

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLENDEN ÜRETİLMİŞ BORULARIN,
DIN 16961-2:2010-03 STANDARDINA GÖRE HALKA RİJİTLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdi Orhan YAVUZ

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İ. Mehmet PALABIYIK

Ekim 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLENDEN ÜRETİLMİŞ BORULARIN,
DIN 16961-2:2010-03 STANDARDINA GÖRE HALKA RİJİTLİKLERİNİN
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Abdi Orhan YAVUZ
(503091220)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Haziran 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Ekim 2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İ. Mehmet
PALABIYIK (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet ÜNAL (YTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ (İTÜ)**

Ekim 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmam sırasında bana teorik ve manevi anlamda destek veren ve deneysel ekipmanların temininde yardımcı olan danışman hocam, Yrd. Doç. Dr. Sayın İ. Mehmet PALABIYIK'a; deney numunelerinin temini ve tez yazımı esnasında, değerli vaktini bana ayıran Sayın İsmınur GÖKGÖZ'e ve başta DİZAYN Grup Teknoloji Ar-Ge Direktörü Sayın Zafer GEMİCİ olmak üzere tüm Ar-Ge çalışanlarına en içten şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, hayatımın her döneminde bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, tecrübeleriyle hayatıma ışık tutan annem Emine YAVUZ'a, babam Mak. Müh. Ramazan YAVUZ'a, abim Mak. Yük. Müh. Emin YAVUZ'a ve abimin sevgili eşi Fatma YAVUZ'a sonsuz teşekkür ederim. Bu günüme onlar sayesinde geldim.

Lisans ve yüksek lisans dönemleri boyunca yurt ve ev arkadaşlığı yapan arkadaşım sevgili Mak. Müh. Anıl BİLGİN'e, tüm çalışmalarım sırasında manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşım İnş. Yük. Müh. Tuğba CANGEL'e ve diğer tüm arkadaşlarıma da teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Mayıs 2011

Abdi Orhan YAVUZ

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatürde Yapılan Çalışmalar	2
2. POLİMERLER	5
2.1 Genel Bakış	5
2.2 Plastikler.....	6
2.2.1 Plastiklerin sınıflandırılması	8
2.2.1.1 Termoplastikler	9
2.2.1.2 Termosetler.....	10
2.2.1.3 Elastomerler	11
2.2.2 Plastiklerin mekanik özellikleri	11
2.2.3 Viskoelastik davranış	13
2.2.3.1 Sürünme ve toparlanma.....	15
2.2.3.2 Gevşeme	15
3. POLİETİLEN.....	17
3.1 Genel Bakış	17
3.2 Bazı Polietilen Türleri	18
3.2.1 Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE).....	18
3.2.2 Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE).....	19
3.2.3 Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (DDYPE).....	19
3.2.4 Çok düşük yoğunluklu polietilen (ÇDYPE)	19
3.2.5 PE 80/PE 100	22
4. DRENAJ BORULARI.....	23
4.1 Rijit Drenaj Boruları.....	23
4.2 Esnek Drenaj Boruları	24
4.2.1 Ekstrüzyon ile plastik boru üretimi	25
4.2.1.1 Korige boru üretimi	29
4.2.1.2 Sarmal korige boru üretimi	31

5. PLASTİK BORULARIN (DRENAJ BORULARI) ÜRETİMİNDE	
KULLANILAN BAZI STANDARTLAR.....	33
5.1 Halka Rijitliği Standartları	33
5.1.1 ASTM D-2412.....	34
5.1.2 ISO 9969	36
5.1.3 DIN 16961-2:2010-03	38
6. TEST DÜZENEĞİ VE NUMUNELERİN ÖZELLİKLERİ.....	43
6.1 Test Düzeneği ve Ekipman.....	43
6.1.1 Test Aleti	44
6.1.2 Strain-gauge	44
6.1.3 Strain-gauge indikatörü	45
6.1.4 Komparatör.....	46
6.2 Malzeme Özellikleri	46
6.3 Numune Ölçüleri	47
6.3.1 Gerekli hesaplamalar.....	49
7. DENEYİN YAPILIŞI.....	53
7.1 Strain-Gaugelerin Yerleştirilmesi.....	53
7.1.1 Yüzeyin hazırlanması.....	54
7.1.2 Strain-gaugelerin yapıştırılması	55
7.1.3 Lehimleme.....	55
7.1.4 Devre Kontrolü.....	56
7.2 Deneyin Yapılışı ve Gerekli Hesaplamalar	57
7.3 Ölçülen Değerler	58
8. SONUÇ.....	61
8.1 Halka Rijitliği	61
8.2 Gerilme Analizi	62
8.2.1 Testlerde meydana gelen gerilmeler	66
KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Karayolları ve Ulaşım Görevlileri Birliği)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Birliği)
ATV	: Abwassertechnische Vereinigung (Atıksu Tekniği Birliği)
ÇDYPE	: Çok Düşük Yoğunluklu Polietilen
DDYPE	: Doğrusal Düşük Yoğunluklu Polietilen
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DP	: Degree of Polymerization (Polimerizasyon Derecesi)
DPE	: Doğrusal Polietilen
DYPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
GRP	: Glass Reinforced Plastic (Cam Takviyeli Plastik)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlaştırma Teşkilatı)
MRS	: Minimum Required Strength (Gereken En Düşük Dayanım)
MFI	: Melt Flow Index (Erime Akış İndeksi)
MFR	: Melt Flow Rate (Erime Akış Hızı)
PE	: Polietilen
PE-HD	: High Density Polietilen (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
PP	: Polipropilen
PS	: Pipe Stiffness (Boru Rijitliği)
PVC	: Polivinil Chloride (Polivinil Klorür)
SF	: Stiffness Factor (Rijitlik Faktörü)
SN	: Nominal Stiffness (Anma Rijitliği)
SR	: Ring Stiffness (Halka Rijitliği)
UDYPE	: Ultra Düşük Yoğunluklu Polietilen
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Amorf ve kısmikristalin termoplastiklerin bazı özellikleri.	10
Çizelge 3.1 : Polietilen çeşitlerinin bazı özellikleri.	21
Çizelge 3.2 : ISO 4427'ye göre MRS değerleri.	22
Çizelge 5.1 : Boru anma çapına karşılık gelen şekil değiştirme hızı değerleri [26].	36
Çizelge 5.2 : Uzunluk ölçümü sayısı.	37
Çizelge 5.3 : En düşük sürünme modülü değerleri [27].	39
Çizelge 5.4 : Yüzde deformasyon – deformasyon katsayısı.	40
Çizelge 6.1 : Strain-gaugenin özellikleri.	45
Çizelge 6.2 : Innoplus 6000F malzemesinin özellikleri [28].	47
Çizelge 6.3 : NPC 7000F malzemesinin özellikleri [29].	47
Çizelge 6.4 : Numunelerin özellikleri.	48
Çizelge 6.5 : Numune ölçüleri.	49
Çizelge 6.6 : Y_c ve I değerleri.	51
Çizelge 7.1 : $S_{R24(te)}$ ve deney yükü değerleri.	57
Çizelge 7.2 : Kg cinsinden test yükü ve çökme miktarları.	58
Çizelge 7.3 : Deneysel S_{R24} değerleri.	58
Çizelge 8.1 : Teorik ve deneysel halka rijitliği değerleri.	61
Çizelge 8.2 : Halka rijitliği değerlerine göre boru serisi sınıflandırması [27].	61
Çizelge 8.3 : Numunelerin, deneysel S_{R24} değerlerine göre boru serisi sınıflandırılması.	62
Çizelge 8.4 : 1 hatveye etki eden F yükü, c ve I değerleri.	65
Çizelge 8.5 : 3 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı noktadaki normal kuvvet, eğme momenti ve teğetsel gerilme değerleri.	66
Çizelge 8.6 : 1 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı noktadaki normal kuvvet, kesme kuvveti, eğme momenti ve teğetsel gerilme değerleri.	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir monomer molekülünün şematik görünüşü.	5
Şekil 2.2 : “n” tane monomerin kimyasal olarak birleşmesiyle oluşan polimer molekülü [7].	5
Şekil 2.3 : Molekül zincirleri arası kuvvetler.	5
Şekil 2.4 : Çeşitli renklerde plastik granülleri.	6
Şekil 2.5 : Bazı takviye malzemeleri. a) Cam elyaf. b) Karbon elyaf.	7
Şekil 2.6 : Soğuma esnasında oluşan çarpılma olayını önleyici kaolin maddesi [7]...	7
Şekil 2.7 : Ham petrol esaslı maddelerin genel sınıflandırılması [7].	8
Şekil 2.8 : Plastiklerin sınıflandırılması.	8
Şekil 2.9 : Kısmikristalin termoplastik içerisindeki kristalin ve amorf bölgeler [7]. ..	9
Şekil 2.10 : Termosetlerin molekül yapıları [7].....	10
Şekil 2.11 : Elastomerlerin molekül yapıları.	11
Şekil 2.12 : Tipik bir plastik için gerilme-birim şekil değişimi diyagramı.	12
Şekil 2.13 : Alan I, atom içi bağların uzaması.....	12
Şekil 2.14 : Alan II, karışık haldeki molekül zincirlerinin çözülmesi.	12
Şekil 2.15 : Alan III, moleküller arası bağıl hareket.....	13
Şekil 2.16 : Elastik ve viskoelastik malzemelerin iki farklı zaman değerleri için gerilme-birim şekil değişimi karakteristikleri.	14
Şekil 2.17 : Bir plastiğin sürünme ve toparlanma davranışı [7].	15
Şekil 2.18 : Plastiklerde görülen gevşeme olayı.	16
Şekil 3.1 : a) Etilen molekülü. b) Polietilen molekülü zinciri [7].....	17
Şekil 3.2 : YYPE’nin şematik gösterimi.	18
Şekil 3.3 : DYPE’nin şematik gösterimi.	19
Şekil 3.4 : DDYPE’nin şematik gösterimi [13].	19
Şekil 3.5 : ÇDYPE’nin şematik gösterimi.	20
Şekil 4.1 : Gömülü rijit borularda kuvvet iletimi.	23
Şekil 4.2 : Rijit borularda oluşan dolgu yükleri [1].	24
Şekil 4.3 : Esnek borularda oluşan dolgu yükleri [1].	24
Şekil 4.4 : Esnek boruların toprak altı davranışının şematik gösterimi. a) Kuvvet dağılımı. b) Deformasyon şekli [11].	25
Şekil 4.5 : Tipik bir ticari ekstrüzyon hattı [10].	26
Şekil 4.6 : Ekstrüzyon hattının şematik gösterimi.	26
Şekil 4.7 : Ekstrüzyon vidasının bölümleri [9].	27
Şekil 4.8 : Çeşitli vida karıştırma bölgesi örnekleri.	27
Şekil 4.9 : Ekran paketi.....	28
Şekil 4.10 : Boru üretiminde kullanılan bir ekstrüder kalıbının şematik görünümü.	28
Şekil 4.11 : Ürüne son şekli veren boyutlandırma halkaları [21].	29
Şekil 4.12 : Bir korige boru örneği [22].	29
Şekil 4.13 : Korige boru üretiminin şematik gösterimi.	30
Şekil 4.14 : Korige boru kalıpları [23].	31
Şekil 4.15 : Sarmal korige boru üretimi [24].....	32

