizi çalışmalarında kullanılmış olan muteber yöntemlerdir. Söz konusu yöntemler sistematik bir hale getirilerek bu çalışmaya özgü bir model şeklinde uygulanmıştır. Önerilen modelin akış şeması Şekil 2.14.'te sunulmuştur.

İlk olarak problemdeki olası yüzey kusuru veya kusurları tanımlanmalıdır. Bu kusurlar göçük, korozyon, iç yüzey kusuru ve kaynaklı birleştirme kusuru olabilir. Sonrasında problemde güvenilirliği etkileyen değişkenler belirlenmelidir. Bunlar geometrik değişkenler olabileceği gibi basınç kuvvet vb. fiziksel değişkenler de olabilir. Bu aşamada dikkat edilecek husus, kusur geometrisini tanımlayan mümkün merteye tüm değişkenlerin tanımlanmasıdır. Çünkü bu değişkenler gerilme konsantrasyon faktörünün doğru hesaplanabilmesi için önem arz etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerilme konsantrasyon faktörü hesaplanır. Sonlu elemanlar modeli analitik veya deneysel veriler ile desteklenerek tutarlılığı ispatlanmalıdır.

Çalışma kapsamında çok değişkenli bir güvenilirlik analizi gerçekleştirilmesi amaçlandığından, gerilme konsantrasyonunu etkileyen değişkenlerin her birisinin farklı değeri için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmek mümkün değildir. Bunun yerine vekil modeller kullanılması uygun olacaktır. Bu amaçla kusur geometrisini oluşturan değişkenlerin farklı değerlerini sistematik bir şekilde içerecek deney tasarımı hazırlanmalıdır. Bu çalışma dahilinde deney tasarımı hazırlanması aşamasında Taguchi dikey dizi deney tasarımı yönteminin kullanılması uygun görülmüştür [75]. Vekil modellerin her birisi için katı modellerin hazırlanması ve bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizlerinin gerçekleştirilmesi problemin geometrik özellikleri ve değişken sayısı dikkate alındığında oldukça zaman alan bir süreçtir. Taguchi deney tasarımı yönteminin kullanılması, deney sayısında tasarruf sağlayarak hesaplama yükünü oldukça düşürmektedir.



Şekil 2.14. Bu çalışmada önerilen model.

Hazırlanan deney tasarımına uygun olarak gerekli sayıda sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilir. Analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak gerilme konsantrasyon faktörü ile değişkenler arasında regresyon işlemiyle denklem türetilir. Bu denklem her bir

değişkenin farklı değeri için gerilme konsantrasyonu hesaplamasını kolaylaştırmaktadır. Elde edilen denklem gerilme dağılımının hesaplanmasında kullanılacaktır. Güvenirliği etkileyen değişkenlerin sahip oldukları toleranslar ilgili standartlardan alınabileceği gibi uygulamayı gerçekleştiren uzmanın sektöre ait deneyiminden veya kurumsal hafızadan elde edilebilir. Kusura ait değişkenlerin geometrik bilgileri, varsa önceki muayenelerden de temin edilebilir. Bu şekilde daha hassas sonuçlara ulaşılabilir. Buraya kadar açıklanan kısım problemin bir ayağı olan gerilme dağılımının elde edilmesinde kullanılacaktır.

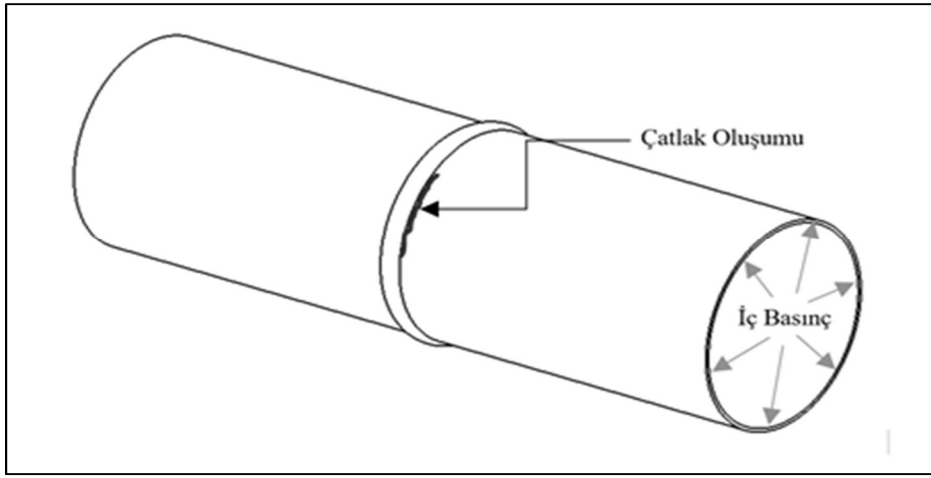
Problemin diğer ayağı ise yorulma dayanımı dağılımlarının elde edilmesidir ki bu tamamen boru malzemesinin mekanik özellikleri ve çevrim sayısına bağlıdır. Söz konusu mekanik özelliklerdeki çeşitlilik dağılımın standart sapmasını oluşturacaktır. Burada ihtiyaç olan bilgi ise yine üreticilerden veya gerçekleştirilecek yorulma deneylerinden temin edilebilir.

Yorulma dayanımı dağılımlarının çevrim sayısına bağlı olarak elde edilmesiyle hasar olasılığının tahmini aşamasına geçilmelidir. Burada elde edilmiş olan iki dağılımdan gerilme-dayanım girişim teorisi kullanılarak hasar olasılığı hesaplanmalıdır. Bunun için literatürde farklı çözümler önerilmiş olmakla birlikte bu çalışma kapsamında Monte Carlo benzetimi yönteminden yararlanılmıştır. Gelişen bilgisayar işlem kapasiteleri sayesinde binlerce veriden oluşan dağılımlar çok hızlı bir şekilde çözüme ulaştırılabilmektedir. Bu şekilde çevrim sayısına bağlı hasar olasılıkları girişim teorisiyle hesaplanır. Yukarıda açıklandığı gibi önerilen modelin farklı aşamalarında, biri sonlu elemanlar analizi diğeri de Monte Carlo benzetimi olmak üzere arka arkaya iki farklı benzetimden yararlanılmıştır. SEA gerilme konsantrasyon faktörlerinin hesaplanmasında, Monte Carlo benzetimi ise hasar olasılıklarının elde edilmesi aşamasında kullanılmıştır.

Yukarıda açıklanan model kullanılarak hesaplanan hasar olasılıkları, risk bazlı muayene planlaması için faydalı bir girdi oluşturmaktadır. Bu yöntemle elde edilmiş olan daha hassas olasılık verilerinin kullanılmasıyla optimum zamanda muayenenin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

3. KAYNAKLI BİRLEŞTİRMELERDE YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ

Boru hatlarının imalatı sırasında, boru elemanlarının birbirleri ile montajı için alın kaynak ile birleştirme yapılmaktadır. Söz konusu birleştirme noktalarında gerilme konsantrasyonu meydana geldiğinden boru hatları için bu noktalar kritik noktalar olarak kabul edilmektedir. Değişken basınçtan dolayı oluşması muhtemel yorulma çatlakları ilk olarak bu kritik noktalarda meydana gelmektedir. Şekil 3.1.'de boru hattı üzerindeki kaynaklı bölgede meydana gelmesi muhtemel çatlak oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Değişken basınç etkisiyle kaynak bölgesinde çatlak oluşumu.

Çalışmanın bu bölümünde boru hatlarındaki alın kaynaklı birleştirmeler değerlendirmeye alınmış olup bir önceki bölümde açıklanan yöntemler kullanılarak kaynaklı birleştirmeler için yorulmaya bağlı hasar olasılığı tahmini yapılacaktır.

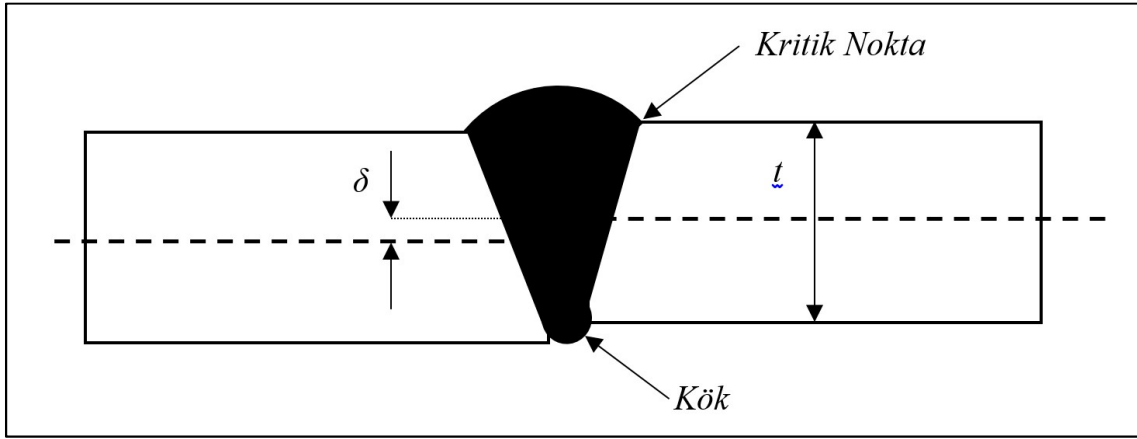
3.1. Gerilme Dağılımının Tahmini

Alın kaynaklı birleştirme için gerilme dağılımının elde edilebilmesi amacıyla öncelikle gerilme konsantrasyon faktörünün tespit edilmesi gerekmektedir. Alın kaynaklı birleştirme noktalarında hem birleştirilecek boruların çap, et kalınlığı ve ovallik toleransına hem de birleştirme işlemini gerçekleştirecek olan operatörün yetkinliğine bağlı olarak bir miktar eksantriklik söz konusu olmaktadır. Bu bölüm kapsamında değerlendirmeye alınan gerilme konsantrasyonunun temel nedeninin bahsi geçen eksantriklik olduğu kabul edilmiştir. Söz konusu eksantriklik bir montaj kusuru olarak kabul edilmiş olup gerilme konsantrasyonu

farklı geometrik özelliklere bağlı olarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Aşağıda hem analitik yöntemle hem de sonlu elemanlar yöntemi ile kaynaklı birleştirme için gerilme konsantrasyon faktörü elde edilmiştir.

3.1.1. Gerilme konsantrasyon faktörünün analitik yöntemle elde edilmesi

Basıncılı borular için alın kaynaklı bölgenin geometrisi Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Kaynaklı bölge için eksantrikliğe bağlı gerilme konsantrasyon faktörü (GKF_w) Eş. 3.1 kullanılarak analitik olarak elde edilebilir [76]. Eşitliğin analitik olarak ne şekilde elde edildiği Ek-1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Alın kaynak geometrisi.

$$GKF_w = 1 + \frac{3\delta_m}{t} e^{-\sqrt{t/D}} \quad (3.1)$$

Burada “ δ_m (mm)” kaynak dikişleri için ortalama eksantrikliği ifade eder. Maksimum değeri cidar kalınlığının 0,1 katı olarak kabul edilmiştir [76]. Bu durum kaynak bölgesinde iç basınçtan doğan normal gerilmeye ek olarak bölgesel geometrik özelliklerden kaynaklı bir gerilme değeri daha eklemektedir. Bu durum halihazırda mekanik özellik bakımından narin olan kaynak bölgesinin yorulmaya karşı daha kritik konuma gelmesine neden olmaktadır. Eş. 3.2 söz konusu bölgedeki eksantrik birleştirmeden oluşan ek normal gerilmeyi ifade etmektedir [76].

$$\sigma_b = \frac{3\delta_m}{t} e^{-\sqrt{t/D}} \sigma^a \quad (3.2)$$

Eş. 2.14, Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 kullanılarak kaynaklı bölgedeki toplam normal gerilme aşağıda görüldüğü şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}\sigma_T &= \sigma^a G K F_w \\ \sigma_T &= \sigma^a + \sigma_b \\ \sigma_T &= \frac{PD}{4t} + \frac{3\delta_m}{t} e^{-\sqrt{\frac{t}{D}} \left(\frac{PD}{4t} \right)}\end{aligned}\quad (3.3)$$

Eş. 3.3 basınç altında çalışan boru hatlarındaki kaynaklı birleştirmeler için en yüksek eksen yönlü gerilmenin hesap edilmesinde kullanılabilir.

3.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmesi

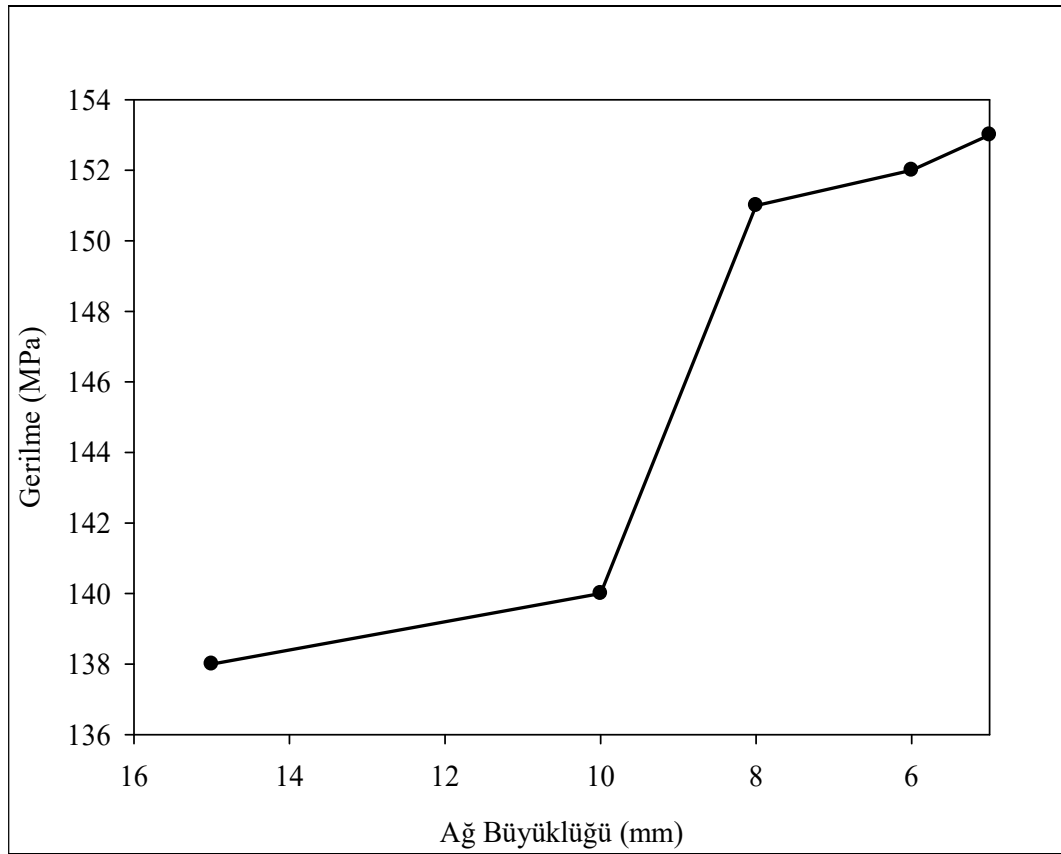
Bir önceki bölümde, kaynaklı birleştirme noktasındaki gerilme konsantrasyon faktörü literatürden alıntılanan bir bağıntı yardımıyla analitik olarak elde edilmiştir. Bu bölümde ise literatürden farklı olarak kaynaklı birleştirmeler için gerilme konsantrasyon faktörünü veren bağıntı sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilecektir. Bu amaçla gerilme konsantrasyon faktörünü etkilediği düşünülen 3 bağımsız geometrik değişkeni (D, t ve δ_m) kapsayacak şekilde 9 koşturmadan oluşan bir Taguchi deney tasarımı hazırlanmıştır [75]. Söz konusu deney tasarımı Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^3)$.

Koşturma	D (mm)	t (mm)	δ_m/t
1	350	7	0,03
2	350	10	0,05
3	350	12	0,1
4	600	7	0,05
5	600	10	0,1
6	600	12	0,03
7	840	7	0,1
8	840	10	0,03
9	840	12	0,05

Oluşturulan deney tasarımına uygun şekilde katı modeller hazırlanmış ve ANSYS yazılımında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme bölgesindeki gerilme değerinin, ele alınan sonlu elemanlar modelinin sınır koşullarında meydana gelen gerilme değişimlerinden etkilenmemesi adına model uzunluğu 500 mm

olarak kararlaştırılmıştır. Ağ yapılırken toplam 250 000 dörtyüzlü katı eleman kullanılmıştır. En uygun ağ büyüklüğünü belirleyebilmek için, ağ büyüklüğüne bağlı olarak kaynaklı bölge için eksen yönündeki maksimum normal gerilme değerleri hesaplanarak yakınsama çalışması yapılmış olup makul hesaplama süreleri dâhilinde kalabilmek için 6 mm ağ büyüklüğü yeterli görülmüştür. Yakınsama çalışmasına ait sonuçlar Şekil 3.3.'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.

Şekil 3.4.'te ise 6 mm boyutunda ağ uygulanan model görülmektedir. Şekil 3.4.'te gösterilen kaynaklı birleştirilmiş boru modeli; Şekil 3.2.'de gösterilen eksantrikliği sağlayacak şekilde ve alın kaynaklı birleştirmeler için makul kabul edilen geometrik özellikler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yakınsama çalışması neticesinde kararlaştırılan ağ büyüklüğünün, Şekil 3.2.'de gösterilen kaynaklı birleştirme kusurundan doğan gerilme artışını kabul edilebilir ölçüde ortaya koyduğu değerlendirilmesine varılmıştır.



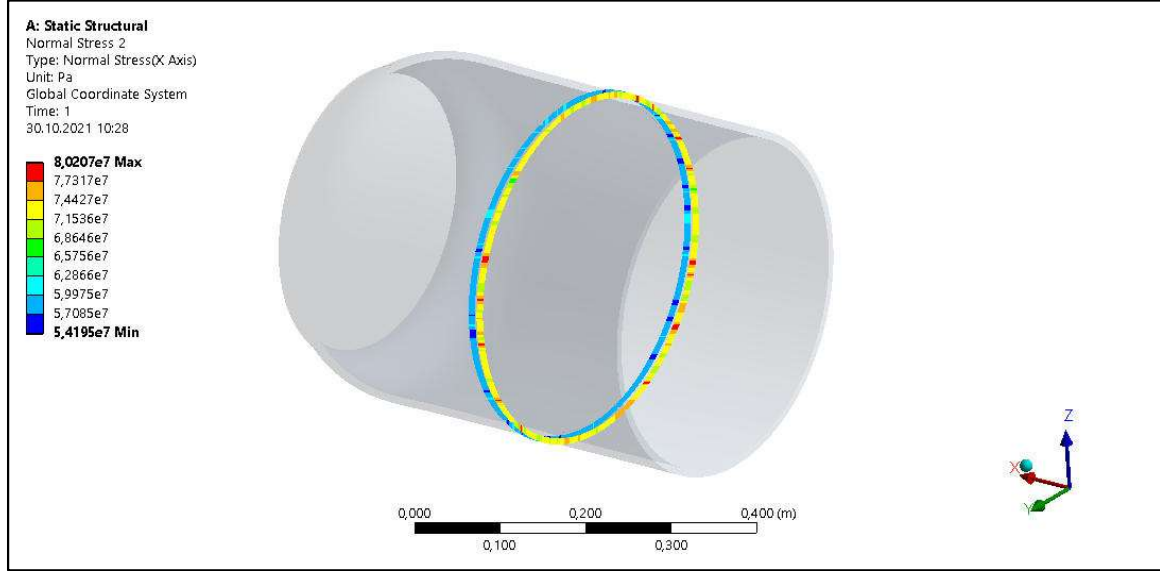
Şekil 3.4. Büyüklüğü 6 mm olan ağ çalışması.

Analiz sırasında modele iç basınç uygulanmıştır. Borudaki akışın sınırlandırılmasıyla eksen yönünde gerilme meydana geleceğinden söz konusu gerilmeyi oluşturacak büyüklükte kuvvet modeldeki boru kesitine eksen yönünde (Şekil 3.4.’te x -ekseninde) ayrıca uygulanmıştır. Kuvvetin büyüklüğü boru iç çapı ve basınca bağlı olarak Eş. 3.4’te gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Sınır koşulları sağlamak amacıyla model diğer kesitinden sabitlenmiştir.

$$F^a = P\pi \frac{D_i^2}{4} \quad (3.4)$$

Çizelge 3.1.’de belirtilen dokuz koşul için analizler tekrarlanmış olup kaynaklı birleştirme bölgesindeki eksen yönündeki normal gerilme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların, geometrinin kaynak dikişi olmayan bölümündeki eksen yönündeki normal gerilme değerine oranlanmasıyla da dokuz ayrı koşul için gerilme konsantrasyon faktörlerine ulaşılmıştır. Şekil 3.5.’te 2 numaralı koşturmaya ait kaynaklı birleştirme noktasında meydana gelen eksen yönündeki en büyük normal gerilme gösterilmiştir. Kaynaklı birleştirme noktaları için sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen gerilme konsantrasyon faktörleri, Eş. 3.3’te verilen bağıntı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak Çizelge 3.2.’de sunulmuştur. Ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) değeri dikkate alındığında

yüksek doğrulukta bir tahmin yapıldığı sonucuna varılmıştır. Ortalama mutlak yüzde hatanın ne şekilde hesaplandığı ve elde edilen sonucun nasıl yorumlandığı Ek-2’de sunulmuştur.



Şekil 3.5. Kaynaklı birleştirme için eksen yönündeki en büyük normal gerilme.

Çizelge 3.2. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarının analitik sonuçlar ile karşılaştırılması.

	D (mm)	t (mm)	δ_m/t	GKF _w Analitik Yöntem (Eş. 3.3)	GKF _w (SEA)	Hata %
1	350	7	0,03	1,078	1,000	7,2
2	350	10	0,05	1,127	1,111	1,4
3	350	12	0,1	1,249	1,228	1,7
4	600	7	0,05	1,135	1,016	10,5
5	600	10	0,1	1,264	1,255	0,7
6	600	12	0,03	1,078	1,169	8,4
7	840	7	0,1	1,274	1,086	14,7
8	840	10	0,03	1,081	1,051	2,7
9	840	12	0,05	1,133	1,278	12,8
OMYH:						6,9

Sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen ve Çizelge 3.2.’de sunulan gerilme konsantrasyon faktörü değerleri kullanılarak, MINITAB yazılımının lineer olmayan regresyon fonksiyonu aracılığıyla, Çizelge 3.1.’deki değişkenler ile gerilme konsantrasyon faktörü arasında bir bağıntı kurularak Eş. 3.5’te sunulmuştur.

$$GKF_w = 1,2473 - 0,00397 \frac{D}{t} e^{-14,5628 \frac{\delta_m}{t}} \quad (3.5)$$

Çizelge 3.3.'te Eş. 3.5 kullanılarak elde edilen sonuçlar, SEA sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ortalama mutlak yüzde hata değeri incelendiğinde sonuçların kabul edilebilir ölçüde tutarlı olduğuna karar verilmiştir. Söz konusu bağıntı, alın kaynaklı boru dikişleri için gerilme konsantrasyon faktörünün hesaplanmasında Eş. 3.1 için alternatif olarak kullanılacaktır.

Çizelge 3.3. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması.

	GKF _w (SEA)	GKF _w (Eş. 3.5)	Hata %
1	1,000	1,12	11,9
2	1,111	1,18	6,2
3	1,228	1,22	0,6
4	1,016	1,08	6,6
5	1,255	1,19	5,0
6	1,169	1,12	4,3
7	1,086	1,14	4,6
8	1,051	1,03	1,8
9	1,278	1,11	12,9
	OMYH:		6,1

3.1.3. Gerilme dağılımının elde edilmesi

Bir önceki bölümde kaynaklı birleştirme için gerilme konsantrasyon faktörü hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Kaynaklı birleştirme için eksen yönündeki toplam normal gerilme Eş. 3.6'da sunulmuştur.

$$\sigma_T = \sigma^a GKF_w \quad (3.6)$$

Eş. 3.6'yı etkileyen bağımsız değişkenlerin (P, D, t ve δ_m) her birinin belirli bir tolerans dahilinde normal dağılım göstereceği varsayılmıştır. Çizelge 3.4.'te geometrik ve mekanik özellikleri sunulan dikişsiz boru için gerilme normal dağılımı, çalışmanın İkinci Bölümü'nde açıklanan yöntemlerle örnek olarak elde edilebilir.

Çizelge 3.4. Örnek boruya ait geometrik ve mekanik özellikler.

Malzeme	API 5L X60
Akma Dayanımı (MPa)	413
Çekme Dayanımı (MPa)	517
Young Modülü (GPa)	206
Çap (mm)	610
Cidar Kalınlığı (mm)	9,53
D/t	64
Maksimum Tasarım Basıncı (MPa)*	12,9
Maksimum İşletme Basıncı (MPa)**	9

* Maksimum tasarım basıncı ince cidarlı borular için $P = \frac{2S_y t}{D}$ bağıntısı ile elde edilir.

** Maksimum işletme basıncı, maksimum tasarım basıncının en fazla 0,72 katı kadar olabilir [77].

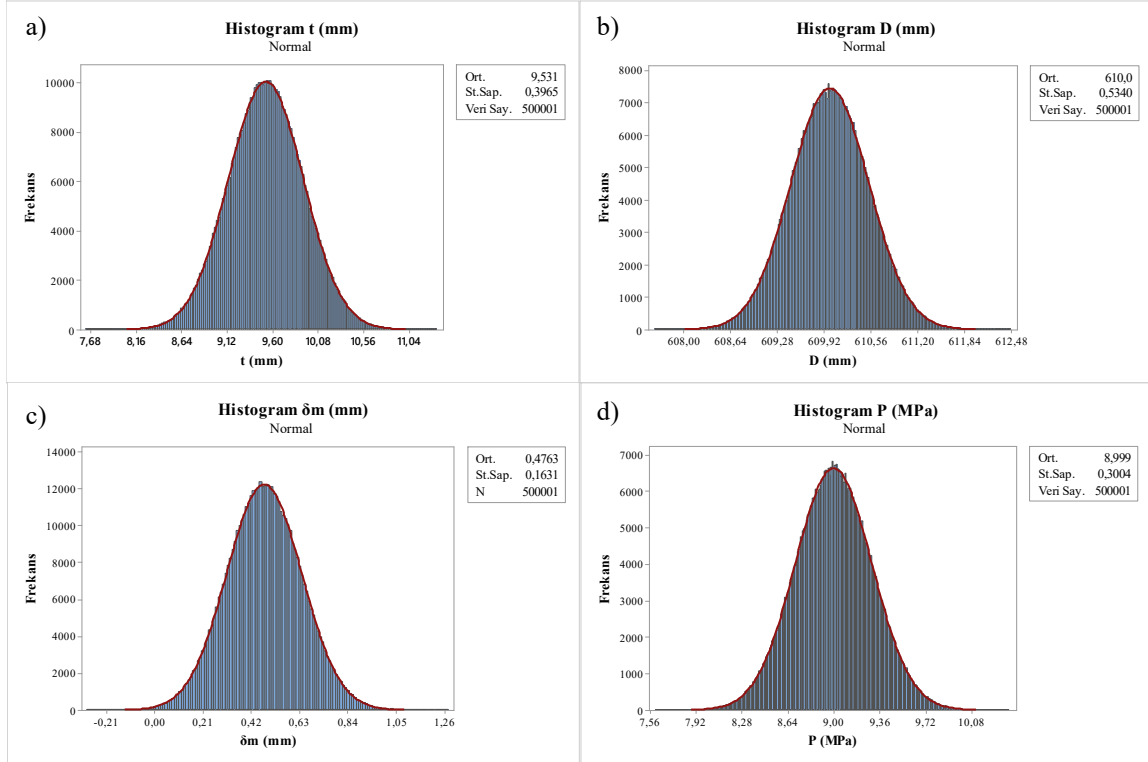
Gerilme normal dağılımının elde edilebilmesi için Monte Carlo benzetimi yönteminden yararlanılmıştır. Gerilmeyi etkileyen ve Çizelge 3.5.'te ortalama ve standart sapma değerleri verilen her bir bağımsız değişken için normal dağılım gösteren 500 000 veri bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Şekil 3.6.'da değişkenlerin dağılımlarına ait histogramlar mevcuttur.

Çizelge 3.5. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.

Değişken	Ortalama	Standart Sapma*
Cidar Kalınlığı t (mm)	9,53	0,397
Çap D (mm)	610	0,534
Eksantriklik δ_m (mm)	0,476	0,163
Basıncı P (MPa)	9	0,3**

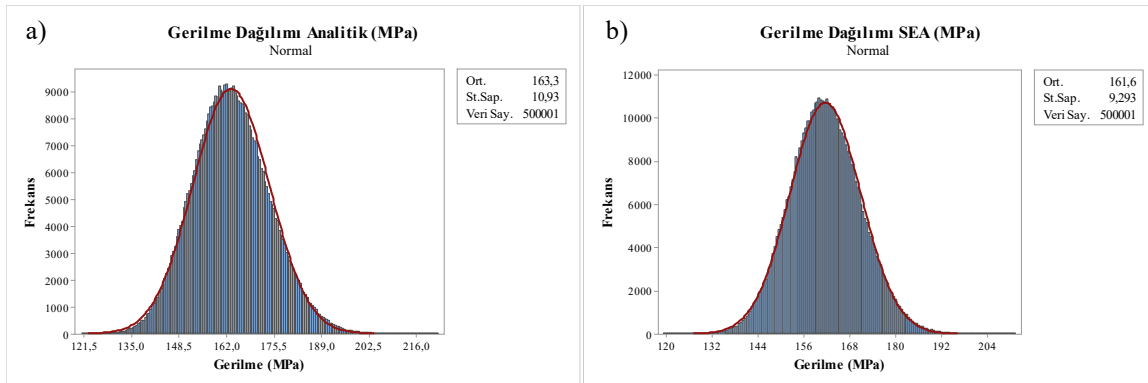
* DNV GL-ST-F101 yönergesindeki toleranslara göre oluşturulmuş normal dağılımlara ait standart sapmalar

** Olası basınç sapması işletme basıncının 1,1 katı kadar alınmıştır [73].



Şekil 3.6. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cedar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: Eksantriklik δ_m (mm), d: Basıncı P (MPa)).

Eş. 3.6'yı etkileyen her bir bağımsız değişkenin farklı değerleri için gerçekleştirilen benzetim sonucunda elde edilen gerilme normal dağılımları Şekil 3.7.'de mevcuttur. Sonuçlar gerilme konsantrasyon faktörünün hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edildiği iki koşulu da gösterecek şekilde sunulmuştur.



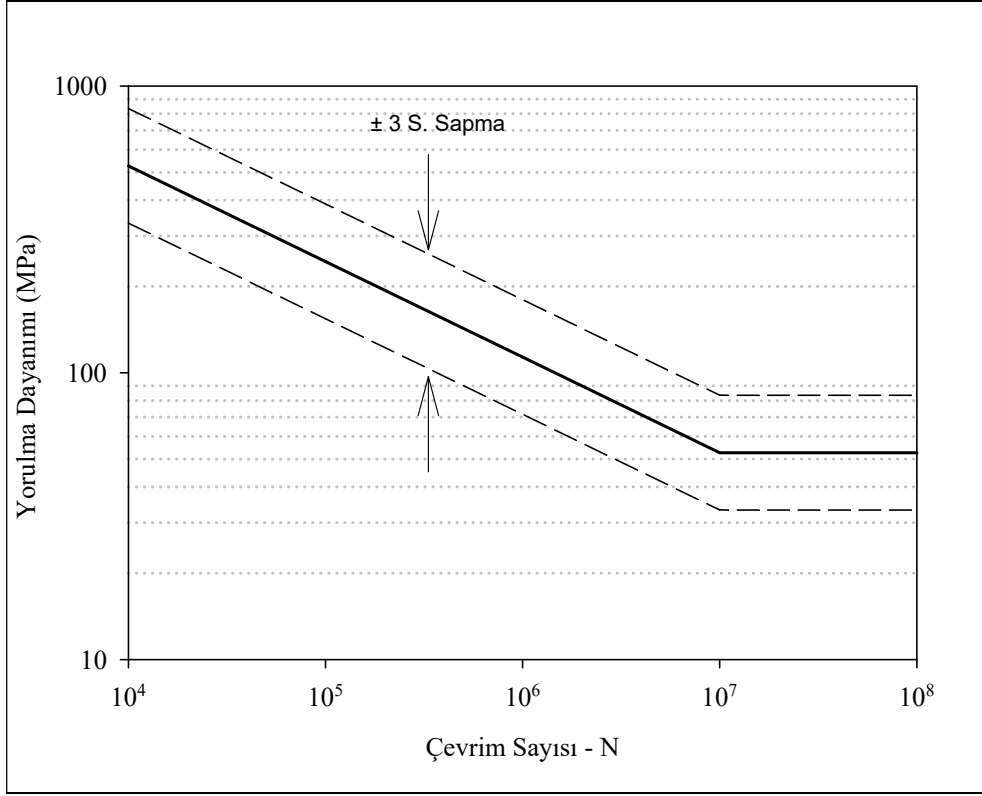
Şekil 3.7. Gerilme için benzetim sonucu (a: Analitik, b: SEA).

3.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini

Basınçlı boru hatlarında, operasyon veya emniyet vanaları vasıtasıyla hattaki akış her serbest bırakıldığında ve tekrar durdurulduğunda (aç-kapa koşulu) hattaki işletme basıncından doğan eksen yönündeki gerilmenin sıfırdan maksimum değere tekrar ederek inip çıktığı dolayısıyla değişken yükleme koşulunun varlığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tekrarlı yüklerin kaynaklı birleştirmeler üzerindeki etkileri, bu bölüm kapsamındaki yorulma hasarlarının temel sebebi olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte normal işletme koşullarında; tekrarlayan operasyonlar, pompa veya kompresörlerin sebep olduğu basınç dalgalanmaları, hatlardaki eksik montajdan kaynaklı titreşimler veya hatlar üzerinde bulunan ve sık çalışan basınç tahliye valflerinden kaynaklı titreşimler gibi yorulma ömrünü etkileyen faktörler de mevcuttur. Boru hatları üzerinden alınacak titreşim ölçümleri en doğru çevrim sayılarının tespit edilebilmesini sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında sadece iç basınç değişimleri dikkate alındığından, işletmelerdeki SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemlerinden alınabilecek aylık veya yıllık basınç değişim değerleri ve çevrim sayıları, hesaplamalarda kullanılabilir. Değişken yükleme koşulları söz konusu olduğunda hesaplamalarda kullanılmak üzere gerilme genliği " σ_a " ve çevrim sayısı "N" değerlerinin de tespit edilmesi gerekir. Ekipmanın kullanım ömrü süresince maruz kalacağı farklı gerilme genliklerine ve çevrim sayılarına bağlı olarak yorulma hasarının tespitinde aşağıda Eş. 3.7'de verilen Palmgren-Miner kuralından yararlanılır.

$$D_a = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.7)$$

Burada " n_i "; " σ_i " gerilme seviyesi için çevrim sayısı ve " N_i "; yine " σ_i " gerilme seviyesi için toplam ömür olmak üzere farklı gerilme seviyeleri ve çevrim sayıları için birikimli yorulma hasarı hesaplanabilir. Dolayısıyla SCADA sisteminden alınan farklı basınç değerleri ve çevrim sayıları için eşdeğer bir gerilme genliği de elde edilmiş olacaktır. Kaynaklı birleştirmelere ait S-N (Yorulma Dayanımı – Çevrim Sayısı) eğrileri baz metale ait olan S-N eğrilerinden farklıdır. Dolayısıyla ilgili kaynaklı birleştirmenin geometrisi ve malzemesine uygun olarak hazırlanmış olan yorulma deney numunelerinden elde edilmiş olan S-N eğrileri kullanılmalıdır. Bu çalışma kapsamında kullanılan S-N eğrisi DNV GL-RP-C203 uygulama rehberinden temin edilmiştir. Şekil 3.8.'de tek kaynak ağzına sahip, alın kaynaklı birleştirme için atmosferik koşullardaki S-N eğrisi sunulmuştur. Yorulma dayanımı dağılımının elde edilmesinde Eş. 3.8 [76] kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Kaynaklı birleştirme için S-N eğrisi ($m = 3$, $\log a = 12,164$).

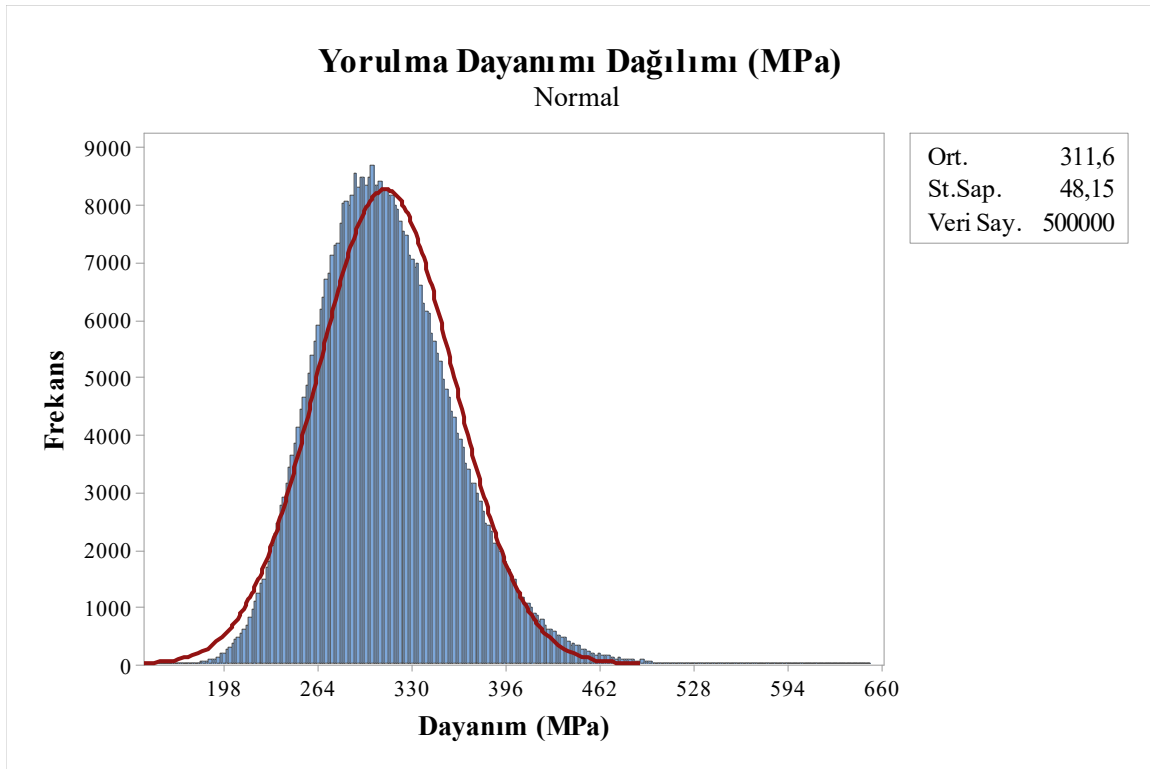
$$\log N = \log a - m \log(S_f) \quad (3.8)$$

Burada “N” çevrim sayısı, “log a” S-N eğrisi ile grafiğin N ekseninin kesişimi, “m” S-N eğrisinin eğiminin negatifi, “ S_f ” yorulma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. “m” ve “a” malzemeye bağlı katsayılar olup kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Üzerinde çalışılan problem için “ $m = 3$ ” ve “ $\log a = 12,164$ ” olarak kabul edilmiştir [76]. Kaynaklı birleştirme için iç basınca bağlı eksen yönündeki normal gerilme değerinin akışın kesintiye uğramasıyla birlikte maksimum değere ulaştığı ve akışın serbest bırakılması ile tekrar sıfıra düştüğü kabul edilmiştir. Bu sebepten gerilme genliği Eş. 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Örnek olarak ele alınan hatta çok sık operasyon yapıldığı varsayılmış olup bir yıl içerisindeki çevrim sayısı 5×10^4 olarak kabul edilmiştir.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_T}{2} \quad (3.9)$$

Kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımı, malzemenin mekanik özelliklerindeki olası varyasyonlara göre farklılıklar gösterecektir. Bu sebepten gerçeğe uygun bir dayanım dağılımı elde edebilmek için S-N eğrisi Şekil 3.8.’de görüldüğü gibi bir tolerans aralığında

kabul edilmelidir. Dolayısıyla malzemenin yorulma dayanımının şekilde gösterilen tolerans aralığında normal dağılım gösteriyor olduğu varsayılmıştır. Eş. 3.8'deki "a" malzeme değişkenin, ± 3 (standart sapma) aralığında normal dağılım gösterecek şekilde değişen 500 000 değeri için Eş. 3.8 çözüldüğünde, Şekil 3.9.' da sunulan yorulma dayanımı dağılımı elde edilir. Burada "loga" malzeme mekanik özelliklerine bağlı değişken için standart sapma 0,2 olarak alınmıştır [76].