Şekil 5.1 : Paralel levha testinin şematik gösterimi. a) Kuvvet uygulanmadan önce.	
b) Kuvvet uygulandıktan sonra.	34
Şekil 5.2 : İç çap değerleri ölçüm noktaları.	41
Şekil 5.3 : Numunenin levhalar arasına yerleştirilmesi. a) Direkt yerleştirme.	
b) Çelik parça konularak yerleştirme [27].....	41
Şekil 6.1 : Test düzeneği.....	43
Şekil 6.2 : Test aletinin, bilgisayarda çizilmiş katı modeli.....	44
Şekil 6.3 : Strain-gauge bağlantısının şematik gösterimi.	45
Şekil 6.4 : Vishay-Model P3 strain-gauge indikatörü.....	45
Şekil 6.5 : Test aleti üzerine yerleştirilmiş analog komparatör.	46
Şekil 6.6: Numune ölçüleri.	48
Şekil 6.7 : Bir hadvedeki boru parçası kesiti ve bu kesitin dikdörtgen elemanlara bölünmesi.	49
Şekil 6.8 : Paralel eksen teoremi ile bir dikdörtgenin, ağırlık merkezinden geçmeyen bir eksen takımına göre atalet momentinin hesaplanması.	50
Şekil 7.1 : Strain-gaugelerin yerleşimi.	53
Şekil 7.2 : Üst levha ile profil arasına yerleştirilen strain-gaugelerin konumları.	54
Şekil 7.3 : Numunenin yan tarafına yerleştirilen strain-gaugelerin konumları.....	54
Şekil 7.4 : Yapıştırma yüzeylerinin, zımparalamadan sonraki görüntüsü.	55
Şekil 7.5 : Yerleştirilmiş bir strain-gauge.	56
Şekil 7.6 : Multimetre ile devre kontrolü.....	56
Şekil 7.7 : Deney düzeneğindeki strain-gaugelerin numaralandırılması.	59
Şekil 8.1 : Paralel levha testinde, 180° lik bir boru kesitinde oluşan kuvvet ve momentler.....	63
Şekil 8.2 : B noktasındaki moment ve kuvvetler.	64
Şekil 8.3 : Boru kesitindeki gerilme dağılımı.	66

SEMBOL LİSTESİ

A	: Alan
C	: Karbon
d	: Ortalama İç Çap
d_i	: İç Çap
d_n	: Borunun Anma Çapı
DP	: Polimerizasyon Derecesi
e	: Çelik Levhalar Arası Uzaklık
E	: Elastiklik Modülü
E_c	: Creep Modulus (Sürünme Modülü)
E_{c24}	: 24 Saatlik Sürünme Modülü
F	: Test Yüğü
F₀	: Ön Yüğü
H	: Hidrojen
I	: 1 Profilin Atalet Momenti
L	: Uzunluk
M_A	: A Noktasındaki Moment
M_B	: B Noktasındaki Moment
n	: Polimerizasyon Derecesi
P	: Borunun Yüzde Birim Şekil Değişimi
PS	: Pipe Stiffness (Boru Rijitliği)
r	: İç Yarıçap
r_n	: Nötral Eksene Kadar Olan Yarıçap
S	: Halka Rijitliği
SF	: Stiffness Factor (Rijitlik Faktörü)
S_{R24}	: 24 Saatlik Halka Rijitliği
S_{R24(te)}	: 24 Saatlik Teorik Halka Rijitliği
t	: Zaman
T_A	: A Noktasındaki Normal Kuvvet
T_B	: B Noktasındaki Normal Kuvvet
T_g	: Camsı Geçiş Sıcaklığı

V_B	: B Noktasındaki Kesme Kuvveti
X_c	: Ağırlık Merkezinin X Koordinatı
Y_c	: Ağırlık Merkezinin Y Koordinatı
Δd_{iv}	: İç Çapın İzin Verilen Maksimum Çökme Miktarı
Δd_{ivm}	: İç Çapın Ortalama Çökme Miktarı
ΔL	: Uzamadaki Değişim
Δy	: İç Çaptaki Değişim Miktarı
$\text{\AA}$	: Angstrom
θ	: 1 Numaralı Strain-Gaugenin Yerleştirildiği Merkez Açısı
$\dot{\gamma}$	: Akışkanın Şekil Değiştirme Hızı
ε	: Birim Şekil Değişimi
$\dot{\varepsilon}$	: Malzemenin Şekil Değiştirme Hızı
η	: Dinamik Viskozite Katsayısı
ξ	: Deformasyon Katsayısı
$\xi_{\Delta divm}$	: Düzeltilmiş Deformasyon Katsayısı
σ_A	: A noktasındaki Normal Gerilme
σ_B	: B noktasındaki Normal Gerilme
τ	: Kayma Gerilmesi

ÖZET

YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN'DEN ÜRETİLMİŞ BORULARIN, DIN 16961-2:2010-03 STANDARDINA GÖRE HALKA RİJİTLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Son yıllarda hızla artan insan nüfusuna paralel olarak, yerleşim yerlerindeki drenaj sistemlerinin de büyümesi ihtiyacı doğmuştur. Bu artan talebi karşılamak amacıyla firmalar; beton, kil, dökme demir gibi klasikleşmiş boru malzemelerine alternatif başka malzeme arayışlarına girmişler ve plastiği, drenaj boru yapımında kullanmışlardır.

Drenaj borularının üretiminde yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) hammaddesi kullanımı, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik özellikler, maliyet, ömür, hafiflik gibi avantajlarından dolayı, diğer boru malzemeleri arasından öne çıkmaktadır. İmalat teknolojilerinin gelişmesi sayesinde, dayanım özellikleri çok iyi olan sarmal korige borular üretilebilir hale gelmiş ve bu sayede, daha az et kalınlığına sahip, daha hafif borular kullanıma sunulmuştur.

Bu çalışmada, YYPE'den üretilmiş, farklı uzunluklarda ve farklı sarım hatvelerine sahip sarmal korige boru numunelerinin halka rijitliği testleri, DIN 16961-2:2010-03 standardına göre yapılmıştır. 6 adet 0,5 m ve 6 adet 0,6 m çaplarındaki numuneler, paralel levha testi ile radyal olarak 24 saat boyunca sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi ölü ağırlıklarla yapılmıştır. Buradan elde edilen verilerle numunelerin halka rijitliği değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, numune üzerinde oluşan birim şekil değişimi değerlerinin belirlenmesi ve sürünme modüllerinin değişiminin gözlemlenmesi amacıyla her testte, direnci 120 Ω 'luk 4'er adet strain-gauge çeyrek köprü yapılarak, kullanılmıştır. Bu strain-gaugeler boru profillerinin üzerine 2 tanesi teğetsel, 2 tanesi eksenel birim şekil değişimlerini ölçecek şekilde yerleştirilmiştir ve strain-gaugelerden, 2 dakikada bir ölçüm alınarak kaydedilmiştir.

SUMMARY

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RING STIFFNESSES OF PIPES, MADE OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE, DUE TO DIN 16961-2:2010-03 STANDARD

Recently, due to the rise in human population, suburban drainage systems needed to become wider. Firms began to search new alternative materials to classical drainage materials like concrete, clay, cast iron for the purpose of satisfying this demand and they used plastic in drainage pipe manufacturing.

Nowadays, usage of high density polyethylene (HDPE) as a raw material for drainage pipe manufacturing is very common. HDPE is more eligible than its rivals due to its advantages like having good mechanical properties, low cost, long durability, and low density. With the developments in manufacturing technology, spiral corrugated drainage pipes having large diameters, thin wall thicknesses and light weight became available.

In this study, the ring stiffness tests of spiral corrugated pipes, made of HDPE, were performed due to DIN 16961-2:2010-03 standard. 6 samples of having 0,5 m diameter and 6 samples of having 0,6 m diameter, which have different length and pitch, had compressed radial by two parallel plates for 24 hours. Compressing was achieved by deadweights. Ring stiffness values were calculated by these data. Adding to this, for the purpose of measuring the strains and the change in creep modulus of the samples, strain-gauges of having 120 Ω resistances was used. In every test, 4 strain-gauges, with quarter bridges each, were used. The strain-gauges were placed to the profile of the samples, as two of them would measure environmental strains and two of them would measure axial strains. The strain values were taken and recorded in every 2 minutes.

1. GİRİŞ

Yer altı su boruları kullanımı, çok eskilere dayanan bir uygulamadır. Romalılar, 1000 yılı aşkın süre önce, Roma'ya su temin etmek için kurşundan yapılmış borular kullanmışlardır. Su ve kanalizasyon uygulamaları için boru yapımı, milattan önce 4000'li yıllara kadar gider. Girit'te Knossos Sarayı'nın yıkıntıları arasında kilden yapılmış borular keşfedilmiştir ve Mısır ve İran'da drenaj uygulamaları için kil borular kullanılmıştır. Bilinen en eski beton kanalizasyon boruları, milattan önce 800'lü yıllarda Roma'da, Cloaca Maxima'da bulunmuştur. Bu borular, taş ve doğal çimentodan üretilmişlerdir. Dökme demirden yapılmış ilk boru hatları, 1800'lü yıllarda Almanya'nın Siegerland bölgesinde kullanılmıştır. Artan dayanım ve farklı boyutlarda boru üretiminin mümkün hale gelmesiyle birlikte çelik boru imalatı 19'uncu yüzyılda yapılmaya başlanmış ve boru hattı teknolojisinde bir devrim gerçekleşmiştir. 1879 yılında, Pensilvanya'da petrolün keşfedilmesiyle birlikte, ilk uzun mesafeli petrol boru hattı burada kurulmuştur ve burada kullanılan boru, 15 cm çapında ve 175 km uzunluğunda çelik borudur [1].

Plastik boruların 1950'lerin sonlarına doğru Kuzey Amerika'ya girmesi, su ve kanalizasyon boru sistemleri için bir devrimin gerçekleşmesine sebep olmuştur. Polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) gibi termoplastik malzemelerin kullanımının yanı sıra, cam takviyeli plastik (GRP) gibi termoset malzemeler de boru üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. PE, bunlar arasında en çok kullanılan boru malzemesi olmuştur. Çok uzun PE borular, hendek açmadan yatay delme işlemiyle yerleştirilmektedirler. Aynı zamanda, hendek açılarak PE boruların yerleştirilmesi de mümkündür [1].

Bu çalışma, toplam sekiz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde; polimerler ve plastikler hakkında genel bilgi verilmiştir. Ayrıca plastiklerin mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, polietilen ve çeşitleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, drenaj boru tipleri ve ekstrüzyon ile boru üretimi anlatılmıştır. Beşinci bölümde, plastik boruların dayanımlarının test edilmesi ile ilgili dünya üzerinde kullanılan bazı standartlardan bahsedilmiştir. Altıncı bölümde; test

düzenegi, numunelerin ölçüleri ve testte kullanılan ekipmanların teknik özellikleri verilmiştir. Ayrıca, numune ölçüleri ile ilgili hesaplamalar yapılmıştır. Yedinci bölümde strain-gaugelerin numuneler üzerine yerleştirilme adımları ve standartta kullanılan terimlerin hesaplamaları yapılarak strain-gaugelerden alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Sekizinci bölümde ise teğetsel birim şekil değişimlerini ölçen strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki gerilme değerleri hesaplanarak malzemelerin sürünme modüllerinin değişimleri incelenmiştir.

1.1 Literatürde Yapılan Çalışmalar

Literatürde; DIN 16961-2:2010-03 standardında ve bu standardın önceki sürümlerinde geçen “halka rijitliği” terimini tespit etmeye yönelik yeterli çalışma mevcut değildir. Bunun yerine daha çok, ASTM standardında geçen “boru rijitliği” teriminin veya boru numunelerinin toprak altındaki davranışlarının tespitine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. DIN standardı ile ASTM standardı arasındaki temel fark, DIN standardında sabit yük uygulanması, ASTM standardında ise sabit deformasyon hızı uygulanmasıdır.

Moore (1994), üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminin etkinliğini test etmek amacıyla çelikten ve yüksek yoğunluklu polietilenden (YYPE) üretilmiş korige boru numunelerinin bölgesel birim şekil değişimleri ölçümlemleri, numunelerin çeşitli yerlerine yapıştırdığı strain-gaugeler sayesinde yapmıştır. Çelik korige boru numunesi, 320 mm uzunluğuna, 525 mm çapa ve 1,82 mm et kalınlığına; YYPE korige boru numunesi ise 320 mm uzunluğa ve 450 mm çapa sahiptir. Strain-gaugeler ise 120 Ω dirence ve 2 mm uzunluğa sahiptir. Uygulanan yük, numuneye sabit deformasyon hızı yaratmak şeklindedir. Çelik boru için 1 mm/dak hızla çap deformasyona uğratarak toplamda 6 mm’lik bir çökme sağlanmış ve numune bu noktada 1 dakika tutulmuş ve ardından yük, 1mm/dak hızla kaldırılmıştır. YYPE boruda ise 12 mm/dak hızla çap deformasyona uğratarak toplamda 24 mm’lik bir çökme sağlanmış ve numune bu noktada 1 dakika tutulmuş ve ardından yük, 24 mm/dak hızla kaldırılmıştır. Çelik boru üzerine yapıştırılan strain-gaugelerden elde edilen en yüksek birim şekil değişim değerleri, teğetsel yönde 600 $\mu\epsilon$, eksenel yönde 830 $\mu\epsilon$ ’dur. YYPE borudan ise elde edilen en yüksek birim şekil değişimi değerleri, teğetsel yönde 5900 $\mu\epsilon$; eksenel yönde 5600 $\mu\epsilon$ ’dur. Bunlara ek olarak, paralel levha testi uygulanan çelik ve YYPE numunelerin davranışlarını gözlemlemek amacıyla üç

boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Üç boyutlu yarı-analitik sonlu elemanlar analizinin, çelik ve YYPE numuneler için doğrusal elastik davranışlarının ve YYPE numuneler için doğrusal viskoelastik davranışlarının tahmini için uygun bir araç olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca bu analizin, boruların gerçek kullanım sahalarındaki (örnek olarak derin gömülme koşulları) performanslarının belirlenmesi için de kullanışlı olabileceğini belirtmiştir [2].

Selig, DiFrancesco ve McGrath (1994a), gömülü boruların toprak altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Bunun için yeni bir aparat kullanmışlardır. Bu aparat, içinde hava dolu bir kese bulunan, 900 mm çapında çelik bir silindirik konteynirden oluşmaktadır. Bir parça boru numunesi, kese içine yerleştirilmiş ve kese ile konteynir arasına da kum doldurulmuştur. Test, kesenin basıncının düzenli olarak arttırılması ile gerçekleştirilmiş ve bu arada boru numunesinin performansı görüntülenmiştir. 610 mm çapa sahip plastik korige boru numunesi üzerinde, 380 kPa'lık radyal basınca karşılık çapta 37 mm'lik deformasyon gözlemlenmiştir [3].

McGrath, Selig ve DiFrancesco (1994b), başka bir çalışmalarında, sabit bir deformasyon miktarında tutulduktan sonra yük uygulanan plastik boru numunelerinin davranışlarının belirlenmesi amacıyla bir paralel levha test düzeneği tasarlamışlardır. Test cihazı, numuneyi belli bir deformasyon seviyesinde tutabilecek kapasiteye sahiptir. Bir yük göstergesi sayesinde, deformasyonun sabit tutulduğu süre boyunca yükte meydana gelen azalma gözlemlenmiştir. Önceden belirlenmiş zaman aralıklarında, deformasyon miktarı düzgün olarak bir miktar arttırılıp azaltılmıştır. Bu işlem esnasında deformasyon artışına sebep olan yük miktarı kaydedilmiştir. Daha sonra numune, ilk haline geri getirilmiştir. Sonuçta, yükte meydana gelen uzun zamanlı bir düşüş veya gevşemenin, kısa zamanlı yük artışlarından etkilenmediği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, kısa zamanlı modülün, uzun zamanlı gevşeme modülünden çok daha fazla olduğunu ve zamanla azalmadığını gözlemlenmiştir [4].

Moore ve Hu, korige polietilen boruların doğrusal viskoelastik parametreleri için sonlu elemanlar analizi tasarlamışlardır. Korige YYPE boruların paralel levha testi yöntemiyle elde edilen gevşeme testi sonuçları %5 ve %10 dikey çap çökmesi gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Sabit dikey çap çökmesi hızı uygulanan 610 mm çapında boruların, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerleri hesaplanmıştır. Laboratuarda elde edilen değerlerle karşılaştırılmak üzere, üç farklı

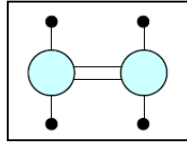
Çökme değeri için öngörülerde bulunulmuştur. %3'lük dikey çökmesinden elde edilen sonuçlar kullanılarak, %5'lik küçük bir çökme için öngörülen gevşeme reolojisi değerleri, iyi sonuçlar vermiştir. %10'luk büyük çökme reolojisi, %3 ve %10'luk dikey çap çökmesinden elde edilen veriler kullanılarak yapılan öngörülere uygun sonuçlar vermiştir. Boru profili üzerinde meydana gelen bölgesel birim şekil değışimleri gözlemlenmiş ve %3'lük bir dikey çap çökmesi sonucunda maksimum %0,6'lık çekme birim şekil değışimi ölçülmüştür. Burada elde edilen reolojik modeller, paralel levha testi uygulanan farklı boru profillerinin davranışlarının öngörülmesi için uygun olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca gömülü durum gibi farklı yükleme koşulları için de bu modellerin kullanılabilir olduğunu tespit etmişlerdir [5].

Mc Grath ve Schafer [2003], yüksek yoğunluklu polietilenden üretilmiş boru numunelerinin, paralel levha testi esnasındaki malzeme ve geometri davranışlarını incelemişlerdir. Bunun için bir dizi paralel levha testi ve bu testlerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi gerçekleştirmişlerdir. Paralel levha testinde, 1500 mm çapında boru kullanılmış ve 450 mm, 750 mm ve 1500 mm çapında boruların sonlu elemanlar analizi de MSC.NASTRAN programını kullanarak yapmışlardır. Sonuç olarak, paralel levha testinde uygulanan birim şekil değışimleri, yükleme hızından bağımsız olduğu tespit etmişlerdir; ancak, %5 çökme seviyesindeki rijitlik değeri ve maksimum yük değerinin yükleme hızı ile ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. Testler ve analizler göstermiştir ki; paralel levha testinde oluşan maksimum yükteki çökme miktarı, düzensizliklere karşı hassastır [6].

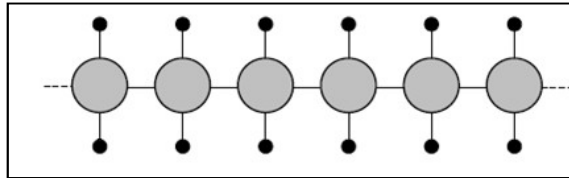
2. POLİMERLER

2.1 Genel Bakış

Polimer; karbonun, hidrojen, oksijen, azot ve diğer elementler ile oluşturduğu *monomer* (Şekil 2.1) adı verilen, basit yapılı moleküllerdeki bağın koparılarak, uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelere verilen isimdir. Monomerler, çift bağa veya en az iki aktif fonksiyonel gruba sahip organik moleküllerdir ve atomları arasındaki bağ, kovalent bağdır. Bu çift bağ veya aktif fonksiyonel grubun varlığı, başka monomerleri bağlanmaya teşvik eder ve bu sayede gerçekleşen zincirleme tepkimelerle polimer oluşur (Şekil 2.2) [7].

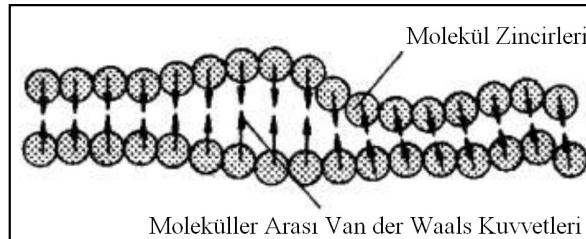


Şekil 2.1 : Bir monomer molekülünün şematik görünüşü.