Şekil 3.9. Kaynaklı birleştirmede dayanım için benzetim sonucu ($N = 5 \times 10^4$ çevrim için hesaplanan).

İnce cidarlı silindirik ekipmanlarda, iç basınca bağlı çevresel yöndeki gerilme daha büyüktür. Bu sebeple; çalışma özelinde değerlendirmeye alınan basınçlı borular için, kaynaklı birleştirmenin söz konusu olmadığı gövde bölümlerindeki yorulma hasar olasılığının belirlenmesi amacıyla, çevresel yöndeki gerilme de dikkate alınmalıdır. Çevresel yöndeki gerilmenin büyüklüğü Eş. 2.15 kullanılarak hesaplanabilir. Basınçlı borularda çevresel yöndeki gerilme genliği için boru işletme basıncında meydana gelen dalgalanmalar esas alınmıştır. Çalışmada ele alınan problem için, boru iç basıncındaki değişim miktarı Çizelge 3.5.'te belirtildiği üzere işletme basıncının %10'u olarak alınmış olup basıncın işletme basıncından $\pm \%10$ kadar saptığı kabul edilmiştir. Çevresel yöndeki gerilme genliği Eş. 3.10 kullanılarak hesaplanabilir.

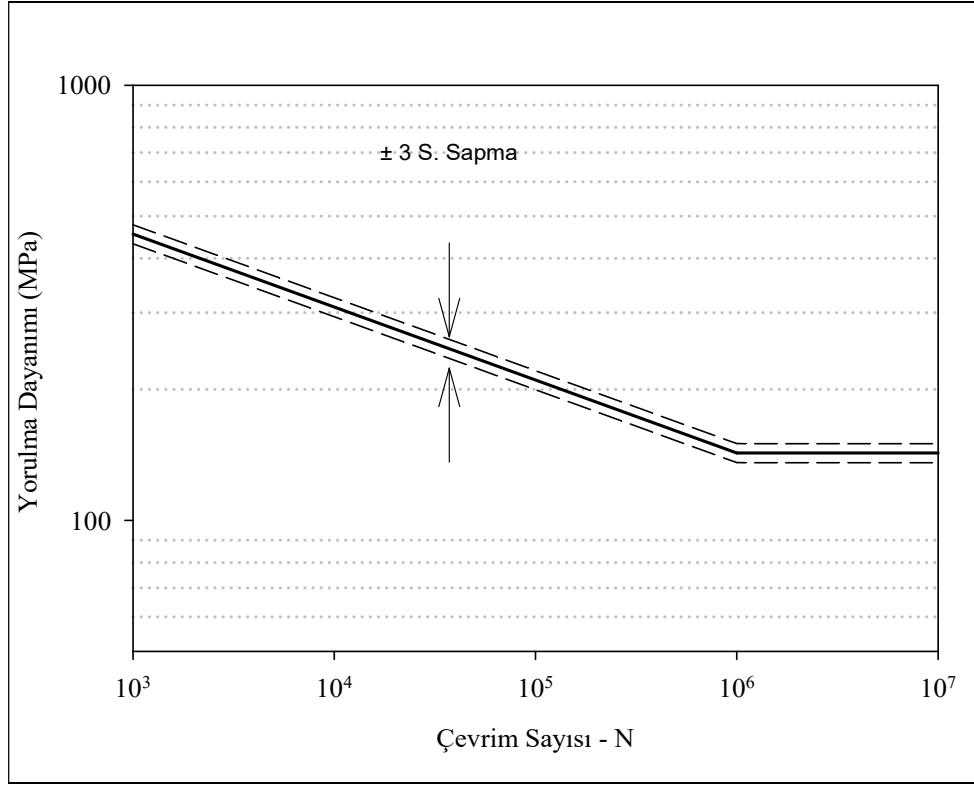
$$\sigma_a^h = 0.1\sigma^h \quad (3.10)$$

Çizelge 3.4.’te mekanik özellikleri verilen boruya ait S-N eğrisi hesaplanarak elde edilmiş ve boru gövdesi için yapılacak yorulma analizinde kullanılmak üzere Şekil 3.10.’da sunulmuştur. S-N eğrisi malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek çeşitliliğe bağlı olarak $\pm \%5$ tolerans aralığında tanımlanmıştır. S-N eğrisi için sonsuz ömür limiti “ S_e ” Eş. 3.11 kullanılarak elde edilmiştir.

$$S_e = 0.5S_{ut}k_ak_bk_c \quad (3.11)$$

Eşitlikte “ S_{ut} ” malzemenin çekme dayanımını, “ k_a ” malzemeye ait yüzey faktörünü, “ k_b ” malzemeye ait boyut faktörünü ve “ k_c ” ise probleme ait yük faktörünü temsil etmektedir. Sonsuz ömür limitinin hesabında yüzey faktörü “0,65”, boruda normal gerilme meydana geldiğinden boyut faktörü “1” ve yük faktörü “0,85” olarak kabul edilmiştir [68].

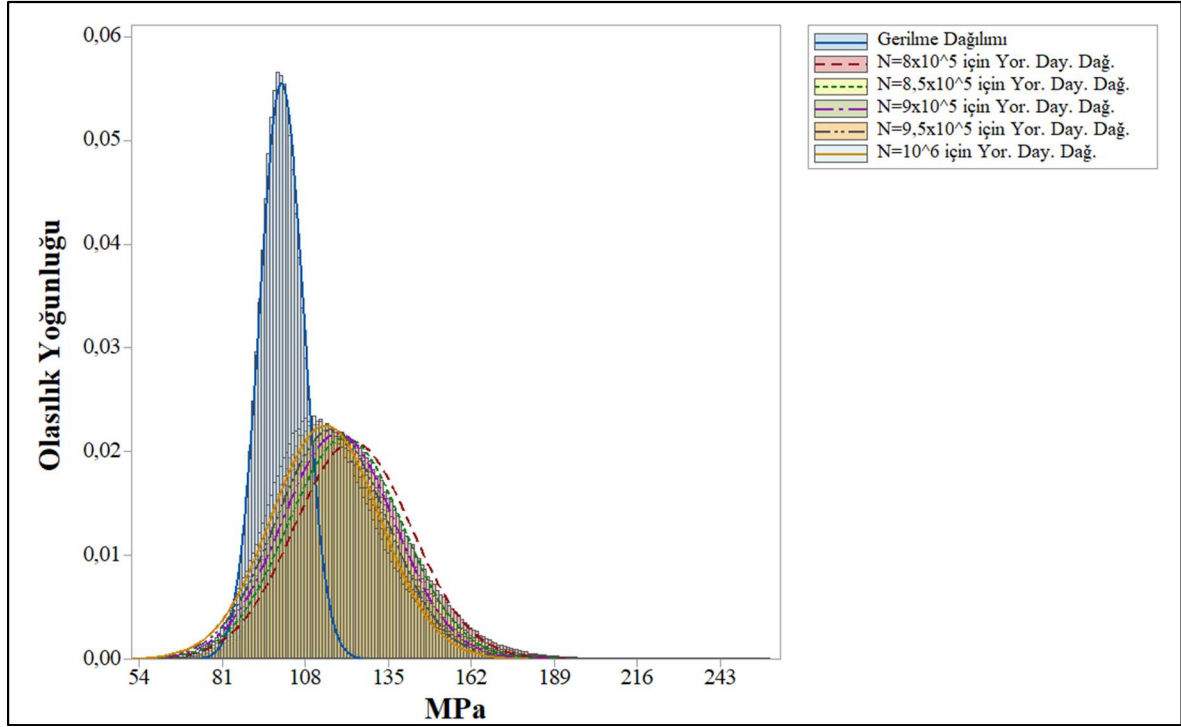
Şekil 3.10’da gösterilen S-N eğrisi kaynaklı birleştirmenin söz konusu olmadığı boru gövdesi için yorulma dayanımı dağılımlarının elde edilmesinde kullanılmıştır. Malzemenin çekme dayanımında oluşması muhtemel $\pm \%5$ tolerans için yine 500 000’er veriden oluşan yorulma dayanımı dağılımları Şekil 3.10’da sunulan S-N eğrisine uygun olarak bilgisayar ortamında elde edilmiştir.



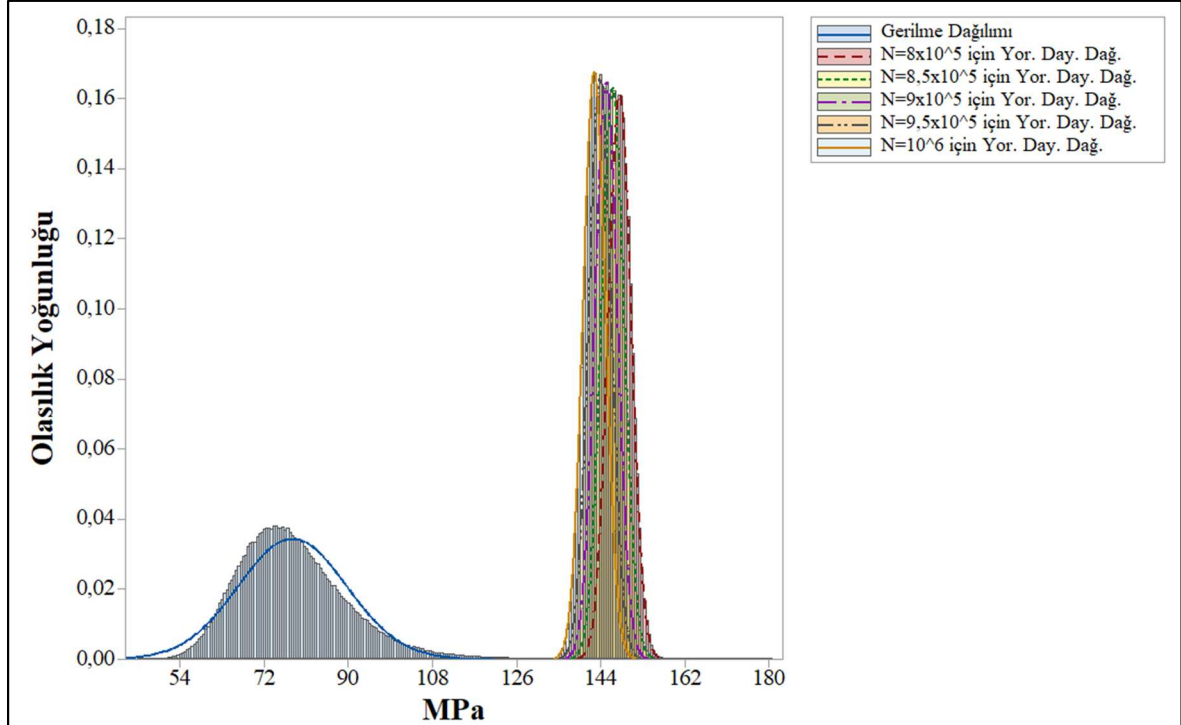
Şekil 3.10. Boru gövdesi için S-N eğrisi.

3.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi

Elde edilen gerilme ve dayanım normal dağılımları kullanılarak Monte Carlo benzetimi yöntemiyle yorulmaya bağlı hasar olasılığı tahmini yapılmış olup elde edilen sonuçlar Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de sunulmuştur. Şekil 3.11.'de kaynaklı birleştirme için eksen yönünde gerilme dağılımı ile çevrim sayısına bağlı olarak değişen yorulma dayanımı dağılımları karşılaştırılmış olup hasar olasılığının büyüklüğü iki dağılımın girişimi üzerinden elde edilebilmektedir. Benzer şekilde, Şekil 3.12'de boru gövdesinde kaynak olmayan alanlar için çevresel yöndeki gerilme dağılımı ile yorulma dayanımı dağılımları karşılaştırılmıştır. İki grafik birlikte incelendiğinde kaynaklı birleştirme bölgesinin yorulma hasarı yönünden daha kritik olduğu değerlendirilebilir. Bunun en önemli nedeni, iç basınca bağlı eksen yönündeki gerilmenin borudaki akışın sınırlandırılmasıyla meydana gelmesi ve bu yüzden de eksen yönündeki gerilme genliğinin çevresel yöndeki gerilme genliğinden daha büyük olmasıdır.



Şekil 3.11. Kaynakta eksen yönünde gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk dağılımları.



Şekil 3.12. Boru gövdesinde çevresel yönde gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk dağılımları.

Ayrıca kaynaklı bölgeye ait S-N eğrisi ile boru gövdesi için hesaplanan S-N eğrisi karşılaştırıldığında, kaynaklı bölgenin sonsuz ömür limitinin daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 3.11. ve Şekil 3.12.'de görüldüğü üzere, çevrim sayısı arttıkça yorulma dayanımı dağılımının gerilme dağılımına yaklaştığı bu sebeple de birikimli hasar olasılığının arttığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada yorulma hasar olasılıklarının hesaplanmasında yorulma hasar kriterlerinden Soderberg Hasar Kriteri kullanılmıştır. Problem için gerçekleştirilecek yorulma analizinde, hem gerilme ortalaması hem de gerilme genliği söz konusu olduğundan çözüm için eşdeğer gerilme genliği dağılımı hesaplanmalıdır. Eşdeğer gerilme genliği Eş. 3.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{a\,eq}^h = \sigma_a^h \left(\frac{S_y}{S_y - \sigma_m^h} \right) \quad (3.12)$$

Çevrim sayısına bağlı olarak hasar olasılığını elde edebilmek için Eş. 2.1 ve Eş. 2.3'ün farklı çevrim sayıları için tekraren çözülmesi gerekmektedir. Her bir çevrim sayısına karşılık gelen hasar olasılığı bu şekilde hesaplanabilmektedir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş olan çözüme ait sonuçlar Çizelge 3.6.'da sunulmuştur. Çizelge 3.6. incelendiğinde, yorulmaya bağlı hasar olasılığının birikimli olarak zamana bağlı şekilde artıyor olduğu görülmektedir. Çizelge 3.6.'da ayrıca boru gövdesinde çevresel yöndeki gerilmeye bağlı hasar olasılığı sonuçları da görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan, kaynaklı birleştirmelerin yorulma hasarı özelinde daha dikkatli incelenmesi gerektiği yorumu yapılabilir.

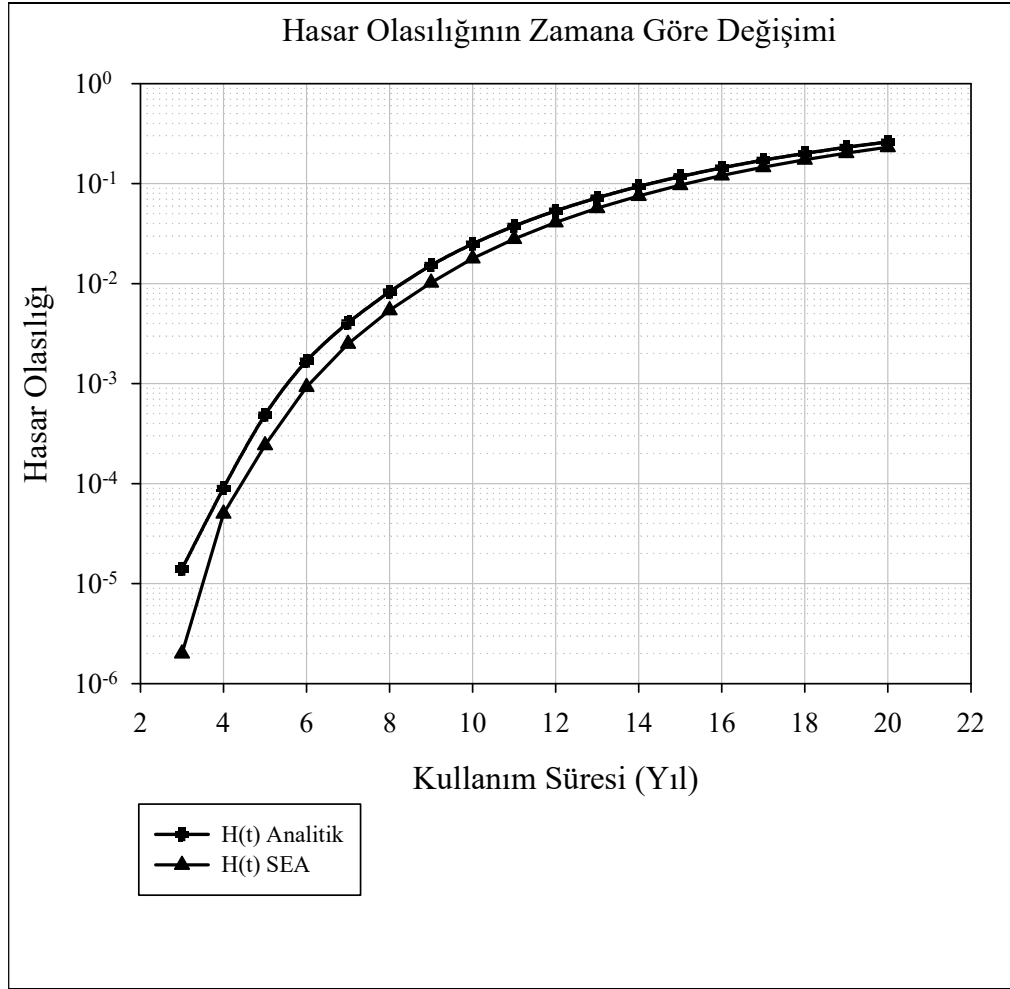
Çizelge 3.6. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.

Çevrim Sayısı	Hasar Olasılığı Analitik	Hasar Olasılığı SEA	Hasar Olasılığı Boru Gövdesi
1,50E+05	1,40E-05	2,00E-06	0,00E+00
2,00E+05	9,00E-05	5,00E-05	0,00E+00
2,50E+05	4,86E-04	2,42E-04	0,00E+00
3,00E+05	1,69E-03	9,26E-04	2,00E-06
3,50E+05	4,07E-03	2,50E-03	2,00E-06
4,00E+05	8,27E-03	5,41E-03	2,00E-06
4,50E+05	1,52E-02	1,02E-02	4,00E-06
5,00E+05	2,50E-02	1,78E-02	1,60E-05
5,50E+05	3,76E-02	2,79E-02	2,40E-05
6,00E+05	5,34E-02	4,10E-02	2,80E-05
6,50E+05	7,20E-02	5,68E-02	4,20E-05
7,00E+05	9,37E-02	7,53E-02	5,40E-05
7,50E+05	1,18E-01	9,66E-02	7,40E-05
8,00E+05	1,44E-01	1,20E-01	9,80E-05
8,50E+05	1,72E-01	1,46E-01	1,20E-04
9,00E+05	2,00E-01	1,73E-01	1,34E-04
9,50E+05	2,31E-01	2,02E-01	1,58E-04
1,00E+06	2,61E-01	2,32E-01	1,80E-04

3.4. Uygulama Sonuçları

Kaynaklı birleştirmeler boru hattı için kritik nokta olarak kabul edilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde alın kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Kaynaklı birleştirmeler bir yüzey kusuru olmamasına rağmen alın kaynak yöntemiyle yapılan birleştirmelerde boru toleranslarına ve operatör yetkinliğine bağlı olarak bir eksantriklik söz konusu olmaktadır. Bu durum da bir kusur gibi kabul edilmiş olup bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmasına karar verilmiştir. Eksantrikliğe bağlı gerilme konsantrasyonu sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Sonuçlar literatürden analitik bir bağıntıdan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her iki sonuç da teorik olmasına rağmen sonuçların birbiri ile tutarlı olması kıymetli bulunmuştur. Anılan eksantrikliğin büyüklüğü, borunun geometrik özellikleri, mekanik özellikleri ve işletme basıncı güvenilirliği etkileyen değişkenler olarak ele alınmıştır. Söz konusu değişkenlere bağlı olarak yorulma etkisinde zamana bağlı hasar olasılığı tahmini yapılmıştır.

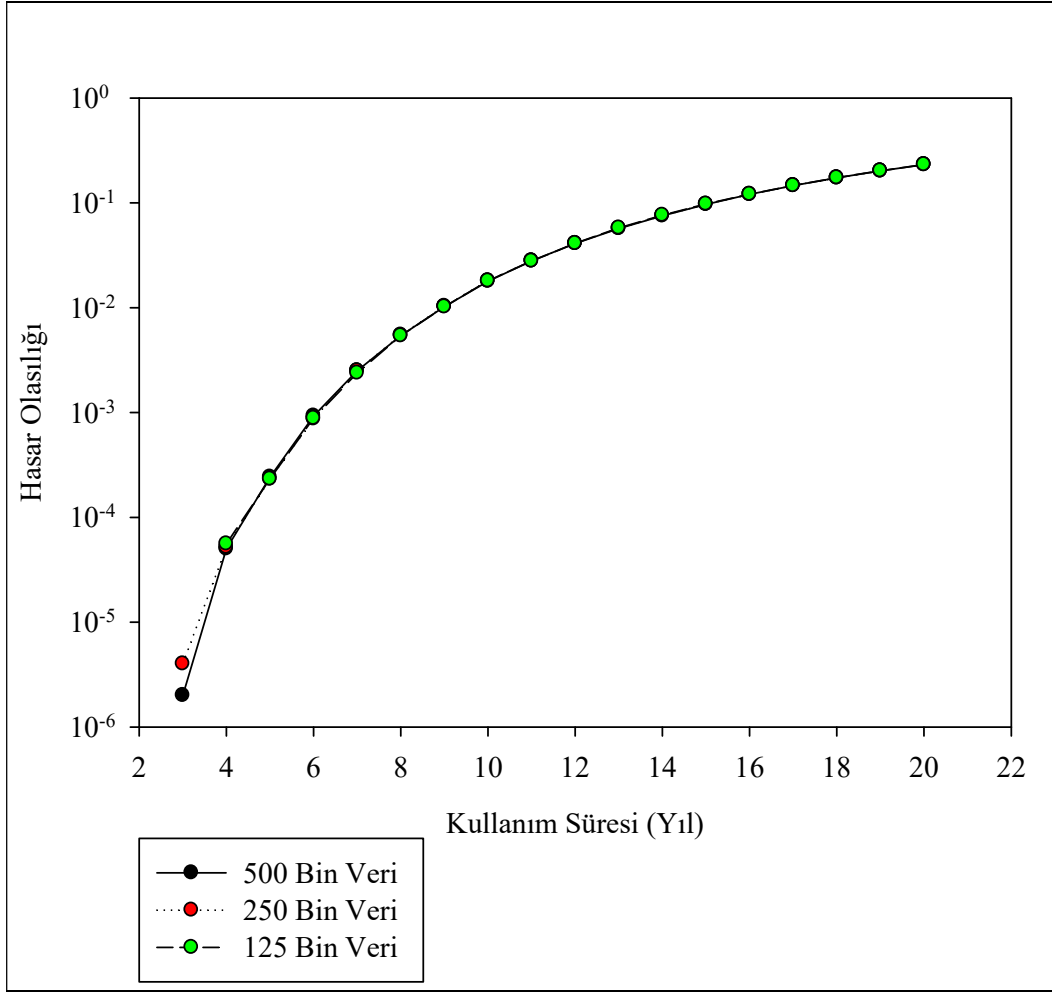
Örnek olarak seçilen API 5L X60 çelik boru için, önerilen yöntem dâhilindeki analitik ve sonlu elemanlar yaklaşımları ile elde edilmiş olan “Hasar Olasılığı – Kullanım Süresi” grafikleri Şekil 3.13.’te sunulmuştur. Şekilde kaynaklı birleştirme noktalarında yorulma hasarı meydana gelme olasılığı çevrim sayısına bağlı olarak gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında, kaynaklı bölge için gerilme konsantrasyon faktörünün hesaplanabileceği denklem sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak elde edilmiştir. Hem analitik yaklaşım hem de sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak elde edilen yorulmaya bağlı hasar olasılığı grafikleri Şekil 3.13.’te beraber görülmektedir.



Şekil 3.13. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı $N = 5 \times 10^4$ olarak kabul edilmiştir).

Grafiklerden sonuçların birbiri ile oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen bu uygulamanın sonucunda, kaynaklı birleştirmeler için gerilme konsantrasyonu elde edilmesinde sonlu elemanlar yönteminin faydalı olduğu, farklı kaynak geometrileri için de bu yöntemden yararlanılabileceği ve sonlu elemanlar yönteminin güvenilirlik tahmini sürecinde kullanılabileceği değerlendirilmesine varılabilir.

Hasar olasılığı hesaplanırken Monte Carlo benzetimi yönteminden yararlanılmıştır. Hesaplamalarda 500 000 verilik bir benzetim gerçekleştirilmiştir. Benzetim için gerçekleştirilen yakınsama çalışması Şekil 3.14.'te görülmektedir. Grafikten 125 000 verinin dahi hemen hemen aynı sonucu verdiği görüldüğünden 500 000 veri oldukça makuldür.

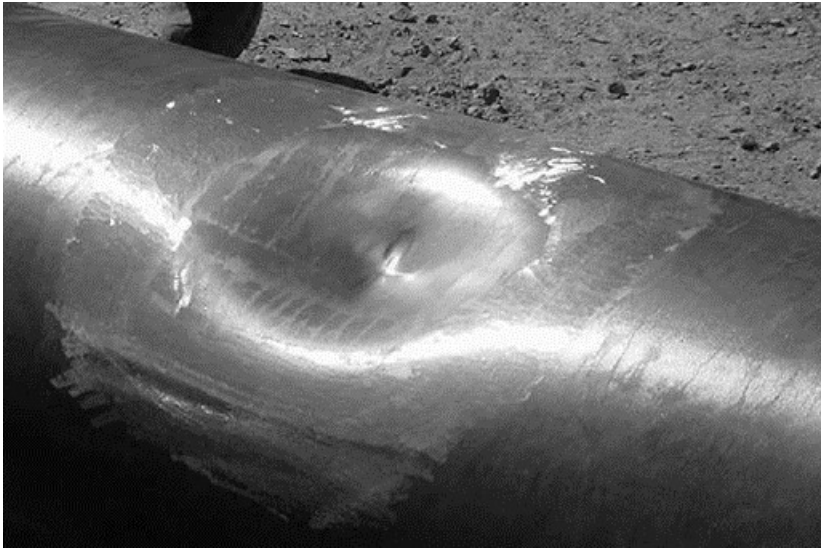


Şekil 3.14. Monte Carlo benzetimi yakınsama çalışması.

Çalışma kapsamında örnek olarak ele alınan boru için elde edilen hasar olasılığı grafiği muayene zamanının belirlenmesi için önemli bir veri oluşturmaktadır. İşletmelerin muhtemel hasarın olası sonuçlarını dikkate alarak kendi risklerini belirlemeleri ve sonucunda tolerans gösterebilecekleri hedef risk büyüklüğüne karar vererek, kendilerine en uygun muayene zamanını tespit etmeleri gerekmektedir.

4. GÖÇÜKLERDE YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ

Önceki bölümde, boru hatları için muhtemel hasarların meydana gelebileceği kritik noktalardan biri olarak kaynaklı birleştirmeler ele alınmıştır. Kaynaklı birleştirmeler hattın hasar olasılığını arttırmakla birlikte, söz konusu birleştirmeleri boru hattında meydana gelmesi muhtemel hasarları açıklamak için tek neden olarak göstermek yeterli değildir. Hattın bulunduğu ortamın çevresel koşullarına bağlı olarak darbe, toprak kayması, vb. nedenlerle meydana gelebilecek cidar göçükleri de boru hatları için kritik noktalar olarak ele alınmalı, bu noktalar da güvenlik açısından ayrıca değerlendirilmelidir. Boru hatları yer altında, su altında veya yer üstünde dış etkilere açık olarak uzun mesafeler kat etmektedirler. Çoğunlukla sert cisimlerin çarpması neticesinde çeşitli boyut ve geometrilerde cidar göçüklerine maruz kalmaları söz konusudur. Çalışmalar göstermektedir ki, göçükler borunun dayanabileceği en yüksek işletme basıncını kayda değer ölçüde değiştirmemektedir [20]. Fakat göçüğün yaratacağı gerilme konsantrasyonunun yorulma hasarları oluşturduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur [78, 79]. Resim 4.1.'de üzerinde göçük oluşmuş bir boru elemanı görülmektedir [21].

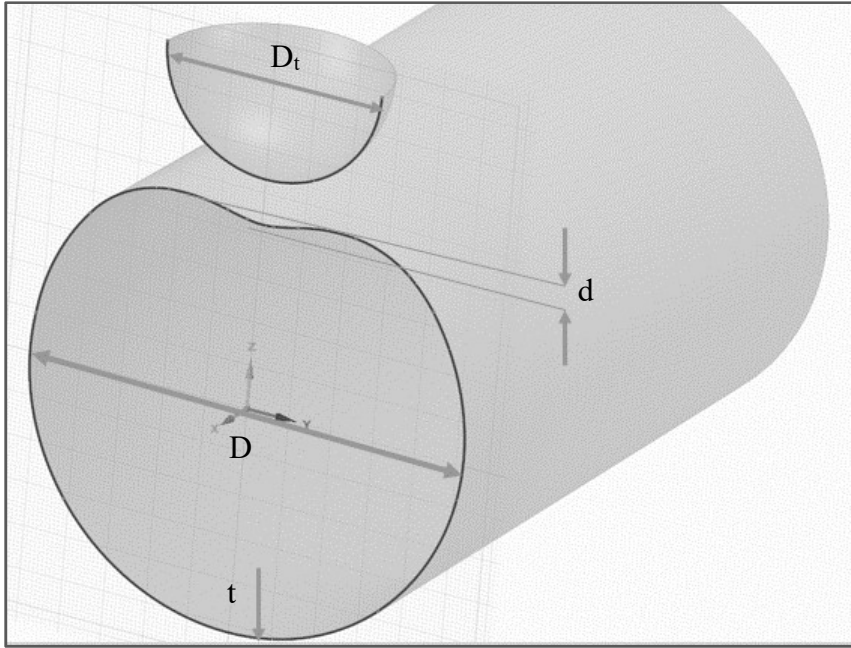


Resim 4.1. Üzerinde göçük oluşmuş bir boru elemanı.

Tez çalışmasının bu bölümünde boru cidarındaki muhtemel göçükler incelenecek olup söz konusu göçüklerin borunun güvenirliliğine etkisi öngörülmeye çalışılacaktır.

4.1. Gerilme Dağılımının Tahmini

Göçük kusurunda gerilme konsantrasyon faktörünü (GK_F_G) etkilediği öngörülen geometrik değişkenler Şekil 4.1.'de gösterilmektedir. Göçük kusuru için gerilme dağılımının elde edilebilir olması için öncelikle söz konusu bölgede gerilme konsantrasyonunun hesaplanabilir olması gerekmektedir. Geometrik değişkenlere bağlı olarak gerilme konsantrasyonu fonksiyonunun elde edilmesi problemin çözümünün ilk adımıdır. Bunun için de sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır.

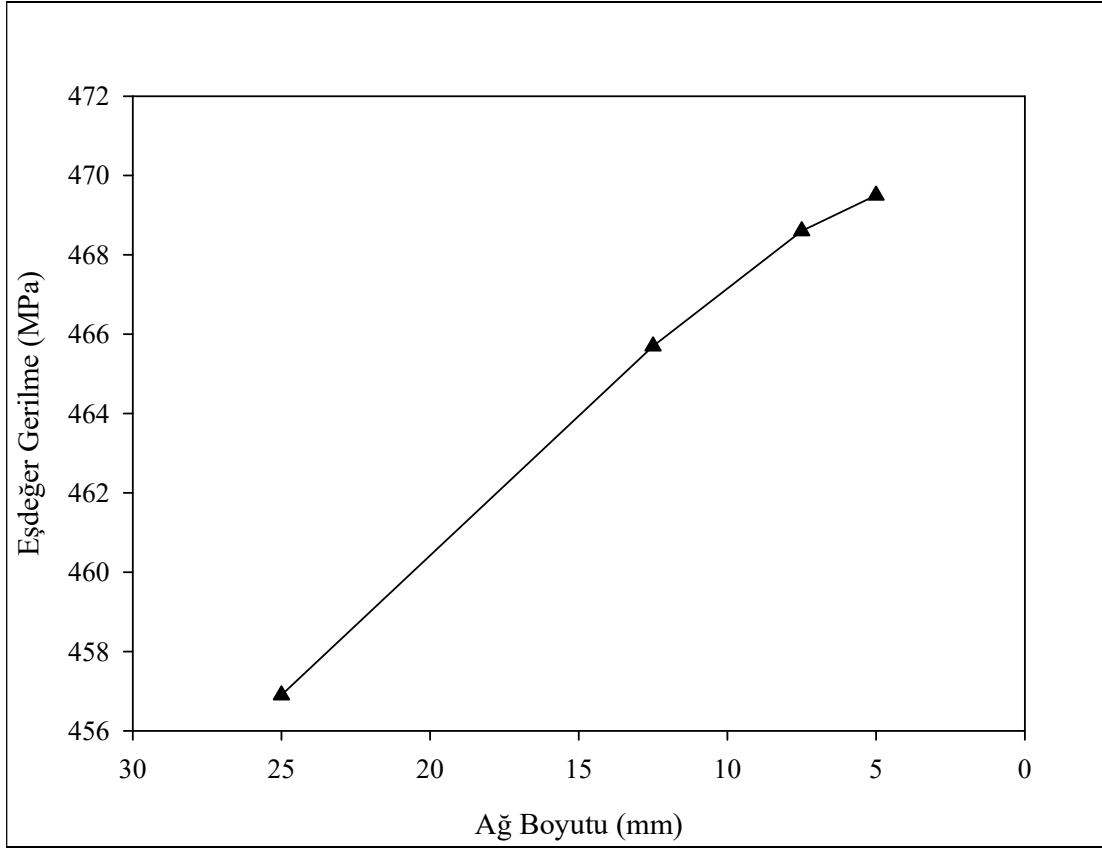


Şekil 4.1. Geometrik değişkenler.

4.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması

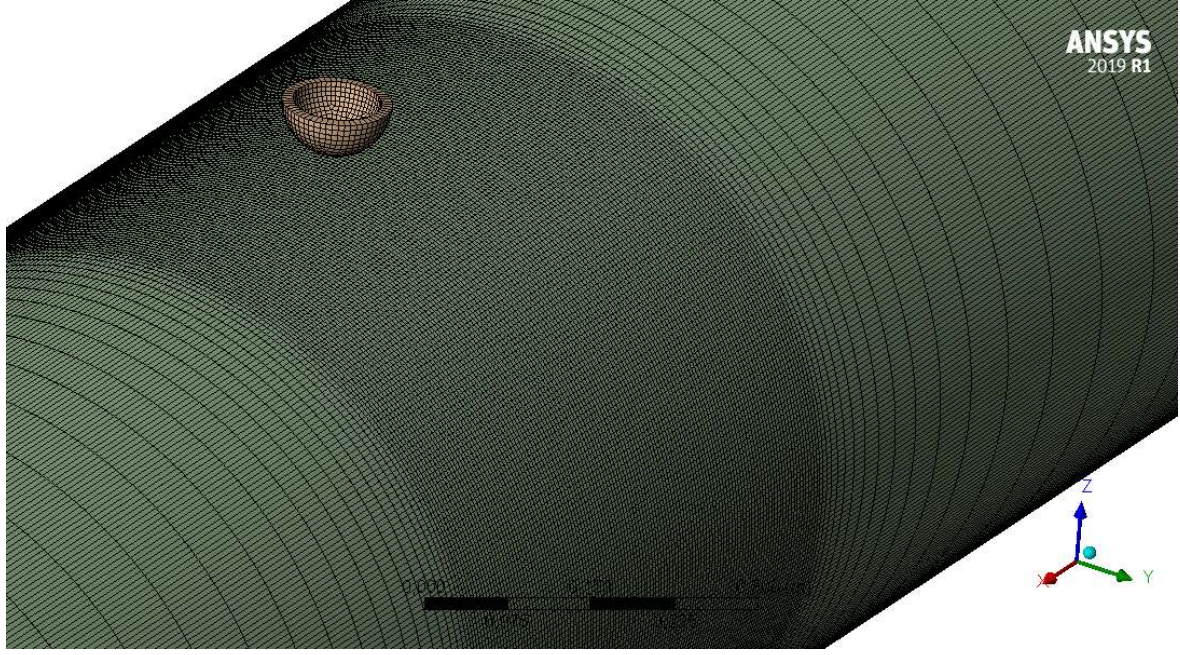
Bu bölümde ele alınan problemi analitik olarak çözmek güçtür fakat borudaki göçük kusuru için gerilme konsantrasyon faktörü sonlu elemanlar yöntemi ile kolaylıkla elde edilebilir. Problemi gerçeğe en uygun şekliyle modelleyebilmek için iki aşamalı bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Analizin birinci aşamasında boru üzerinde istenilen çap ve derinlikte bir göçük oluşturulmuş, ikinci aşamada ise üzerinde göçük bulunan boru modeline iç basınç uygulanarak göçük bölgesindeki gerilme artışı kaydedilmiştir. Yakınsama çalışması yapılmak suretiyle modelde göçük bölgesi için ağ boyutunun 5 mm olarak alınmasının yeterli olduğu kararlaştırılmış olup göçük bölgesi uzağında hesaplama süresinden avantaj sağlamak için ağ boyutu büyütülmüştür. Şekil

4.2.'de yakınsama çalışması grafik olarak sunulmuştur. Model kabuk olarak hazırlanmıştır. Ağ dört kenarlı kabuk elemanlardan oluşturulmuş olup et kalınlığı ayrıca benzetim sırasında tanımlanmıştır. Şekil 4.3.'te ağ uygulanmış model görülmektedir.



Şekil 4.2. Göçük bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.

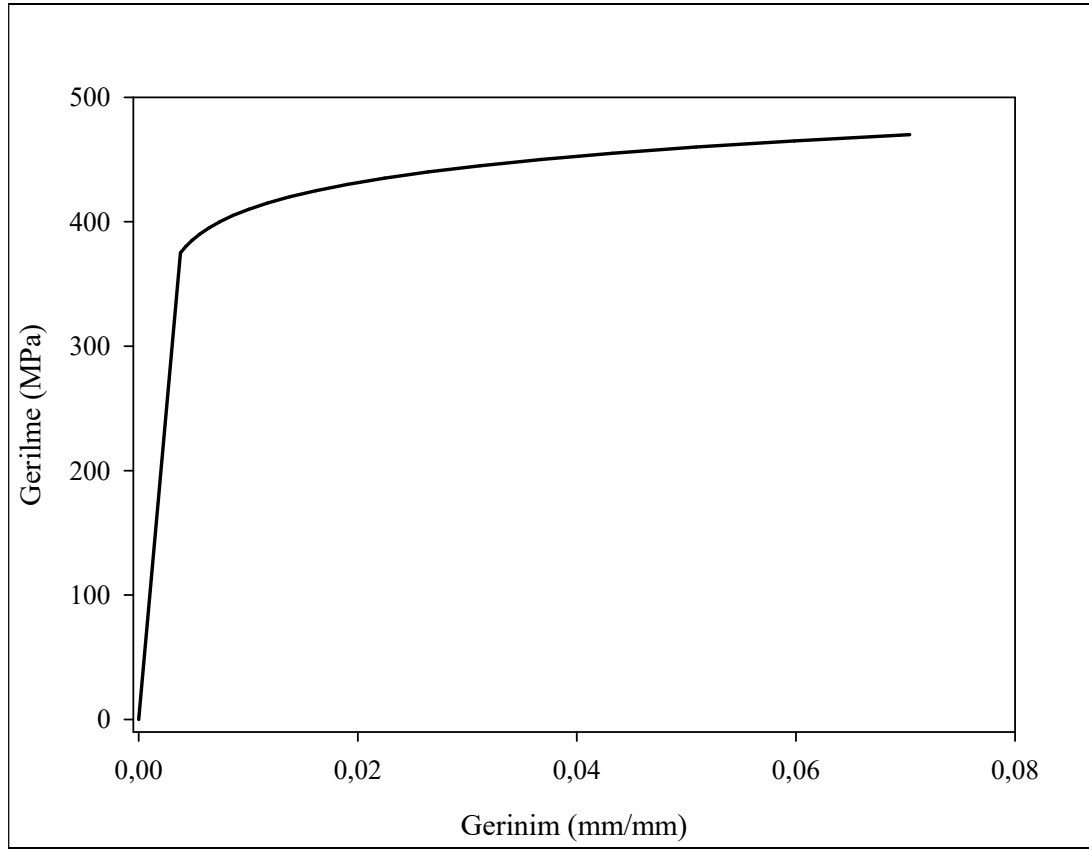
Şekilde boru üzerinde konumlanmış olan cisim göçüğü oluşturmak üzere tamamen katı olarak modellenmiştir. Benzetimin birinci aşamasında borunun hareketi tüm yönlerde kısıtlanmış olup katı cisme “-z” yönünde hareket verilmiştir. Boru ile katı cismin dış yüzeyleri arasında söz konusu olan temas problemi çözülmüştür. Boru üzerinde kalıcı bir şekil değişikliği yaratmak hedeflendiğinden doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Malzemeye ait gerilme-gerinim eğrisi Eş. 4.1’de sunulan Ramberg-Osgood denklemi kullanılarak Şekil 4.4.’te görüldüğü şekliyle elde edilmiştir.



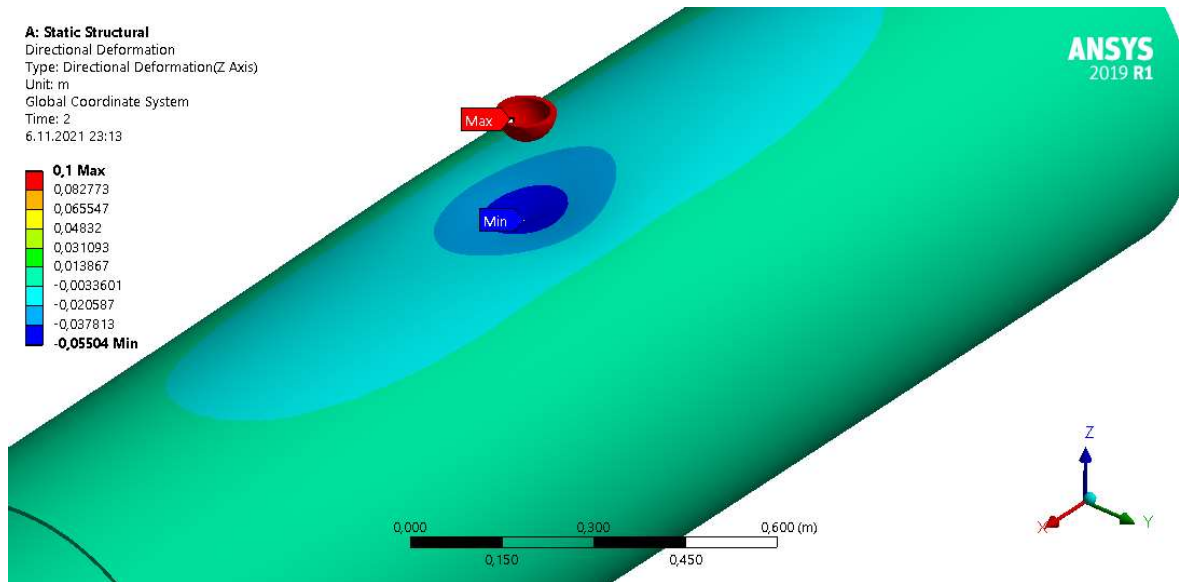
Şekil 4.3. 5 mm boyutunda ağ uygulanmış kabuk model.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,02 \left(\frac{\sigma}{S_y} \right)^{1/n_h} \quad (4.1)$$

Burada “ ε ” gerinim, “ σ ” gerilme, “ S_y ” akma dayanımı ve “ n_h ” gerinim sertleşmesi üstelidir. Söz konusu eğri ANSYS üzerinde malzeme modülü içerisinde tanımlanarak problem çözülmüştür. Gerilme-gerinim eğrisine uygun olarak şekil değiştiren boru modeli, üzerinden katı cismin kaldırılmasıyla bir miktar geri esnemeye maruz kalsa da model üzerinde kalıcı bir göçük oluşturmaktadır. Şekil 4.5.’te boru modeli üzerindeki kalıcı deformasyon görülmektedir. Göçük kusurlu boru modelinin elde edilmesiyle benzetimin ikinci aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada üzerinde göçük bulunan boru modeli iç yüzeyine basınç uygulanarak göçük bölgesindeki gerilme artışı kaydedilmiştir. Sınır koşullarını sağlamak için boru bir ekseninden sabitlenmiştir. İç basınç borunun tüm iç yüzeyine homojen şekilde uygulanmıştır. Boru parçasının her iki uçtan körlendiği ve akışın sınırlandığı kabul edilmiş olduğundan bu durum boru eksen yönünde normal gerilme meydana getirecektir. Söz konusu gerilmeyi oluşturacak büyüklükte kuvvet modeldeki boru kesitine eksen yönünde (Bkz. Şekil 4.3. x -ekseninde) ayrıca uygulanmıştır. Kuvvetin büyüklüğü boru iç çapı ve basınca bağlı olarak Üçüncü Bölüm’ de (Bkz. Eş. 3.4) gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

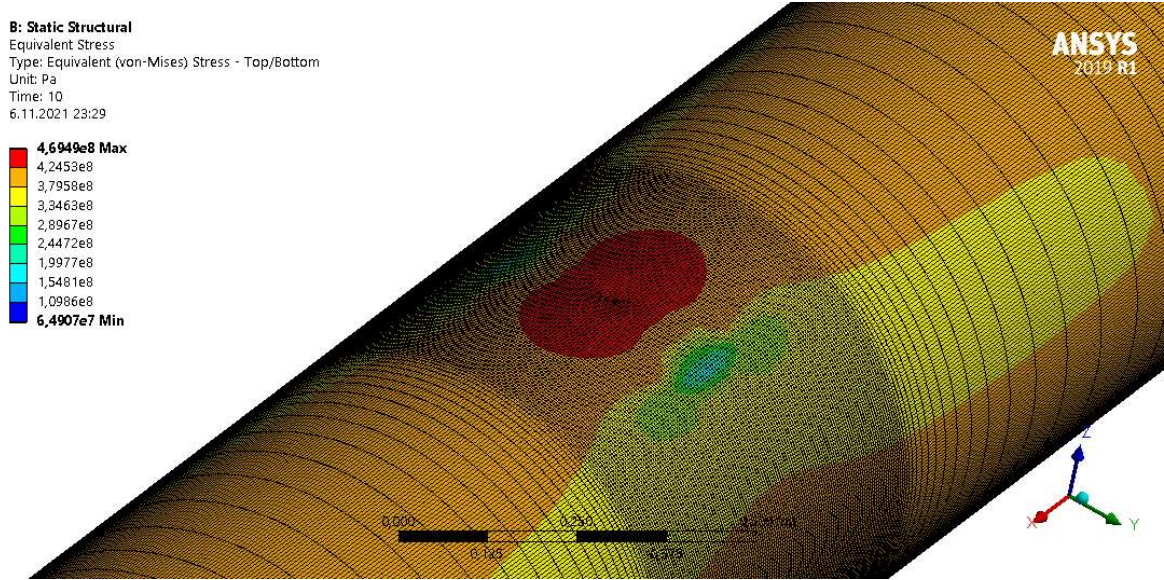


Şekil 4.4. Gerilme-gerinim eğrisi.



Şekil 4.5. Boru modeli üzerinde oluşturulan göçük.

Analiz sonucunda beklendiği şekilde göçük bölgesinde gerilme artışı kaydedilmiş, göçük ve yakın çevresindeki eşdeğer gerilme durumu Şekil 4.6.'da sunulmuştur.



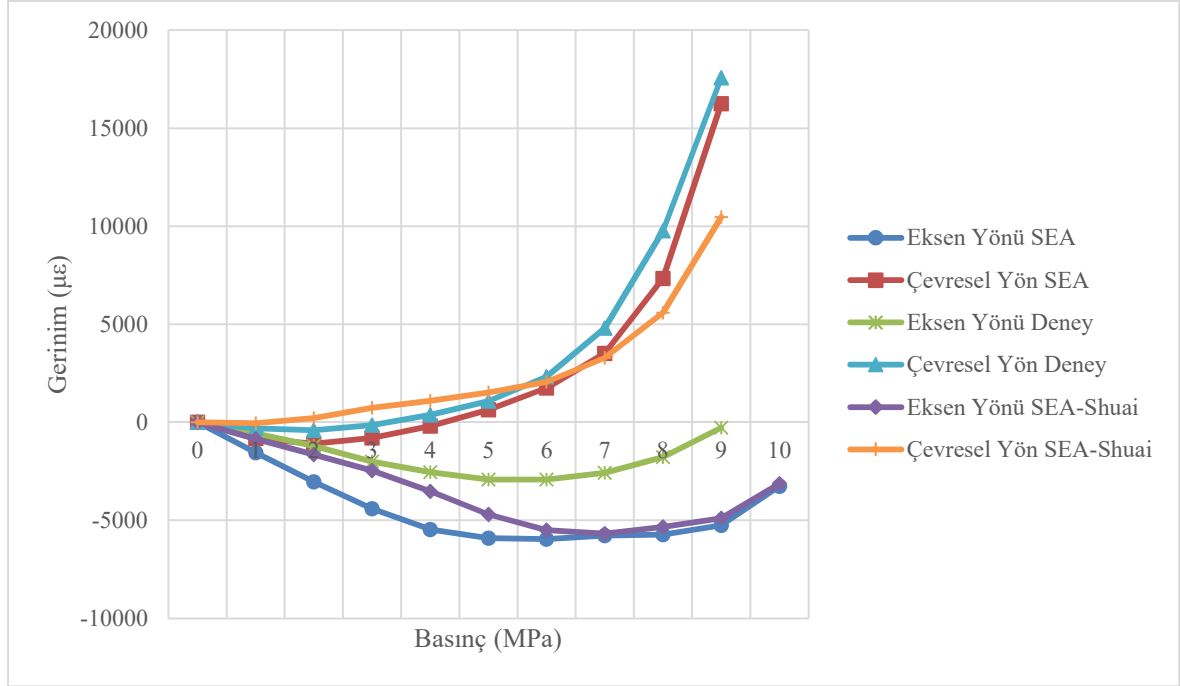
Şekil 4.6. Göçük bölgesi için iç basınca bağlı eşdeğer gerilme durumu.

4.1.2. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması

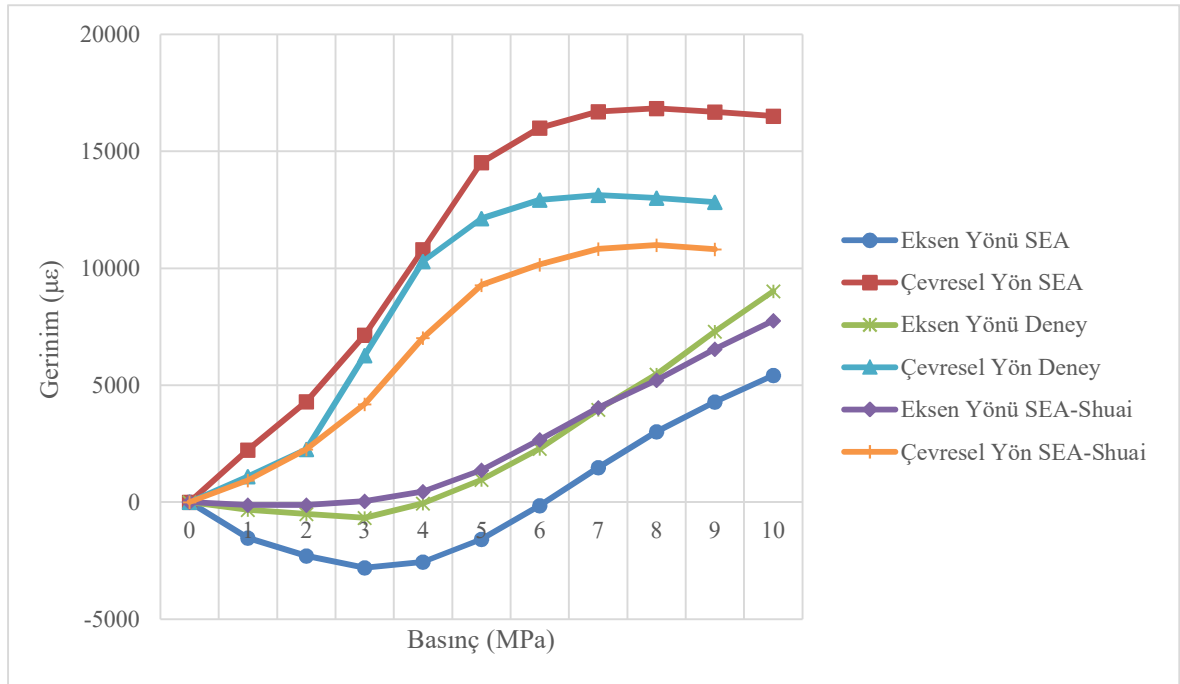
Literatürde borulardaki göçüklerin mekanik davranışını inceleyen güvenilir deneysel çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmanın öncelikli amacı göçük probleminin deneysel çözümü olmadığından ve halihazırda deneyleri gerçekleştirilmiş olan kabul edilebilir örnekler mevcut olduğundan bu çalışma kapsamında hazırlanmış olan sonlu elemanlar modeli literatürdeki deneysel çalışmalar kullanılarak doğrulanmıştır. Bunun için daha önce farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş iki ayrı deneysel çalışma kullanılmıştır.

Birinci örnek deneysel çalışma [20]

İlgili deney iki aşamalıdır. Birinci aşamada boru numunesi üzerine pres ile göçük oluşturulmuş, ikinci aşamada ise göçük bölgesine gerinim ölçerler yerleştirilmiş ve boru numunesine iç basınç uygulanmıştır. Deney sırasında Çizelge 4.1.'de mekanik ve geometrik özellikleri sunulmuş olan boru numunesi kullanılmıştır. Deney sırasında 100 mm çapında küresel bir kalıp kullanılmış olup 67 mm derinliğe inilmiştir. Darbe, borunun kaynak dikişi olmayan bir bölümüne, sınır koşullarından etkilenmemesi adına boru uçlarından uzakta



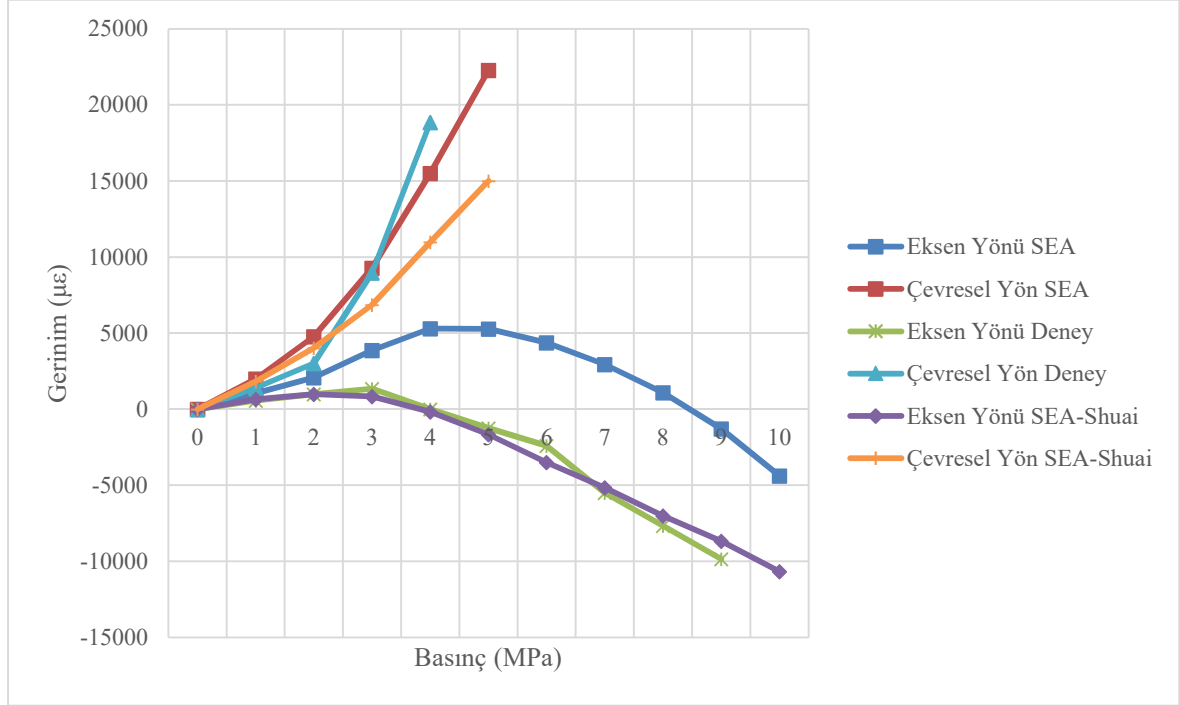
Şekil 4.8. Bir numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.



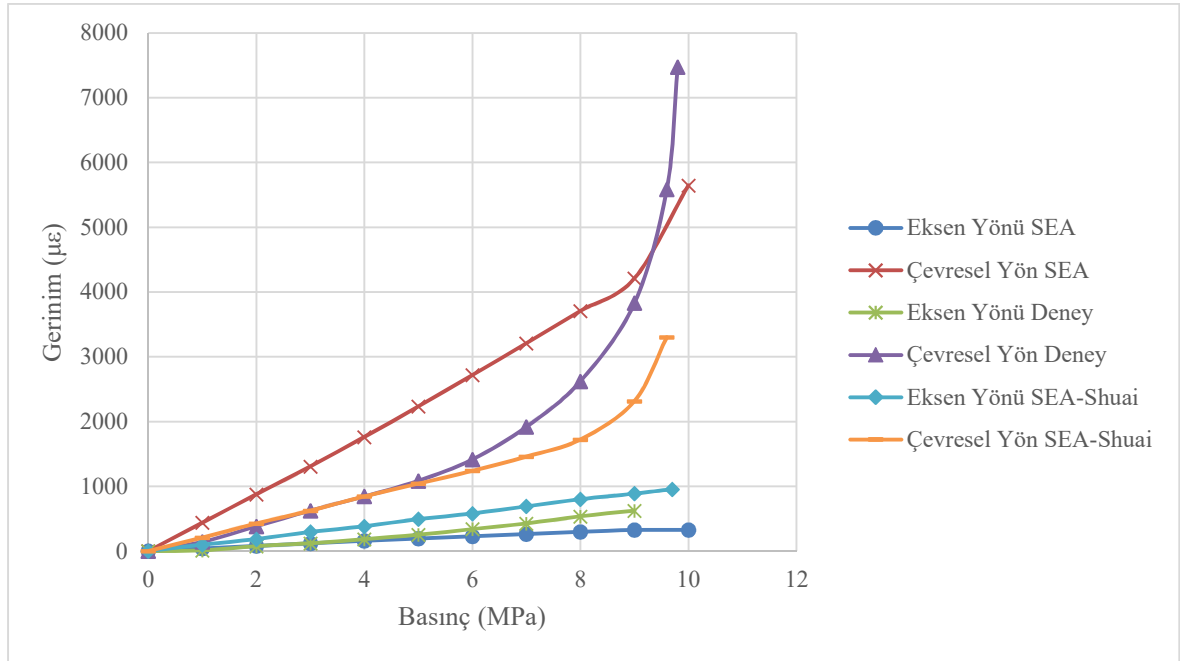
Şekil 4.9. İki numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.

sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar da ayrıca sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde benzetim sonuçlarının deney sonuçları ile kabul edilebilir ölçüde tutarlı olduğu, gerinim değerleri birebir aynı olmasa bile eğilimlerin benzer olduğu değerlendirilmesine varılmıştır. Sonuçlar arasındaki farkların, gerinim ölçerlerin ölçüm aldığı

noktalar ile model üzerinden ölçüm alınan noktalar arasında meydana gelen sapmalardan kaynaklı olabileceği kanaatine varılmıştır.



Şekil 4.10. Dört numaralı ölçüm noktası gerinim değerleri karşılaştırması.

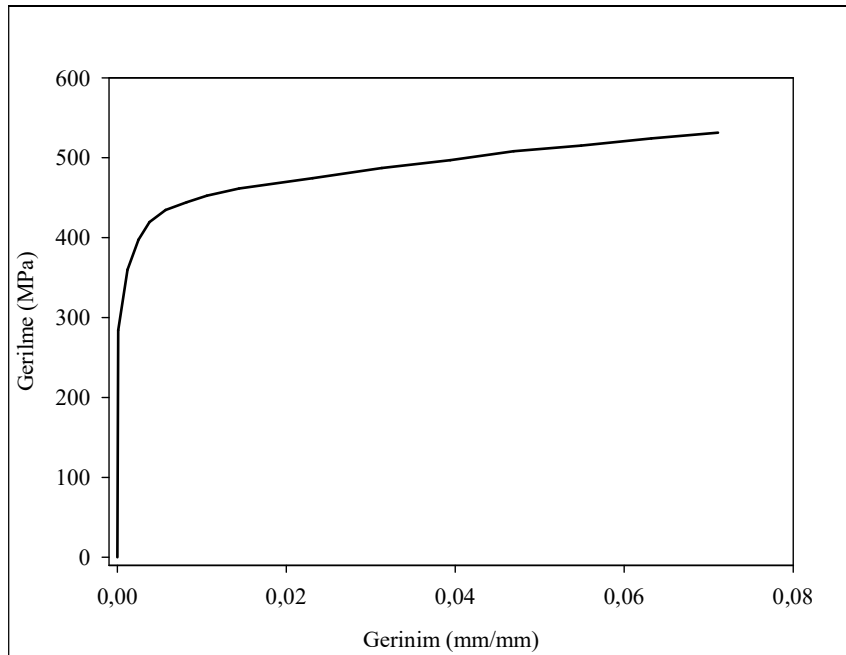


Şekil 4.11. Göçük bölgesi dışındaki bir ölçüm noktası için gerinim değerleri karşılaştırması.

Deneyin ilk aşaması olan şekil verme aşamasında, boru numunesi üzerinde bir miktar elastik bir miktar da plastik deformasyon oluşmaktadır. Kalıp numuneden çekilip boru numunesi üzerindeki basınç kaldırıldığında bir miktar geri esneme meydana gelmiştir. 67 mm derinliğe inilen bası neticesinde boru numunesi üzerinde 48,68 mm derinlikte göçük oluşmuş olup derinliği boru çapının %6,76'sı kadardır. Bu tez çalışması kapsamında hazırlanmış olan model üzerinden ölçülen kalıcı deformasyonun derinliği ise 50,99 mm olup boru çapının %7,08'i kadardır.

İkinci örnek deneysel çalışma [21]

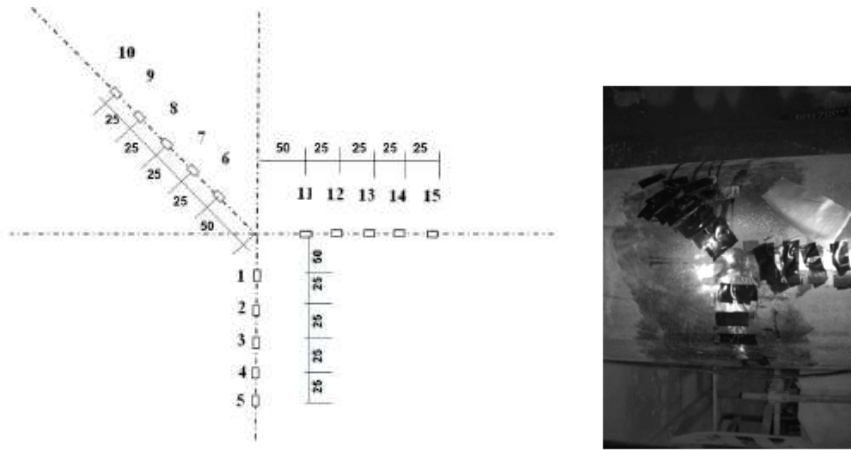
Söz konusu deneyde, basınçlandırılmış bir boru numunesi üzerinde pres ile göçük oluşturma sırasında, göçük çevresinin mekanik davranışı hem eksen yönünde hem de çevresel yönde incelenmiştir. Deneyden elde edilen veriler bu tez çalışması kapsamında hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar benzetimi sırasında Şekil 4.12.'de sunulan gerilme-gerinim eğrisi kullanılmıştır. Söz konusu deneyde farklı geometrilerde kalıplar kullanılmış olmakla birlikte bu tez çalışması ile uyumlu olacak şekilde küresel kalıpla oluşturulan göçük değerlendirmeye alınmıştır. Deney sırasında Çizelge 4.2.'de mekanik ve geometrik özellikleri sunulmuş olan boru numunesi kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Deney numunesine ait gerilme-gerinim eğrisi.
Çizelge 4.2. İkinci deneye ait numune özellikleri.

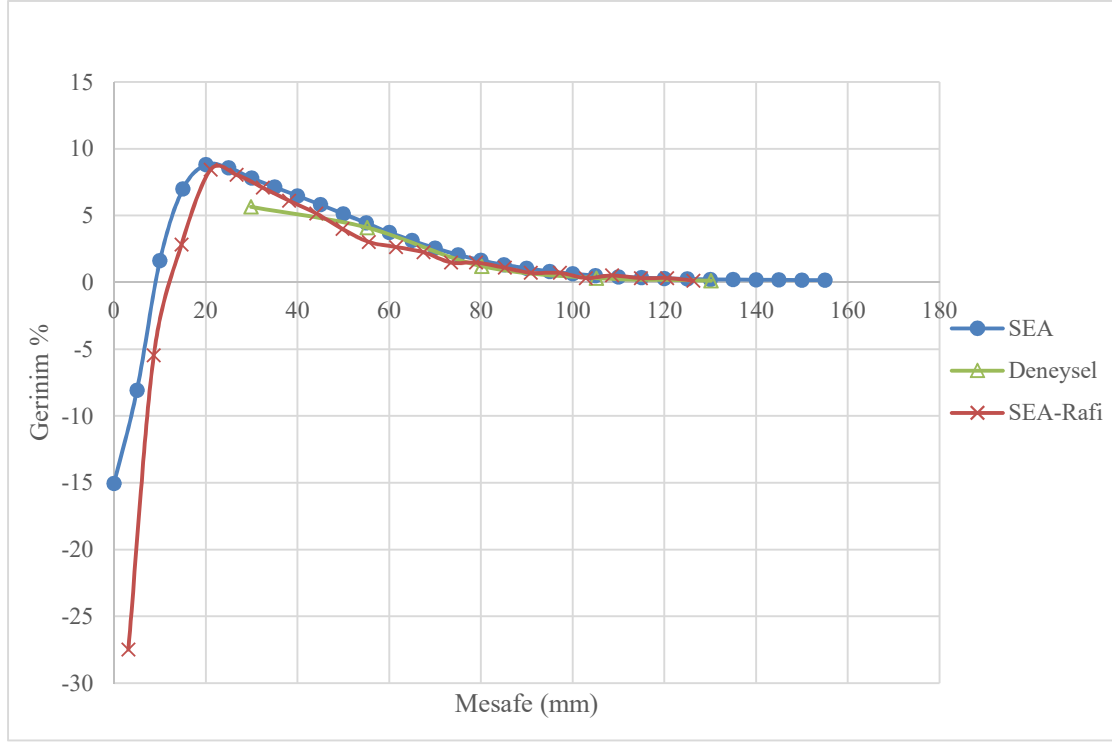
Malzeme	API 5L X52
Akma Dayanımı (MPa)	410
Çekme Dayanımı (MPa)	498
Young Modülü (GPa)	200
Çap (mm)	274
Cidar Kalınlığı (mm)	8,2
Poisson Oranı	0,3

Şekil 4.13.'te sunulmuş olan şablona uygun şekilde gerinim ölçer yapıştırılmış boru numunesine yaklaşık 4,9 MPa büyüklüğünde iç basınç uygulanmıştır [21]. Deney için bir pres düzeneği hazırlanmıştır. Göçük oluşturmak için 50 mm çapında ve küresel geometrili bir kalıp prese bağlanmıştır. Sonrasında basınçlandırılmış boru üzerinde pres ile göçük oluşturulmuştur. İşlem süresince gerinim ölçerlerden alınan veriler kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem eksen yönünde hem de çevresel yönde bu tez çalışması kapsamında hazırlanmış olan sonlu elemanlar modeli ile Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'de karşılaştırılmıştır.

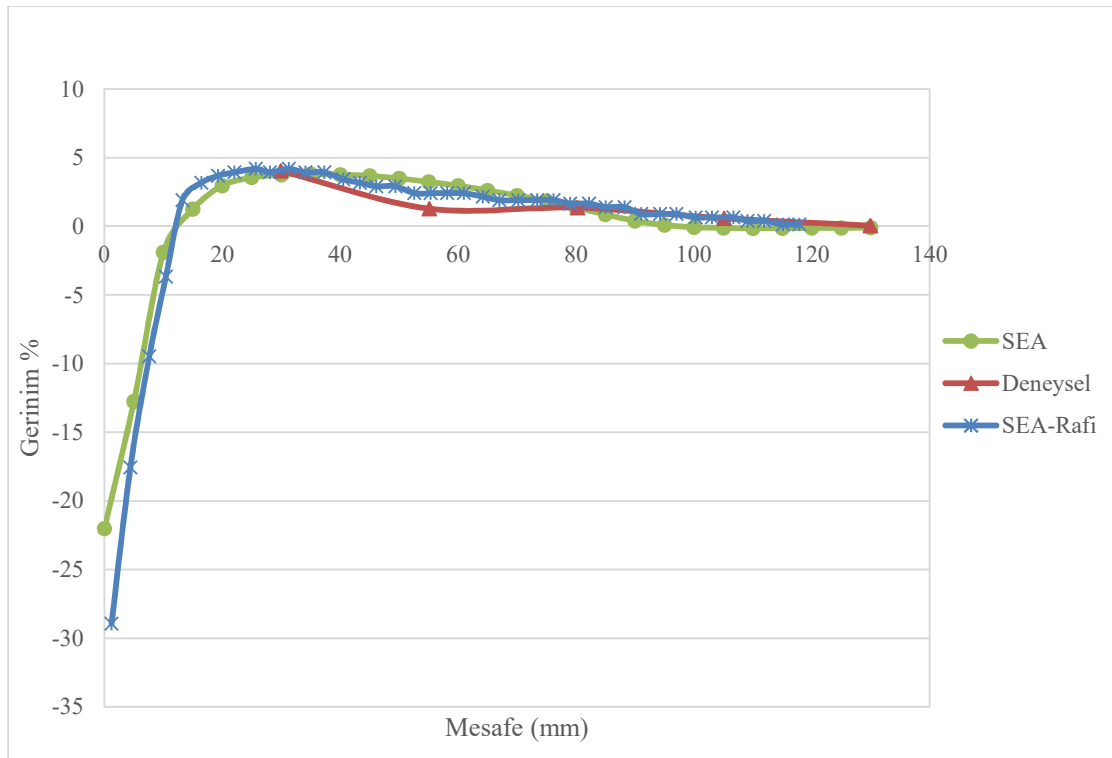


Şekil 4.13. Deney numunesi üzerinde gerinim ölçer yerleşimi.

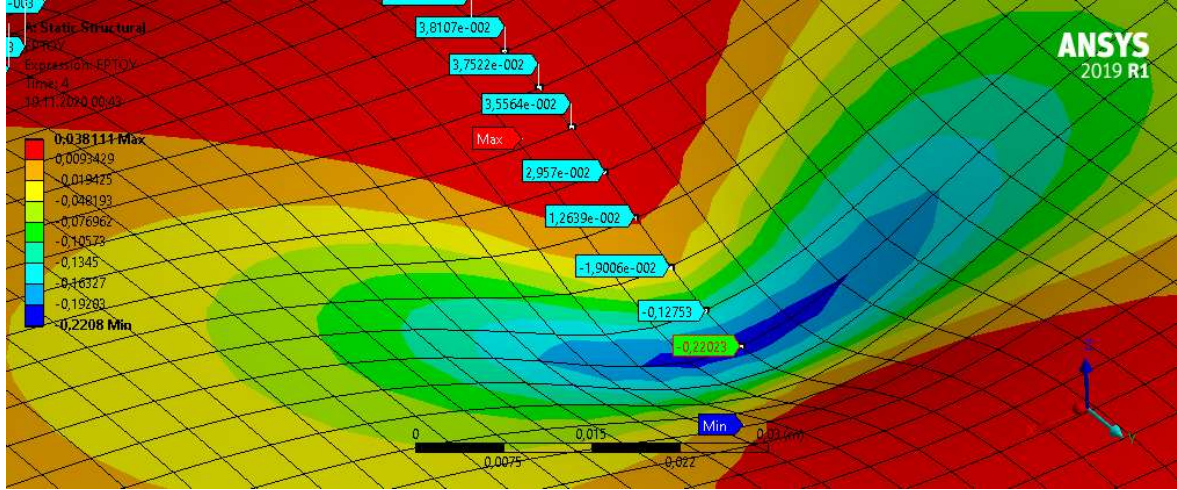
Karşılaştırmalı grafikler incelendiğinde, bu çalışma kapsamında hazırlanan sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte literatürdeki çalışmada elde edilen sonlu elemanlar analizi sonuçlarının da bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu da görülmektedir. Ayrıca deney sonucunda 22 mm nihai göçük derinliği elde edilmiş olduğu belirtilmiş olup boru çapının %8,03'ü kadardır. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen modelde göçük derinliği 21,05 mm olarak ölçülmüş olup boru çapının %7,68'i kadardır. Model üzerinden çevresel yönde alınan gerinim ölçümleri Şekil 4.16.'da sunulmuştur.



Şekil 4.14. Eksen yönünde yüzde gerinim karşılaştırması.



Şekil 4.15. Çevresel yönde yüzde gerinim karşılaştırması.



Şekil 4.16. Model üzerinden çevresel yönde alınan gerilim ölçümleri.

Literatürdeki iki deney sonucu da göz önüne alındığında, bu çalışma kapsamında hazırlanmış olan modelin tutarlı sonuçlar gösterdiği yorumu yapılabilir. Farklı boyut ve geometriler için gerçekleştirilecek olan sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kabul edilebilir ölçüde güvenilir olacağı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla modelin çalışmanın güvenilirlik analizi aşamasında kullanılmasında sakınca görülmemiştir.

4.1.3. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi

Modelin yeterli hassasiyeti sağlıyor olduğunun doğrulanması sonrasında, çalışmanın bu bölümünün esas amacı olan gerilme konsantrasyon faktörünün; göçük çapı, göçük derinliği, boru çapı ve boru et kalınlığına bağlı olarak elde edilmesi aşamasına geçilmiştir. Bunun için yukarıda anılan geometrik değişkenlerin farklı değerlerini içerecek şekilde dokuz koşurma içeren bir deney tasarımı oluşturulmuş olup Çizelge 4.3.'te sunulmuştur. Deneydeki değişken sayısını azaltmak ve değişkenleri boyutsuz hale getirebilmek amacıyla değişkenlerin tümü boru çapına bağlı hale getirilmiştir.

Deney tasarımına uygun şekilde kalıp ve borunun katı modelleri oluşturulmuştur. Bölüm 4.1.1'de anlatılan yöntemle ANSYS yazılımında 9 ayrı model için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde boru hattının maksimum işletme basıncı 9 MPa olarak kabul edilmiş olup gerilme konsantrasyon faktörleri bu basınç altında hesaplanmıştır.

Analiz sonucunda göçük bölgesi için hem eksen yönünde hem de çevresel yönde gerilme konsantrasyonları elde edilmiştir. Basıncılı borularda çevresel yöndeki gerilme daha kritik

olduğundan çevresel yönde gerilme için konsantrasyon faktörü (GKF_G) değerlendirmeye alınmış ve sonuçlar Çizelge 4.4.'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^3)$.

Koşturma	D/t	d/D	D_t/D
1	50	0,06	0,2
2	50	0,08	0,5
3	50	0,1	0,7
4	60	0,06	0,5
5	60	0,08	0,7
6	60	0,1	0,2
7	70	0,06	0,7
8	70	0,08	0,2
9	70	0,1	0,5

Çizelge 4.4. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması.

	D(mm)	t(mm)	d(mm)	D_t (mm)	GKF_G (SEA)	GKF_G (Eş.4.2)	Hata %
1	350	7,0	21,0	70	2,24	2,23	0,3
2	350	7,0	28,0	175	2,29	2,27	0,7
3	350	7,0	35,0	245	2,34	2,31	1,2
4	600	10,0	36,0	300	1,9	1,94	1,8
5	600	10,0	48,0	420	1,93	1,97	2,2
6	600	10,0	60,0	120	1,96	1,99	1,5
7	840	12,0	50,4	588	1,66	1,63	1,5
8	840	12,0	67,2	168	1,68	1,65	1,7
9	840	12,0	84,0	420	1,69	1,69	0,1
					OMYH: 1,2		

Analizlerden elde edilen GKF_G değerlerinden yararlanılarak MINITAB yazılımının doğrusal regresyon fonksiyonu vasıtasıyla Çizelge 4.3.'teki değişkenler ile GKF_G arasında doğrusal bir bağıntı oluşturulmuştur. Söz konusu bağıntı Eş. 4.2'de görülmektedir.

$$GKF_G = 3,665 - 0,03067 \frac{D}{t} + 1,583 \frac{d}{D} + 0,0307 \frac{D_t}{D} \quad (4.2)$$

Yine Çizelge 4.4.'te 9 model için sonlu elemanlar analizi ile elde edilmiş olan GKF_G sonuçları Eş. 4.2 ile elde edilmiş olanlarla karşılaştırılmış olup regresyon sonucunda elde edilen denklemin tutarlılığı sınanmıştır. Ortalama mutlak yüzde hata değeri incelendiğinde, ortaya çıkarılmış olan denklemin modeli yeterince temsil ettiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak söz konusu eşitliğin GKF_G 'yi etkileyen değişkenlerin farklı değerleri için gerilme

dağılımı tahmini için kullanılabilir olduğu değerlendirilmesine varılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan regresyon işlemi için model özeti Çizelge 4.5.'te sunulmuştur.

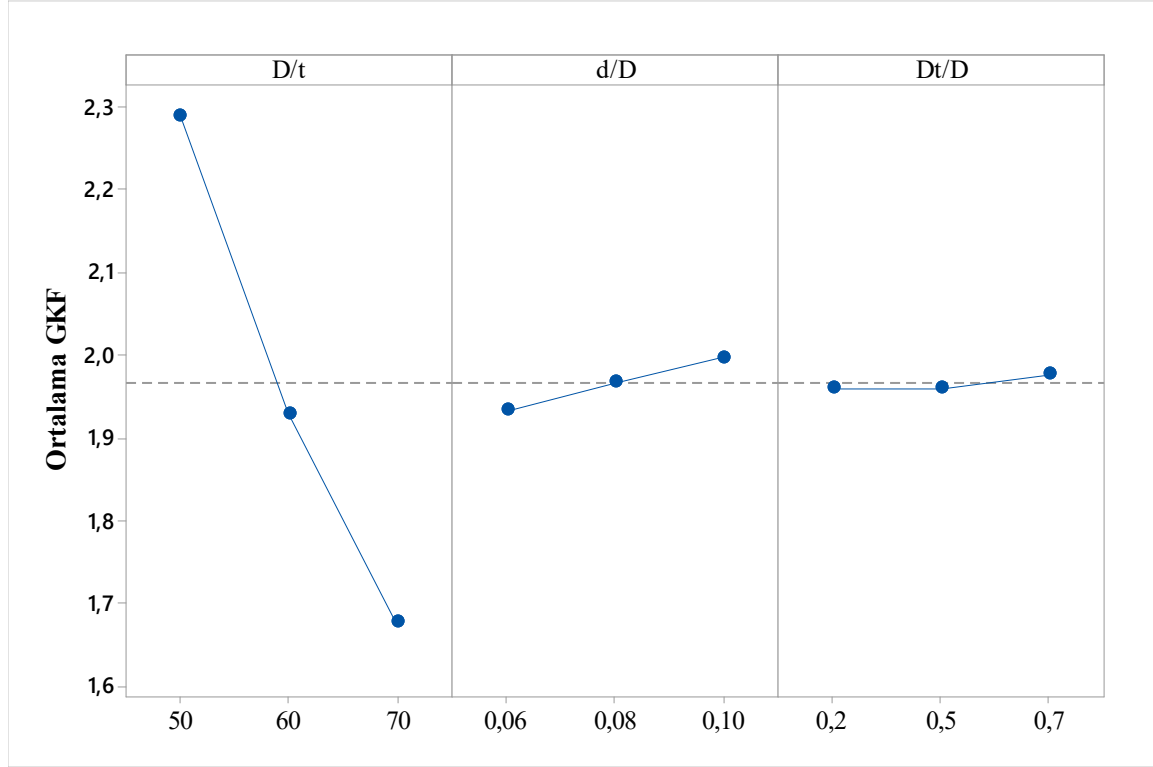
Çizelge 4.5. Regresyon modeli özeti.