Şekil 2.2 : “n” tane monomerin kimyasal olarak birleşmesiyle oluşan polimer molekülü [7].

Monomerlerin birleşerek polimer oluşturdukları bu işleme *polimerizasyon* denir. Isı, ışık ve kimyasal katkıların etkisi ile gerçekleştirilen polimerizasyon işleminde polimer zincirlerini, nispeten zayıf *Van der Waals* kuvvetleri ile bir arada tutan ikincil bir bağ oluşur (Şekil 2.3) [7].



Şekil 2.3 : Molekül zincirleri arası kuvvetler.

Polimer zinciri içerisindeki monomerlerin tekrarlanma sayılarına polimerizasyon derecesi (DP) denir. DP, polimerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine doğrudan etki eder. Bir polimeri oluşturmak için gerekli polimerizasyon derecesinin minimum değeri belli bir değer değildir. Üç adet monomerden oluşan moleküllere sahip maddelere polimer denebilir; ancak genellikle polimer kelimesi, çok daha büyük moleküllere sahip malzemeler için kullanılır. Polimerizasyon derecesi arttıkça polimerin çekme dayanımı, darbe dayanımı yumuşama sıcaklığı gibi özellikleri de artar [8].

2.2 Plastikler

Plastik ve polimer kelimeleri genellikle aynı şeyi tanımlıyorlarmış gibi kullanılırlar, ancak farklı kavramları ifade etmektedirler. Polimer, polimerizasyon sonucu oluşmuş saf maddeye verilen isimdir ve genellikle uzun zincir benzeri moleküllerin tanımlanması amacıyla kullanılır. Polimerler çok ender olarak saf halde, katkı maddesi katılmadan, kullanılırlar. Plastik kelimesi ise, polimerlere çeşitli katkılar katıldıktan sonra ortaya çıkan malzeme için kullanılır. Polimerlere katılan katkı maddelerinin birçok çeşidi vardır, bunlardan bazıları antistatik katkılar, pigmentler, dolgular, yağlayıcılar, takviyeler, bağlayıcı katkılar, kararlılaştırıcılar, alev önleyicilerdir [9].

- Antistatik katkılar, elektrik iletkenliği zayıf olan birçok polimer üzerinde oluşan statik elektriklenmeyi önleyici katkılardır. Bu katkılar, havadaki nemi polimer üzerine çekerek yüzey iletkenliğini artırır ve bu sayede oluşan statik elektrik boşaltılmış olur [9].

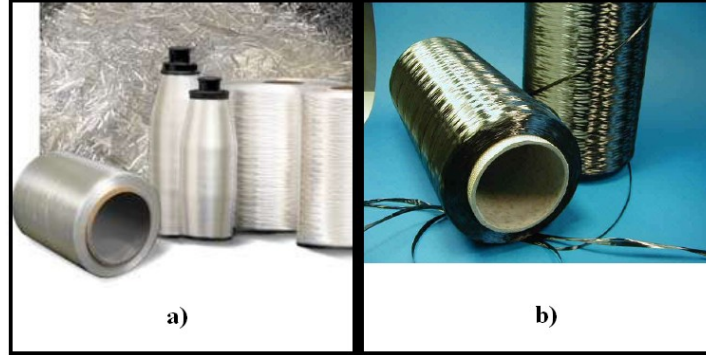
- Pigmentler, polimerlere renk vermek amacıyla kullanılırlar (Şekil 2.4) [7].



Şekil 2.4 : Çeşitli renklerde plastik granülleri.

- Dolgular, inorganik malzemeden üretilmiş elyaf veya tabaka şeklinde katkılardır. Kullanım amaçları, polimer malzemenin mekanik özelliklerini arttırmaktır [9].

- Yağlayıcılar, erimiş haldeki polimerin viskozitesini düşürerek şekil değiştirme karakteristiklerini arttırırlar.
- Takviyeler, polimerin dayanımını ve rijitliğini arttırmak amacıyla kullanılırlar (Şekil 2.5) [7].



Şekil 2.5 : Bazı takviye malzemeleri. a) Cam elyaf. b) Karbon elyaf.

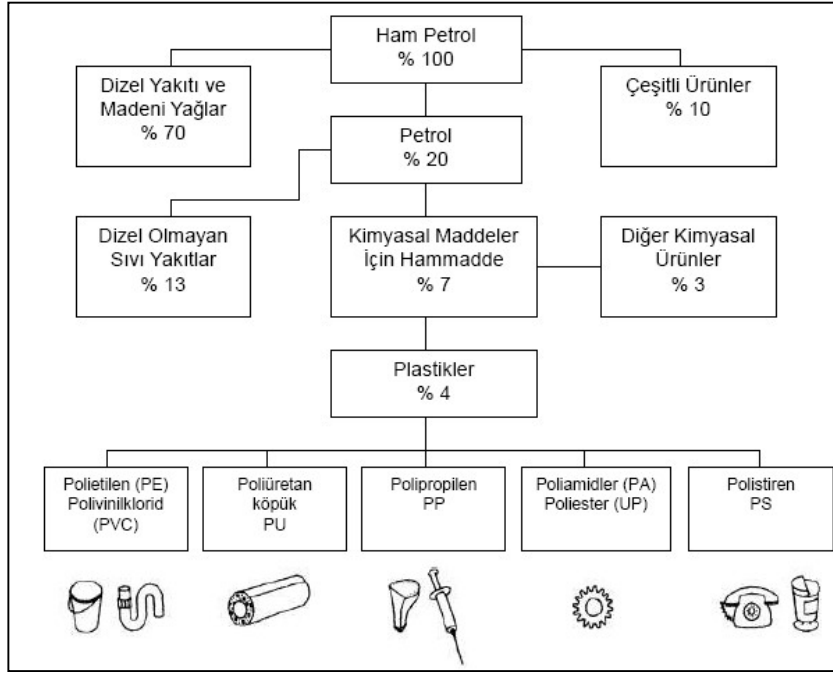
- Bağlayıcı katkıları, polimerin, cam elyafları gibi inorganik dolgu malzemeleri ile daha güçlü bağ kurmalarını sağlar.
- Kararlılaştırıcılar polimerlerin sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkilere dolayı bozulmalarını önler (Şekil 2.6) [9].



Şekil 2.6 : Soğuma esnasında oluşan çarpılma olayını önleyici *kaolin* maddesi [7].

- Alev önleyiciler, organik kökenli olduklarından dolayı yanıcı olan polimerlerin yanmasını engeller. Alev önleyici olarak fosfor veya metalik tuz içeren katkı maddeleri kullanılabilir[9].

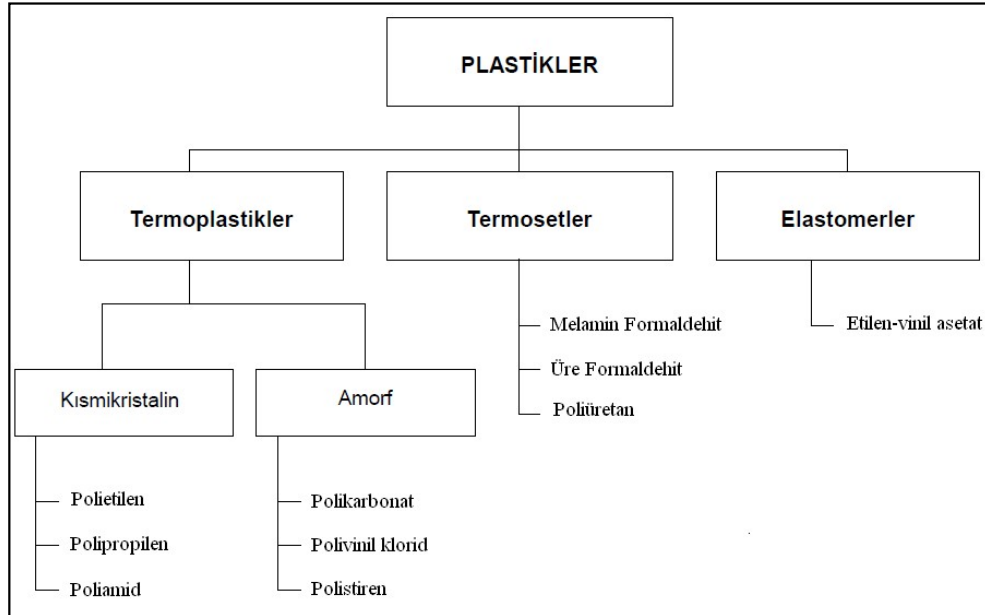
Plastik ilk elde edildiğinde toz veya granül halde olabilir. Genelde plastikler petrol rafinerilerinde kullanılan ham petrolün işlenmesi sonucu arta kalan malzemelerden elde edilir. Yapılan araştırmalara göre yeryüzündeki petrolün sadece % 4 lük bir kısmı plastik imalatı için kullanılmaktadır (Şekil 2.7) [7].



Şekil 2.7 : Ham petrol esaslı maddelerin genel sınıflandırılması [7].

2.2.1 Plastiklerin sınıflandırılması

Plastikler; bağ mekanizmaları, moleküler yapıları gibi özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Buna göre 3 tip plastik vardır; termoplastikler, termosetler ve elastomerler (Şekil 2.8) [7].

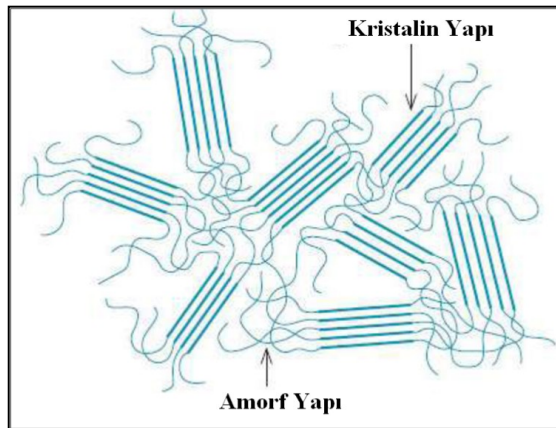


Şekil 2.8 : Plastiklerin sınıflandırılması.