Std. Hata	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	R ² (Tahmin)
0,0362786	%98,86	%98,18	%96,30

Ayrıca değişkenler için varyans analizi (ANOVA) yapılmış olup sonuçlar Çizelge 4.6. 'da sunulmuştur. Çizelgedeki “P-değeri” yorumlanarak değişkenlerin yanıt üzerinde anlamı bir etkisi olup olmadığı sonucuna varılabilir. Genel kabul değişkene ait P-değeri $\leq 0,05$ ise değişkenin yanıt üzerinde anlamı bir etkisi olduğu yönündedir. Göçük problemi özelinde sonuçlar değerlendirildiğinde ise “D/t” değişkeninin gerilme konsantrasyonunu anlamı şekilde etkilediği yönündedir. Özellikle “Dt/D” değişkeninin ise kayda değer bir etki yaratmadığı çıkarımı yapılmıştır. Şekil 4.17.'de her bir değişkendeki değişimin GKF_G ortalamasını ne mertebede etkilediği görülmektedir. “D/t” oranının artmasıyla GKF_G 'nin azaldığı, göçük derinliğinin büyümesiyle GKF_G 'nin arttığı, göçük çapının büyümesiyle GKF_G 'nin kayda değer bir biçimde değişmediği görülmektedir.

Çizelge 4.6. Varyans analizi.

Kaynak	SD	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	3	0,570642	0,190214	144,52	0,000
D/t	1	0,564267	0,564267	428,73	0,000
d/D	1	0,006017	0,006017	4,57	0,086
Dt/D	1	0,000358	0,000358	0,27	0,624
Hata	5	0,006581	0,001316		
Toplam	8	0,577222			



Şekil 4.17. GKF_G için ana etki grafiği.

4.1.4. Gerilme dağılımının elde edilmesi

Basıncılı borularda iç basınca bağlı çevresel yöndeki gerilme kritiktir ve boruların tasarımı söz konusu gerilmenin büyüklüğü dikkate alınarak yapılmaktadır. Dolayısıyla göçük kusuru için de çevresel yöndeki gerilmenin büyüklüğü dikkate alınacaktır. Basıncılı borularda çevresel yöndeki gerilme İkinci Bölüm’ de (Bkz. Eş. 2.15) sunulmuştur. Eş. 2.15 ve Eş. 4.2 kullanılarak göçük olan kısım için çevresel yöndeki en büyük normal gerilme Eş. 4.3’te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\sigma_T = \sigma^h GKF_G \quad (4.3)$$

Normal koşullarda Eş. 4.3’ü etkileyen bağımsız değişkenlerin (P , D , t , d , D_t) her birinin belirli bir tolerans dahilinde normal dağılım göstereceği varsayılmıştır. Üçüncü Bölüm’ de (Bkz. Çizelge 3.4.) geometrik ve mekanik özellikleri sunulan dikişsiz boru için gerilme normal dağılımı çalışmanın İkinci Bölümü’nde detayları açıklanan yöntemlerle örnek olarak elde edilebilir.

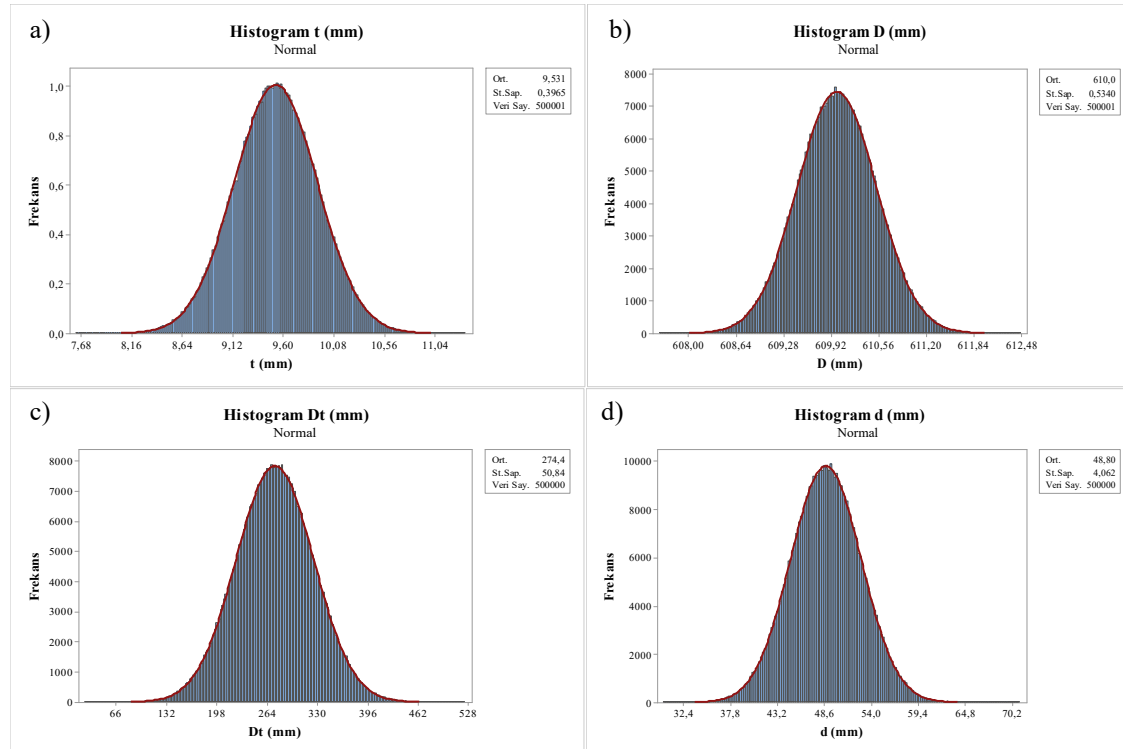
Gerilme normal dağılımın elde edilebilmesi için Monte Carlo benzetimi yönteminden yararlanılmıştır. Gerilmeyi etkileyen ve Çizelge 4.7.'de ortalama ve standart sapma değerleri verilen her bir bağımsız değişken için normal dağılım gösteren 500 000'er veri elektronik ortamda oluşturulmuştur. Şekil 4.18.'de değişkenlerin dağılımlarına ait histogramlar mevcuttur.

Çizelge 4.7. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.

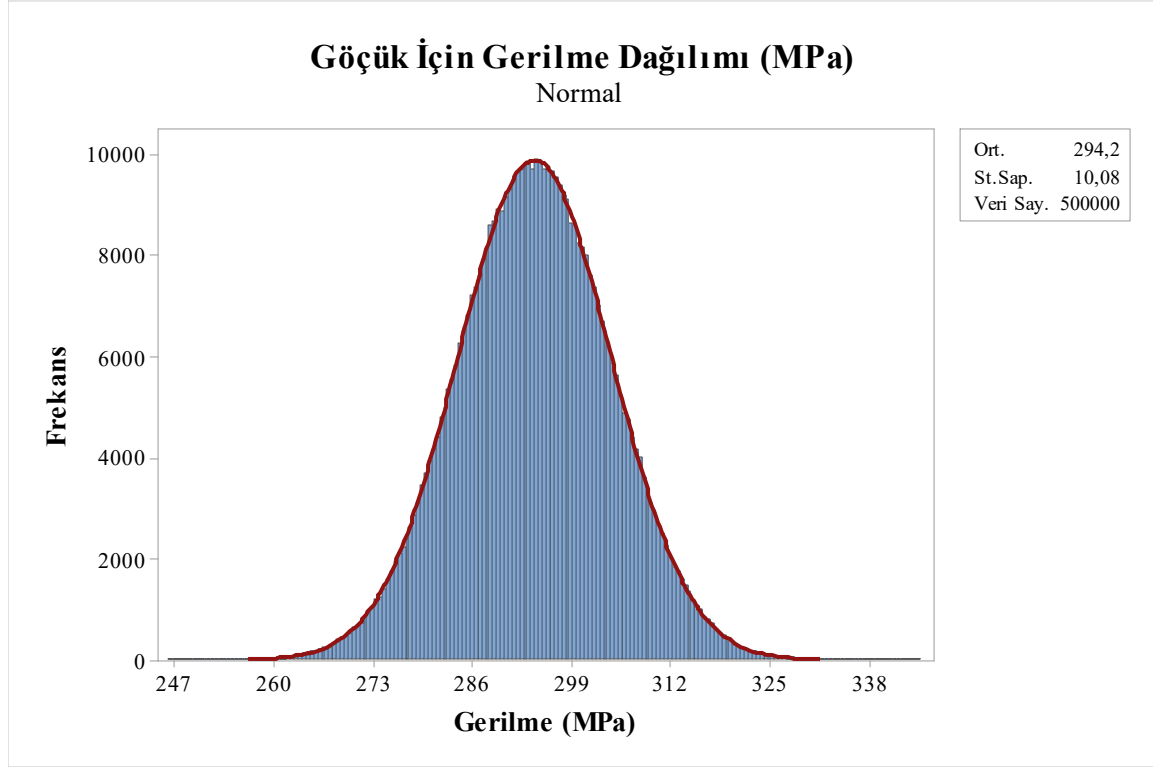
Değişken	Ortalama	Standart Sapma
Cidar Kalınlığı t (mm)	9,53	0,397*
Çap D (mm)	610	0,534*
Kalıp Çapı D_t (mm)	275	50,8
Göçük Derinliği d (mm)	48,8	4,06
Basınç P (MPa)	5	0,167**

* DNV GL-ST-F101 yönergesindeki toleranslara göre oluşturulmuş normal dağılımlara ait standart sapmalar

** Olası basınç saptması işletme basıncının 1,1 katı kadar alınmıştır [73].



Şekil 4.18. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cedar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: Kalıp Çapı D_t (mm), d: Göçük Derinliği d (mm)).



Şekil 4.19. Göçük kusuru için gerilme dağılımı.

Sonuç olarak Eş. 4.3 kullanılarak gerçekleştirilen Monte Carlo benzetimi sonucunda elde edilen gerilme normal dağılımı Şekil 4.19.'da sunulmuştur.

4.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini

Boru hatlarında yorulmaya hangi koşulların sebep olduğu ve boru hatlarında değişken yüklerle ait çevrim sayılarının ne şekilde elde edilebileceği çalışmanın Üçüncü Bölümü'nde açıklanmıştır. Bu bölüm kapsamında boru hatları için operasyon sayıları yorulmanın temel sebebi olarak değerlendirmeye alınmıştır. Her bir operasyonda boru hattının sıfırdan işletme basıncına kadar basınçlandırıldığı kabul edilmiş olup buna bağlı gerilme genliği ve gerilme ortalaması Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Boru hatlardaki operasyon sayıları işletmeden işletmeye farklılık göstermektedir. Bu sebeple bu bölümde dikkate alınacak çevrim sayısı için bir varsayım yapılmış olup söz konusu boru hattında haftada yaklaşık 70 operasyon gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Bir yıl içerisindeki çevrim sayısı bu varsayım dikkate alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

$$\sigma_a^h = \sigma_m^h = \frac{\sigma_T}{2} \quad (4.4)$$

Burada “ σ_a^h ” çevresel yönde gerilme genliği, “ σ_m^h ” çevresel yönde gerilme ortalaması olarak tanımlıdır. Üçüncü Bölüm’ de (Bkz. Çizelge 3.4.) mekanik özellikleri verilen boruya ait S-N eğrisi hesaplanarak elde edilmiş ve göçük bölgesi için yapılacak yorulma analizinde kullanılmak üzere yine Üçüncü Bölüm’ de sunulmuştur (Bkz. Şekil 3.10.). S-N eğrisi malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek çeşitliliğe bağlı olarak $\pm$ %5 tolerans aralığında tanımlanmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerinde oluşması muhtemel söz konusu tolerans için yine 500 000’er veriden oluşan yorulma dayanımı dağılımları sunulan S-N eğrisine (Bkz. Şekil 3.10) uygun olarak farklı çevrim sayıları için elektronik ortamda elde edilmiştir.

4.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi

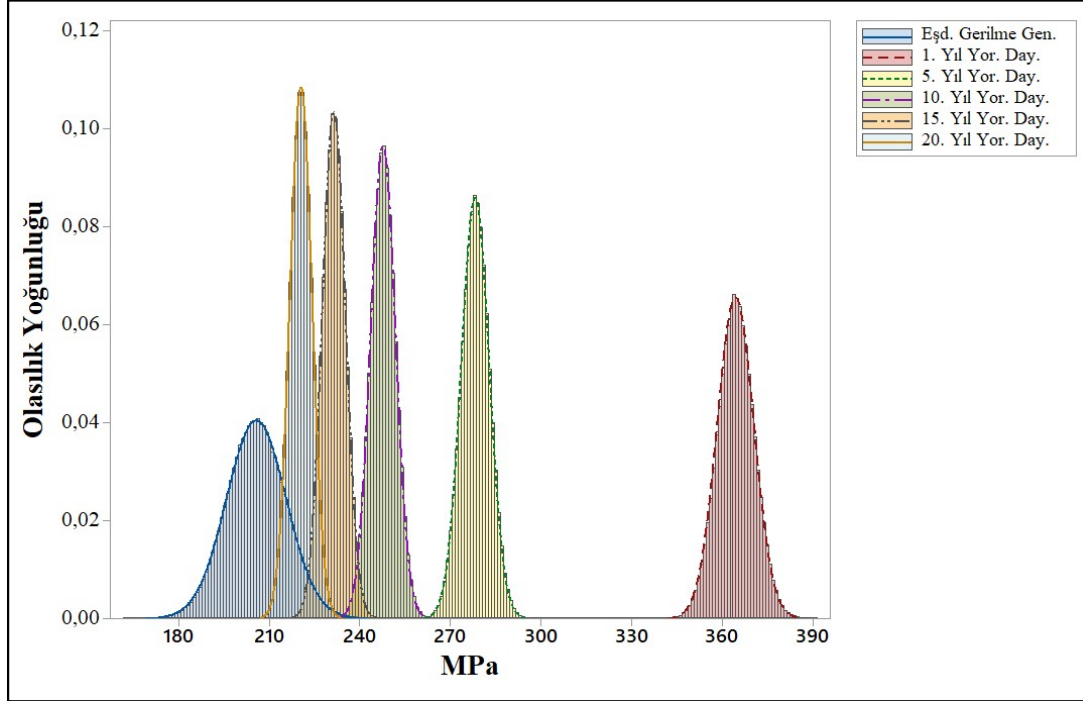
Problem için gerçekleştirilecek yorulma analizinde, Eş. 4.4’te gösterildiği şekilde hem gerilme ortalaması hem de gerilme genliği söz konusu olduğundan çözüm için eşdeğer gerilme genliği dağılımı hesaplanmalıdır. Analizde yorulma hasar kriterlerinden Modified Goodman yaklaşımı kullanılmış olup eşdeğer gerilme genliği dağılımı Eş. 4.5 kullanılarak elde edilmiştir [80].

$$\sigma_{a\,eq}^h = \sigma_a^h \left(\frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m^h} \right) \quad (4.5)$$

Elde edilmiş olan eşdeğer gerilme ve yorulma dayanımı normal dağılımları kullanılarak Monte Carlo benzetimi yöntemiyle yorulmaya bağlı hasar olasılığı tahmini yapılmış olup dağılımlar karşılaştırmalı olarak Şekil 4.20.’de sunulmuştur. Grafikte göçük kusurlu boru için çevresel yönde eşdeğer gerilme dağılımı ile çevrim sayısına bağlı olarak değişen yorulma dayanımı dağılımları karşılaştırılmış olup hasar olasılığı iki dağılımın girişim alanı üzerinden elde edilmiştir. Şekil 4.20.’ de görüldüğü üzere, çevrim sayısı arttıkça yorulma dayanımı dağılımının gerilme dağılımına yaklaştığı bu sebeple de birikimli hasar olasılığının arttığı anlaşılmaktadır.

Çevrim sayısına bağlı olarak hasar olasılığını elde edebilmek için İkinci Bölüm’ de sunulan ilgili eşitliklerin (Bkz. Eş. 2.1), (Bkz. Eş. 2.3) farklı çevrim sayıları için tekraren çözülmesi gerekmektedir. 500 000 veri kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş Monte Carlo

benzetimine ait sonuçlar Çizelge 4.8.'de sunulmuştur. Beklendiği şekilde çevrim sayısına bağlı olarak artan hasar olasılıkları görülmektedir.



Şekil 4.20. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.

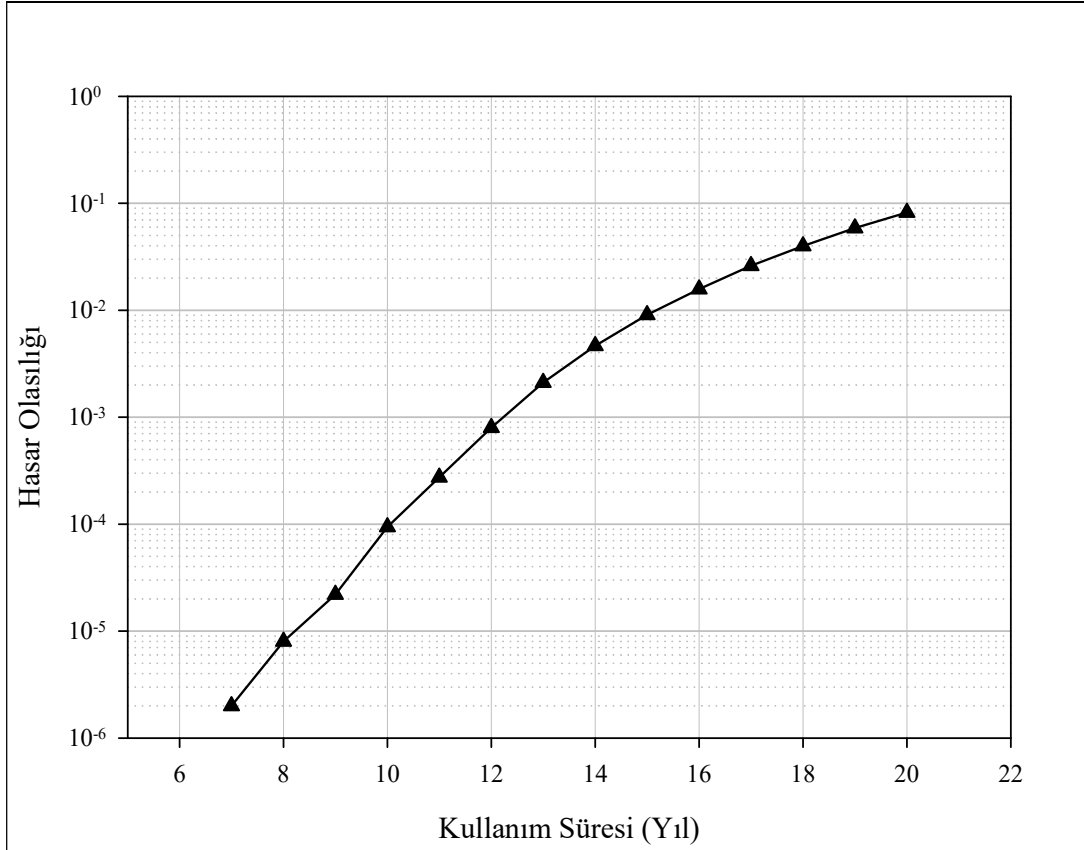
Çizelge 4.8. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.

Yıl	Çevrim Sayısı	Hasar Olasılığı
1	3650	0,00E+00
5	18250	0,00E+00
10	36500	9,40E-05
15	54750	9,05E-03
20	73000	8,19E-02

4.4. Uygulama Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde göçük kusurları değerlendirmeye alınmıştır. Literatürde borular üzerindeki göçüklerin mekanik davranışı üzerine birden çok deneysel çalışma olduğundan, bu bölüm başlığı altında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri literatürden deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, gerçekleştirilmiş olan benzetimin gerçek mekanik davranış ile tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Üzerinde göçük bulunan boru için yorulmaya bağlı hasar olasılığı, göçük geometrisi, borunun mekanik ve geometrik özellikleri, boru iç basıncı gibi değişkenlere bağlı olarak elde edilmiştir.

Örnek olarak seçilen API 5L X60 çelik boru için, önerilen yöntem dâhilinde elde edilmiş olan “Hasar Olasılığı-Kullanım Süresi” grafiği Şekil 4.21.’de sunulmuştur. Şekilde göçük kusuru olan bölümlerde yorulma hasarı meydana gelme olasılığı çevrim sayısına bağlı olarak gösterilmiştir.

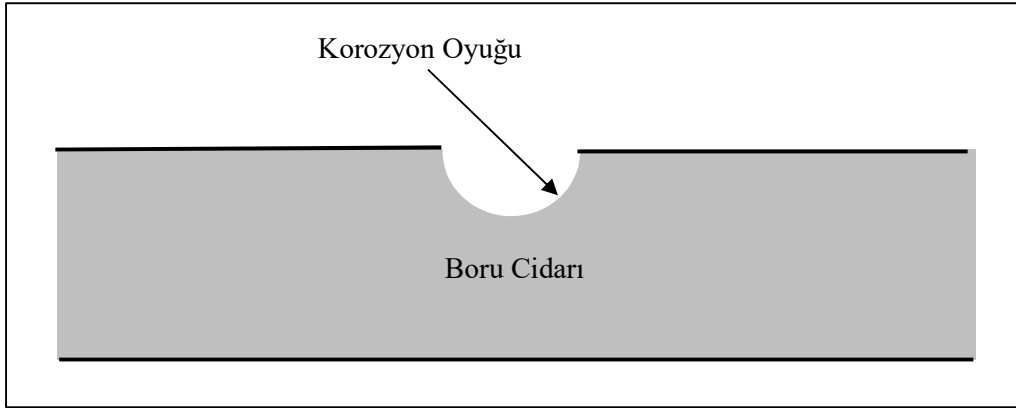


Şekil 4.21. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “N = 3650” olarak kabul edilmiştir).

Bu bölüm kapsamında örnek olarak ele alınan boru hattı için elde edilen hasar olasılığı grafiği muhtemel göçük kusurlu borularda muayene zamanının belirlenmesi için önemli bir veri oluşturmaktadır. İşletmelerin hasarın olası sonuçlarını dikkate alarak kendi risklerini belirlemeleri ve sonucunda tolerans gösterebilecekleri hedef risk büyüklüğüne karar vererek, kendilerine en uygun muayene zamanını tespit etmeleri gerekmektedir.

5. KOROZYON OYUKLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ

Basınçlı boru hatları gerek güvenlik gerekse de boru hatlarını dış etkilere korumak amaçlı olarak sıklıkla toprak altında tesis edilmektedir. Bu durum dış etkilere kaynaklı olarak göçük oluşumunu ve eğilme hasarlarını önemli ölçüde bertaraf etmekle birlikte, boru hattını korozyon mekanizmasına yönelik olarak koruyamamaktadır. Özellikle geçen yüzyılın ortalarında toprak altına tesis edilmiş olan dökme demirden boru hatlarında oyuk biçimli korozyon oluşumu yaygın olarak görülmektedir [47]. Bu yüzden değişken yük altında yorulmaya maruz kalan basınçlı boru hatlarında oyuk geometrili korozyon oluşumu değerlendirmeye alınması gereken önemli bir hasar mekanizması olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Bu hasar mekanizmasında, korozyon etkisiyle ekipman gövdesinde Şekil 5.1.'dekine benzer oyuklar meydana gelebilmektedir. Söz konusu oyuklar boru gövdesine göre boyutça çok küçük olmakla birlikte yorulma etkisi söz konusu olduğunda kayda değer bir gerilme konsantrasyon faktörü oluşturmakta ve boru hatlarında yorulma hasarları için önemli bir neden teşkil etmektedir.

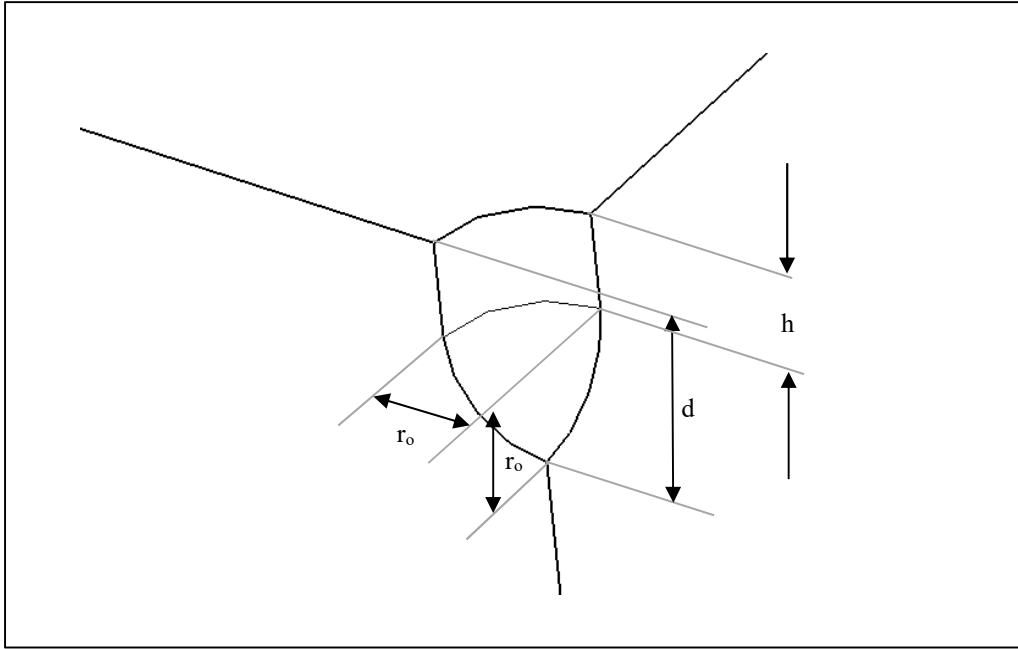


Şekil 5.1. Boru cidarında korozyon oyuklu.

5.1. Gerilme Dağılımının Tahmini

Korozyon etkisi dış etkenlere bağlı olarak görece uzun yıllarda meydana geldiğinden laboratuvar ortamında taklit edilmesi kolay değildir. Bununla birlikte özellikle korozyona sebep olan kimyasallara bağlı olarak meydana gelen korozyon etkilerini gösteren ampirik bağıntılar da mevcuttur. Söz konusu bağıntılar akış hızı, malzeme kimyasal özellikleri, sıcaklık, basınç vb. değişkenlere bağlı olarak korozyon hızını elde etmemizi sağlamaktadır.

Buna rağmen Şekil 5.1.'dekine benzer bir korozyon oluşumunun yorulmayla birlikte etkisini değerlendirebilmek için söz konusu bağıntılar yetersiz kalmaktadır. Şekildeki gibi oyukların meydana getirebileceği gerilme konsantrasyon faktörleri sonlu elemanlar yöntemiyle hesap edilebilir ve literatürde bu yöntemin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [19, 47]. Çalışmanın bu bölümünde korozyona bağlı gerilme konsantrasyon faktörü (GKF_K) elde edilirken sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Oyuk geometrisi ve oyuk oluşuran geometrik değişkenler Şekil 5.2.'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Gerçekte oyuk geometrisi her ne kadar düzgün olmasa da çoğunlukla daireye daha yakın bir geometride tezahür etmektedir. Bu bölümde de uygulama kolaylığı sağlamak adına oyuk kesiti dairesel olarak kabul edilmiştir.

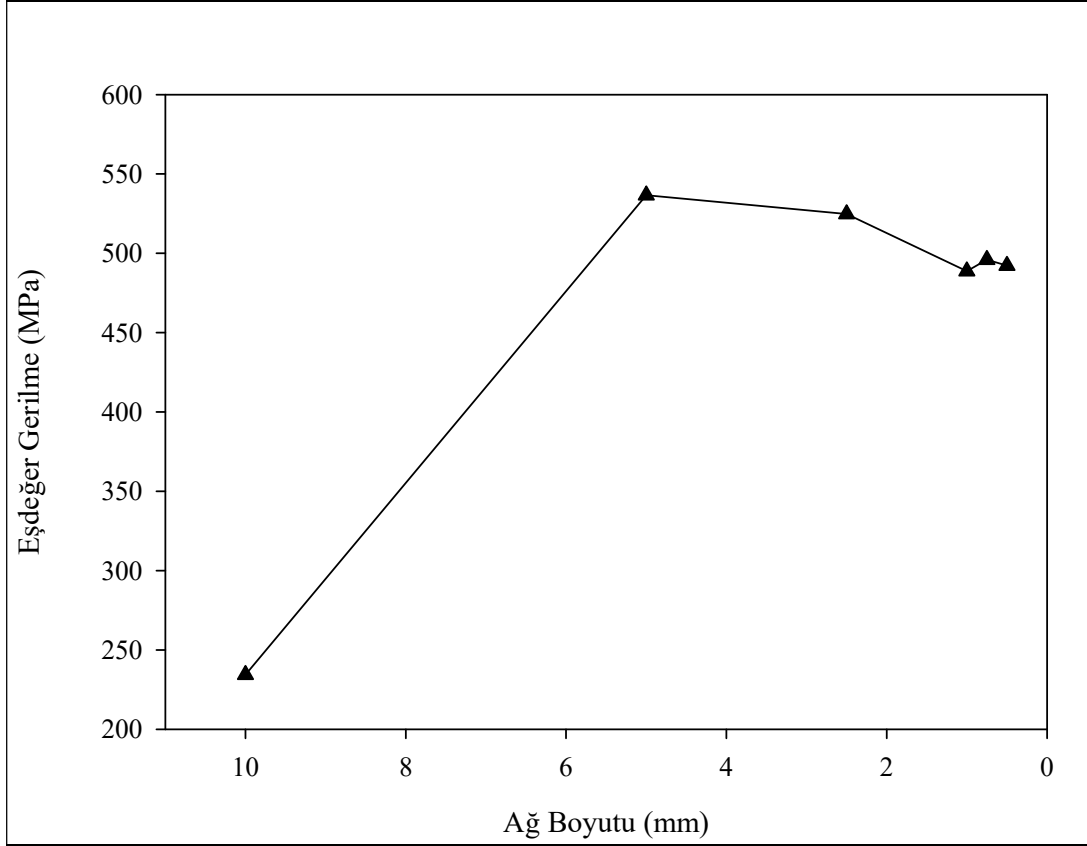


Şekil 5.2. Korozyon oyuk geometrisi.

5.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması

Bu bölümde üzerinde korozyona bağlı oyuk oluşmuş olan bir boru modellenmiştir. Oyuk geometrisi çalışmaya esas boru geometrisine göre oldukça küçük olacaktır. Dolayısıyla hassas sonuçlar elde edebilmek için oyuk bölgesinde ağ boyutu 0,5 mm olarak kararlaştırılmıştır. Modelin geri kalanında hesaplama süresini düşürmek için bölüntü büyüklüğü 5 mm olarak ayarlanmıştır. Ağ uygulamasına yönelik olarak gerçekleştirilmiş olan yakınsama çalışmasına ait sonuçlar Şekil 5.3.'te sunulmuştur. Söz konusu grafikte ağ

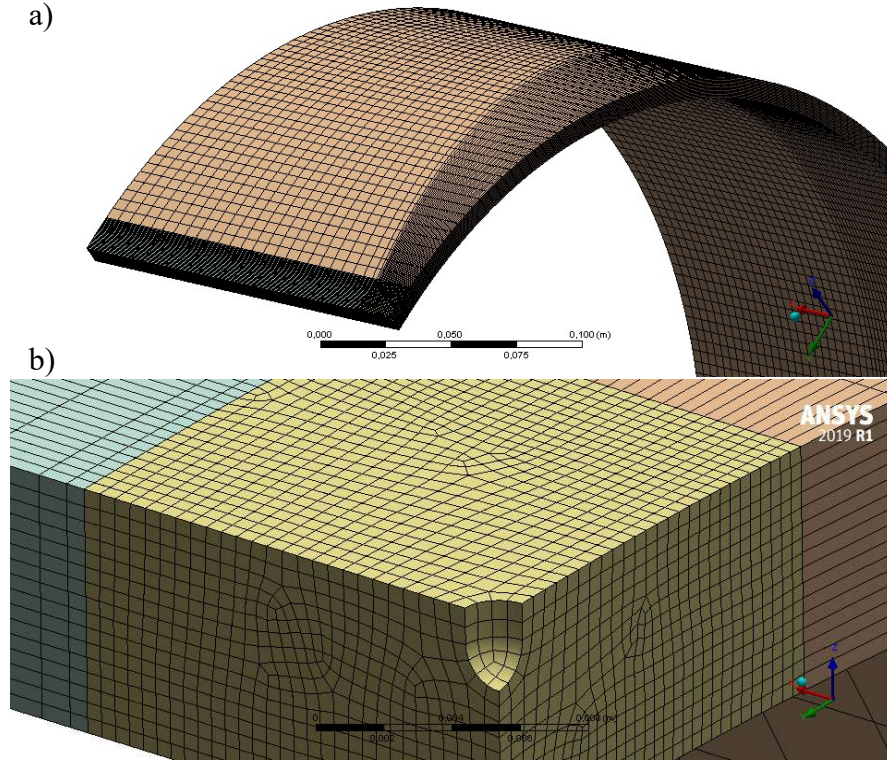
boyutuna karşılık oyuk bölgesindeki eşdeğer gerilme çizdirilmiştir. Sonuçlar oyuk bölgesi için 0,5 mm ağ boyutunun kabul edilebilir olduğunu göstermektedir. Ağ uygulanmış model Şekil 5.4.'te sunulmuştur. Oyuğun kesit boyunca etkisini görebilmek için model katı elemanlardan oluşacak şekilde hazırlanmış olup kesit boyunca da ağ oluşturulmuştur. Modelde mümkün mertebe düzgün altı yüzlü (hexahedron) elemanlara ağırlık verilmiştir.



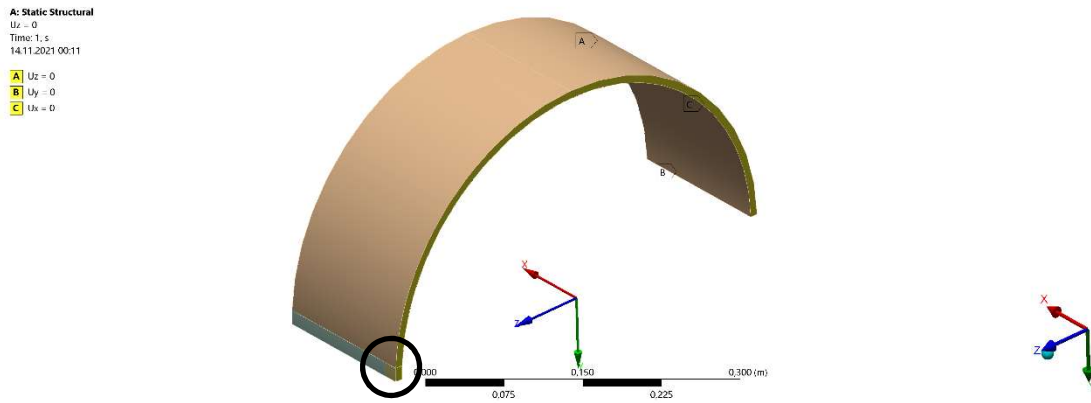
Şekil 5.3. Oyuk bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.

Yine hesaplama süresinden tasarruf edebilmek için, modelin simetrik oluşundan da faydalanılarak, gerçek borunun çeyreği boyutunda olacak şekilde model oluşturulmuş olup sınır koşullar gerçek geometri ve yükleme koşullarını taklit edecek şekilde Şekil 5.5.'te görüldüğü gibi oluşturulmuştur. Oyuk kusurunun bulunduğu nokta Şekil 5.5'te ayrıca işaretlenmiştir. İç basınç borunun tüm iç yüzeyine homojen şekilde uygulanmıştır. Boruda akışın sınırlandığı kabul edilmiş olduğundan bu durum boru eksen yönünde normal gerilme meydana getirecektir. Söz konusu gerilmeyi oluşturacak büyüklükte kuvvet modeldeki boru kesitine eksen yönünde (Bkz. Şekil 5.4. ve Şekil 5.5. x -ekseninde) ayrıca uygulanmıştır. Kuvvetin büyüklüğü boru iç çapı ve basınca bağlı olarak Eş. 5.1'de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$F^a = P\pi \frac{D_i^2}{8} \quad (5.1)$$

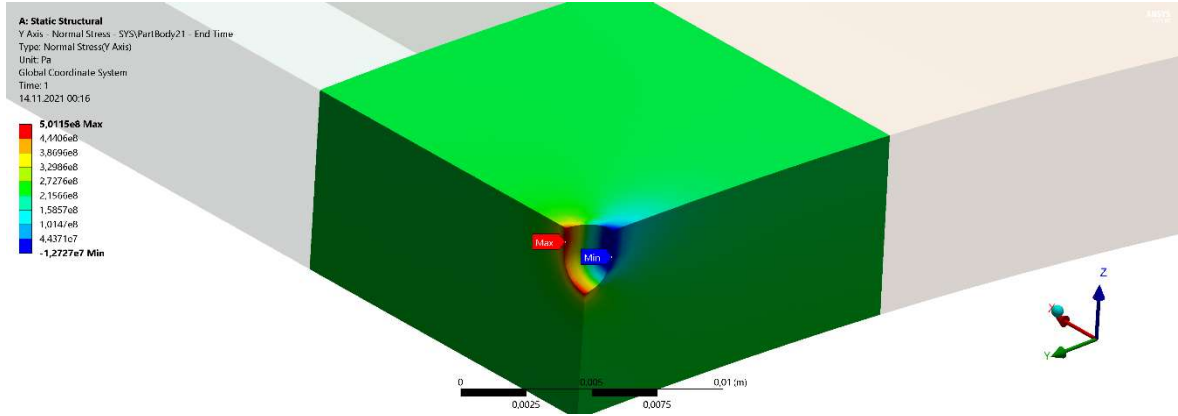


Şekil 5.4. Ağ uygulanmış model (a: Tüm model, b: Oyuk detayı).



Şekil 5.5. Sınır koşulları (A: $u_z = 0$, B: $u_y = 0$, C: $u_x = 0$).

Belirtilen sınır koşullara uygun olarak, iç basınç ve eksen yönlü kuvvet etkisi altında model analiz edilerek ilgili sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 5.6.'da çevresel yönde normal gerilme için elde edilmiş olan analiz sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5.6. Oyuk bölgesi için çevresel yönde en büyük normal gerilme.

5.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi

Gerilme konsantrasyon faktörü, üzerinde oyuk bulunan borudan alınan en büyük gerilmenin, kusursuz borudan alınan en büyük gerilmeye oranlanması ile hesaplanır. Böylelikle korozyon oyuğu için benzetimden elde edilen çevresel yönde en büyük normal gerilme değeri, üzerinde oyuk bulunmayacak şekilde modellenen başka bir benzetim üzerinden alınan çevresel yönde normal gerilme değerine oranlanarak GKF_K elde edilmiştir.

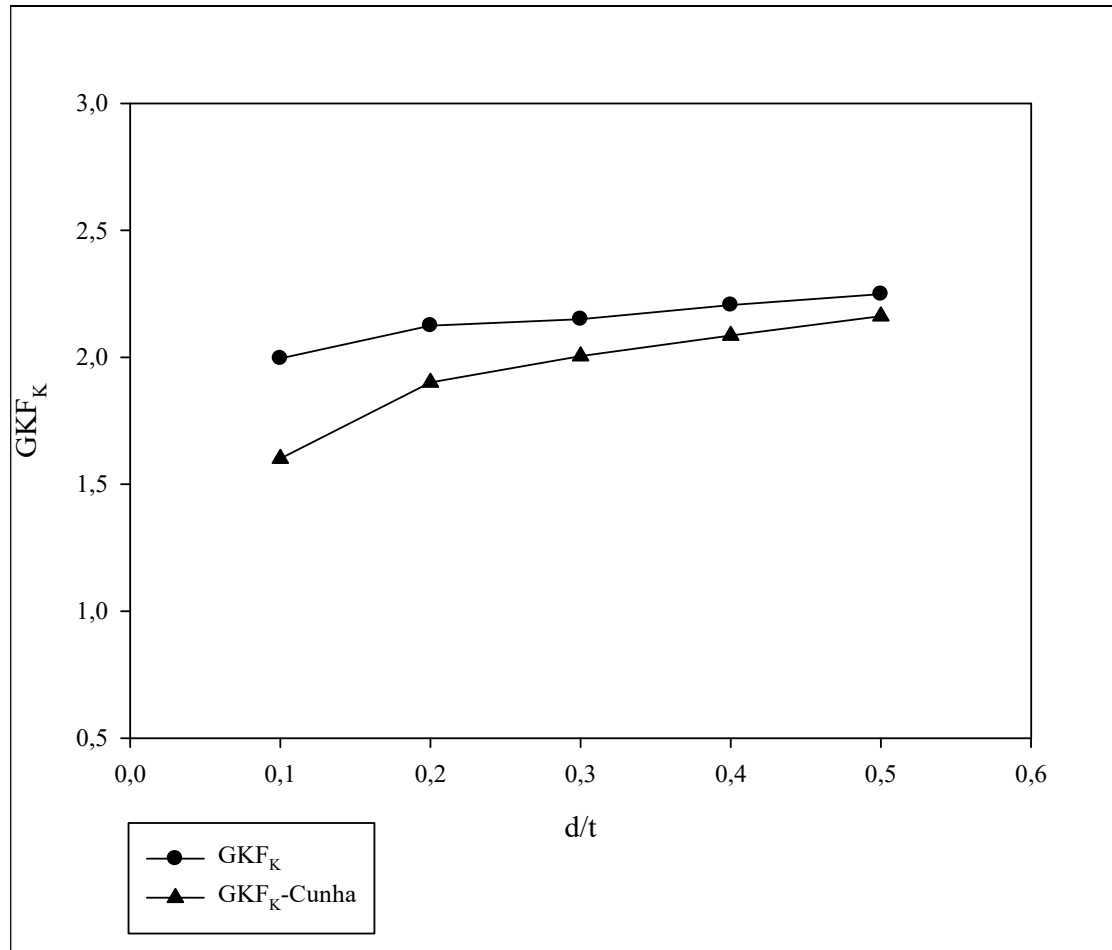
Benzetim kullanılarak elde edilmiş olan GKF_K değerlerini analitik olarak hesaplamak oldukça zordur. Söz konusu problem için de gerinim ölçmek suretiyle deneysel sonuca varmak kusurun boyutları göz önüne alındığında da pek mümkün değildir. Literatürde benzer problemler için gerçekleştirilmiş olan çalışmaların da benzetim yoluyla sonuçlandırıldığı görülmektedir. Bu sebeple gerçekleştirilmiş olan benzetimden elde edilen çevresel yönlü GKF_K sonuçları, literatürde gerçekleştirilmiş başka bir çalışma ile karşılaştırılmıştır [19]. Şekil 5.7.'de oyuk derinliğine bağlı olarak GKF_K 'nin ne şekilde değişiyor olduğu karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. İki ayrı çalışmadan elde edilen benzetim sonuçları beraber incelendiğinde ölçümlerin benzer olduğu değerlendirilmesine varılmıştır.

Bu bölümde incelenen problem için GKF_K 'nin oyuk derinliği “d” ve oyuk yarıçapı “ r_o ” göre değiştiği öngörülmüştür. Söz konusu değişkenlerin farklı değerlerine bağlı olarak GKF_K 'nin hesaplanabileceği bir denklem elde edebilmek için ilgili değişkenlere ait değerleri sistematik

bir şekilde içeren Taguchi deney tasarımı oluşturulmuş olup Çizelge 5.1.'de sunulmuştur. Değişkenler cidar kalınlığına “t” bağlı olacak şekilde boyutsuz hale getirilmiştir.

Çizelge 5.1. Taguchi deney tasarımı $L_9 (3^2)$.

Koşturma	d/t	r_o/t
1	0,1	0,1
2	0,1	0,2
3	0,1	0,3
4	0,3	0,1
5	0,3	0,2
6	0,3	0,3
7	0,5	0,1
8	0,5	0,2
9	0,5	0,3



Şekil 5.7. GKF_K'nin oyuk derinliğine bağlı olarak değişimi.

Çizelge 5.3. Regresyon modeli özeti.

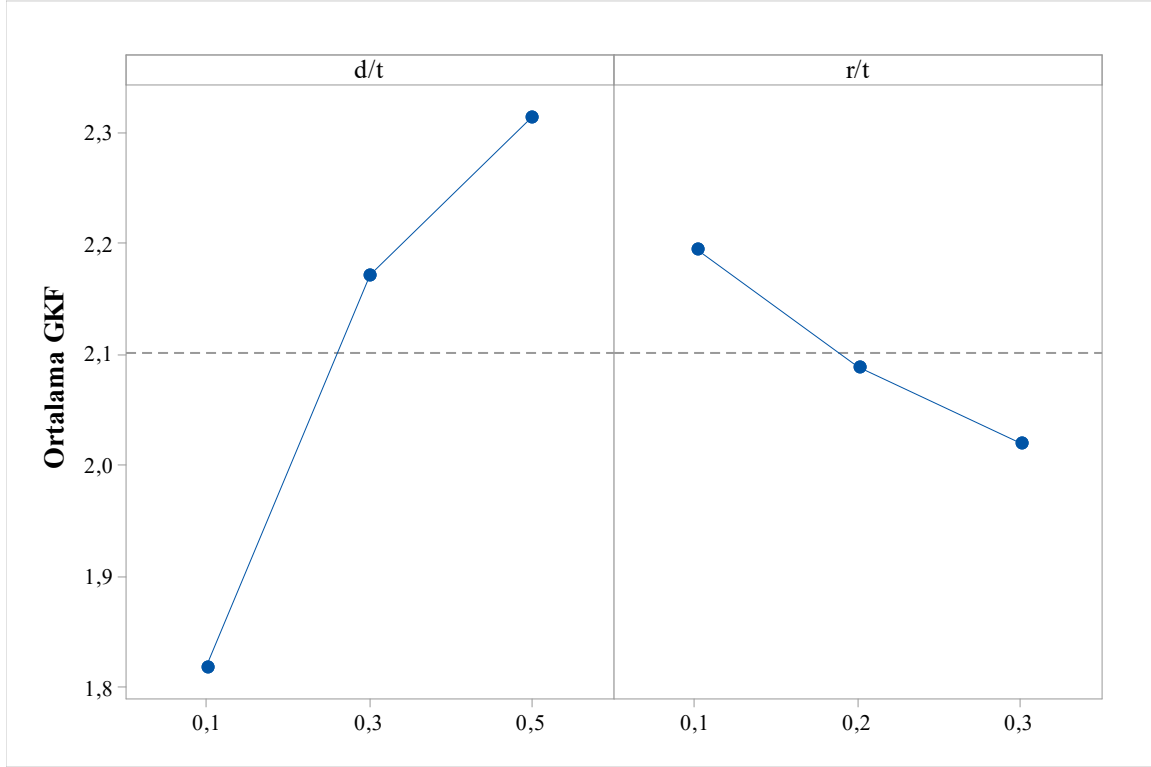
Std. Hata	R ²	R ² (Düzeltilmiş)	R ² (Tahmin)
0,0685552	%93,61	%91,48	%85,74

Sonuç olarak söz konusu eşitliğin, değişkenlerin farklı değerleri için GKF_K 'yi yeterince temsil ettiği ve Monte Carlo benzetimi ile gerilme dağılımı tahmini için kullanılabilir olduğu değerlendirilmesine varılmıştır. Ayrıca değişkenler için varyans analizi (ANOVA) yapılmış olup sonuçlar Çizelge 5.4. 'te sunulmuştur. Çizelgedeki "P-Değeri" her bir değişken için incelendiğinde, söz konusu değişkenlerin, yanıtı anlamlı bir biçimde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.4. Varyans analizi.

Kaynak	SD	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	2	0,41322	0,206610	43,96	0,000
d/t	1	0,36753	0,367527	78,20	0,000
r_o / t	1	0,04569	0,045694	9,72	0,021
Hata	6	0,02820	0,004700		
Toplam	8	0,44142			

Şekil 5.8.'de her bir değişkendeki değişimin GKF_K ortalamasını ne mertebede etkilediği görülmektedir. Grafiklerden, oyuk derinliği arttıkça gerilme konsantrasyonunun arttığı ve beklendiği şekilde oyuk yarı çapı büyüdükçe gerilme konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.8. GKF_K için ana etki grafiği.

5.1.3. Gerilme dağılımının elde edilmesi

Göçük kusurunda olduğu gibi korozyon kusuru için de çevresel yöndeki gerilmenin büyüklüğü dikkate alınacaktır. Basıncılı borularda çevresel yöndeki gerilme İkinci Bölüm’ de (Bkz. Eş. 2.15) sunulmuştur. İlgili eşitlikler (Bkz. Eş. 2.15 ve Eş. 5.2) kullanılarak göçük olan kısım için çevresel yöndeki en büyük normal gerilme Eş. 5.3’te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\sigma_T = \sigma^h GKF_K \quad (5.3)$$

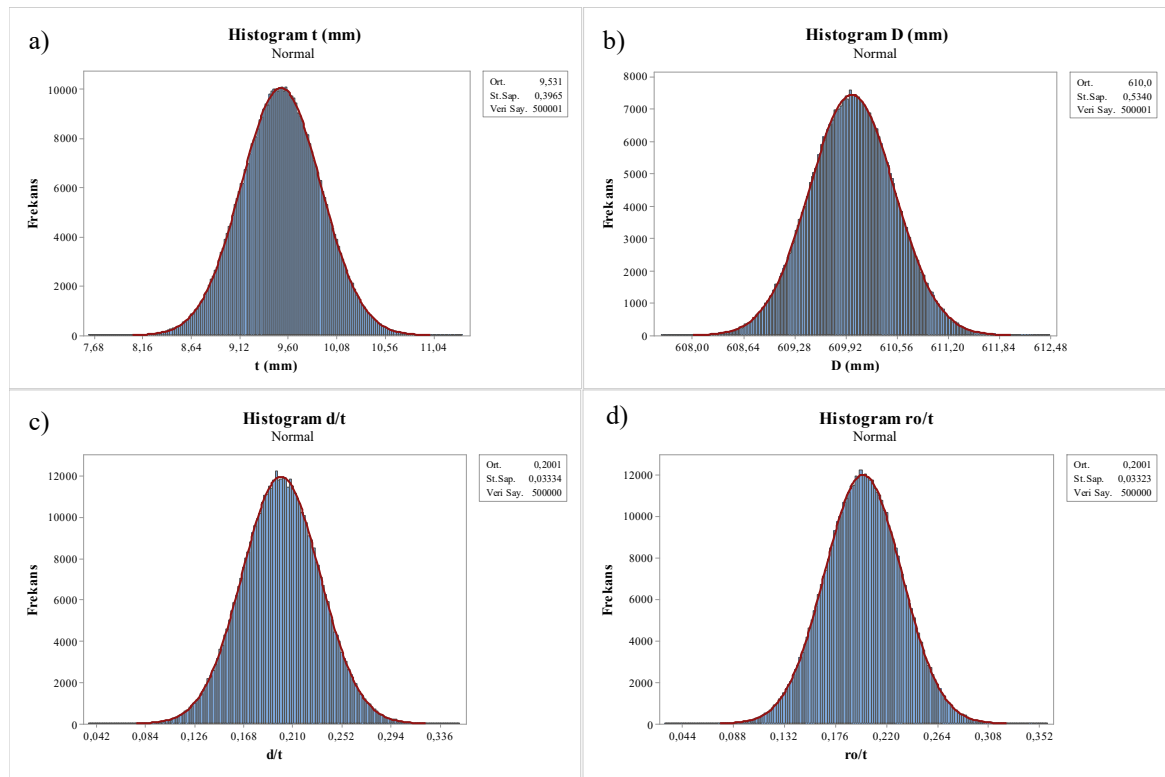
Normal koşullarda Eş. 5.3’ü etkileyen bağımsız değişkenlerin (D, d, r_o, t) her birinin belirli bir tolerans dahilinde normal dağılım göstereceği varsayılmıştır. Üçüncü Bölüm’ de (Bkz. Çizelge 3.4.) geometrik ve mekanik özellikleri sunulan dikişsiz boru için gerilme normal dağılımı çalışmanın İkinci Bölümü’nde detayları açıklanan yöntemlerle örnek olarak elde edilebilir.

Çizelge 5.5. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.

Değişken	Ortalama	Standart Sapma
Cidar Kalınlığı t (mm)	9,53	0,397*
Çap D (mm)	610	0,534*
d/t	0,2	0,033
r_o/t	0,2	0,033
Basınç P (MPa)	5	0,167**

* DNV GL-ST-F101 yönergesindeki toleranslara göre oluşturulmuş normal dağılımlara ait standart sapmalar

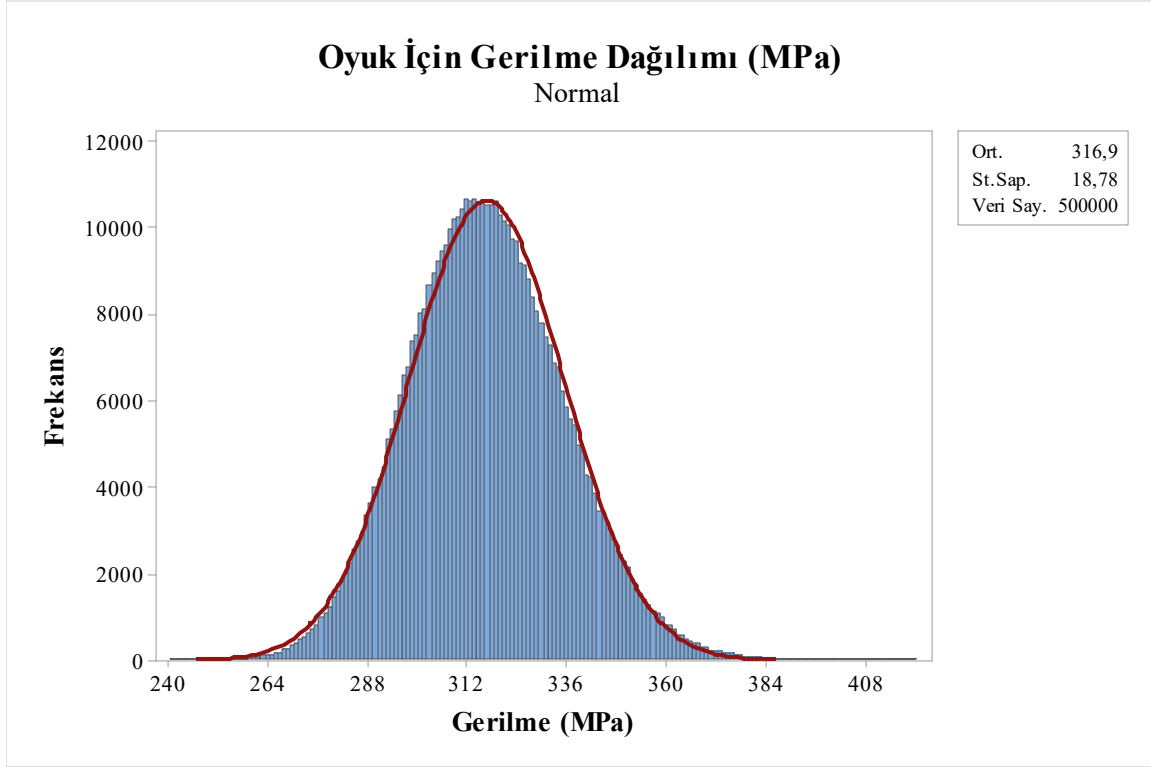
** Olası basınç saptması işletme basıncının 1,1 katı kadar alınmıştır [73].



Şekil 5.9. Değişkenlere ait histogramlar (a: Cidar Kalınlığı t (mm), b: Çap D (mm), c: d/t , d: r_o/t).

Gerilme normal dağılımının elde edilebilmesi için benzetim yapılmıştır. Gerilmeyi etkileyen ve Çizelge 5.5.'te ortalama ve standart sapma değerleri verilen her bir değişken için normal dağılım gösteren 500 000'er veri elektronik ortamda oluşturulmuştur. Şekil 5.9.'da değişkenlerin dağılımlarına ait histogramlar mevcuttur.

Sonuç olarak Eş. 5.3 kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonucunda elde edilen gerilme normal dağılımı Şekil 5.10.'da sunulmuştur.



Şekil 5.10. Oyuk kusuru için gerilme dağılımı.

5.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini

Bu bölüm kapsamında da Dördüncü Bölüm’ de olduğu gibi boru hatları için operasyon sayıları yorulmanın temel sebebi olarak değerlendirmeye alınmıştır. Her bir operasyonda boru hattının sıfırdan işletme basıncına kadar basınçlandırıldığı kabul edilmiş olup buna bağlı gerilme genliği ve gerilme ortalaması Eş. 5.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Boru hatlardaki operasyon sayıları işletmeden işletmeye farklılık göstermektedir. Bu sebeple bu bölümde dikkate alınacak çevrim sayısı için bir varsayım yapılmış olup söz konusu boru hattında haftada yaklaşık 35 operasyon gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Bir yıl içerisindeki çevrim sayısı bu varsayım dikkate alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

$$\sigma_a^h = \sigma_m^h = \frac{\sigma_T}{2} \quad (5.4)$$

Burada “ σ_a^h ” çevresel yönde gerilme genliği, “ σ_m^h ” çevresel yönde gerilme ortalaması olarak tanımlıdır. Üçüncü Bölüm’ de (Bkz. Çizelge 3.4.) mekanik özellikleri verilen boruya ait S-N eğrisi hesaplanarak elde edilmiş ve oyuk bölgesi için yapılacak yorulma analizinde kullanılmak üzere Üçüncü Bölüm’ de sunulmuştur (Bkz. Şekil 3.10.). S-N eğrisi

malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek çeşitliliğe bağlı olarak $\pm$ %5 tolerans aralığında tanımlanmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerinde oluşması muhtemel söz konusu tolerans için yine 500 000'er veriden oluşan yorulma dayanımı dağılımları sunulan S-N eğrisine (Bkz. Şekil 3.10) uygun olarak farklı çevrim sayıları için elektronik ortamda elde edilmiştir.

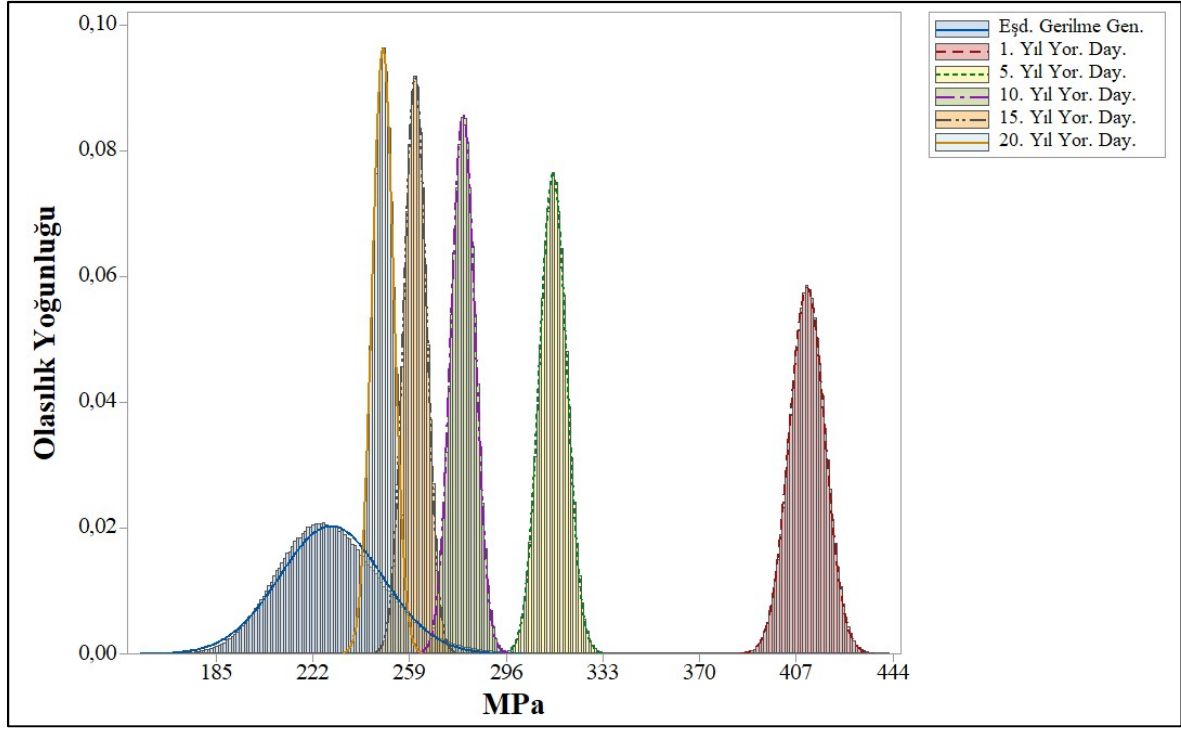
5.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi

Problem için gerçekleştirilecek yorulma analizinde, Eş. 5.4'te gösterildiği şekilde hem gerilme ortalaması hem de gerilme genliği söz konusu olduğundan çözüm için eşdeğer gerilme genliği dağılımı hesaplanmalıdır. Analizde yorulma hasar kriterlerinden Modified Goodman yaklaşımı kullanılmış olup eşdeğer gerilme genliği dağılımı Eş. 5.5 kullanılarak elde edilmiştir [80].

$$\sigma_{a\,eq}^h = \sigma_a^h \left(\frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m^h} \right) \quad (5.5)$$

Elde edilmiş olan eşdeğer gerilme ve yorulma dayanımı normal dağılımları kullanılarak Monte Carlo benzetimi yöntemiyle yorulmaya bağlı hasar olasılığı tahmini yapılmış olup dağılımlar karşılaştırmalı olarak Şekil 5.11.'de sunulmuştur. Grafikte oyuk kusurlu boru için çevresel yönde eşdeğer gerilme dağılımı ile çevrim sayısına bağlı olarak değişen yorulma dayanımı dağılımları karşılaştırılmış olup hasar olasılığı iki dağılımın girişim alanı üzerinden elde edilmiştir. Şekil 5.11.' de görüldüğü üzere, çevrim sayısı arttıkça yorulma dayanımı dağılımının gerilme dağılımına yaklaştığı bu sebeple de birikimli hasar olasılığının arttığı anlaşılmaktadır.

Çevrim sayısına bağlı olarak hasar olasılığını elde edebilmek için İkinci Bölüm' de sunulan ilgili eşitliklerin (Bkz. Eş. 2.1 ve Eş. 2.3) farklı çevrim sayıları için tekraren çözülmesi gerekmektedir. 500 000 veri kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş Monte Carlo benzetimine ait sonuçlar Çizelge 5.6.'da sunulmuştur. Beklendiği şekilde çevrim sayısına bağlı olarak artan hasar olasılıkları görülmektedir.



Şekil 5.11. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.

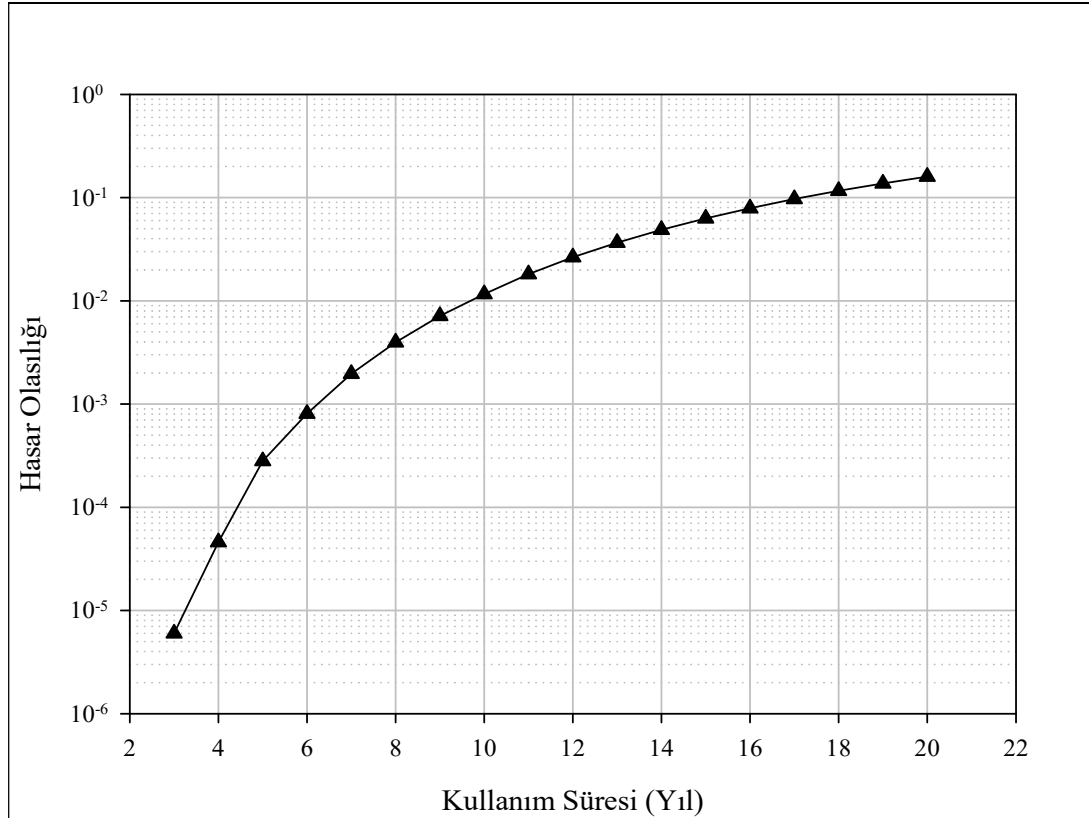
Çizelge 5.6. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.

Yıl	Çevrim Sayısı	Hasar Olasılığı
1	1825	0,00E+00
5	9125	2,80E-04
10	18250	1,16E-02
15	27375	6,28E-02
20	36500	1,60E-01

5.4. Uygulama Sonuçları

Bu bölüm kapsamında korozyon oyukları kritik nokta olarak değerlendirmeye alınmıştır. Söz konusu oluşumlar da boru cidarında ciddi bir gerilme konsantrasyonu yaratmaktadır. Gerilme konsantrasyon faktörü yine sonlu elemanlar yöntemiyle, yani benzetim yapılarak elde edilmiştir. Korozyon oyukları için gerilme konsantrasyonunun deneysel olarak elde edilmesi pratik olmadığından geçmişteki çalışmalar da benzetim üzerinedir. Dolayısıyla elde edilen teorik sonuçlar yine teorik sonuçlar ile karşılaştırılmış olup kabul edilebilir düzeyde tutarlılık tespit edilmiştir.

Bu bölümde korozyon mekanizmasının kendisinin değil de meydana getirdiği öngörülen oyukların yorulmaya bağlı hasar olasılığının tespit edilmiş olduğu açıklığa kavuşturulmalıdır. Korozyon mekanizmasının kendisi boru hatları için çok kritik bir husus olmakla birlikte bu çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.



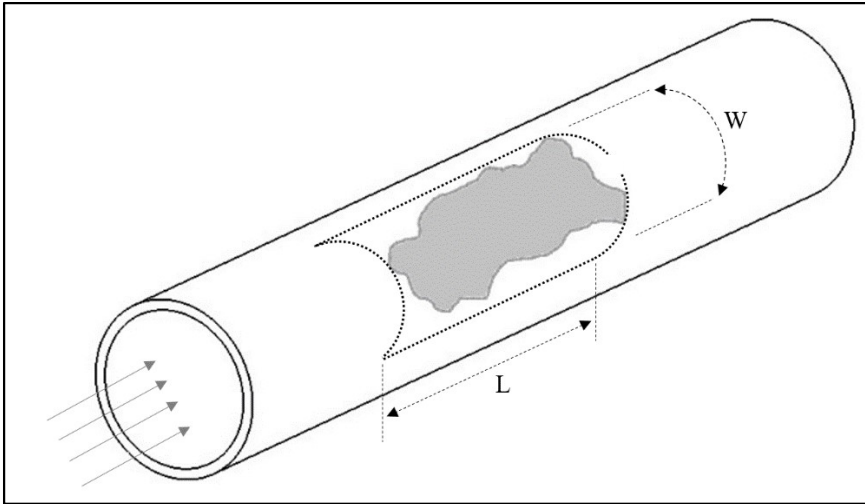
Şekil 5.12. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “N = 1825” olarak kabul edilmiştir).

Örnek olarak seçilen API 5L X60 çelik boru için, önerilen yöntem dâhilinde elde edilmiş olan “Hasar Olasılığı-Kullanım Süresi” grafiği Şekil 5.12.’de sunulmuştur. Şekilde oyuk kusuru olan bölümlerde yorulma hasarı meydana gelme olasılığı çevrim sayısına bağlı olarak gösterilmiştir. Oyuk kusurlu bölge için elde edilmiş olan gerilme konsantrasyon denklemi kullanılarak gerilme normal dağılımı oluşturulmuş ve ilgili dağılım yorulma dayanımı dağılımı ile değerlendirilerek çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı hesaplanmıştır. Bu bölüm kapsamında örnek olarak ele alınan boru hattı için elde edilen hasar olasılığı grafiği muayene zamanının belirlenmesi için önemli bir veri oluşturmaktadır. İşletmelerin muhtemel hasarın olası sonuçlarını dikkate alarak kendi risklerini belirlemeleri ve sonucunda tolerans

gösterebilecekleri hedef risk büyüklüğüne karar vererek, kendilerine en uygun muayene zamanını tespit etmeleri gerekmektedir.

6. İÇ YÜZEY KUSURLARINDA YORULMAYA BAĞLI HASAR OLASILIĞI TAHMİNİ

Dikişsiz çelik boruların üretiminde haddeleme sırasında çeşitli büyüklük ve şekillerde yüzey kusurları meydana gelebilmektedir [81, 82]. Söz konusu kusurlar korozyon oyuklarına benzese de oluşma mekanizması boru üretim süreçleri kaynaklı olduğundan birbiriyle karıştırılmamalıdır [81]. Bu bölümde dikişsiz borunun üretimi sırasında oluştuğu kabul edilen iç yüzey kusurları yorulma dayanımı yönünden kritik noktalar olarak kabul edilmiştir. Şekil 6.1.'de boru iç yüzeyinde bulunması muhtemel yüzey kusuru temsili olarak gösterilmiştir. Kusurun formasyonunu daha iyi gösterebilmek adına kusur ölçeksiz bir biçimde gerçekte olduğundan çok daha büyük çizilmiştir. Kusurun derinliği de kusurlu bölge içerisinde değişiklik gösterebilmektedir.

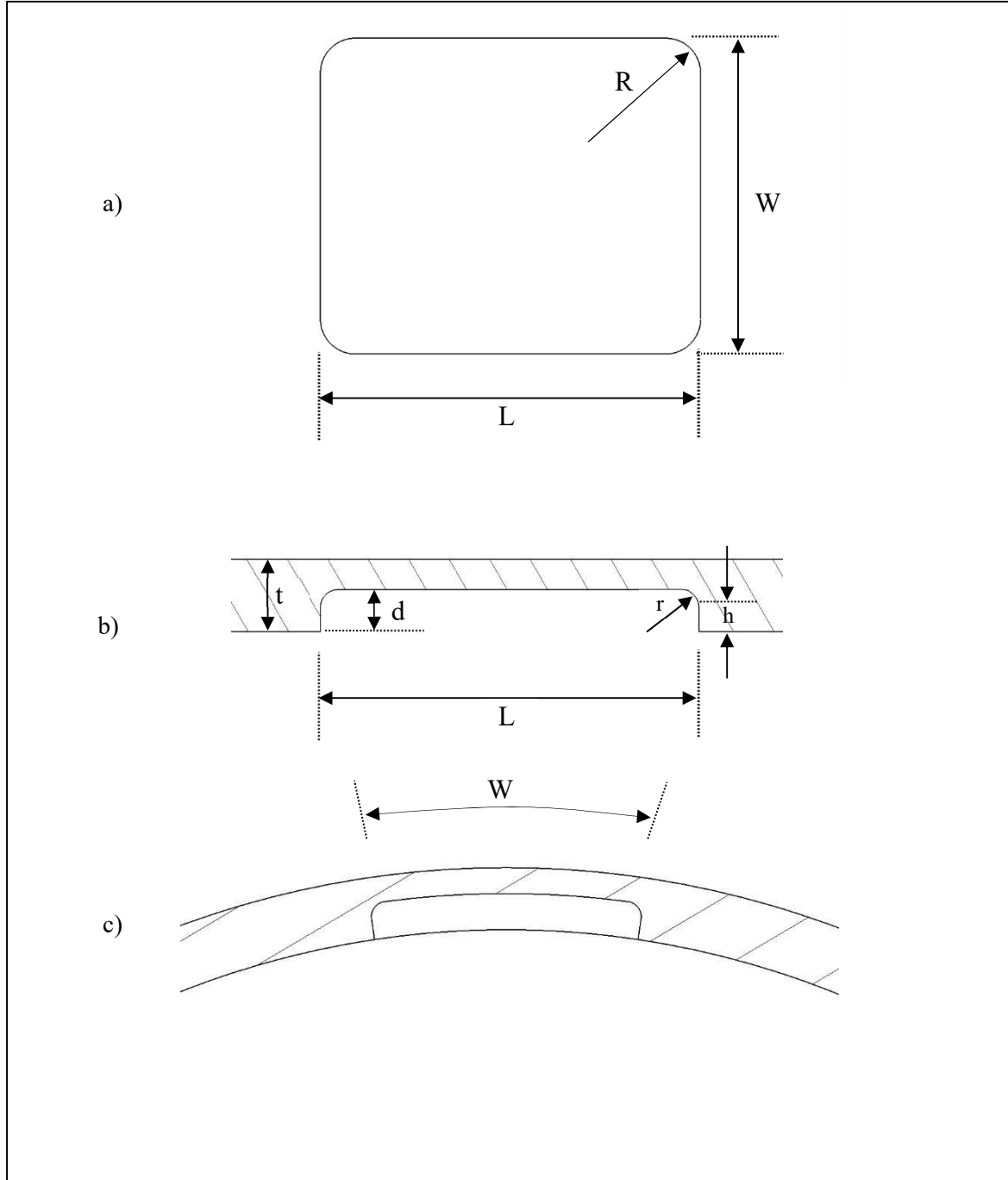


Şekil 6.1. Basınçlı boru iç yüzey kusuru geometrisi.

6.1. Gerilme Konsantrasyon Faktörünün Tahmini

Borudaki iç yüzey kusurlu bölgede gerilme dağılımını elde edebilmek için öncelikle kusura bağlı gerilme artışını doğru tahmin etmek gereklidir. Haddelemeye bağlı iç yüzey kusurları da korozyon oyukları gibi boru cidarında gerilme konsantrasyonu (GKF_Y) yaratmaktadır. Bu yüzey kusurları farklı büyüklük ve geometrilerde meydana gelebilmektedir. Bu bölüm dahilinde uygulama kolaylığı sağlayabilmek için Şekil 6.2.'de gösterildiği gibi dikdörtgen kesitli ve düzgün dağılmış derinliğe sahip olarak kabul edilmiştir. Şekilde GKF_Y 'yi etkileyeceği tahmin edilen tüm geometrik değişkenler gösterilmiştir. Burada; “t” cidar kalınlığı, “L” kusurun boyu, “W” kusurun çevresel yönde genişliği, “R” ve “r” kenar

yarıçapları, “d” oyuğun maksimum derinliği ve “h” oyuk derinliği ile taban yarıçapı farkı olarak tanımlanmaktadır. Problemin çözümüne, söz konusu değişkenlerin boru cidarındaki farklı kusurlar için farklı değerler alabileceği öngörülerek yaklaşılmıştır.



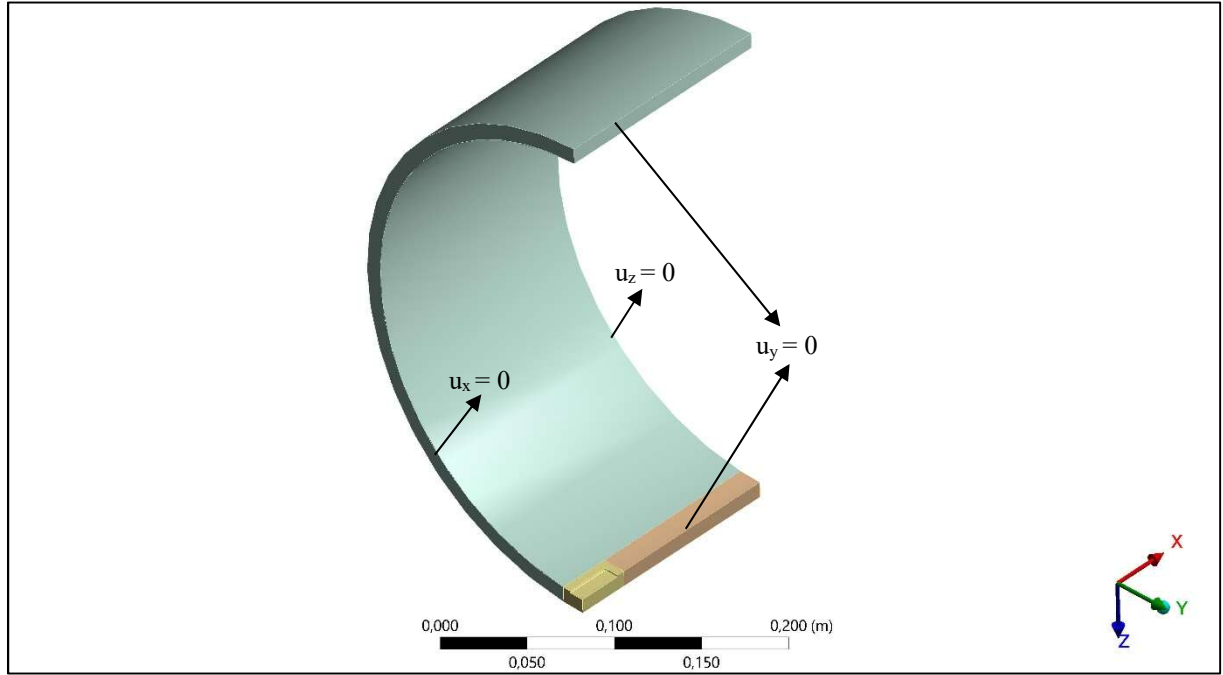
Şekil 6.2. Boru iç yüzey kusuru geometrisi (a: Üst görünüş, b: Eksen yönünde kesit görünüşü, c: Çevresel yönde kesit görünüşü).

Korozyon oyukunda olduğu gibi haddelemeye bağlı iç yüzey kusurları da boru boyutuna nazaran oldukça küçük ölçektedir. Söz konusu kusur bölgesinde gerinim ölçerler vasıtasıyla

bir deney gerçekleştirerek kusurun, borunun mekanik davranışına olan etkisini ölçmek pratik değildir. Bununla birlikte kusurun, borunun iç yüzeyinde olması deney yapma imkanını da güçleştirmektedir. Literatür incelendiğinde söz konusu problem için deneysel ya da sayısal herhangi bir çözüm önerilmediği görülmüştür. Bu bölüm kapsamında ise kusura bağlı GKF_Y 'nin elde edilmesinde sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır.