2.2.1.1 Termoplastikler

Termoplastikler, uzun molekül zincirlerine sahip malzemelerdir. Isıtıldıklarında molekül içi kuvvetler zayıflar ve malzeme yumuşamaya, esnekleşmeye başlar; hatta ısıtma işlemi yeteri kadar sürdürülürse viskoz bir eriyik haline gelir. Bu noktaya getirilmiş malzeme soğumaya bırakıldığında tekrar katılaşır. Sıcaklık etkisiyle yumuşama ve soğuyarak katılaşma döngüsü, belirli bir noktaya kadar, tekrar tekrar yapılabilir. Isı etkisiyle yumuşayabilme özellikleri, üretimlerinde kullanılan metotların belirlenmesinde büyük bir rol oynar. Öte yandan, ısı etkisiyle yumuşamanın bir dezavantajı da vardır ki bu da termoplastikler ısıya karşı hassastırlar demektir. Bu yüzden de kullanılabildikleri sıcaklık aralığı nispeten dardır [9].

Termoplastiklerin yapılarında düzenli ve rastgele dizilmiş bölgeler bulunabilir. Yapı içindeki düzenli kısımlara *kristalin*, rastgele dizilmiş kısımlara da *amorf* denir (Şekil 2.9). Çok miktarda dallanmış molekül zincirlerine veya uzun yan zincirlere sahip termoplastikler, düzgün yapıya sahip olamadıklarından belirli bir hacme sıkıştırılamazlar. Bunun yerine bir yün yumağı gibi karmaşık bir yapıda dizilirler. Bu tip karmaşık yapıdaki termoplastiklere *amorf termoplastikler* denir ve her zaman amorf yapıdadırlar. Moleküllerinde çok az dallanma veya kısa yan zincirler bulunan termoplastiklerde ise bazı bölgelerde doğrusal ve düzenli zincirler bulunabilir. Bu tip yarı-düzenli termoplastiklere *kısmikristalin termoplastikler* denir. Pratikte, yüzde yüz kristalin yapıya sahip bir plastik elde etmek imkansızdır, bu yüzden tam kristalin yapıda plastik yoktur. Kısmikristalin termoplastikler içerisindeki kristalin bölgelerin yoğunluğunu tanımlamak amacıyla *kristallik derecesi* terimi kullanılmaktadır [7,9].



Şekil 2.9 : Kısmikristalin termoplastik içerisindeki kristalin ve amorf bölgeler [7].

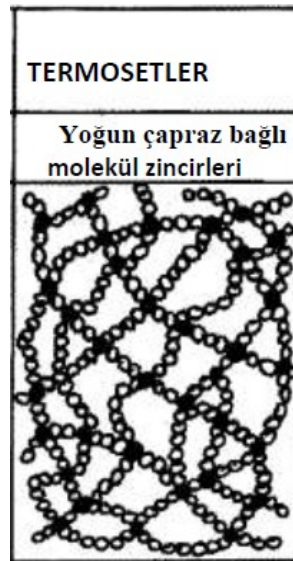
Amorf ve kısmikristalin termoplastiklerin birbirlerinden farklı bazı özellikleri vardır. Çizelge 2.1’de bu farklılıklar gösterilmektedir [9].

Çizelge 2.1 : Amorf ve kısmikristalin termoplastiklerin bazı özellikleri.

Amorf Termoplastikler	Kısmikristalin Termoplastikler
- Geniş, ısı yumuşama aralığı.	- Keskin erime noktası.
- Genellikle saydamdır.	- Genellikle opaktır.
- Sıvı halden katı hale geçiş esnasında az miktarda büzülme.	- Sıvı halden katı hale geçiş esnasında çok miktarda büzülme.
- Düşük kimyasal direnç	- Yüksek kimyasal direnç
- Zayıf yorulma ve aşınma direnci	- Yüksek yorulma ve aşınma direnci

2.2.1.2 Termosetler

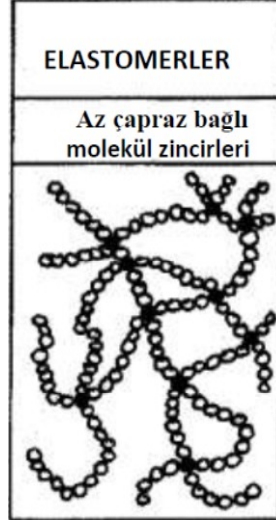
Termosetler, iki aşamalı bir kimyasal tepkime sonucu üretilirler. İlk aşamada, termoplastiklerin üretimindeki gibi uzun zincir moleküllerini oluşturan tepkime gerçekleşir. İkinci aşamada ise, bu uzun zincirlerin birbirleriyle *çapraz bağ* oluşturmaları olayı gerçekleşir (Şekil 2.10). İkinci aşama tepkimesi, genellikle kalıplama esnasında ısı ve basınç altında gerçekleşir. Kalıplama sonucu oluşan malzeme rijit ve ağırsı bir yapıya sahiptir. İkinci aşama esnasında uzun molekül zincirleri, güçlü bağlarla birbirlerine bağlanırlar; bu sebeple malzeme, ısı etki altında tekrardan yumuşama göstermez. Eğer ısı etkiye maruz kalırlarsa, yanar ve bozulurlar. Moleküllerin güçlü kimyasal bağlarla çapraz bağ oluşturmaları sonucunda termoset malzemeler gayet rijit malzemelerdir ve mekanik özellikleri, sıcaklığa bağlı olarak değişmez [9].



Şekil 2.10 : Termosetlerin molekül yapıları [7].

2.2.1.3 Elastomerler

Elastomerler de termosetler gibi çapraz bağa sahip plastiklerdendir, ancak daha az çapraz bağ içerirler (Şekil 2.11). Bu sebeple oda sıcaklığında kauçuk gibi davranırlar. Bu bağların parçalanması, yüksek sıcaklık gerektirir ve bir defa parçalanmış bağ tekrar geri oluşturulamaz. Bu sebeple elastomerler de termosetler gibi erimezler. Isıl etkiye maruz kalan elastomer, bozulur ve tekrar kullanılamayacak hale gelir [7].

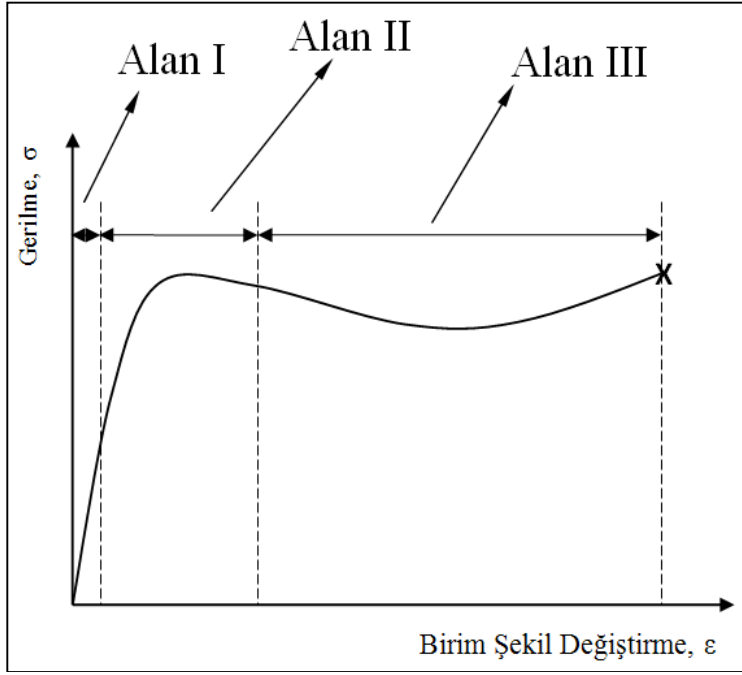


Şekil 2.11 : Elastomerlerin molekül yapıları.

2.2.2 Plastiklerin mekanik özellikleri

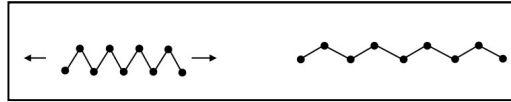
Plastiklerin mekanik özellikleri, diğer birçok malzemelerden farklı olarak, zamana, sıcaklığa ve şekil değiştirme hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Şekil 2.12’te, sabit şekil değişim hızı uygulanan tipik bir plastik için, tek eksenli gerilme-birim şekil değişimi diyagramı detaylandırılmıştır. Burada, termoplastiklerin deformasyonları sırasında malzeme içinde gerçekleşen bazı olayları tanımlamak mümkündür. Buna göre, çekme gerilmesine maruz bırakılan bir plastik, üç farklı şekil değişimi mekanizması gösterir [10].



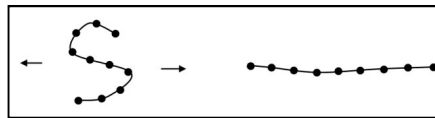
Şekil 2.12 : Tipik bir plastik için gerilme-birim şekil değişimi diyagramı.

Alan I: Bu bölgede plastik, elastik bir katı gibi davranır ve şekil değişimi tam olarak geri dönüşebilir. Çok küçük deformasyonlar için geçerli olan bu bölgede, polimer moleküllerinin atomları arasındaki bağların eğilmesi ve uzaması olayı gerçekleşir (Şekil 2.13) [10].



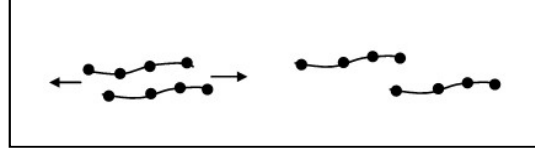
Şekil 2.13 : Alan I, atom içi bağların uzaması.

Alan II: Bu bölgedeki deformasyonlar hala bir miktar geri dönüşebilir ancak bu dönüşüm aniden değil, zaman içerisinde gerçekleşir. Burada meydana gelen olay, karışık halde bulunan molekül zincirlerinin çözülmesi olayıdır ve gerilmede bir miktar artış (pekleşme) gerçekleşir (Şekil 2.14) [10].



Şekil 2.14 : Alan II, karışık haldeki molekül zincirlerinin çözülmesi.

Alan III: Bu bölgede, moleküller arası bağıl hareket vardır ve geri dönüşü olmayan bir şekil değişimi söz konusudur. Bu bölge simüle edilmek istenirse, viskoelastik ve plastik bileşenlerden oluşan bir viskoplastik model kullanmak gereklidir (Şekil 2.15) [10].



Şekil 2.15 : Alan III, moleküller arası bağıl hareket.

2.2.3 Viskoelastik davranış

Viskoelastik davranış, adından da anlaşılabilir olduğu üzere, hem viskoz hem de elastik davranışın bir arada gözlemlendiği durumdur. Gerilmeye maruz bırakılan bir termoplastik, hem viskoz bir sıvı gibi akış gösterir (aldığı enerjinin bir kısmını yutar), hem de elastik şekil değişimi gösterir (aldığı enerjiyi aynen geri verir). Viskoz davranış, sıvılarda görülen bir özellik olmasına karşın, plastik malzemelerde de gözlemlenir. Tanım olarak viskoz davranış, sıvı içinde oluşan kayma gerilmesinin, sıvının şekil değiştirme hızıyla olan oranı olarak tanımlanır. İdeal viskoz bir sıvıda (Newtoniyen), bu oran sabittir ve dinamik viskozite katsayısı (η) olarak adlandırılır (2.1) [7,9].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Burada τ , akışkan üzerinde oluşan kayma gerilmesini; $\dot{\gamma}$, akışkanın şekil değiştirme hızını temsil etmektedir. Viskoz davranışta bulunan bir cisim (örneğin sönüm elemanı) için de gerilme, şekil değiştirme hızı ($\dot{\epsilon}$) ve dinamik viskozite katsayısı ile hesaplanır (2.2) [9].

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (2.2)$$

Elastik davranış gösteren bir cisim ise *Hooke Kanunu*'na uyar. Bu kanuna göre gerilme, elastiklik modülü (E) ve birim şekil değişimi ile hesaplanır (2.3) [9].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.3)$$

Plastiklerin hepsinde viskoelastik davranış gözlemlenmektedir. Malzemenin cinsine göre bu davranış, doğrusal veya doğrusal olmayan viskoelastik davranış olarak ikiye

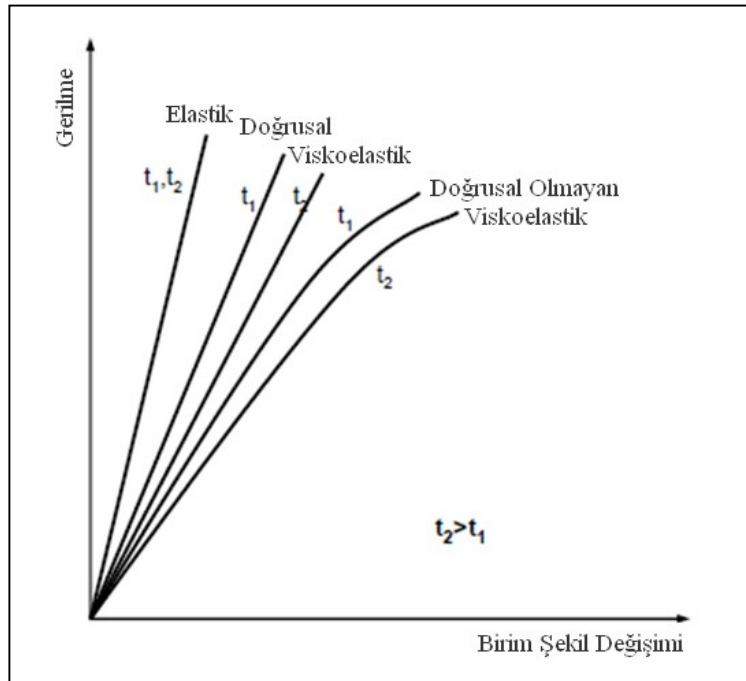
ayrılır. Doğrusal viskoelastik davranışta birim şekil değişimi sabittir, gerilme yalnızca zamana (t) bağlı bir fonksiyon haline gelir **(2.4)** [7,9].

$$\sigma = \varepsilon \cdot f(t) \quad (2.4)$$

Doğrusal olmayan viskoelastik davranış gösteren malzemelerde ise gerilme, birim şekil değişimi ve zamanın bir fonksiyonudur **(2.5)** [7].

$$\sigma = f(\varepsilon, t) \quad (2.5)$$

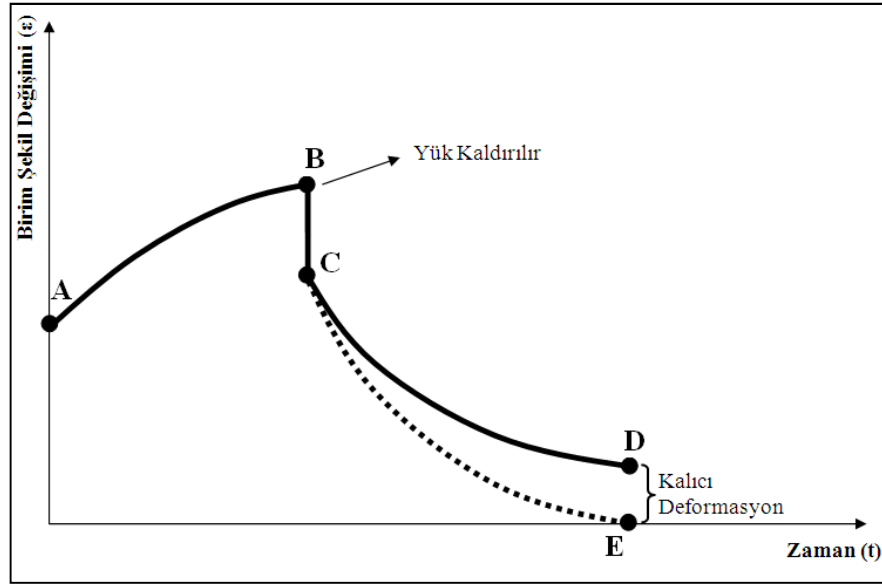
Şekil 2.16'de görüldüğü üzere; elastik malzemeler uygulanan gerilmeye, her zaman aynı birim şekil değişimi ile cevap verirler ve gerilme-birim şekil değişimi grafiği üzerinde bir doğru oluştururlar. Doğrusal viskoelastik malzemeler gerilme uygulandığı zaman, elastik malzemelere benzer olarak, gerilme-birim şekil değişimi grafiğinde bir doğru oluşturacak şekilde cevap verirler; ancak gerilme sonlandırılıp tekrar uygulanırsa, eğimi farklı olan başka bir doğru meydana getirirler. Doğrusal olmayan viskoelastik malzemelerde ise durum biraz daha karışıktır. Belirli bir noktaya kadar, gerilme artışı ile birim şekil değişimi artışı doğrusaldır; ancak bu noktadan sonra artış, doğrusallıktan sapar ve bir eğri oluşturmaya başlar. Gerilme kaldırılarak tekrar uygulanırsa da, eğimi farklı bir doğru ve buna bağlı bir eğri oluştururlar [7].



Şekil 2.16 : Elastik ve viskoelastik malzemelerin iki farklı zaman değerleri için gerilme-birim şekil değişimi karakteristikleri.

2.2.3.1 Sürünme ve toparlanma

Termoplastikler, sabit bir kuvvete, zamanla değişen bir birim şekil değişimi ile cevap verirler. Eğer kuvvet kaldırılırsa da benzer bir şekilde, zamanla değişen bir birim şekil değişimi ile eski hallerine dönmeye çalışırlar; ancak tam olarak eski hallerine dönemezler. Sürünme davranışının tespiti için sabit gerilme uygulanan plastiğin birim şekil değişimi-zaman grafiği incelenebilir (Şekil 2.17) [7,9].

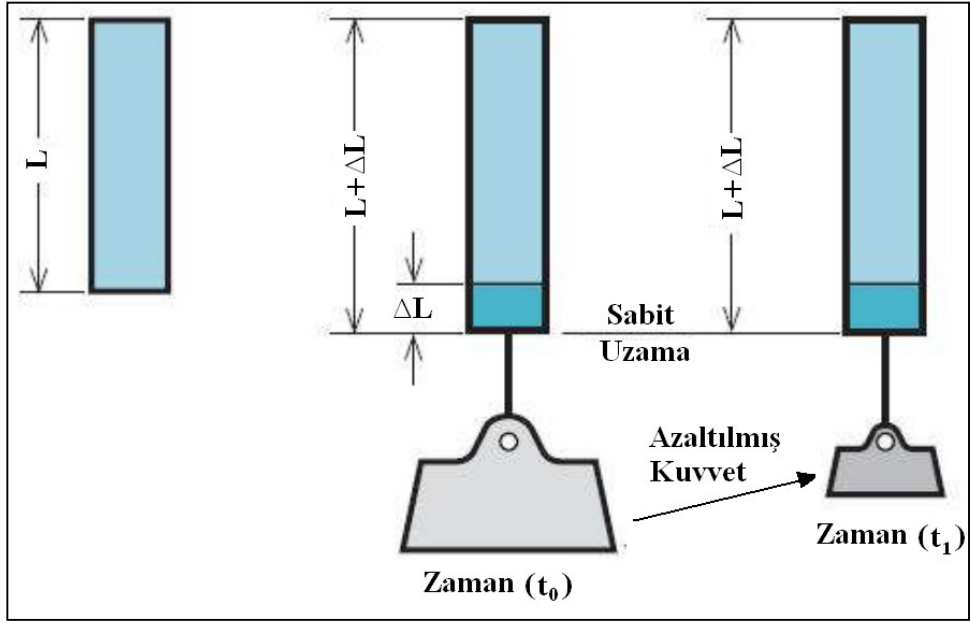


Şekil 2.17 : Bir plastiğin sürünme ve toparlanma davranışı [7].

Burada plastik, A noktasına kadar ani bir şekil değişimine uğratılır. Bir süre bu sabit gerilme altında tutulur, zaman içinde *viskoelastik* olarak şekil değiştirir ve B noktasına kadar sürünmeye uğrar. B noktasına gelindiği anda gerilmeye neden olan etki aniden kaldırılır ve plastik, C noktasına kadar ani bir elastik toparlanma gösterir ve önceki şekil değişiminin bir kısmını geri alır. C noktasından sonra plastik zaman içerisinde azalan bir eğimle şekil değişimini geri kazanmaya devam eder. D noktasına gelene kadar devam eden bu toparlanma, D noktasından sonra biter ve plastik son şeklini kazanmış olur. Grafikteki D-E noktaları arasındaki fark oluşan kalıcı deformasyondur [7,9].

2.2.3.2 Gevşeme

Belirli bir kuvvet etkisiyle bir miktar uzaması sağlanan plastiğin, bu uzama miktarını koruması için zaman içerisinde uygulanan kuvvetin azalması gereklidir. Viskoelastik malzemelerde görülen bu olay, *gevşeme* olarak adlandırılır (Şekil 2.18) [7].