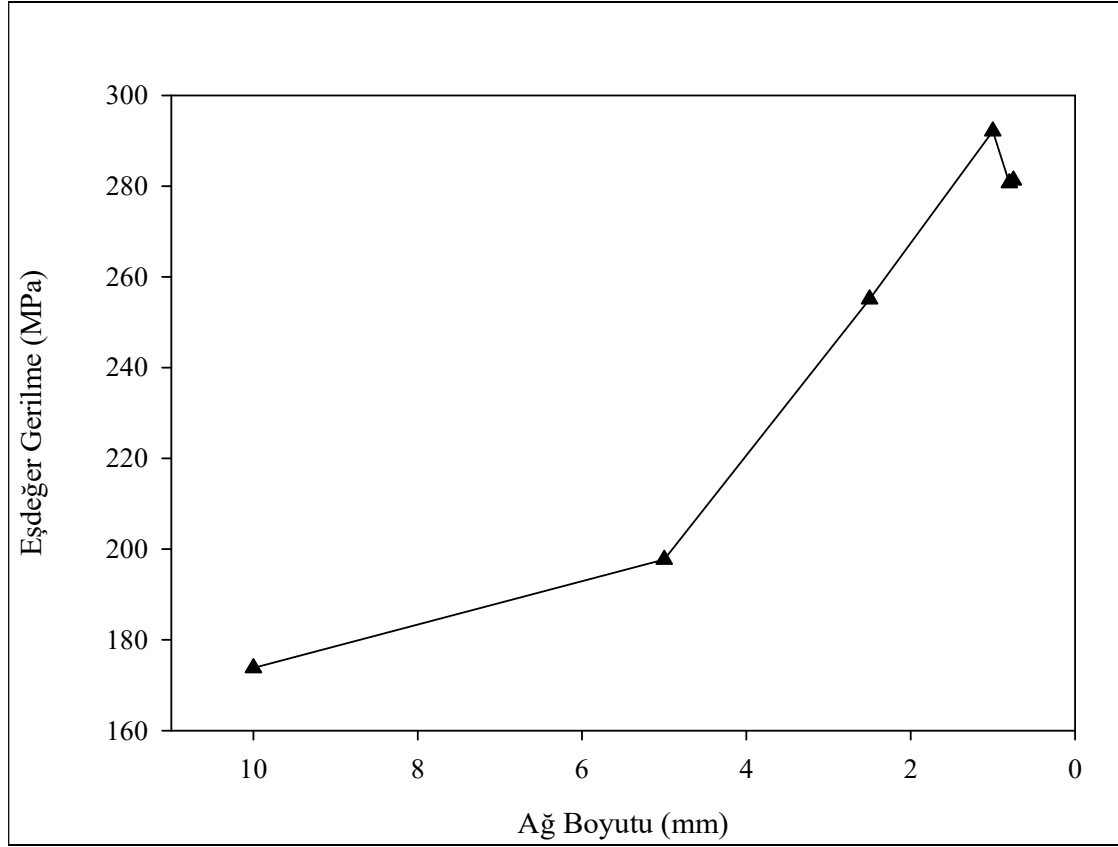
6.1.1. Sonlu elemanlar analizi için model hazırlanması

İç yüzeyinde haddelemeye bağlı üretim kusuru bulunan bir boru modeli bu bölüm kapsamında hazırlanmıştır. Kusurlu bölgedeki gerilme değerinin modelin sınır koşullarından etkilenmemesi için boru boyu 150 mm olarak belirlenmiştir. Problem simetrik olduğundan analiz sürelerini düşürebilmek için katı model boru geometrisinin çeyreği boyutunda hazırlanmıştır. İç yüzey kusurlu modelin geometrisi ve problemin sınır koşulları Şekil 6.3.'te mevcuttur.



Şekil 6.3 Problemin geometrisi ve sınır koşulları.

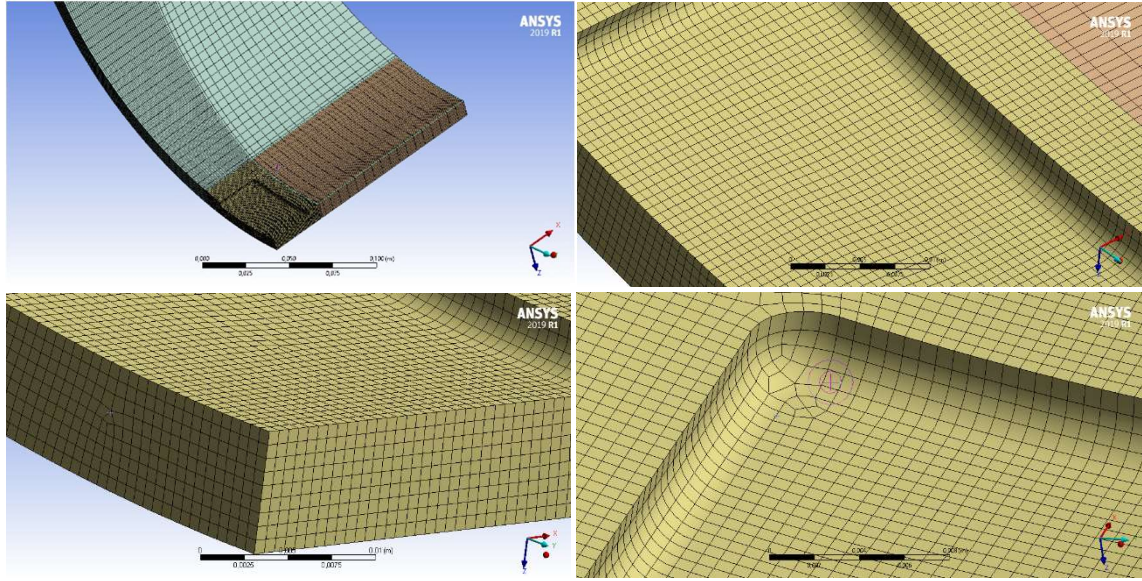
Ağ büyüklüğüne karar verebilmek için yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4.). Modelde ağırlıklı olarak düzgün altı yüzlü katı elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Kusur bölgesi için yakınsama çalışmasına ait sonuçlar.

Kusurlu bölge için hesaplama süresi de göz önüne alınarak en uygun ağ büyüklüğü 0,8 mm olarak kararlaştırılmıştır. Hesaplama süresini azaltmak amacıyla modelin düzgün geometrilili geri kalanında ağ büyüklüğü ise 5 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 6.5.'te kusurlu bölgede yapılan ağ oluşturma işleminin detayı gösterilmiştir.

Analiz sırasında iç basınç borunun tüm iç yüzeyine homojen şekilde uygulanmıştır. Problem tanımında borudaki akışın sınırlandığı kabul edilmiş olduğundan bu durum boru eksenli yönünde normal gerilme meydana getirecektir. Söz konusu gerilmeyi oluşturacak büyüklükte kuvvet modeldeki boru kesitine eksen yönünde (Bkz. Şekil 6.3. x-ekseninde) ayrıca uygulanmıştır. Kuvvetin büyüklüğü boru iç çapı ve basınca bağlı olarak ilgili eşitlikte (Bkz. Eş. 5.1) gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 6.5. Ağ oluşturma çalışmasına ait detaylar.

6.1.2. Gerilme konsantrasyon faktörünün sonlu elemanlar analiziyle elde edilmesi

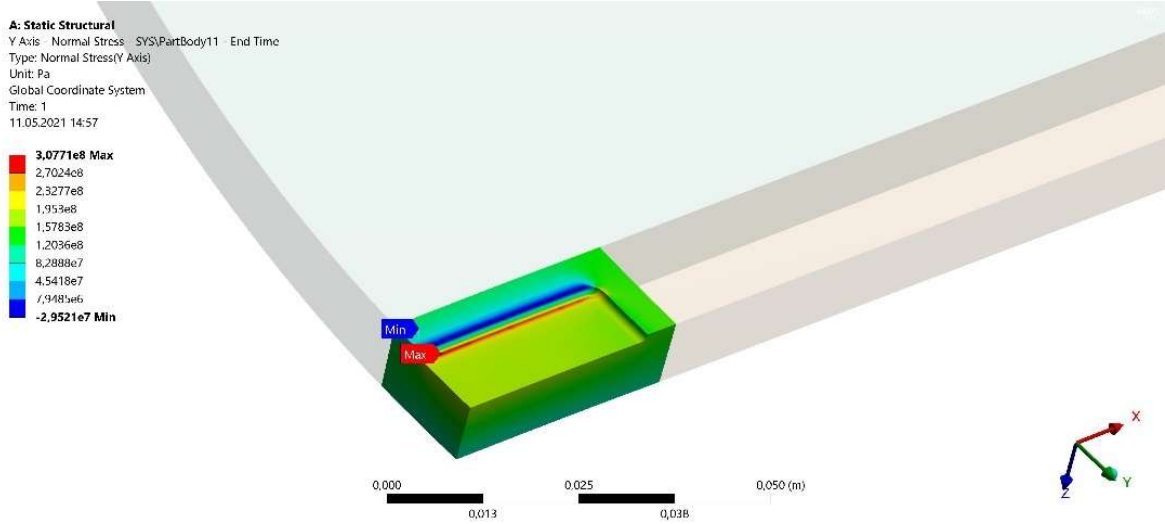
Bu bölüm içerisinde de çalışmanın önceki bölümlerinde izlenen yöntemin aynısı izlenmiştir. Çizelge 6.1.'de özellikleri verilen iç yüzey kusurlu basınçlı boru problemleri için bir önceki başlıkta anlatılan yöntemle sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımında gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında belirtilen sınır koşullarla (Bkz. Şekil 6.3) birlikte boru iç yüzeyine tabloda belirtilen basınç değerleri uygulanmıştır. Bu problem için de çevresel yöndeki gerilmenin büyüklüğü daha önemli olduğundan çevresel yönde en büyük normal gerilme değerleri kaydedilmiştir. Şekil 6.6.'da 1. sıra numaralı analize ait sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Analizi gerçekleştirilen modellere ait geometrik özellikler ve elde edilen gerilme konsantrasyonları.

	d/t	d (mm)	r (mm)	h (mm)	L (mm)	W (mm)	R (mm)	P (MPa)	GKF _Y
1	0,1	1,031	0,8248	0,2062	60	20	1,6496	8,2	2,50
2	0,2	2,062	1,6496	0,4124	90	30	3,2992	8,2	2,67
3	0,3	3,093	2,4744	0,6186	120	40	4,9488	8,2	2,86
4	0,4	4,124	3,2992	0,8248	150	50	6,5984	8,2	3,11
5	0,5	5,155	4,124	1,031	180	60	8,248	8,2	3,45

Borunun kusur olmayan bölümlerindeki gerilme değerini elde edebilmek için aynı çap ve cidar kalınlığında kusursuz bir model de hazırlanarak sonlu elemanlar analizi söz konusu

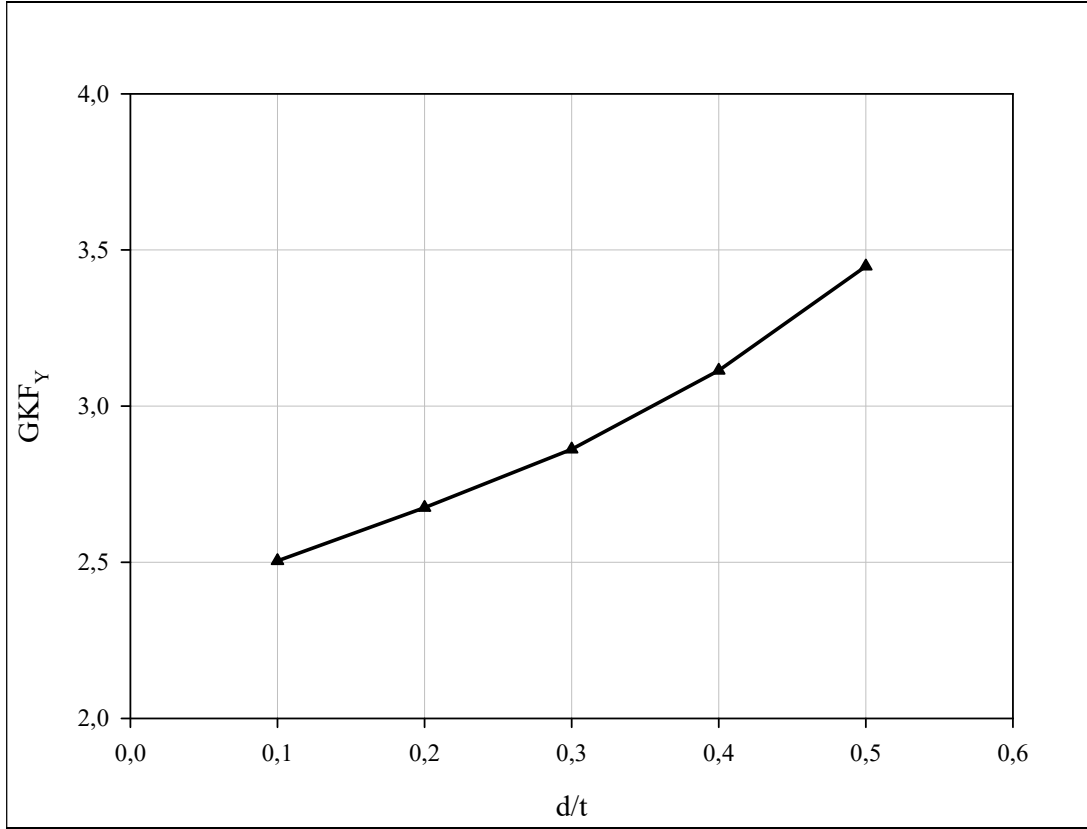
model üzerinde de gerçekleştirilmiş ve çevresel yönde normal gerilme değeri tespit edilmiştir. Kusurlu bölgenin gerilme değeri kusursuz bölgenin gerilme değerine oranlanarak Çizelge 6.1.'de verilen gerilme konsantrasyon faktörleri elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Kusur bölgesi için çevresel yönde en büyük normal gerilme.

Gerçekleştirilmiş olan benzetim sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak GKF_Y 'nin kusur derinliğine bağlı olarak ne şekilde değiştiğini göstermek üzere Şekil 6.7.'de sunulmuş olan grafik çizilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere beklendiği şekilde kusur derinliği arttıkça GKF_Y artmaktadır. GKF_Y 'nin aldığı değerler göz önüne alındığında söz konusu kusurların borunun yorulma dayanımını önemli derecede düşürecek olduğu değerlendirilmesi yapılmıştır.

Gerilme konsantrasyon faktörü sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilebildiğine göre Şekil 6.2.'deki her bir değişkenin farklı değeri için ayrı bir benzetim yapılarak GKF_Y aynı yöntem ile elde edilebilir. Fakat bu oldukça uzun zaman alacağından her bir geometrik değişkenin farklı değeri için hazırlanan vekil modellerden oluşan sistematik bir deney tasarımı oluşturularak GKF_Y 'nin tahmin edileceği bir denklem elde edilebilir. İlgili şekildeki (Bkz. Şekil 6.2.) değişkenler boyutsuz hale getirilerek Çizelge 6.2.'de gösterilen 9 koşturmadan oluşan 4 değişkenli ve 3 aşamalı Taguchi deney tasarımı hazırlanmıştır [75].



Şekil 6.7. GKF_Y 'nin kusur derinliğine bağlı olarak değişimi.

Çizelge 6.2.'deki deney tasarımına uygun şekilde Çizelge 6.3.'te geometrik özellikleri sunulan dokuz adet sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan modellerin önceki bölümde açıklanan yöntemle analizleri gerçekleştirilerek Çizelge 6.3.'te karşılarında kaydedilen GKF_Y 'ler elde edilmiştir.

Çizelge 6.2. Taguchi deney tasarımı $L_9(3^4)$.

Koşturma	d/t	r/t	R/t	L/W
1	0,1	0,1	0,1	0,6
2	0,1	0,2	0,2	1,2
3	0,1	0,3	0,3	1,8
4	0,3	0,1	0,2	1,8
5	0,3	0,2	0,3	0,6
6	0,3	0,3	0,1	1,2
7	0,5	0,1	0,3	1,2
8	0,5	0,2	0,1	1,8
9	0,5	0,3	0,2	0,6

Çizelge 6.3. Vekil modellere ait geometrik özellikler ve hesaplanan GKF_Y .

	D (mm)	t (mm)	d (mm)	r (mm)	h (mm)	L (mm)	W (mm)	R (mm)	GKF_Y
1	329,9	10,31	1,031	1,031	0	54	90	1,031	1,97
2	329,9	10,31	1,031	2,062	0	54	45	2,062	1,86
3	329,9	10,31	1,031	3,093	0	54	30	3,093	1,83
4	329,9	10,31	3,093	1,031	2,062	54	30	2,062	3,16
5	329,9	10,31	3,093	2,062	1,031	54	90	3,093	2,29
6	329,9	10,31	3,093	3,093	0	54	45	1,031	2,82
7	329,9	10,31	5,155	1,031	4,124	54	45	3,093	3,72
8	329,9	10,31	5,155	2,062	3,093	54	30	1,031	4,68
9	329,9	10,31	5,155	3,093	2,062	54	90	2,062	3,46

Çizelge 6.2.'deki değişkenler ile GKF_Y arasında bir bağıntı oluşturabilmek için MINTAB yazılımının doğrusal regresyon formülü kullanılmıştır. Elde edilen bağıntı Eş. 6.1'de sunulmuştur.

$$GKF_Y = 1,450 + 5,161 \left(\frac{d}{t} \right) - 1,211 \left(\frac{r}{t} \right) - 2,711 \left(\frac{R}{t} \right) + 0,543 \left(\frac{L}{W} \right) \quad (6.1)$$

Elde edilen denklemin vekil modelleri kabul edilebilir ölçüde temsil ettiği ve denklemin tahmin yapabilme kabiliyetinin de makul ölçüde olduğu Çizelge 6.4.'te sunulmuş olan model özetinden anlaşılmaktadır. Çalışmanın geri kalanında iç yüzey kusurlu bölgeler için gerilme konsantrasyon faktörlerinin elde edilmesinde Eş. 6.1 kullanılacaktır.

Çizelge 6.4. Regresyon modeli özeti.

Std. Sap.	R^2	R^2 (Uyarlama)	R^2 (Tahmin)
0,163391	%98,61	%97,21	%91,94

Denklemin tutarlılığını sınamak için Eş. 6.1 ile elde edilen GKF_Y 'ler sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Çizelge 6.5.'te gösterilmiştir. Ortalama mutlak yüzde hata değeri incelendiğinde sonuçların kabul edilebilir ölçüde tutarlı olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 6.5. Elde edilen denkleme ait sonuçların SEA sonuçlarıyla karşılaştırılması.

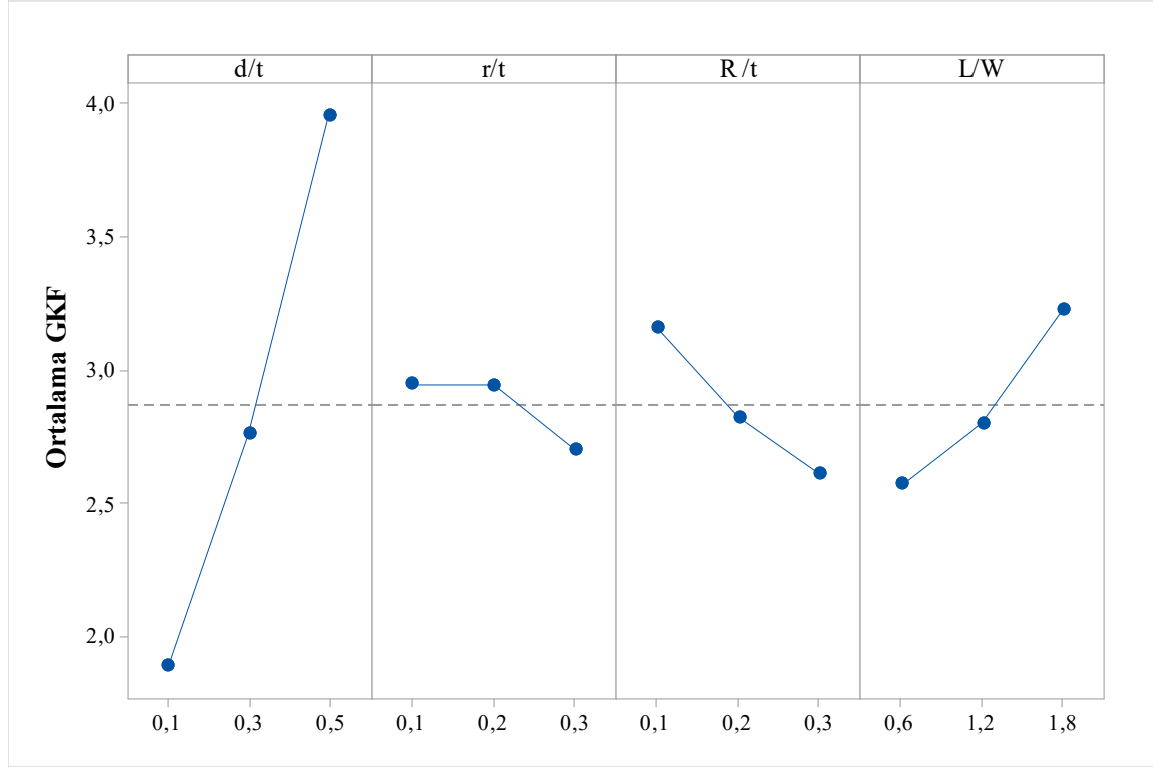
GKF _Y (SEA)	GKF _Y (Eş. 6.1)	Hata %
1,97	1,90	3,4
1,86	1,83	1,4
1,83	1,77	3,6
3,16	3,31	4,9
2,29	2,27	1,1
2,82	3,02	6,8
3,72	3,75	0,8
4,68	4,49	4,0
3,46	3,45	0,2
OMYH: 2,9		

Ayrıca değişkenler için varyans analizi (ANOVA) yapılmış olup sonuçlar Çizelge 6.6. 'da sunulmuştur. Çizelgedeki “P-Değeri” her bir değişken için incelendiğinde, “r/t” değişkeninin yanıtı anlamı bir şekilde etkilemediği fakat diğer değişkenlerin GKF_Y üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.6. Varyans analizi.

Kaynak	SD	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	4	7,55881	1,88970	70,78	0,001
d/t	1	6,39372	6,39372	239,50	0,000
r/t	1	0,08802	0,08802	3,30	0,144
R /t	1	0,44106	0,44106	16,52	0,015
L/W	1	0,63600	0,63600	23,82	0,008
Hata	4	0,10679	0,02670		
Toplam	8	7,66559			

Şekil 6.8.'de her bir değişkendeki değişimin GKF_Y ortalamasını ne mertebede etkilediği görülmektedir. Grafiklerden GKF_Y'nin kusur derinliğindeki artışa bağlı olarak artıyor olduğu buna rağmen kenar yarıçapları artıkça da azalıyor olduğu görülmektedir. İki durum da beklentiler ile örtüşmektedir. Kenar yarıçapları ne kadar küçük olursa konsantrasyon faktörü o kadar büyük olacaktır. Bununla birlikte kusurun boyu eksen yönünde büyüdükçe gerilme konsantrasyonu artmaktadır. Çevresel yönde gerilme konsantrasyonu ölçümü yapıldığından eksen yönündeki büyümenin çevresel yöndeki konsantrasyonu arttırdığı değerlendirilmesine varılmıştır.



Şekil 6.8. GKF_Y için ana etki grafiği.

İç yüzey kusuru için de çevresel yöndeki gerilmenin büyüklüğü dikkate alınacaktır. Basıncılı borularda çevresel yöndeki gerilmeyi veren eşitlik (Bkz. Eş. 2.15) İkinci Bölüm’ de sunulmuştur. İlgili eşitlikler (Bkz. Eş. 2.15 ve Eş. 6.1) kullanılarak iç yüzey kusuru olan kısım için çevresel yöndeki en büyük normal gerilme Eş. 6.2’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\sigma_T = \sigma^h GKF_Y \quad (6.2)$$

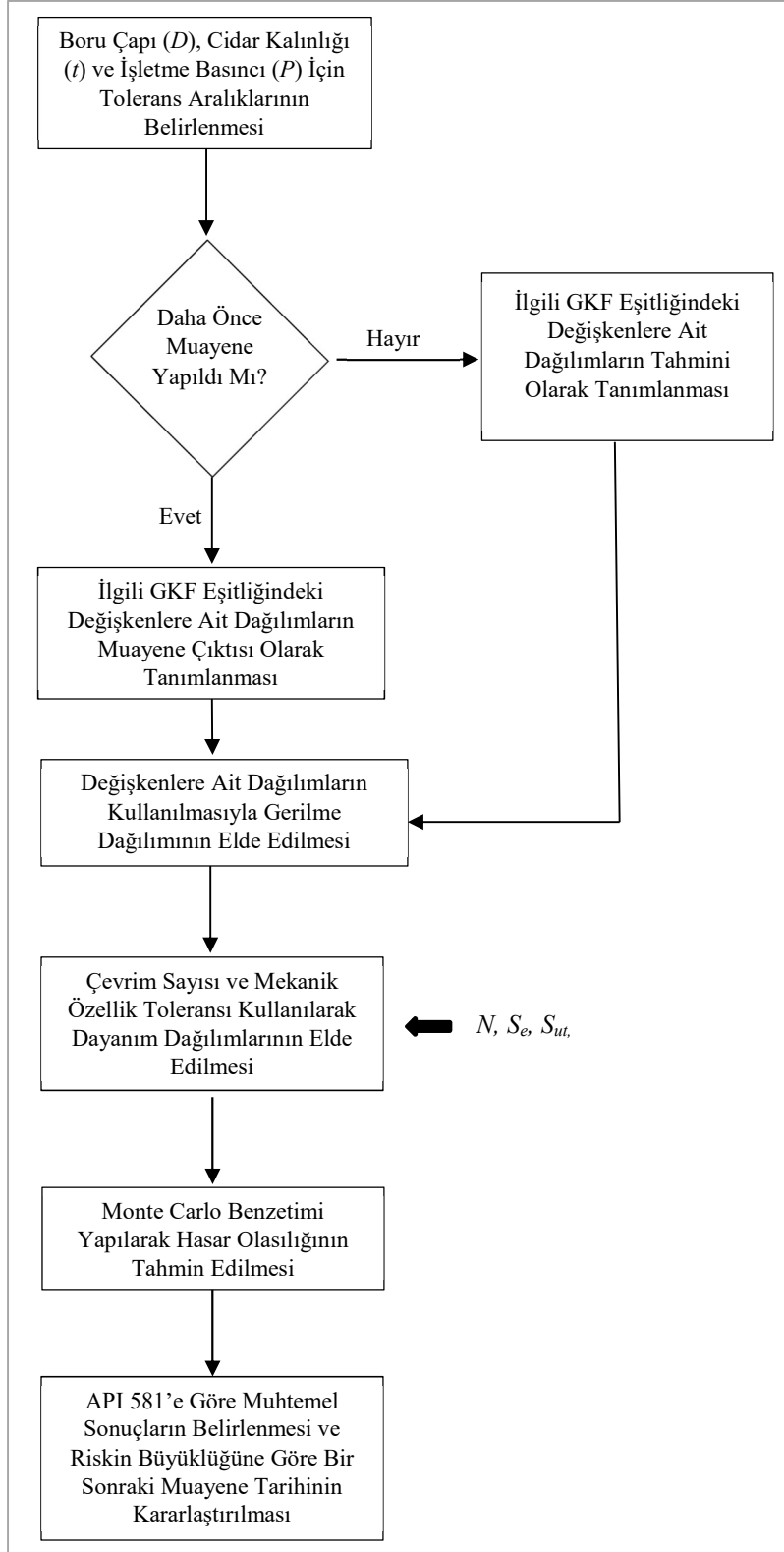
6.2. Hasar Olasılığının Tahmini

Basıncılı borularda iç yüzey kusurlarına bağlı olarak meydana gelebilecek hasarın olasılığı, İkinci Bölüm’ de açıklanan yöntemlerle tahmin edilebilir. Uygulaması yine bu çalışmanın Beşinci Bölümü’nde korozyon oyukları için tarif edilenle örtüşmektedir. Bu nedenle mükerrer anlatıma sebebiyet vermemek adına bu bölüm içerisinde tekrar gösterilmemiştir. Bunun yerine bu çalışmanın Yedinci Bölümü’nde gerçek bir boru hattında söz konusu yöntemin uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamada, boru hattı içinde bulunan çeşitli boyutlarda iç yüzey kusurları için hasar olasılığı tahmini yapılmış olup bu bilgilerin bu bölüm içerisinde ayrıca sunulmasına gerek duyulmamıştır.

7. ÖNERİLEN MODELLE ÖRNEK BİR BORU HATTI ÜZERİNDE MUAYENE PLANLAMASI GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde çalışmada önerilen yöntemle gerçek bir boru hattında uygulamanın nasıl gerçekleştirileceği ve bir muayene planlamasının ne şekilde uygulanacağı anlatılmıştır.

Öncelikle uygulama yapılacak olan boru hattına ilişkin geometrik ve mekanik özellikler ile bunlara ait tolerans değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Tolerans aralıklarının hesaplamalara katılması, boru hattının üretiminden gelen rastgeleliğin hasar olasılığı hesaplamalarında dikkate alınmasını sağlamaktadır. Bu tolerans aralıkları çelik boru üreticisinden temin edilebileceği gibi çeşitli standartlardan da elde edilebilir. Ardından borudaki muhtemel yüzey kusurları tanımlanmalıdır. Bu yüzey kusurları borunun üretim süreçlerinden kaynaklanabileceği gibi darbe veya korozyon etkisiyle de meydana gelmiş olabilir. Eğer planlama öncesinde bir kontrol gerçekleştirilmiş ise söz konusu kontrolden edinilen veriler ile yüzey kusurlarının boyut ve geometrileri daha hassas bir şekilde hesaplamalara dahil edilmiş olacaktır. Değilse başka hatlarda daha önce yapılmış olan muayeneler veya sektördeki tecrübeler kullanılarak olası kusurlar için bir projeksiyon oluşturulmalıdır. İlk muayene gerçekleştirildikten sonra söz konusu bilgi eksikliği ortadan kalkacağından, sonraki muayeneler için planlama daha etkin bir şekilde gerçekleştirilecektir. Boru yüzeyinde bulunan bu kusurların sayısı ve geometrisi de problem için rastgelelik oluşturduğundan kusurlara ait geometrik değişkenler için de bir tolerans aralığı tanımlanmalıdır. Bu çalışma kapsamında sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak elde edilen GKF eşitliklerden, borudaki muhtemel yüzey kusurlarına karşılık gelenler kullanılarak söz konusu yüzey kusurları için en büyük gerilme değerleri elde edilir. GKF değerleri boru üzerinde meydana gelecek gerilme dağılımını elde etmek için önemli olmakla birlikte boru iç basıncında oluşabilecek muhtemel değişimler de gerilmeyi etkileyen bir diğer değişken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple hat işletme basıncının da dikkate alınması ve bu değişken için de bir ortalama ve standart sapma tanımlanması yararlı olacaktır. Ayrıca problemde yorulma durumu dikkate alındığından hat üzerinde belirli bir zaman dilimi içerisinde kaç operasyon gerçekleştiriliyor olduğu da değerlendirmeye alınmalıdır. Böylelikle problemdeki değişkenlerin her birisi için ortalama ve standart sapma değerleri dikkate alınarak bilgisayar ortamında gerilme ve dayanım dağılımları oluşturulmalı, bu dağılımlar kullanılarak çok değişkenli bir Monte Carlo benzetimi gerçekleştirilmelidir. Yöntemin akış şeması Şekil 7.1.'de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Önerilen yöntemin akış şeması.

Benzetim, yorulma etkisini dikkate alabilmek için çevrim sayısına bağlı olarak gerçekleştirilmelidir. Benzetimdeki örnekleme sayısı ne kadar büyük seçilirse gerçek sonuca o kadar yaklaşılabacaktır. Hasar olasılığı çevrim sayısına bağlı olarak elde edildikten sonra

ilgili (Bkz. Eş. 2.13) eşitlik kullanılarak risk tespit edilebilir. Bu örnekte hasarın muhtemel sonuçlarını tahmin edebilmek için API 581 uygulama rehberinin sonuç analizi bölümünden yararlanılmıştır. Hasar olasılığı zamana bağlı olarak elde edildiğinden risk de zamana bağlı olacaktır. Riskin büyüklüğü kabul edilebilir mertebeyi geçtiğinde muayene gerçekleştirilmelidir.

Örnek bir uygulama olarak; Türkiye’deki bir rafineri ile ticari unvanının yayınlanmasını istemeyen bir firmaya ait akaryakıt terminali arasında bulunan ve büyük bölümü yer altında olan boru hattının muayene planlaması, bu çalışmada önerilen yöntem ile risk bazlı olarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama söz konusu boru hattının işletmenin sorumluluğunda olan 775 metre uzunluğundaki bölümü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boru hattının yer yüzeyine çıktığı alandan bir fotoğraf Resim 7.1.’de sunulmuştur.



Resim 7.1. Muayene planlaması yapılan boru hattı.

Söz konusu boru hattı vasıtasıyla, rafineri ile akaryakıt terminali arasında düzenli olarak dizel yakıt transferi gerçekleştirilmektedir. Boru hattının mekanik ve geometrik özellikleri Çizelge 7.1.’de mevcuttur.

Çizelge 7.1. Örnek boru hattına ait geometrik ve mekanik özellikler.

Malzeme	API 5L Grade B
Akma Dayanımı (MPa)	241
Çekme Dayanımı (MPa)	413
Young Modülü (GPa)	206
Çap (mm)	323,9
Cidar Kalınlığı (mm)	10,31
Maksimum Tasarım Basıncı (MPa)*	15,3
İzin Verilen İşletme Basıncı (MPa)**	11

* Maksimum tasarım basıncı ince cidarlı borular için

$P = \frac{2S_y t}{D}$ bağıntısı ile elde edilir.

** Maksimum işletme basıncı, maksimum tasarım basıncının en fazla 0,72 katı kadar olabilir [77].

Hattın kurulumunu takip eden 10. yılın sonunda hat üzerinde bir muayene gerçekleştirilmiştir. Hattın büyük bölümü yer altında olduğundan muayene Resim 7.2.'de gösterilen MFL-PIG kullanılarak yapılmıştır.



Resim 7.2. Muayenede kullanılan MFL-PIG.

Yapılan muayene neticesinde boru hattı üzerinde farklı boyut ve geometrilerde toplam 31 adet yüzey kusuru tespit edilmiştir. Uzman değerlendirmesi neticesinde söz konusu yüzey kusurlarının korozyon sonucunda oluşmadığı, kusurların boruların imalat süreçlerinden gelen yüzey kusurları olduğu değerlendirilmesine varılmıştır. Bu yüzey kusurlarından en derini için cidar kalınlığında %28 kayıp tespit edilmiştir. Söz konusu yüzey kusurları borunun mevcut şartlarda işletilmesi için herhangi bir engel teşkil etmese de yorulma dayanımı operasyon sayısına bağlı olarak düşebileceğinden uzun vadeli olarak hasar olasılığı artmaktadır. Muayene sırasında boru hattı üzerinde herhangi bir göçük veya korozyon oyugu tespit edilmemiştir.

7.1. Gerilme Dağılımının Tahmini

Boru hattında sadece üretime bağlı iç yüzey kusurları tespit edilmiş olduğundan bu çalışmanın Altıncı Bölümü'nde elde edilen GKF_Y eşitliğinden (Bkz. Eş. 6.1) yararlanılacaktır. Tespit edilen yüzey kusurları Altıncı Bölüm' de sunulan şekilde (Bkz. Şekil 6.2.) gösterildiği kadar düzgün geometrili olmasa da ölçüm neticesinde işlenen veriler ilgili geometri ile uyumlu hale getirilmiştir. Ölçüm sonuçlarının kusurlara ait yüzey yarıçapları ile ilgili kesin bir bilgi üretemediğine dikkat edilmelidir. Gerçekleştirilen muayene sonucunda tespit edilen 31 adet yüzey kusuruna ait boyutlar Çizelge 7.2.'de mevcuttur.

Çizelge 7.2. 'deki bilgiler GKF_Y denklemi (Bkz. Eş. 6.1) için uygun bir veri oluşturmaktadır. Fakat gerçekte söz konusu kusurların geometrileri kabul edilen (Bkz. Şekil 6.2.) ile birebir uyumlu olmamakla birlikte yüzey yarıçapları diğer bir rastgele değişken olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmada bir hasar olasılığı hesaplama iddiası bulunduğundan söz konusu veri havuzunu genişletmek ve mümkün olan tüm ihtimalleri değerlendirmek uygun olacaktır. Bu sebeple problemdeki GKF_Y hesaplamasında Çizelge 7.2.'de sunulan “L/W” ve “d/t” değişkenlerine ait ölçüm sonuçlarının ortama ve standart sapma değerleri doğrudan kullanılmış olup “r/t” ve “R/t” değişkenleri içinse mümkün olduğunca kapsayıcı bir ortalama ve standart sapma tahmini yapılarak daha geniş katılımlı bir GKF_Y veri havuzu oluşturulmuştur.

Çizelge 7.2. Muayene neticesinde tespit edilen iç yüzey kusurları.

	L (mm)	W (mm)	d (mm)	L/W	d/t
1	27	24	2,06	1,13	0,20
2	58	70	0,62	0,83	0,06
3	48	47	1,86	1,02	0,18
4	76	91	1,13	0,84	0,11
5	74	89	0,52	0,83	0,05
6	69	43	1,34	1,60	0,13
7	63	49	0,62	1,29	0,06
8	86	64	0,52	1,34	0,05
9	75	40	0,52	1,88	0,05
10	65	49	0,52	1,33	0,05
11	52	43	0,62	1,21	0,06
12	38	42	1,13	0,90	0,11
13	37	50	1,44	0,74	0,14
14	39	36	0,52	1,08	0,05
15	42	38	2,89	1,11	0,28
16	33	32	1,44	1,03	0,14
17	37	41	1,03	0,90	0,10
18	48	43	0,72	1,12	0,07
19	34	36	1,75	0,94	0,17
20	24	26	0,82	0,92	0,08
21	18	18	0,52	1,00	0,05
22	39	59	1,65	0,66	0,16
23	39	38	1,96	1,03	0,19
24	38	26	0,62	1,46	0,06
25	54	56	1,96	0,96	0,19
26	18	18	0,72	1,00	0,07
27	63	37	0,93	1,70	0,09
28	63	59	0,52	1,07	0,05
29	58	45	1,13	1,29	0,11
30	49	60	1,13	0,82	0,11
31	63	55	1,55	1,15	0,15
			Ort.	1,10	0,11
			Std. Sap.	0,28	0,06

Her ne kadar boru hattı için izin verilen işletme basıncı 11 MPa olsa da muayene planlaması söz konusu terminal için gerçekleştirildiğinden ve terminalde uygulanan işletme basıncı izin verilen işletme basıncının oldukça altında kaldığından fiili işletme basıncı tasarım basıncının yaklaşık yarısı olacak şekilde 7,5 MPa olarak kabul edilmiştir. Altıncı Bölüm’ de sunulan eşitlik (Bkz. Eş. 6.2.) boru hattındaki basınca bağlı olarak çevresel yönde en büyük normal gerilmeyi vermekte olup denklemdeki tüm değişkenler için ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 7.3’te sunulmuştur. Çizelgedeki her bir bağımsız değişken için normal

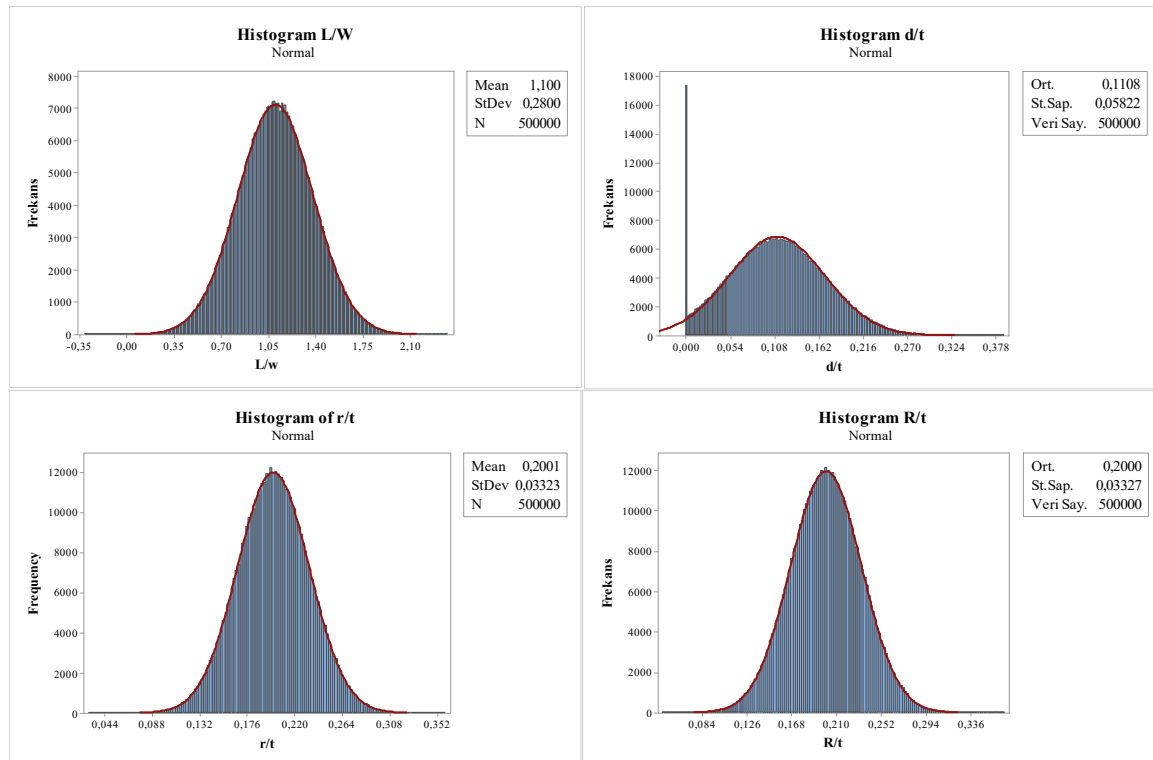
dağılım gösteren 500 000'er veri bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Şekil 7.2.'de GKF_Y 'yi etkileyen değişkenlere ait histogramlar sunulmuştur. Kusur derinliğinin cidar kalınlığına oranı (d/t) için muayene sonucu elde edilen ortalama ve standart sapmaya bağlı kalınarak 500 000 veriden oluşan teorik normal dağılım üretildiğinde, doğal olarak verilerin küçük bir bölümünün sıfırdan küçük değer aldığı görülmektedir. Pratikte böyle bir durum söz konusu olamayacağından, dağılımdaki sıfırdan küçük değerler 10^{-4} kabul edilerek Şekil 7.2'deki histogram bu duruma uygun hale getirilmiştir.