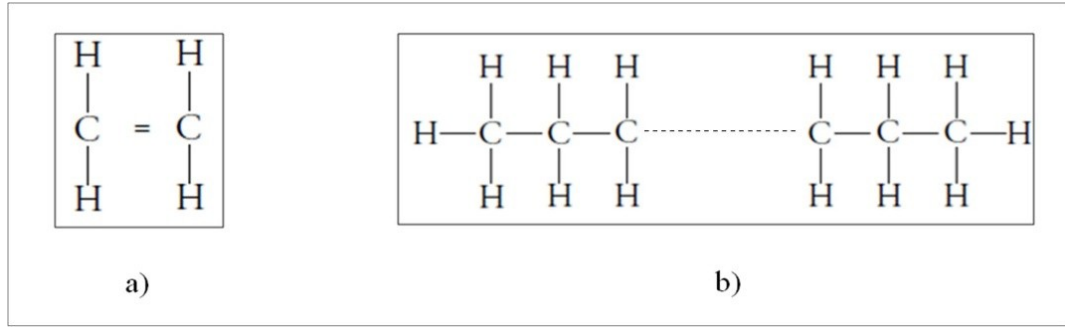
Şekil 2.18 : Plastiklerde görülen gevşeme olayı.

Burada L , çubuğun ilk boyu; ΔL , kuvvet sonrası oluşan uzamayı; t_0 başlangıç zamanını ve t_1 de bir süre sonraki zamanı temsil etmektedir. Bu olay molekül zincirlerinin, komşularıyla adım adım düzenli hale gelmesi olayıdır ve eğer yeteri kadar süre beklenirse, kuvvet miktarı sıfıra kadar düşebilir [7].

3. POLİETİLEN

3.1 Genel Bakış

Adından da anlaşılacağı gibi polietilen, etilen monomerlerinin polimerizasyon sonucu birleşmesiyle meydana gelen polimer çeşididir (Şekil 3.1). Katı polietilen ilk olarak 1935 yılında İngiliz kimyacılar Eric Fawcett ve Reginald Gibson tarafından üretilmiştir. Ticari olarak da ilk kez İngilizler tarafından 2. Dünya Savaşı sırasında radar kablolarının yalıtılmasında kullanılmıştır [11].



Şekil 3.1 : a) Etilen molekülü. b) Polietilen molekülü zinciri [7].

1950li yılların ortasına dek ticari polietilen, yüksek basınç altında üretiliyordu. Bu malzeme, nispeten dallı bir içyapıya sahipti ve sayı-ortalamalı molekül ağırlıkları genellikle 50,000’den azdı. 1954 yılından itibaren ise bu malzemeleri daha düşük sıcaklık ve basınç altında üretebilecek yöntemler geliştirildi (Phillips metodu, Ziegler metodu gibi). Bu sayede üretilen polietilen daha yoğun, daha sert ve daha yüksek yumuşama sıcaklığına sahipti. Üretilen bu malzemelere *Yüksek yoğunluklu polietilen* (YYPE) ismi verildi. Daha önceden üretilen polietilene de *düşük yoğunluklu polietilen* (DYPE) denmeye başlandı. 1970’lerin sonunda, yüksek basınçla ve düşük basınçla üretilen polietilenin arasında özelliklere sahip bir polietilen türü keşfedildi. *Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen* (DDYPE) adı verilen bu polietilen türü, film üretiminde hemen kullanılmaya başlandı. Bundan yaklaşık 15 yıl sonra da, yani 1985 yılında, *çok düşük yoğunluklu polietilen* (ÇDYPE) üretildi [12].

Kimyasal olarak saf polietilen reçine $C_{2n}H_{4n+2}$ formülü ile tanımlanan alkan molekülleri içerirler. Buradaki “n”, polimerizasyon derecesini, yani zincir içindeki

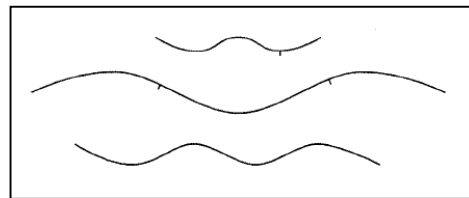
etilen monomeri sayısını gösterir. Diğer polimerler gibi polietilen de benzer moleküller içermez yani çok-dağılımlıdır (polydisperse). Polietilen reçineler, çeşitli iskelet uzunluklarında zincirlerden meydana gelirler. Tipik olarak, bir polietilen zincirinin uzunluğu, açıldığı zaman 10.000 Å'a kadar ulaşabilmektedir. Aynı şekilde, polimerizasyon derecesi de 100'den 250.000'e kadar bir aralıkta olabilir. Polimerizasyon derecesine bağlı olarak molekül ağırlıkları da 1400'den 3.500.000'e kadar çıkabilmektedir [12,13].

Polietilen doğası gereği kısmikristalin bir termoplastik malzemedir. Bu özelliğinden dolayı da kullanım alanı çok geniştir. Kristalin faz, malzemeye dayanım kazandırırken, amorf faz da esneklik kazandırır. Tamamen kristalin fazda polietilen olduğunu varsayalım. Bu malzeme aşırı gevrek olacağından kullanışsız olacaktır. Aynı şekilde, tamamı amorf fazda polietilen de çok esnek yapıda olacaktır ki bu da onu kullanışsız yapar. Polietilenin yapısının ne kadarı amorf ne kadarı kristalin olduğunu ifade etmek amacıyla *kristallik derecesi* kavramı kullanılmaktadır. Polietilenden üretilmiş bir numunenin kristallik derecesi, onun yoğunluğu ve rijitliği ile yakından ilişkilidir; hatta, bir çok fiziksel özelliği, onun kristallik derecesinden çıkarılabilir [11,13,14].

3.2 Bazı Polietilen Türleri

3.2.1 Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)

YYPE' nin kimyasal yapısı, saf polietilen malzemesine çok yakındır. Temel olarak, lineer yapısını bozmayacak ölçüde düzensizlikler içeren, düzgün bir yapısı vardır (Şekil 3.2). YYPE reçineler, tipik olarak, 940-970 kg/m³ arasında değişen yoğunluklara sahiptirler. Yapısındaki çok düşük miktarda dallanmalar sebebi ile, zaman zaman doğrusal polietilen (DPE) olarak adlandırılabilir [13].



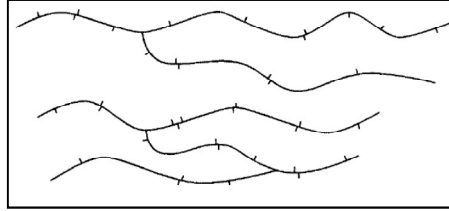
Şekil 3.2 : YYPE'nin şematik gösterimi.

YYPE'nin büyük oranda doğrusal yapıya sahip olması sayesinde, yüksek kristallik derecesi değerlerine ulaşılabilir. Bu sayede de polietilen türleri arasında en yüksek

rijitliğe ve en düşük geçirgenliğe sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı süt ve deterjan kutuları gibi depolama uygulamalarında; içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz boru hatları gibi iletim uygulamalarında kullanılmaktadır [13].

3.2.2 Düşük yoğunluklu polietilen (DYPE)

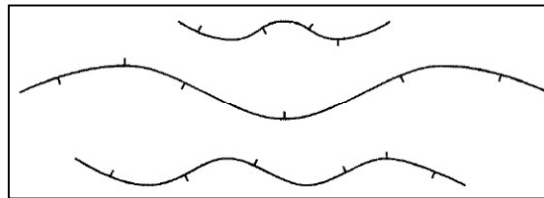
Bu malzemelere düşük yoğunluklu polietilen denmesinin sebebi, içerdiği ciddi boyutlardaki dallanmaların kristalizasyon işlemini engelleyerek nispeten düşük yoğunluklu malzeme meydana getirmesidir (Şekil 3.3). Bu dallanmalar, temel olarak etil ve bütilden oluşan uzun zincirler içerirler. DYPE'yi meydana getiren yüksek basınç polimerizasyonu işleminin doğası gereği, etil ve bütıl dalları sık bir şekilde demetlenmiş halde bulunurlar. DYPE reçineler, tipik olarak, 900-940 kg/m³ arasında değişen yoğunluklara sahiptirler [13].



Şekil 3.3 : DYPE'nin şematik gösterimi.

3.2.3 Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (DDYPE)

DDYPE, rastgele aralıklarla kısa alkil gruplarının bağlı olduğu doğrusal polietilen iskeletlerden oluşmaktadır (Şekil 3.4). DDYPE'de de bir miktar uzun zincirli dallanmalar bulunmaktadır; ancak bunlar, DYPE'deki kadar karmaşık dallanmalara sahip değildirler. Bu dallanmalar, kristalizasyonu bir miktar etkiler, bu sebeple DDYPE reçinelerin yoğunlukları 900-940 kg/m³ arasında değişen değerlere sahiptirler. [9,13].

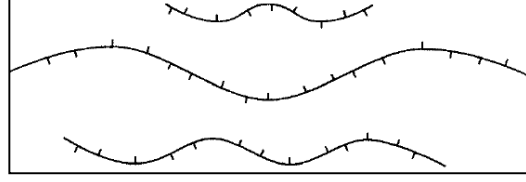


Şekil 3.4 : DDYPE'nin şematik gösterimi [13].

3.2.4 Çok düşük yoğunluklu polietilen (ÇDYPE)

Ultra Düşük Yoğunluklu Polietilen (UDYPE) olarak da adlandırılan ÇDYPE; DDYPE'nin, çok daha yoğun kısa-zincir dalları bulunduran özel bir formudur (Şekil

3.5). Bu yüksek dallanma seviyesi, kristalizasyonu önemli ölçüde engeller ve nispeten kristalin olmayan bir yapının ortaya çıkmasına sebep olur. Bu yüksek düzensizlik, yoğunluğun 860-900 kg/m³ aralığında kalmasını sağlar [13].



Şekil 3.5 : ÇDYPE'nin şematik gösterimi.

Çizelge 3.1'de polietilen çeşitlerinin bazı özellikleri gösterilmiştir [13].

Çizelge 3.1 : Polietilen çeşitlerinin bazı özellikleri.