Çizelge 7.3. Gerilme dağılımını etkileyen değişkenler.

Değişken	Ortalama	Standart Sapma
Cidar Kalınlığı t (mm)	10,31	0,43*
Çap D (mm)	323,9	0,83*
L/W	1,10	0,28
d/t	0,11	0,06
r/t	0,2	0,033
R/t	0,2	0,033
Basınç P (MPa)	7,5	0,25**

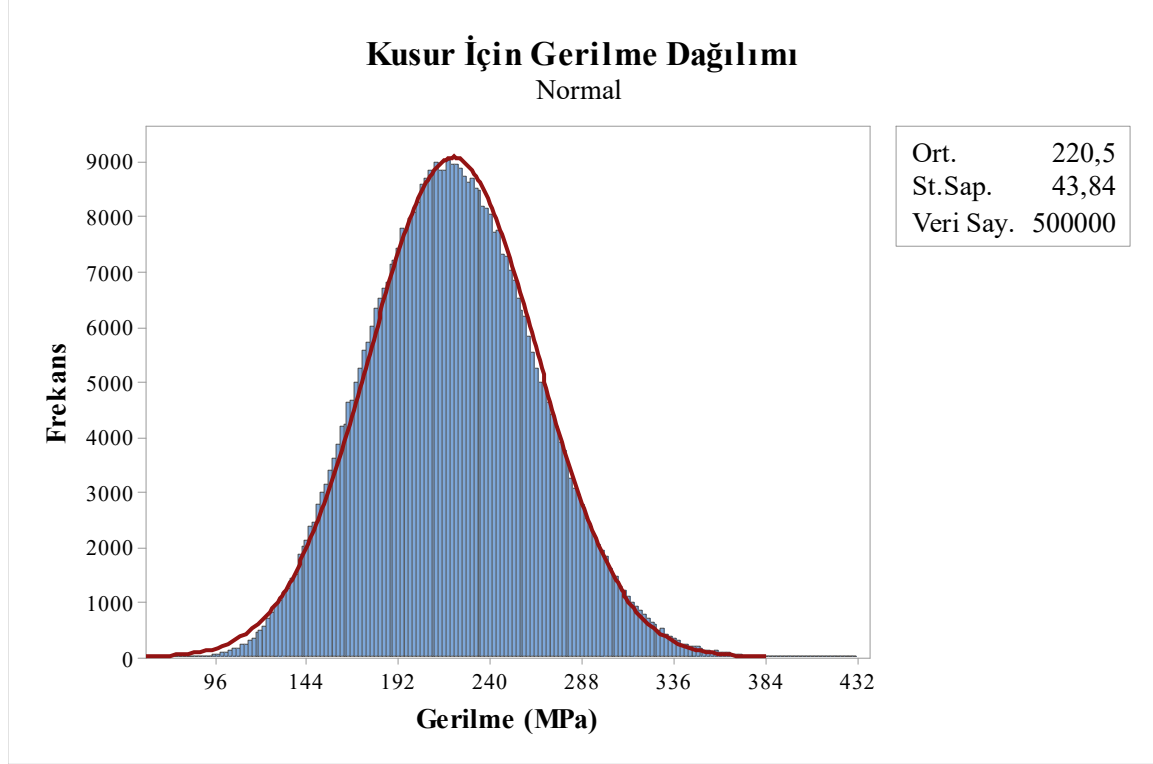
* DNV GL-ST-F101 yönergesindeki toleranslara göre oluşturulmuş normal dağılımlara ait standart sapmalar

** Olası basınç sapması işletme basıncının 1,1 katı kadar alınmıştır [73].



Şekil 7.2. Değişkenlere ait histogramlar.

Yüzey kusurlu bölge için Altıncı Bölüm’ de sunulan çevresel yöndeki en büyük normal gerilme denklemindeki (Bkz. Eş. 6.2.) değişkenlerin dağılımları kullanılarak gerçekleştirilen Monte Carlo benzetimi sonucunda elde edilen çevresel yöndeki en büyük normal gerilme dağılımı Şekil 7.3.’te mevcuttur.



Şekil 7.3. İç yüzey kusuru için gerilme dağılımı.

7.2. Yorulma Dayanımı Dağılımının Tahmini

Çalışmanın gerçekleştirildiği boru hattında haftada ortalama 5 operasyon yapılmaktadır. Yorulma analizinde çevrim sayısı hesaplanırken hattaki operasyon sayısı dikkate alınmıştır. Boru hattı için çevresel yöndeki gerilme genliği ve gerilme ortalaması ise Eş. 7.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

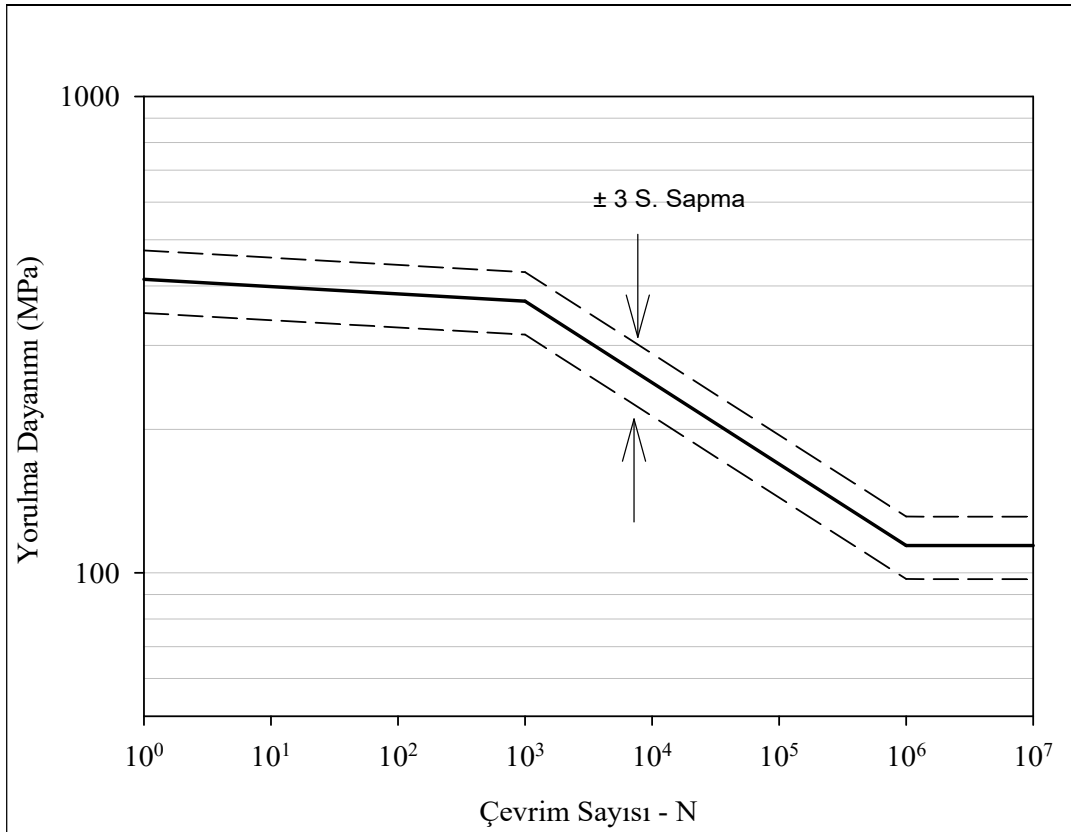
$$\sigma_a^h = \sigma_m^h = \frac{\sigma_T}{2} \quad (7.1)$$

Çizelge 7.1.’de mekanik özellikleri verilen boru hattına ait S-N eğrisi yorulma analizinde kullanılmak üzere Şekil 7.4.’te sunulmuştur. S-N eğrisi için sonsuz ömür limiti “S_e” Eş. 7.2 kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmalar göstermektedir ki sonsuz ömür limitinin standart

sapması %8'in altındadır [83]. Bu çalışmada ise %5 olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla S-N eğrisi bu toleransa uygun olarak oluşturulmuştur.

$$S_e = 0.5k_a S_{ut} k_b k_c \quad (7.2)$$

Eşitlikte “ S_{ut} ” malzemenin çekme dayanımını, “ k_a ” malzemeye ait yüzey faktörünü, “ k_b ” malzemeye ait boyut faktörünü ve “ k_c ” ise probleme ait yük faktörünü temsil etmektedir. Sonsuz ömür limitinin hesabında yüzey faktörü “0,76”, boruda normal gerilme meydana geldiğinden boyut faktörü “1” ve yük faktörü “0,85” olarak kabul edilmiştir. Düşük çevrim için ($N = 10^3$) yorulma dayanımı malzeme çekme dayanımının yaklaşık 0,9 katı olarak alınmıştır [68].



Şekil 7.4. Boru gövdesi için S-N eğrisi.

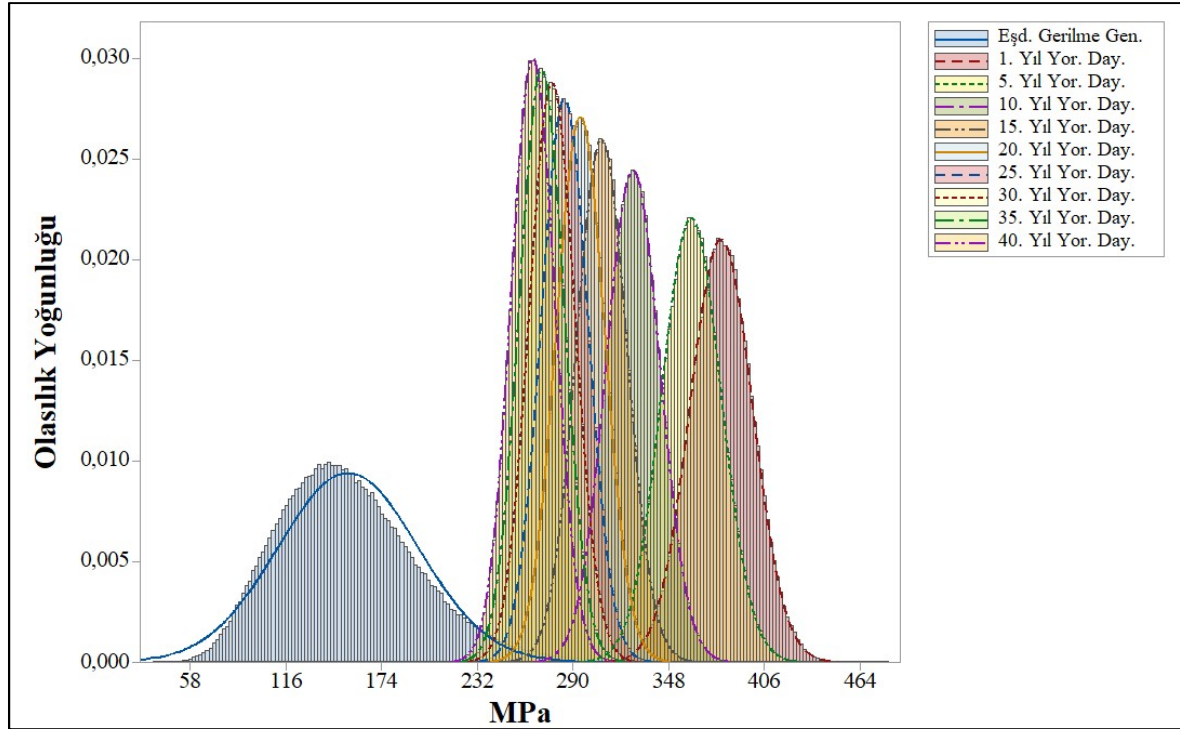
7.3. Hasar Olasılığının Öngörülmesi

Bu çalışmada ele alınan yüzey kusurlu boru problemi için gerilme dağılımı birden çok değişkenin etkisinde elde edilmiş ve Şekil 7.3.'te sunulmuştur. Problem için

gerçekleştirilecek yorulma analizinde, Eş. 7.1’de gösterildiği şekilde hem ortama gerilme hem de gerilme genliği söz konusu olduğundan çözüm için eşdeğer gerilme genliği dağılımı hesaplanmalıdır. Analizde yorulma hasar kriterlerinden Modified Goodman yaklaşımı kullanılmış olup eşdeğer gerilme genliği dağılımı Eş. 7.3 kullanılarak elde edilmiştir [80].

$$\sigma_{a\,eq}^h = \sigma_a^h \left(\frac{S_{ut}}{S_{ut} - \sigma_m^h} \right) \quad (7.3)$$

Yorulma dayanımı dağılımları ise çevrim sayısına, dolayısıyla da zamana bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte Şekil 7.4.’te sunulmuş olan S-N eğrisi kullanılarak istenilen çevrim sayısına karşılık gelen yorulma dayanımı dağılımları elde edilebilir.



Şekil 7.5. Eşdeğer gerilme genliği ve yorulma dayanımı olasılık yoğunluk grafikleri.

Şekil 7.5.’te yüzey kusurlu boru için çevresel yönde eşdeğer gerilme genliği dağılımı ile çevrim sayısına bağlı olarak değişen yorulma dayanımı dağılımları karşılaştırılmış olup hasar olasılığı iki dağılımın girişim alanı üzerinden elde edilmiştir. Şekil 7.5.’te görüldüğü üzere, çevrim sayısı arttıkça yorulma dayanımı dağılımının gerilme dağılımına yaklaştığı bu sebeple de birikimli hasar olasılığının arttığı anlaşılmaktadır.

Çevrim sayısına bağlı olarak hasar olasılığını elde edebilmek için İkinci Bölüm’ de sunulan eşitliklerin (Bkz. Eş. 2.1 ve Eş. 2.3) farklı çevrim sayıları için tekraren çözülmesi gerekmektedir. 500 000 veri kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiş Monte Carlo benzetimine ait sonuçlar Çizelge 7.4.’de sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde sonuçların Şekil 7.5. ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.4. Çevrim sayısına bağlı hasar olasılığı.

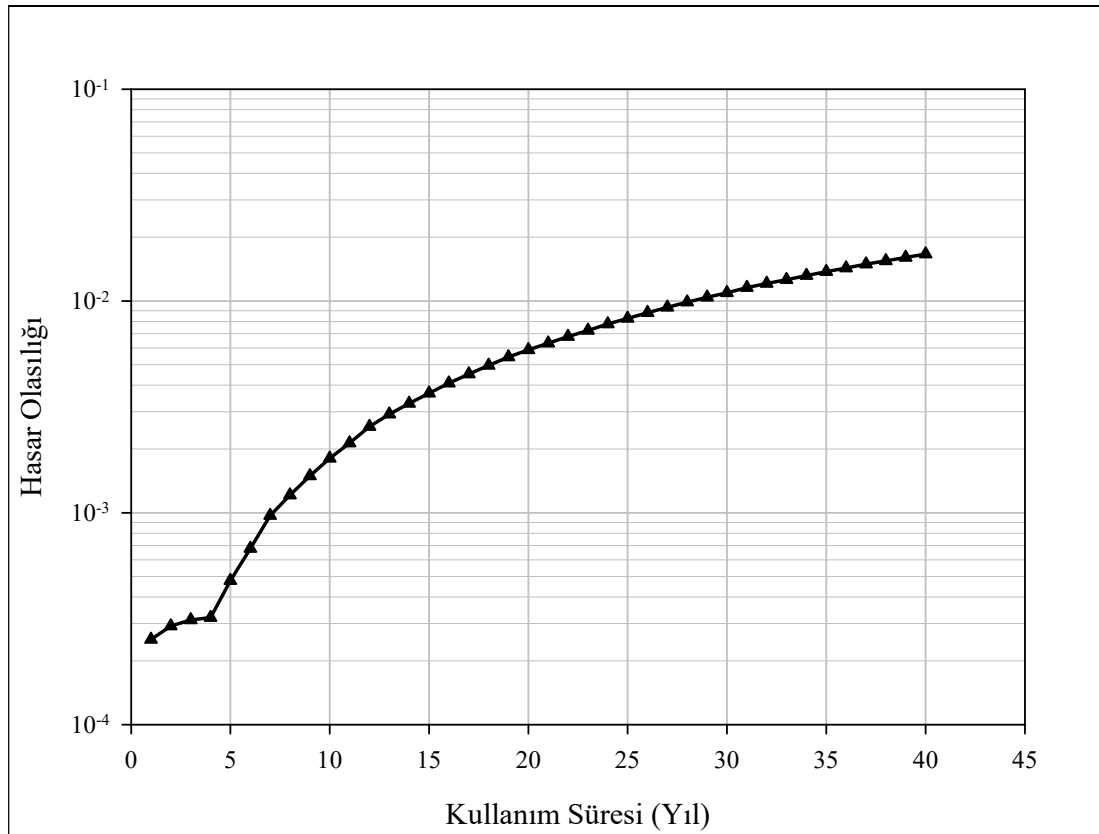
Yıl	Çevrim Sayısı	Hasar Olasılığı
1	240	2,52E-04
5	1200	4,78E-04
10	2400	1,81E-03
15	3600	3,67E-03
20	4800	5,87E-03
25	6000	8,28E-03
30	7200	1,09E-02
35	8400	1,38E-02
40	9600	1,66E-02

7.4. Uygulama Sonuçları

Boru hatlarında üretime bağlı iç yüzey kusurlarının borunun yorulma dayanımına olan etkisi geçmişte herhangi bir araştırmaya konu olmayan bir başlıktır. Boru iç yüzeyinde korozyona bağlı kusurlar olduğu bilinmektedir fakat bu aşamada incelenen durum bu konunun dışındadır. Burada değerlendirmeye alınan iç yüzey kusurlarının dikişsiz boru üretiminde haddeleme aşamasında olduğu tahmin edilmektedir. Söz konusu kusurlar da boru hatları için kritik olarak kabul edilmiştir. Kusur geometrisinin dikdörtgen kesite yakınsayacağı varsayılmıştır. Gerilme konsantrasyon faktörü kusur geometrisine bağlı olarak ilgili bölümde sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Bu alanda yeterli araştırmaya rastlanılmadığından elde edilen sonuçları karşılaştırmak üzere deneysel veya teorik bir çalışmaya ulaşılamamıştır.

Gerçekleştirilen örnek uygulamada Çizelge 7.1.’de özellikleri sunulan API 5L Grade B çelik boru hattı için, hattın iç yüzeyinde farklı noktalarda bulunan yüzey kusurları etkisi altında yorulmaya bağlı hasar olasılığı elde edilmiştir. Hasar olasılığı çevrim sayısına dolayısıyla zamana bağlı olarak sunulmuştur. Bu veri kullanılarak boru hattı için en uygun muayene zamanına karar verilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için de risk bazlı muayene planlaması

yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde risk İkinci Bölüm’ de sunulan eşitlik (Bkz. Eş. 2.13) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Eşitlikteki hasar olasılığı değişkeni, bu çalışma dahilinde ele alınan yüzey kusurlu boru hattı için yorulma etkisi altında zamana bağlı olarak hesaplanmış ve Şekil 7.6.’da sunulmuştur. Riskin hesaplanmasında ihtiyaç duyulan bir diğer değişken olan muhtemel sonuçların etkisi (C) ise API 581 uygulama rehberinden yararlanılarak elde edilmiş olup söz konusu hesaplamaların detaylarına bu çalışma kapsamında yer verilmemiştir. API 581’e göre hasar neticesinde meydana gelen bütünlük kaybı sonrası muhtemel sonuçların etkisi, boru hattında taşınan kimyasalın özellikleri ile basınç ve sıcaklık gibi işletme koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Rehberin sonuç analizi bölümü, kimyasallardan kaynaklı olarak meydana gelebilecek yangın, zehirli yayılım vb. istenmeyen durumların muhtemel etkilerinin alan veya maliyet bazında hesaplanmasında kullanılabilmektedir [31]. Örnek uygulamanın gerçekleştiği terminalde sadece yanıcı kimyasallar bulunduğundan olası bir yangının etkisi dikkate alınmıştır.



Şekil 7.6. Hasar olasılığının zamana göre değişimi (1 yıl içindeki çevrim sayısı “N = 240” olarak kabul edilmiştir).

API 581 risk eşitliğini (Bkz. Eş. 2.13) İkinci Bölüm’ de (Bkz. Şekil 2.11) de gösterildiği gibi bir risk matrisi haline getirerek uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Yine İkinci Bölüm’ de

ilgili çizelgede (Bkz. Çizelge 2.1.) olası bir yangından etkilenen alanın büyüklüğünün hangi risk seviyesine karşılık geldiği gösterilmiştir.

Bu uygulamanın gerçekleştirilmiş olduğu örnek boru hattında motorin transferi yapılmakta olup söz konusu hatta meydana gelen bir hasar neticesinde boru üzerinde yaklaşık 102 mm büyüklükte bir delik oluştuğu varsayılmıştır. Bu nedenle oluşabilecek yangının etkisi API 581'in muhtemel sonuçların etkisi bölümüne göre hesaplanarak yaklaşık 650 m² olarak bulunmuştur (Ek-3). Bu sonuç "C" seviyesi riske karşılık gelmektedir (Bkz. Çizelge 2.1.). Bu bilgi kullanılarak sırasıyla risk matrisinden (Bkz. Şekil 2.11) işletmenin kabul edebileceği risk seviyesi tespit edilir ve matriste bu seviyeye karşılık gelen kabul edilebilir en büyük hasar olasılığı seviyesi belirlenir. Son olarak kabul edilebilir en büyük hasar olasılığına karşılık gelen muayene zamanı Şekil 7.6.'daki grafik kullanılarak tespit edilebilir. Çalışma sonucunda örnek olarak ele alınan boru hattı için riskin büyüklüğüne göre en uygun muayene zamanları Çizelge 7.5.'de sunulmuştur. Bu problemdeki örnek boru hattımız için orta risk seviyesi üzerine çıkmamak adına 10. yılın sonunda bir muayene daha gerçekleştirilmesi tavsiye edilebilir.

Çizelge 7.5. API 581'e göre hasar olasılığı seviyeleri ve örnek uygulama için muayene zamanları.

Seviye	Hasar Olasılığı $H(t)$	Muayene Zamanı	Riskin Büyüklüğü
1	$H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-5}$	-	Düşük Risk
2	$3,0 \cdot 10^{-5} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$	Muayene Yılı < 5	Orta Risk
3	$3,0 \cdot 10^{-4} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-3}$	$5 \leq \text{Muayene Yılı} \leq 10$	Orta Risk
4	$3,0 \cdot 10^{-3} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-2}$	$10 < \text{Muayene Yılı} \leq 40$	Orta - Yüksek Risk
5	$H(t) > 3,0 \cdot 10^{-2}$	Muayene Yılı > 40	Orta - Yüksek Risk

Çalışma kapsamında örnek boru hattı için elde edilen ve Şekil 7.6.'da sunulan grafik hattın muayene zamanının belirlenmesi için önemli bir veri oluşturmaktadır.

8. TARTIŞMA

Bu çalışmanın her bir bölümünde farklı bir kritik nokta için gerilme konsantrasyonu elde edilmiş olup buna bağlı olarak hasar olasılığı hesaplaması yapılmıştır. Problemin çözüm aşamalarında Monte Carlo benzetimi ve sonlu elemanlar yöntemlerinden yararlanılmış olduğundan elde edilmiş olan hasar olasılıkları teoriktir. Söz konusu hasar olasılıklarının gerçek olasılıklar ile doğrulanması pratikte çok zordur. Gerçek bir olasılık verisini elde edilebilmek için bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan tüm koşullar için yeterli sayıda boru hattını kabul edilebilir bir süre boyunca gözlemlemek ve hasar sayılarını kaydetmek gereklidir. Böyle bir uygulamanın tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmesinin güçlüğü ortadadır. Bununla birlikte ülkemizde böyle bir veriyi derlemiş kamu veya özel sektörden herhangi bir kurum veya kuruluşa ulaşılamamıştır. Çalışma kapsamında elde edilmiş bulguların desteklenmesi amacıyla, farklı kritik noktalar için hesaplanan gerilme konsantrasyonları literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilmiş analitik, deneysel veya benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup sonuçların tutarlılığı sınanmıştır. Böylelikle çalışma sonucunda elde edilmiş olan olasılık verisinin tutarlı olduğu kanaati oluşmuştur.

Çalışmanın Dördüncü Bölümü'nde göçük problemi için sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilirken, üzerinde göçük oluşturulmuş boru modeline iç basınç uygulandığında, göçükte bir miktar toparlanma yaşandığı ve göçük bölgesinin tekrar yuvarlak forma yaklaştığı gözlemlenmiştir. Boru maksimum işletme basıncına yaklaştığında toparlanma kayda değer miktarda artmaktadır. Bu konuda gerçekleştirilmiş olan başka bir çalışmada da benzer sonuçlara ulaşıldığı anlaşılmaktadır. İç basınç borunun tasarım basıncını aştığında, göçük bölgesinde bir miktar tepelenme görüldüğü de belirtilmiştir [20]. İç basınca bağlı olarak meydana gelen söz konusu değişimin, göçüğe bağlı gerilme konsantrasyonunu da etkileyeceği düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında göçük problemi için sınırlı sayıda analiz gerçekleştirildiğinden, söz konusu davranışın etkileri tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu alanda yapılacak ileri araştırmalar ve deneysel çalışmalar ile bu etki daha kapsamlı bir şekilde incelenebilir.

Çalışmanın farklı bölümlerinde değerlendirmeye alınan kritik noktaların her biri ayrı birer problem olarak incelenmiştir. Her bir problemin fiziksel özellikleri birbirinden bağımsız ele alınmış olup birbirleri ile karşılaştırılması amacını taşımamaktadır. Birden çok yüzey

kusurunun bir arada olma ihtimali olan boru hatları için muayene planlaması en büyük hasar olasılığı dikkate alınarak yapılmalıdır.

Çalışmada incelenen farklı yüzey kusurlarının bir araya gelmesiyle, gerilme konsantrasyonunu daha da yukarıya taşıyacak birikimli bir etki oluşacağı tahmin edilmektedir. Bu birikimli etkiler; kaynaklı birleştirme noktası üzerinde veya yakınında meydana gelebilecek bir göçük veya korozyon oyuğunun birlikte etkisi, birbirine çok yakın iki veya daha fazla korozyon oyuğunun birlikte etkisi veya korozyon oyuğu oluşmuş bir bölümde meydana gelebilecek göçüğün birikimli etkisi vb. olarak arttırılabilir. Söz konusu koşulların modellenmesi mümkün olmakla birlikte literatürde bu hususları inceleyen sınırlı deneysel çalışma bulunmaktadır. Dolayısıyla söz konusu etkileri modelleyecek benzetimlerin doğrulanmasında güçlük yaşanacaktır. Bu sebeple söz konusu birikimli etkileri bu çalışma kapsamında incelemek mümkün olamamıştır.

Problemdeki zamana bağlı etki yorulma mekanizmasıyla açıklanmış olup bu noktada erozyon, korozyon vb. hasar mekanizmalarının zamana bağlı etkisi çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm sonuçlar hasar olasılığı olarak ifade edilmiştir. Sonuçların güvenilirlik olarak sunulması da mümkün olmakla birlikte bu ifade şeklinin tercih edilmesinin iki önemli sebebi vardır. Birincisi, risk bazlı muayene planlaması aşamasında hasar olasılığı verilerinin kullanılmasıdır ve bu veriye sahip olmak planlama aşamasında kolaylık sağlamaktadır. Diğeri ise işletmeler için hasar olasılığı bilgisinin güvenilirlik bilgisinden daha kıymetli olmasıdır. Hasar olasılığı bir istenmeyen durumu ifade eder ve önlemek için iyileştirme yapılmalıdır. Dolayısıyla kavram olarak hasar olasılığı üzerinden çözüm sunulması daha anlamlı bulunmuştur.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yorulma etkisi altındaki boru hatlarının güvenilirliğini tahmin edebilmek için yeni bir model önerilmiştir. Yorulma hasarlarının öncelikli olarak boru hattı üzerindeki kritik noktalarda meydana geleceği öngörülmüştür. Boru hattı üzerindeki kritik noktalar; kaynaklı birleştirmeler, göçükler, korozyon oyukları ve üretime bağlı iç yüzey kusurları olarak kabul edilmiştir. Problem özelinde güvenilirliği etkileyen tüm değişkenlerin dikkate alınması hedeflenmiştir. Araştırma kapsamında literatürdeki farklı yöntemler bu çalışmaya özgü bir sistematik dahilinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar zamana bağlı hasar olasılığı grafiği haline getirilerek her bir kritik nokta için sunulmuştur.

Kaynaklı birleştirmeler, yüzey göçükleri, korozyon oyukları ve iç yüzey kusurları için gerilme konsantrasyon faktörleri sonlu elamanlar analizi yönteminden yararlanılarak hesaplanmıştır. Kusurları oluşturan geometrik değişkenlerin farklı değerleri için deney tasarımları oluşturulmuş, gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı kusur tipleri için gerilme konsantrasyonlarını sağlayan bağıntılar türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar; literatürden deneysel, analitik ve benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Neticesinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Göçüğe bağlı gerilme konsantrasyon faktörünün;

- Göçük derinliğinin büyümesiyle arttığı,
- Göçük çapının büyümesiyle kayda değer bir biçimde değişim göstermediği görülmüştür.

Korozyon oyuğuna bağlı gerilme konsantrasyon faktörünün;

- Oyuk derinliği arttıkça arttığı,
- Oyuk yarıçapı büyüdükçe azaldığı görülmüştür.

İç yüzey kusuruna bağlı gerilme konsantrasyon faktörünün;

- Kusur derinliği arttıkça arttığı,
- Kenar yarıçapları arttıkça azaldığı,
- Kusur boyu eksen yönünde büyüdükçe arttığı görülmüştür.

Araştırma kapsamında önerilen yöntemin, söz konusu problemin çözümüne ne şekilde uygulanabileceğini göstermek adına gerçek bir boru hattı üzerinde güvenilirlik analizi yapılması kararlaştırılmıştır. Türkiye’de faaliyet gösteren fakat ticari unvanının açıklanmasını istemeyen bir akaryakıt terminali ile yine Türkiye’deki bir rafineri arasında tesis edilmiş olan boru hattı incelemeye alınmıştır. Analiz sonucunda daha doğru sonuçlara ulaşabilmek amacıyla, boru hattında yakın tarihte gerçekleştirilmiş olan bir muayeneden elde edilen bulgulardan yararlanılmıştır. Söz konusu bulgular kullanılarak boru hattı için çok değişkenli ve yorulmaya bağlı bir hasar olasılığı tahmini yapılmıştır. Sonuçlar zamana bağlı olacak şekilde grafik haline getirilerek sunulmuştur.

Elde edilmiş olan bu sonuç, boru hatlarının muayene planlamasının risk bazlı olarak gerçekleştirilebilmesi için önemli bir bilgi sunmaktadır. Çalışma kapsamında örnek olarak ele alınan boru hattı için de benzer bir muayene planlaması önerilmiştir. Önerilen risk bazlı muayene planlamasında, hasarın muhtemel sonuçları API 581 uygulama rehberinden yararlanılarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen zamana bağlı hasar olasılığı ile API 581 rehberi kullanılarak elde edilen muhtemel sonuçların çarpımı boru hattının zamana bağlı riskini vermektedir. Söz konusu boru hattı için kabul edilebilir risk seviyesi aşılmadan bir muayene gerçekleştirilmesi önerilmiştir.

Araştırmanın bilime katkısını ifade edebilmek için öncelikle bilgi eksikliğini tanımlamak gereklidir. Boru hatları özelinde uzun vadeli hasar olasılığı sunan sınırlı araştırma mevcuttur. Özellikle yüzey kusurlarının boru hatlarının güvenliğini nasıl etkilediğini açıklayan bilimsel bir çalışmanın eksikliği görülmüş ve bu çalışma ile bu alandaki bilgi eksikliği kısmen doldurulmaya çalışılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen güvenilirlik verisinin, boru hatlarının muayene planlamasında kullanılabileceği açıktır. Bu planlama yapılırken ulusal veya uluslararası mevzuat ve standartlar göz ardı edilmemelidir. Elde edilen zamana bağlı hasar olasılığı sonuçları üzerinden ülkemizde hali hazırda uygulanan ve en geç on yıla varan periyodik muayene aralıklarının kabul edilebilir olduğu yorumu yapılabilir. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların teorik olduğu ve boru hattının fiili durumunun ancak hattın bütününe detaylı bir şekilde muayene edilmesiyle anlaşılacağı unutulmamalıdır.

Bu çalışmaya benzer şekilde basınçlı kaplar için güvenilirlik tahmini üzerine ayrı bir araştırma yürütülebilir. Ayrıca bu araştırmanın devamı olacak nitelikte;

- Boru hatları üzerindeki yorulma çatlakları tahribatsız muayene teknikleriyle ölçülerek, bu çalışma neticesinde elde edilmiş olan teorik hasar olasılıkları fiili durumla karşılaştırılabilir.
- Zamana bağlı bir korozyon etkisi de probleme eklenebilir.
- Isıl gerilmelerin boru hattının güvenilirliğine olan etkisi araştırılabilir.
- Bu çalışmada önerilen model ticari bir yazılım haline getirilerek bu alanda ihtiyaç duyan işletmelere kullanıcı dostu bir arayüz ile sunulabilir.

KAYNAKLAR

1. Stracener, J. T., Cruse, T. A. (Editor) (1997). *Reliability based mechanical design*, New York: Marcel Dekker Inc, 91-122.
2. Kapur, K. C., Pecht, M. (2014). *Reliability engineering* (First Edition). New Jersey: John Wiley & Sons, 4.
3. Mekki, K. S. (2010). *Reliability Function Deployment in Conceptual Product Development Phases*, Doctoral Dissertation, Graduate College of the University of Illinois, Chicago, 11.
4. Huang, Z. (2010). *Design for Reliability Starting from Conceptual Design*, Doctoral Dissertation, University of Southern California, 11.
5. Avontuur, G. C., van der Werff, K. (2002). Systems reliability analysis of mechanical and hydraulic drive systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 77(2), 121-130.
6. Atamer, Ş., Çavdar, K. (2009). Tek kademeli dişli kutusunun güvenilirlik analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 14(1), 39-53.
7. Asri, Y. M., Azrulhisham, E. A., Dzuraidah, A. W., Shahrir, A., Shahrum, A., and Azami, Z. (2011). Fatigue life reliability prediction of a stub axle using Monte Carlo simulation. *International Journal of Automotive Technology*, 12(5), 713-719.
8. Bacharoudis, K. C., Philippidis, T. P. (2015). Estimating design reliability of composite rotor blades under ultimate loading. *Wind Energy*, 18(5), 783-796.
9. Echard, B., Gayton, N., and Bignonnet, A. (2014). A reliability analysis method for fatigue design. *International journal of fatigue*, 59, 292-300.
10. Haugen, E. B. (1968). *Probabilistic approaches to design*. New York: John Wiley and Sons Inc.
11. Kapur, K. C. (1975). Reliability bounds in probabilistic design. *IEEE Transactions on Reliability*, 24(3), 193-195.
12. Taraman, S. I., Kapur, K. C. (1975). Optimization considerations in design reliability by stress-strength interference theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 24(2), 136-138.
13. Hasofer, A. M., Lind, N. C. (1974). Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100(1), 111-121.

14. Rackwitz, R., Flessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers and Structures*, 9(5), 489-494.
15. Faravelli, L. (1989). Response surface approach for reliability analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 115(12), 2763-2781.
16. Larin, O., Barkanov, E., and Vodka, O. (2016). Prediction of reliability of the corroded pipeline considering the randomness of corrosion damage and its stochastic growth. *Engineering Failure Analysis*, 66, 60-71.
17. Türedi, A. T. (2013). *Innovative Reliability Analysis of a Heavy Duty Hydraulic Driven Machinery*, Master's Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, 78-83.
18. Schweitzer, E. O., Fleming, B., Lee, T. J., and Anderson, P. M. (1997, October). *Reliability analysis of transmission protection using fault tree methods*. In Proceedings of The 24th Annual Western Protective Relay Conference, 1-17.
19. Cunha, D. J., Benjamin, A. C., Silva, R. C., Guerreiro, J. N., and Drach, P. R. (2014). Fatigue analysis of corroded pipelines subjected to pressure and temperature loadings. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 113, 15-24.
20. Shuai, Y., Shuai, J., and Zhang, X. (2018). Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 56, 81-92.
21. Rafi, A. N. M. (2011). *Structural Behaviour of Dented Pipelines*, Master's Thesis, Applied Science at the University of Windsor, Ontario, 35-66.
22. Ryu, D. M., Wang, L., Kim, S. K., and Lee, J. M. (2017). Comparative study on deformation and mechanical behavior of corroded pipe: Part I–Numerical simulation and experimental investigation under impact load. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(5), 509-524.
23. Balcı, A., Yurdakul, M., and İç, Y. T. (2018). Basınçlı kaplarda malzeme seçimine yönelik bir karar destek sisteminin geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1).
24. Teng, T. L., Fung, C. P., and Chang, P. H. (2002). Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79(7), 467-482.
25. Yaghi, A., Hyde, T. H., Becker, A. A., Sun, W., and Williams, J. A. (2006). Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83(11-12), 864-874.

26. Li, Y., Zhou, X. P., Qi, Z. M., and Zhang, Y. B. (2014). Numerical study on girth weld of marine steel tubular piles. *Applied Ocean Research*, 44, 112-118.
27. Wang, L., Tang, Y., Ma, T., Zhong, J., Li, Z., Zhang, Y., and Xuan, H. (2020). Stress concentration analysis of butt welds with variable wall thickness of spanning pipelines caused by additional loads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 182, 104075.
28. Xu, K., Qiao, G. Y., Pan, X. Y., Chen, X. W., Liao, B., and Xiao, F. R. (2020). Simulation of fatigue properties for the weld joint of the X80 weld pipe before and after removing the weld reinforcement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 187, 104164.
29. Li, Y., Shuai, J., and Xu, K. (2018). Investigation on size tolerance of pore defect of girth weld pipe. *PloS one*, 13(1), e0191575.
30. Carvalho, A. A., Rebello, J. M. A., Sagrilo, L. V. S., Camerini, C. S., and Miranda, I. V. J. (2006). MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects. *Ndt and E International*, 39(8), 661-667.
31. American Petroleum Institute. (2008). *Risk based inspection technology*. Washington D.C.: API Standards Department, 5-21.
32. Det Norske Veritas. (2010). DNV-RP-G101 *Risk based inspection of offshore topsides static mechanical equipment*. Oslo: DNV, 7-21.
33. DNV GL AS. (2015). DNV GL-RP-C210 *Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures*. Oslo: DNV GL AS, 22-29.
34. The British Standards Institution. (2016). *BS 7910 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. London: BSI, 1-4.
35. Madsen, H. O., Sorensen, J. D. (1990). Probability-based optimization of fatigue design, inspection and maintenance. *Proceedings of the Integrity of Offshore Structures*, 24, 421-438.
36. Onoufriou, T., Fowler, D., and Smith, J. K. (1994). *Reliability based optimised inspection planning*. In Proceedings of 7th International Conference on Behavior of Offshore Structures.
37. Shetty, N. K., Gierlinski, J. T., Smith, J. K., and Stahl, B. (1997, December). *Structural system reliability considerations in fatigue inspection planning*. Paper presented at the 8. International Conference on The Behaviour of Offshore Structures, Delft.
38. Onoufriou, T. (1999). Reliability based inspection planning of offshore structures. *Marine Structures*, 12(7-8), 521-539.

39. American Petroleum Institute. (2000). *Publication 581-Risk-Based inspection base resource document*. Washington D.C.: API Standards Department.
40. Dey, P. K. (2001). A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(1), 25-41.
41. Straub, D., Faber, M. H. (2005). Risk based inspection planning for structural systems. *Structural Safety*, 27(4), 335-355.
42. Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J., and He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. *Safety Science*, 49(6), 852-860.
43. Singh, M., Pokhrel, M. (2018). A fuzzy logic-possibilistic methodology for risk-based inspection (RBI) planning of oil and gas piping subjected to microbiologically influenced corrosion (MIC). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 159, 45-54.
44. Luque, J., Straub, D. (2019). Risk-based optimal inspection strategies for structural systems using dynamic Bayesian networks. *Structural Safety*, 76, 68-80.
45. Lotsberg, I., Sigurdsson, G., Fjeldstad, A., and Moan, T. (2016). Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures. *Marine Structures*, 46, 167-192.
46. Lassen, T. and Recho, N. (2015, June). *Risk based inspection planning for fatigue damage in offshore steel structures*. In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, New York.
47. Ji, J., Zhang, C., Kodikara, J., and Yang, S. Q. (2015). Prediction of stress concentration factor of corrosion pits on buried pipes by least squares support vector machine. *Engineering Failure Analysis*, 55, 131-138.
48. Chen, Y., Zhang, H., Zhang, J., Liu, X., Li, X., and Zhou, J. (2015). Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects. *Engineering Failure Analysis*, 47, 67-76.
49. Kececioglu, D., Cormier, D. (1964). *Designing a specified reliability directly into a component* (No. 640615). SAE Technical Paper.
50. Cornell, C. A. (1969). A probability based structural code. In *Journal Proceedings*, 66(12), 974-985.
51. Ditlevsen, O. (1981). Principle of normal tail approximation. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 107(6), 1191-1208.
52. Von Neumann, J. and Ulam, S. (1951). Monte carlo method. *National Bureau of Standards Applied Mathematics Series*, 12, 36.

53. Harrison, R. L. (2010) Introduction to monte carlo simulation. *In AIP Conference Proceedings*, 1204(1), 17-21.
54. Hrennikoff, A. (1941). Solution of problems of elasticity by the framework method. *Journal of Applied Mechanics*, 8(4), A169-A175.
55. McHenry, D. (1943). A lattice analogy for the solution of stress problems. *Journal of The Institution of Civil Engineers*, 21(2), 59-82.
56. Newmark, N. M. (1949). Numerical methods of analysis of bars, plates, and elastic bodies. *In Selected Papers By Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics*, 313-344.
57. Courant, R. (1994). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*, 1-1.
58. Levy, S. (1953). Structural analysis and influence coefficients for delta wings. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 20(7), 449-454.
59. Argyris, J. H., Kelsey, S. (1960). *Energy theorems and structural analysis*. (First Edition). Boston: Springer, 2-72.
60. Clough, R. W. (1960, September). *The finite element method in plane stress analysis*. In Proceedings of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburgh Pa.
61. Melosh, R. J. (1961). A stiffness matrix for the analysis of thin plates in bending. *Journal of the Aerospace Sciences*, 28(1), 34-42.
62. Grafton, P. E., Strome, D. R. (1963). Analysis of axisymmetrical shells by the direct stiffness method. *AIAA Journal*, 1(10), 2342-2347.
63. Wilson, E. L. (1965). Structural analysis of axisymmetric solids. *AIAA Journal*, 3(12), 2269-2274.
64. Melosh, R. J. (1963). Structural analysis of solids. *Journal of the Structural Division*, 89(4), 205-223.
65. Martin, H. C. (1968). Finite element analysis of fluid flows. *University of Washington Department of Aeronautics and Astronautics*, 517-535.
66. Wilson, E. L., Nickell, R. E. (1966). Application of the finite element method to heat conduction analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 4(3), 276-286.
67. Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of finite element analysis*. (First Edition). New York: Mc Graw-Hill, 1-18.

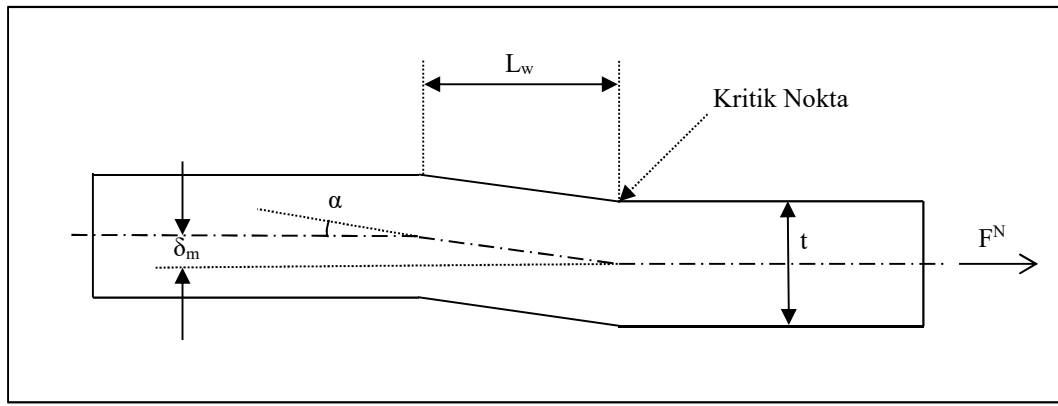
68. Budynas, R. G., Nisbett, J. K. (2006). *Shigley's mechanical engineering design* (Eight Edition). New York: McGraw-Hill.
69. Beller, M. (2007). Pipeline inspection utilizing ultrasound technology: on the issue of resolution. *Pigging Products and Services Association*, 2.
70. Ege, Y., Coramik, M. (2018). A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection. *Measurement*, 123, 163-174.
71. Mishra, D., Agrawal, K. K., Abbas, A., Srivastava, R., and Yadav, R. S. (2019). PIG [Pipe Inspection Gauge]: An artificial dustman for cross country pipelines. *Procedia Computer Science*, 152, 333-340.
72. Kandroodi, M. R., Araabi, B. N., Ahmadabadi, M. N., Shirani, F., and Bassiri, M. M. (2013, May). *Detection of natural gas pipeline defects using magnetic flux leakage measurements*. In 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Mashhad.
73. DNV GL AS. (2016). DNV GL-ST-F101 *Submarine pipeline systems*. Oslo: DNV GL AS, 176.
74. Lotsberg, I. (2009). Stress concentrations due to misalignment at butt welds in plated structures and at girth welds in tubulars. *International Journal of Fatigue*, 31(8-9), 1337-1345.
75. Draper, N. R. (2014). Statistical robust design: *An industrial perspective by Magnus Arner* (First Edition). New York: Wiley, 195-208.
76. DNV GL AS. (2016). DNV GL-RP-C203 *Fatigue design of offshore steel structures*. Oslo: DNV GL AS, 20-35.
77. The American Society of Mechanical Engineers. (2002). *ASME B31.4: Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids*. Washington D.C.: ASME, 13-15.
78. Pinheiro, B. D. C., Pasqualino, I. P. (2009). Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure. *International Journal of Fatigue*, 31(5), 962-973.
79. Pinheiro, B., Pasqualino, I., and Cunha, S. (2014). Fatigue life assessment of damaged pipelines under cyclic internal pressure: Pipelines with longitudinal and transverse plain dents. *International Journal of Fatigue*, 68, 38-47.
80. Le, X. (2019). Reliability-Based mechanical design, volume 1: Component under cyclic load and dimension design with required reliability. *Synthesis lectures on mechanical engineering*, 3(4), 1-263.

81. Höhler, S., Karbasian, H., and Brückner, J. (2016, May). *Pipe features identified during inline inspection using MFL pigs*. In Pipeline Technology Conference, Berlin.
82. Biś, J., Koczurkiewicz, B., and Mazur, I. (2019). Defects and Incompatibilities of Pipes Manufactured by Pilgrim Method. *New Trends in Production Engineering*, 2(2), 24-35.
83. Haugen, E. B., Wirsching, P. H. (1975). Probabilistic design. *Machine Design*, 47(12), 10-14.
84. Lotsberg, I. (1998). Stress concentration factors at circumferential welds in tubulars. *Marine Structures*, 11(6), 207-230.
85. American Petroleum Institute. (2016). *Risk-Based inspection technology part three*. (Third Edition). Washington D.C.: API Standards Department, 9-21.
86. Crowl, D. A., Louvar, J. F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. (Second Edition). New Jersey: Prentice Hall, 109-151.

EKLER

EK-1. Alın kaynaklı birleştirme için GKF_w 'nin analitik olarak elde edilmesi

Bu ekin hazırlanmasında, borulardaki çevresel kaynaklar için gerilme konsantrasyon faktörü elde edilmesi üzerine gerçekleştirilmiş olan analitik bir çalışmadan yararlanılmıştır [84]. Alın kaynaklı birleştirme için eksantrikliğin neden olduğu bölgesel eğilme momenti klasik kabuk teorisi kullanılarak Eş. 1.1'deki gibi elde edilebilir. Kaynaklı birleştirme için kritik noktanın kaynak merkezine olan uzaklığı kaynak genişliğinin yarısı kadar ($x = L_w/2$) kabul edilmiştir (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Alın kaynaklı birleştirme için eksantriklik.

$$M_x(x = L_w/2) = -F^N l_e \frac{\delta_m}{L_w} e^{-\xi} \sin \xi \quad (1.1)$$

“ l_e ” elastik uzunluk olup Eş. 1.2 ile tanımlanmıştır.

$$l_e = \frac{\sqrt{r_s t}}{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}} \quad (1.2)$$

“ ν ” poisson oranı çelik boru için “0,3” kabul edilmiş olup elastik uzunluk Eş. 1.3'teki hali almıştır.

$$l_e \cong 0,78 \sqrt{r_s t} \quad (1.3)$$

Kritik nokta boru dış yüzeyindedir. Kritik noktada eksen yönünde toplam gerilme Eş. 1.4 ile hesaplanabilir.

EK-1. (devam) Alın kaynaklı birleştirme için GKF_w 'nin analitik olarak elde edilmesi

$$\sigma_T = \frac{F^N}{t} - \frac{M_x}{W_m} = \frac{F^N}{t} GKF_w \quad (1.4)$$

Burada “ W_m ” elastik kesit modülü olup büyüklüğü “ $t^2/6$ ” olarak kabul edilmiştir. “ F^N ” ise çevresel yönde birim uzunluğa düşen eksen yönlü kuvvettir. Gerilme konsantrasyon faktörü Eş. 1.5’te gösterilen şekilde hesaplanabilir.

$$GKF_w = 1 + 4,68 \frac{\delta_m}{L_w} \sqrt{\frac{r_s}{t}} e^{-\xi} \sin \xi \quad (1.5)$$

Denklem boru çapına bağlı olacak şekilde Eş. 1.6’da gösterilen şekilde de ifade edilebilir.

$$GKF_w = 1 + 3,30 \frac{\delta_m}{L_w} \sqrt{\frac{D-t}{t}} e^{-\xi} \sin \xi \quad (1.6)$$

Alın kaynaklı birleştirmedeki eksantriklik için indirgenmiş koordinat Eş. 1.7 kullanılarak elde edilir. Kritik noktanın kaynağa olan uzaklığı kaynak genişliğinin yarısı kadar ($x = L_w/2$) kabul edilmiştir.

$$\xi = \frac{x}{l_e} = \frac{L_w}{2l_e} = \frac{L_w \sqrt{3(1-\nu^2)}}{2\sqrt{r_s t}} \cong \frac{0,64}{\sqrt{r_s t}} w \quad (1.7)$$

Eş 1.7 boru çapına bağlı olacak şekilde Eş. 1.8’deki hali alır.

$$\xi = \frac{0,91}{\sqrt{(D-t)t}} w \quad (1.8)$$

Kaynak genişliği “ L_w ” cidar kalınlığına “ t ” eşit olarak kabul edilmiştir. İnce cidarlı borular için “ $D - t \cong D$ ” olduğu varsayılmıştır. Eşitlik için $\sin \xi \cong \xi$ yaklaşık olarak doğrudur. Sonuç olarak Eş 1.6 sadeleştirilerek Eş. 1.9’daki hale getirilmiştir [74].

$$GKF_w = 1 + 3 \frac{\delta_m}{t} e^{-\sqrt{t/D}} \quad (1.9)$$

EK-1. (Devam) Alın kaynaklı birleştirme için GKF_w 'nin analitik olarak elde edilmesi

Eş. 1.9 borularda alın kaynaklı birleştirme için eksantrikliğe bağlı olarak gerilme konsantrasyon faktörünün hesaplanmasında kullanılmıştır.

EK-2. Ortalama mutlak yüzde hata hesaplaması ve yorumlaması

Ortalama mutlak yüzde hata Eş. 2.1 kullanılarak hesaplanır.

$$OMYH = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{A_t} \right| \right) \times 100 \quad (2.1)$$

Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.1. kullanılarak yorumlanır.

Çizelge 2.1. Sonuçların yorumlanması.

OMYH	Yorum
<10	Yüksek Doğrulukta Tahmin
10-20	İyi tahmin
20-50	Kabul Edilebilir Doğrulukta Tahmin
>50	Hatalı Tahmin

EK-3. Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

1. Risk Bazlı Muayene Planlaması

Bu ekin hazırlanmasında API 581 uygulama rehberinden yararlanılmıştır [85]. Risk bazlı muayene planlaması boru, basınçlı kap, ısı değiştirici gibi basınçlı ve sabit ekipmanlar üzerine uygulanabilmektedir. Riskin hesaplanması hasarın meydana gelme olasılığı ile oluşacak hasarın muhtemel sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde hasar, ekipmanın bütünlüğünün kaybolması neticesinde içerisinde bulunan basınçlı bileşenin atmosfere saçılmasıdır. Ekipmanın işletilmesi süresince hasar olasılığının sürekli büyümesi sonucunda risk artar ve kabul edilemeyecek seviyeye gelmeden bir muayene gerçekleştirilmesi tavsiye edilir. Muayene işlemi tek başına ele alındığında fiili riski azaltan bir husus olmamakla birlikte, ekipmanın mevcut durumu üzerindeki bilgi eksikliğini azalttığı için ekipmanın hasar olasılığını daha gerçeğe yakın bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır. Söz konusu yöntemle muayene aralıkları belirlenebileceği gibi yöntem hangi ekipmanın muayenesinin daha öncelikli olduğunun kararlaştırılabilmesi için de kullanılabilir. Riskin büyüklüğü Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanır.

$$Risk(t) = H(t) \times C \quad (3.1)$$

Burada “H(t)” hasar olasılığıdır ve ana metinde açıklandığı şekilde çeşitli yüzey kusurları için ayrı-ayrı hesaplanabilir. “C” ise olası sonuçların etkisinin büyüklüğüdür. Çalışmada ele alınan problem için istenmeyen durum yorulmaya bağlı oluşan hasar neticesinde boru üzerinde bir bütünlük kaybı oluşması ve boru içerisinde bulunan tehlikeli kimyasalın boru üzerinde oluşan açıklıktan basıncın da etkisiyle atmosfere saçılmasıdır. Meydana gelen bu olayın sonuçlarının etkisi aşağıdaki etmenlere bağlı olarak değişmektedir.

- Kimyasalın yayılım fazı (sıvı, gaz veya karma)
- Hattın işletme basıncı ve kimyasalın özellikleri
- Hasar sonucu boru üzerinde meydana gelen çıkış açıklığının büyüklüğü
- Boru içindeki kimyasalın tehlikesi (yanıcı, zehirleyici vb.)

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Bu bağlamda API 581 uygulama rehberi, bütünlük kaybı sonucu meydana gelen yayılım alanının büyüklüğü ve yayılımın etkilerini değerlendirmek için sistematik bir yöntem sunmaktadır.

1.1. Kimyasalın Çıkış ve Yayılım Fazının Belirlenmesi

Bütünlük kaybı sonucu atmosfere saçılacak kimyasalın çıkış hızı ve yayılacağı alanın büyüklüğünü doğru bir şekilde öngörebilmek için öncelikle kimyasalın çıkış ve yayılım fazının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Yayılım fazı; kimyasalın boru içinde, işletme basınç ve sıcaklığındaki fazı ile atmosfer koşulları altında dönüşebileceği fazının birlikte değerlendirilmesi sonucu belirlenmelidir. Yayılım fazının doğru tespit edilebilmesi için Çizelge 3.1.'den yararlanılabilir.

Çizelge 3.1. Kimyasalın yayılım fazının belirlenmesi.

Kimyasalın İşletme Koşullarında Fazı	Kimyasalın Atmosfer Koşullarında Fazı	Kimyasalın Yayılım Fazı
Sıvı	Sıvı	Sıvı
Gaz	Gaz	Gaz
Gaz	Sıvı	Gaz
Sıvı	Gaz	Gaz*
*Atmosfer koşullarında kaynama noktası 26°C üzerinde olan kimyasallar için sıvı alınır.		

Kimyasalın çıkış hızının doğru tespit edilebilmesi, kimyasalın boru üzerindeki delikten çıkış fazının doğru bir şekilde tespit edilebilmesine bağlıdır. Kimyasalın borudan çıkış fazı işletme koşullarındaki fazından farklı olabileceği gibi kimyasalın atmosfer koşullarında dönüşeceği fazından da farklı olabilir. Çıkış fazının tespitinde kimyasalın denge buhar basıncı ile işletme basıncının Çizelge 3.2.'de gösterildiği gibi karşılaştırılması gerekmektedir.

Çizelge 3.2. Kimyasalın çıkış fazının belirlenmesi.

Eğer;	$P_{dng} \geq P_{isl} \geq P_{atm}$	Gaz Çıkışı
	$P_{isl} \geq P_{dng} > P_{atm}$	Çift Fazlı Çıkış
	$P_{isl} \geq P_{atm} > P_{dng}$	Sıvı Çıkışı

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Çizelge 3.2.'de belirtildiği üzere, işletme koşullarında sıvı fazda bulunan fakat çıkış koşullarında çift fazlı olabilecek kimyasallar için detaylı bir çift fazlı çıkış analizi yapılabileceği gibi daha muhafazakâr sonuç elde etmek bir sorun teşkil etmiyorsa sıvı fazda çıkış kabul edilebilir.

1.2. Kimyasalın İşletme Basıncı ve Özellikleri

Aşağıda sıralanan özellikler, bütünlük kaybı sonucu ekipman üzerinde açılan delikten atmosfere yayılan kimyasalın çıkış hızı, yayılım alanı ve yanıcı bir kimyasalsa kendiliğinden tutuşup tutuşmayacağı hususlarında belirleyici rol oynamaktadır.

- Kimyasalın ekipman içerisindeki işletme basıncı ($P_{i\text{şl}}$)
- Kimyasalın yoğunluğu (ρ)
- Kaynama noktası
- Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı
- Moleküler ağırlık (MA)
- Sabit basınçtaki ısı sığası (C_p)
- Sabit hacimdeki ısı sığası (C_v)
- İdeal Gaz Isı Sığası Oranı (k)

1.3. Hasar Sonucu Boru Üzerindeki Çıkış Açıklığının Büyüklüğü

Ekipman üzerinde meydana gelen bütünlük kaybı farklı çaplarda bir delik olarak tanımlanabileceği gibi ekipmanın tamamen kırılması olarak da tanımlanabilir. Analiz sırasında Çizelge 3.3.'te belirtilen boyutlarda delikler kullanılabilir.

Çizelge 3.3. Çıkış açıklığını tanımlayan delik çapları.

	Delik Çapı (mm)
Küçük Delik	6,4
Orta Delik	25
Büyük Delik	102
Tamamen Kırılma	406

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

1.4. Boru İçindeki Kimyasalın Tehlikesi

Bütünlük kaybı neticesinde atmosfere saçılan kimyasal yanıcı olabileceği gibi insan veya çevre için zehirleyici etki gösterebilir. Her iki koşul da geri dönülemez zararlara sebep olabilecek istenmeyen durumlardır.

Yanıcı bir kimyasalın yayılımı neticesinde yayılım anı akabinde veya kimyasalın özelliklerine bağlı olarak bir süre sonra atmosferik etkilerle taşındığı bir bölgede yangın, parlama, patlama veya sınırlandırılmamış buhar bulutu patlaması gibi etkiler gösterebilir. Zehirleyici kimyasallar da benzer şekilde maruziyet sonrasında veya kimyasalın cinsine göre maruziyet anından bir süre sonra insan veya çevre sağlığı açısından istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir.

1.5. Bütünlük Kaybı Sonrası Akış Hızının Belirlenmesi

Bütünlük kaybı sonucunda ekipmandan çıkan kimyasalın akış hızı Crowl and Louvar tarafından farklı çıkış fazları için ayrı ayrı belirlenmiştir [86].

1.5.1. Sıvı fazda çıkış

Sıvı faz çıkışta çıkış hızını elde etmek için kullanılacak bağıntı Eş. 3.2’de sunulmuştur.

$$W_s = C_d K_v \rho A_h \sqrt{\frac{2g_c (P_{isl} - P_{atm})}{\rho}} \quad (3.2)$$

Burada “ W_s ” çıkış hızı, “ C_d ” boşalma katsayısı ($0,60 \leq C_d \leq 0,65$, $0,61$ kabul edilmiştir), “ K_v ” viskozite düzeltme faktörü (*muhafazakâr sonuç için 1 olarak kabul edilmiştir*), “ A_h ” delik çapı ve “ g_c ” kütle çekim sabiti (1 kg.m/N.s^2).

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

1.5.2. Gaz fazda çıkış

Gaz fazda akış rejimi sonik ve sübsonik olarak iki ayrı rejimde değerlendirilmelidir. Yüksek işletme basınçlarında sonik, düşük işletme basınçlarında ise sübsonik akış rejimi söz konusudur. Geçiş basıncı Eş. 3.3 vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$P_{geç} = P_{atm} \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.3)$$

Eşitlikteki “k” ısı sığası oranıdır ve Eş. 3.4 vasıtasıyla hesaplanır.

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.4)$$

a) Sonik akış koşulu ($P_{işl} > P_{geç}$)

$$W_s = C_d A_h P_{işl} \sqrt{\left(\frac{k \cdot MA \cdot g_c}{RT_s} \right) \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (3.5)$$

b) Sübsonik akış koşulu ($P_{işl} \leq P_{geç}$)

$$W_s = C_d A_h P_{işl} \sqrt{\left(\frac{MA \cdot g_c}{R_g T_s} \right) \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left(\frac{P_{atm}}{P_{işl}} \right)^{\frac{2}{k}} \left(1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (3.6)$$

Eş. 3.5 ve Eş. 3.6’da “ W_s ” çıkış hızı, “ C_d ” boşalma katsayısı ($0,85 \leq C_d \leq 1$), “ A_h ” delik çapı, “ MA ” molekül ağırlığı, “ g_c ” kütle çekim sabiti (1 kg.m/N.s^2), “ R_g ” evrensel gaz sabiti ($8,314 \text{ J/mol.K}$) ve “ T_s ” işletme sıcaklığı olarak tanımlanmıştır.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

1.6. Salınabilecek Toplam Kütlenin Tahmini

Bütünlük kaybı sonrası atmosfere yayılabilecek kimyasal kütlesinin tahmininde, salınımın meydana geldiği ekipman içerisinde bulunan kimyasalın kütlesi ve ekipmanın bağlı olduğu depolama unsurlarında bulunan envanterin tamamı değerlendirmeye alınmalıdır. Herhangi bir ekipmandan büyük bir salınım söz konusu olduğunda, operasyon değişkenlerinde ciddi dalgalanmalar olacağından, operatörün en fazla beş dakika içinde akışı kesecek vanalara müdahale edeceği öngörülmüş olup ortalama üç dakika müdahale süresi olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla atmosfere yayılabilecek kütlenin tahmininde Eş. 3.7 kullanılabilir.

$$m_t = (m_{ekip} + W_s \cdot 180) \quad (3.7)$$

1.7. Salınım Tipinin Tespiti

Bütünlük kaybı neticesinde meydana gelen salınım anlık olabileceği gibi sürekli de olabilir. Anlık salınımında çıkış hızlı gerçekleşir ve büyük bir havuz veya buhar bulutu söz konusudur. Sürekli salınım durumunda ise akış zamana yayılmıştır ve salınım hava koşullarına göre değişmekle birlikte uzatılmış bir elips formundadır. Salınımın tipini belirlemek için iki koşul mevcuttur.

- a) Delik çapı 6,35 mm ve daha küçükse salınım sürekli kabul edilir.
- b) Delik çapı 6,35 mm'den büyük ve 4536 kg'dan (10 000 lb) fazla kimyasalın salınımı 3 dk. veya daha kısa sürüyorsa salınım anlık kabul edilir. Değilse salınım sürekli dir.

1.8. Erken Tespit, Sınırlandırma ve Baskılama Sistemleri

İşletmelerde bütünlük kaybı sonucu meydana gelen salınımları tespit eden, salınımın yayılımını sınırlayan veya salınımın istenmeyen etkilerini baskılayan çeşitli sistemler bulunabilir. Söz konusu sistemler işletmede mevcut ise değerlendirmeye dahil edilmeli ve yayılımın olumsuz etkilerini azaltacak bir etki gösterdiği varsayılmalıdır. Bu sistemlerin

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

bütünlük kaybı sonucu meydana gelen istenmeyen olayların etkilerini iki şekilde azalttığı varsayılmıştır.

- a) Tespit ve Sınırlandırma (R_{fd}): Salınımı tespit eden ve atmosfere yayılacak madde miktarını azaltan sistemler olarak tanımlanabilir (dedektörler, otomatik kapatma sistemleri, taşıma havuzları vb.). Tespit ve sınırlandırma sisteminin teknolojik düzeyine göre ($0 \geq R_{fd} \geq 0,25$) aralığında bir değer kabul edilir.
- b) Baskılama (R_{fm}): Yayılımın olumsuz etkilerini baskılayan sistemler olarak tanımlanabilir (yangınla mücadele sistemleri vb.). Baskılama sisteminin etkinliğine göre ($0,25 \geq R_{fm} \geq 0,05$) aralığında bir değer kabul edilir.

1.9. Salınım Hızı ve Anlık Salınım Kütlesinin Belirlenmesi

Sürekli salınım koşulu için salınım hızının belirlenmesi gerekmektedir. Salınım hızının belirlenmesinde “ R_{fd} ” etkisi dikkate alınmalıdır.

- a) Salınımın Hızının Belirlenmesi

$$W_C = W_s (1 - R_{fd}) \quad (3.8)$$

- b) Anlık Salınım Koşulu İçin Salınım Kütlesinin Belirlenmesi

Anlık salınım koşulları için ani salınım kütlesinin belirlenmesi gerekmektedir. Salınımın başlangıcıyla sonuçlanması arasında geçen süre sızıntı süresi (L_d) olarak tanımlanmıştır. Anlık salınım, salınabilecek toplam kütlenin atmosfere salınımıyla tamamlanabileceği gibi tespit sistemlerinden gelecek sinyal sonucu otomatik olarak veya operatör müdahalesiyle de sonuçlanabilir. Salınım iki koşuldan hangisi önce gerçekleşirse sonuçlanacağından, salınım kütlesinin tespitinde aşağıdaki eşitlikten yararlanılabilir.

$$m_a = \min [(W_c \cdot L_d), m_t] \quad (3.9)$$

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Eş. 3.9’da “ L_d ” tespit ve sınırlandırma sistemlerinin etkisi de göz önüne alınarak operasyonun durdurulabileceği maksimum süreyi temsil etmektedir. Sızıntı süresi sızıntının meydana geldiği deliğin büyüklüğü ile tespit ve sınırlandırma sistemlerinin teknolojik düzeyine göre ($5dk \leq L_d \leq 60dk$) aralığında bir değer kabul edilir.

1.10. Yangından Fiziksel Olarak Etkilenen Alanın Belirlenmesi

Aşağıdaki eşitlikler yangından etkilenen alanın büyüklüğünün hesaplanmasında kullanılır.

a) Sürekli Salınım Koşulu

$$C^s_f = a (W_c)^b (1 - R_{fm}) \quad (3.10)$$

b) Anlık Salınım Koşulu

$$C^a_f = a (m_a)^b (1 - R_{fm}) / E_{eff} \quad (3.11)$$

Eş. 3.10 ve Eş. 3.11’deki “a” ve “b” sabitleri yangın etkisi altında kalacak alanın büyüklüğünü tanımlamak için kullanılır ve atmosfere salınan kimyasalın özelliklerine göre değişiklik gösterir. “ E_{eff} ” ise enerji verimliliği düzeltme katsayısıdır. Geçmişte meydana gelmiş olan gerçek salınımlar ile teorik hesaplamalar karşılaştırıldığında, anlık salınım koşulu modellenirken bir enerji verimliliği düzeltme katsayısı kullanımına ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. “ E_{eff} ” Eş. 3.12 kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_{eff} = 4 \cdot \log_{10} [2205 \cdot m_a] - 15 \quad (3.12)$$

1.11. Hasar Olasılıklarının ve Sonuçlarının Sınıflandırılması

Çizelge 3.4’te hasar olasılıkları ve muhtemel sonuçlarının ne şekilde sınıflandırılacağı gösterilmiştir.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Çizelge 3.4. Hasar olasılıkları ve muhtemel sonuçları için sınıflandırma.

Kategori	Hasar Olasılığı $H(t)$	Kategori	Yangından Etkilenen Alan $C_f(m^2)$
1	$H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-5}$	A	$C_f \leq 10$
2	$3,0 \cdot 10^{-5} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$	B	$10 < C_f \leq 100$
3	$3,0 \cdot 10^{-4} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-3}$	C	$100 < C_f \leq 1\,000$
4	$3,0 \cdot 10^{-3} < H(t) \leq 3,0 \cdot 10^{-2}$	D	$1\,000 < C_f \leq 10\,000$
5	$H(t) > 3,0 \cdot 10^{-2}$	E	$C_f > 10\,000$

1.12. Riskin Belirlenmesi

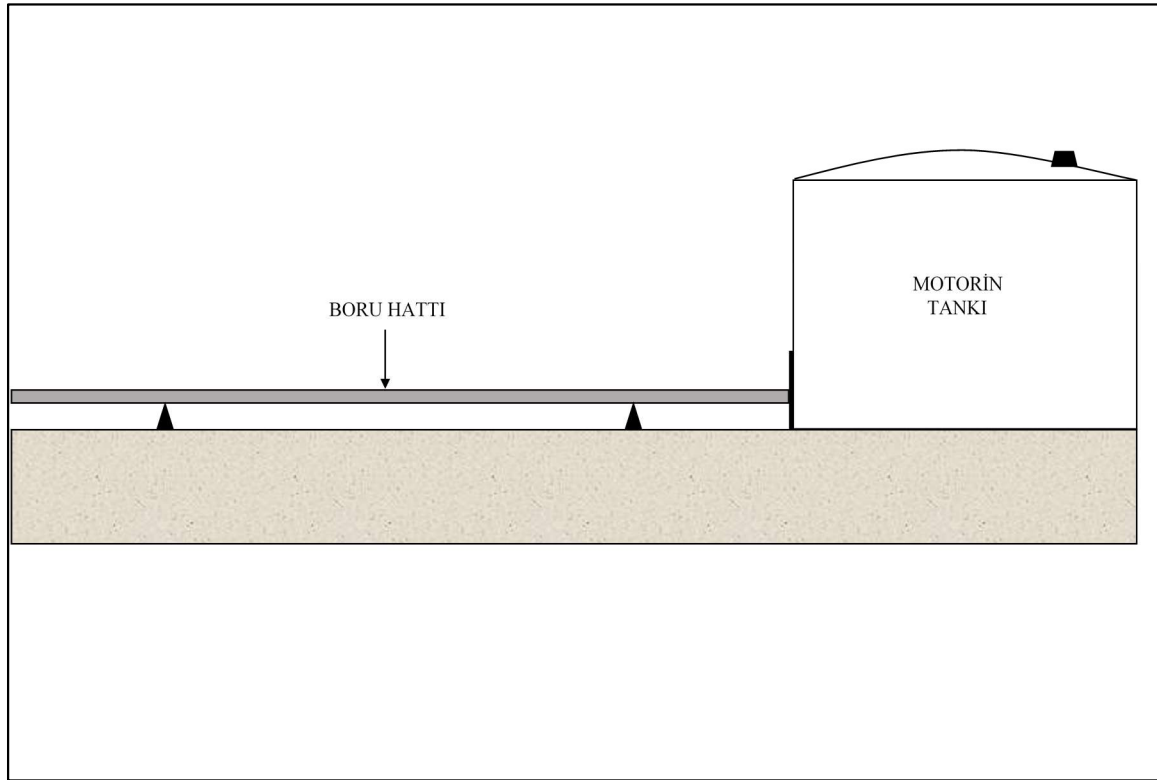
Risk Eş. 3.1 kullanılarak hesaplanır. Riskin kategorize edilmesinde matris gösterimi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir ve İkinci Bölüm’ de gösterilmiştir (Bkz. Şekil 2.11.). Görsel olduğundan ve sayılardan arındırıldığından riskin sınıflandırılmasında ve doğru algılanmasında kolaylık sağlar.

2. Örnek Boru Hattı İçin Hesaplama

Çalışmanın Yedinci Bölümü’nde ele alınan boru hattı için örnek sonuç analizi bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Uygulama söz konusu boru hattının işletmenin sorumluluğunda olan 775 metre uzunluğundaki bölümü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Boru hattı vasıtasıyla rafineri ile akaryakıt terminali arasında düzenli olarak motorin transferi gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.1.’de boru hattı ve irtibatlı olduğu motorin tankının temsili görünümü mevcuttur.

Boru hattına ait özellikler Yedinci Bölüm’ de (Bkz. Çizelge 7.1.) sunulmuştur. Söz konusu boru hattında haftada 5 operasyon gerçekleştirilmektedir. Boru hattı için yorulmaya bağlı olarak hasar meydana gelebileceği öngörülmektedir. Bu sebeple boru hattında bir muayene planlaması yapılması amaçlanmaktadır. Olası bir hasar neticesinde Çizelge 3.3.’e göre boru üzerinde büyük (102 mm çapında) bir delik meydana geleceği öngörülmüştür. Bu büyüklük herhangi bir analiz neticesinde kararlaştırılmamış olup biraz daha emniyetli tarafta kalabilmek adına bu şekilde seçilmiştir.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi



Şekil 3.1. Söz konusu boru hattının temsili görünümü.

2.1. Çıkış ve Yayılım Fazının Belirlenmesi

Motorin, boru hattı içinde aktarım sırasında da, atmosfer koşullarında da sıvı fazda olacağından hem çıkış fazı hem de yayılım fazı sıvı faz olarak kabul edilecektir.

2.2. Kimyasalın İşletme Basıncı ve Özellikleri

Boru hattında aktarılan motorine ait kimyasal özellikler Çizelge 3.5.'te sunulmuştur [85]. Boru hattının en yüksek işletme basıncı 7,5 MPa olarak kabul edilmiştir.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Çizelge 3.5. Motorinin kimyasal özellikleri.

Yoğunluk (ρ)	kg/m ³	734
Molekül Ağırlığı (MA)	kg/kg-mol	149
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	°C	208
Kaynama Noktası	°C	184
Parlama Noktası	°C	52

2.3. Tehlikenin Belirlenmesi

Motorin yanıcı bir sıvıdır.

2.4. Hasar Sonucu Boru Üzerindeki Çıkış Açıklığının Büyüklüğü

Hasar sonucunda boru üzerinde 102 mm çapında bir delik meydana gelebileceği yönünde muhafazakâr bir tahmin yapılmıştır.

2.5. Bütünlük Kaybı Sonrası Akış Hızının Belirlenmesi

Sıvı fazda çıkış kabulü için açıklıktan çıkış hızı Eş. 3.2 ile hesaplanmıştır. ($P_{isl} = 7\,500\,000\,Pa$, $P_{atm} = 101\,325\,Pa$)

$$W = 519,5\,kg / s$$

2.6. Salınacak Toplam Kütlenin Tahmini

Boru hattı içindeki kütlenin tamamının ve boru hattının bağlı bulunduğu tanktaki miktarın bir bölümünün ortama salınacağı kabul edilmiştir. Tanktan salınacak miktarın hesabında üç dakikalık ortalama müdahale süresi öngörülmüştür. Operatörün salınımın başlangıcını takip eden üç dakika içinde olaydan haberdar olup tankın çıkış vanasını kapatacağı varsayılmıştır. Boru hattı uzunluğu 775 metredir. Boru çapı 324 milimetredir. Boru hattındaki toplam kütle Eş. 3.13 kullanılarak hesaplanmıştır.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

$$m_{ekip} = L \frac{\pi D^2}{4} \rho \quad (3.13)$$

$$m_{ekip} = 46\,901 \text{ kg}$$

Eş. 3.7 kullanılarak ortama salınan toplam kütle hesaplanmıştır.

$$m_t = 140\,406 \text{ kg}$$

2.7. Salınım Tipinin Tespiti

Açıklık çapı 6,35 mm'den büyüktür.

$$t = \frac{4536}{W} = \frac{4536}{519,5} = 8,7 \text{ s} < 180 \text{ s}$$

Anlık salınım koşulu geçerlidir.

2.8. Erken Tespit, Sınırlandırma ve Baskılama Sistemleri

Terminalde hidrokarbon dedektörleri ve yangın monitörleri mevcuttur.

$$R_{fd} = 0,15$$

$$R_{fm} = 0,05$$

2.9. Salınım Hızı ve Anlık Salınım Kütlesinin Belirlenmesi

Salınım hızı Eş. 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

$$W_C = W(1 - R_{fd})$$

$$W_C = 441,6 \text{ kg/s}$$

Anlık salınım kütlesi ise Eş. 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır ($L_d = 20 \text{ dk}$ olarak kabul edilmiştir).

$$m_a = 140406 \text{ kg}$$

2.10. Yangından Fiziksel Olarak Etkilenen Alanın Belirlenmesi

Anlık salınım koşulu söz konusu olduğundan Eş. 3.11 ve Eş. 3.12 kullanılmıştır. Eşitlikte “ $a = 0,559$ ” ve “ $b = 0,76$ ” olarak alınmıştır [85].

$$C_f^a = 622,8 \text{ m}^2$$

2.11. Riskin Belirlenmesi

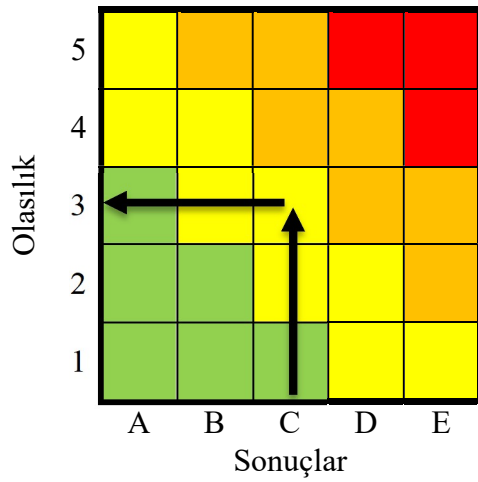
Yangından fiziksel olarak etkilenen alanın büyüklüğünün belirlenmesinin ardından Çizelge 3.6. kullanılarak olası sonucun seviyesi belirlenir. Hesaplanan yaklaşık 650 m^2 alan “C” sonuç seviyesine karşılık gelmektedir.

Şekil 3.2.’de sunulan risk matrisi kullanılarak kabul edilebilir risk seviyesine karar verilmektedir. Matriste yeşil renk düşük riski, sarı renk orta riski, turuncu renk orta-yüksek riski ve kırmızı renk yüksek riski temsil etmektedir. Orta risk, kabul edilebilir risk seviyesi olarak belirlenirse olasılık seviyesi en fazla “3” olabilir.

EK-3. (devam) Risk bazlı muayene planlamasında sonuç analizi

Çizelge 3.6. Olası sonuçların alan bazlı seviyeleri.

Seviye	Alan Etkisi $C_f(m^2)$
A	$C_f \leq 10$
B	$10 < C_f \leq 100$
C	$100 < C_f \leq 1\,000$
D	$1\,000 < C_f \leq 10\,000$
E	$C_f > 10\,000$



Şekil 3.2. Risk matrisi.

Çizelge 3.7. kullanılarak kabul edilebilir olasılık seviyesi için olasılığın büyüklüğü tespit edilebilir. Çizelgeye göre olasılık seviyesi “3” için hasar olasılığı en fazla $3,0 \times 10^{-3}$ olabilir. Çalışmanın Yedinci Bölümü’nde ele alınan örnek boru hattı için hesaplanan ve sunulan grafik (Bkz. Şekil 7.6.) kullanılarak en uygun muayene zamanına karar verilebilir. $3,0 \times 10^{-3}$ hasar olasılığını aşmamak adına 10 yıl içerisinde muayene gerçekleştirilmesi tavsiye edilir.

Çizelge 3.7. Hasar olasılığı seviyeleri.

Seviye	Hasar Olasılığı $H(t)$
1	$H(t) \leq 3,0 \text{ E}^{-5}$
2	$3,0 \text{ E}^{-5} < H(t) \leq 3,0 \text{ E}^{-4}$
3	$3,0 \text{ E}^{-4} < H(t) \leq 3,0 \text{ E}^{-3}$
4	$3,0 \text{ E}^{-3} < H(t) \leq 3,0 \text{ E}^{-2}$
5	$H(t) > 3,0 \text{ E}^{-2}$



GAZİ GELECEKTİR...