Özellik	YYPE	DYPE	DDYPE	ÇDYPE
Yoğunluk (kg/m ³)	940 - 970	910- 940	900 - 940	860 - 900
Kristallik derecesi (yoğunluğa göre, %)	62 - 82	42 - 62	34 - 62	4 - 34
Kristallik derecesi (kalorimetreye göre, %)	55 - 77	30 - 54	22 - 55	0 - 22
Eğilme Modülü (73°C’de MPa)	1000 - 1550	240 - 330	275 - 1100	< 275
Çekme Modülü (MPa)	1070 - 1380	172 - 345	260 - 900	< 260
Çekme Akma Gerilmesi (MPa)	18 - 30	9 - 19	7,6 - 19	< 7,6
Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	22 - 30	8,3 - 30	13 - 45	17 - 34
Kopma Noktasındaki Çekme Uzaması (%)	10 - 1500	100 - 650	100 - 950	100 - 600
D tipi Shore Sertliği	66 - 73	44 - 50	55 - 70	25 - 55
Erime Sıcaklığı (°C)	125 - 132	98 - 115	100 - 125	60 - 100
Isıl bozulma sıcaklığı (0,45 MPa’da °C)	80 - 90	40 - 44	55 - 80	-

3.2.5 PE 80/PE 100

PE 80 ve PE 100, yüksek yoğunluklu polietilen sınıfına girerler. PE 80'in yoğunluğu yaklaşık 950 kg/m³; PE 100'ün yoğunluğu da yaklaşık 960 kg/m³ tür. PE'nin bu şekilde sınıflandırılması, ISO 4427 standardına göre yapılmaktadır. Bu standartta, malzemenin 50 yıl boyunca 20 °C sıcaklıkta sağlaması gerektiği MRS (Minimum Required Strength), yani en düşük dayanım değerlerine göre sınıflandırma mevcuttur (Çizelge 3.2) [15].

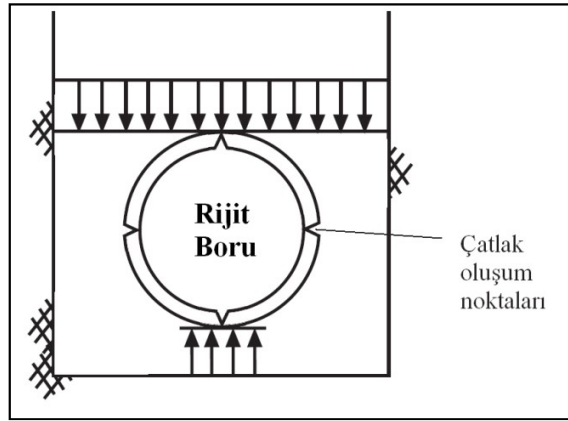
Çizelge 3.2 : ISO 4427'ye göre MRS değerleri.

Malzemenin Tanımı	50 yıl boyunca 20°C'deki MRS Değeri, Mpa
PE 100	10
PE 80	8
PE 63	6,3
PE 40	4
PE 32	3,2

4. DRENAJ BORULARI

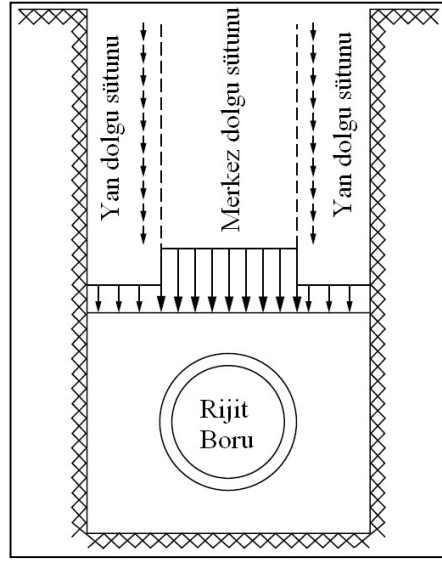
4.1 Rijit Drenaj Boruları

Rijit drenaj boruları, genellikle, %2'den daha fazla ϕ ap değişimine uğradıklarında hasara uğrayan borular olarak tanımlanabilir. Üzerilerindeki dolgu veya dolgunun da üzerinde oluşan başka bir yük sebebiyle kuvvete maruz kaldıklarında, bu kuvveti aynen iletirler. Bu iletim esnasında deformasyona uğrayamayan boru, kuvvet etkisi yeterince fazlaysa belirli noktalarından çatlamaya başlar ve kuvvet artarsa da bu noktaların birinden deformasyona uğrar, kırılır (Şekil 4.1) [11].



Şekil 4.1 : Gömülü rijit borularda kuvvet iletimi.

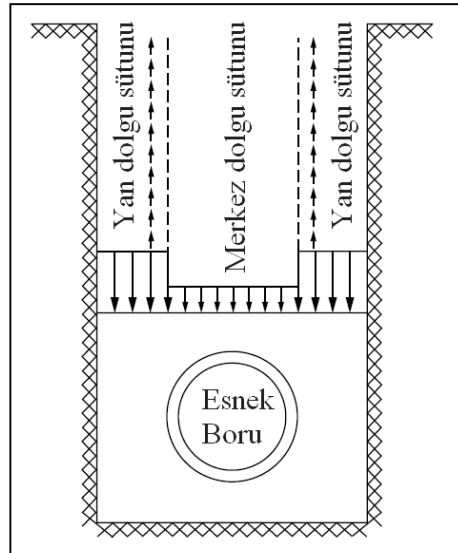
Martson yük teorisine göre; gömülü bir borunun taşıdığı yük, borunun ve yan dolgu sütunlarının davranışına göre şekillenir. Yan dolgu sütunları, borudan daha fazla sıkışabilir ise, oradaki dolgunun yükünü de boru taşır (Şekil 4.2). Bu sebeple boru etrafına uygun bir dolgu malzemesi kullanılması gereklidir [1].



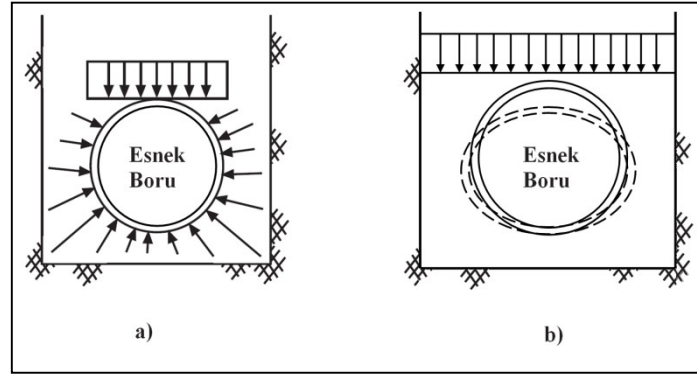
Şekil 4.2 : Rijit borularda oluşan dolgu yükleri [1].

4.2 Esnek Drenaj Boruları

Esnek borular, birçok yapısal avantaja sahiptirler. Genelde, düzgü olarak gömülmüş esnek borular, boru ile dolgu arasındaki etkileşimden dolayı, rijit borulardan çok daha derine gömülebilmektedirler. Bunun sebebi, esnek borunun, yan taraflarındaki dolgu malzemesinden daha fazla sıkışmasıdır (Şekil 4.3). Merkez dolgu sütunu ile yan dolgu sütunları arasında oluşan sürtünme kuvvetleri, boru üzerine düşen yükün bir miktar azalmasına sebep olmaktadır (Şekil 4.4) [1,11].



Şekil 4.3 : Esnek borularda oluşan dolgu yükleri [1].

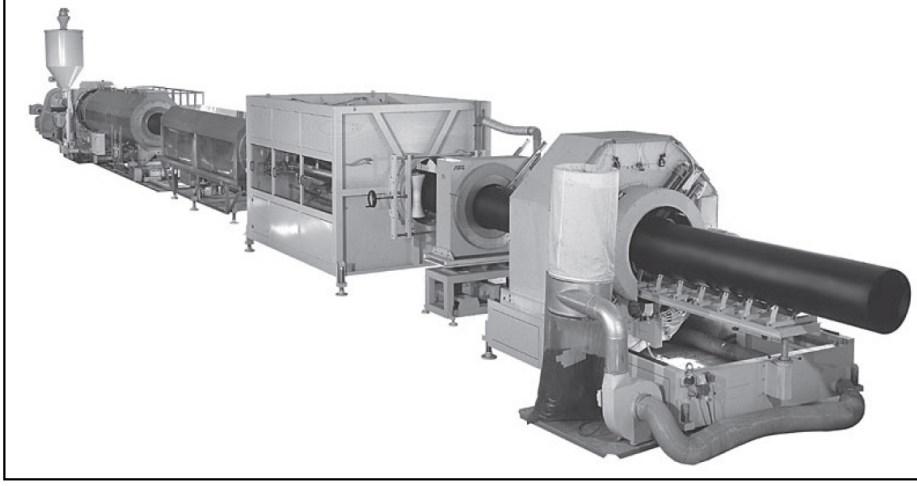


Şekil 4.4 : Esnek boruların toprak altı davranışının şematik gösterimi.
a) Kuvvet dağılımı. b) Deformasyon şekli [11].

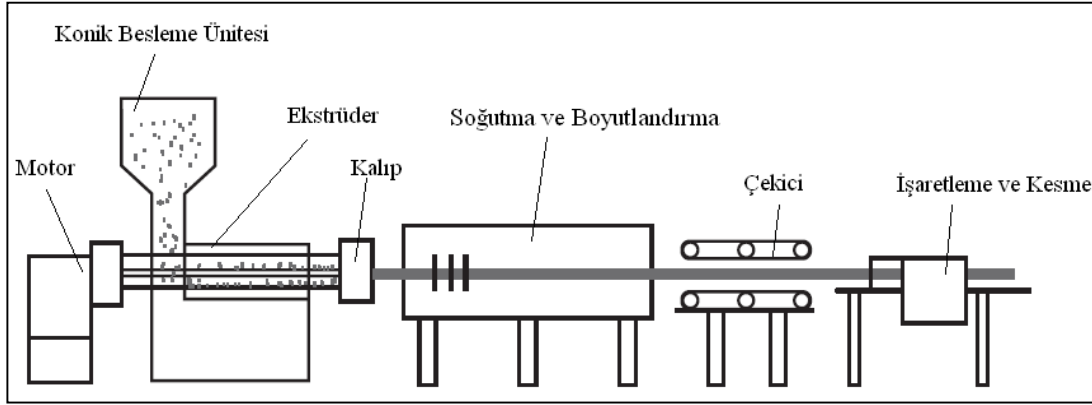
Termoplastikten imal edilmiş boruların tamamı, dökme veya sünek demir borular, çelik borular ve cam takviyeli borular esnek boru sınıfına girer. Polietilenden yapılmış esnek borular, %7,5 çap deformasyonuna kadar dayanabilmektedir. Plastik malzeme türlerinden üretilen boruların istenmeyen tek özelliği, viskoelastik özelliklerinden kaynaklanan sürünme olayıdır. Toprak altında sabit yüke maruz kalan plastik borular, zaman içerisinde deforme olarak kullanılamaz hale gelebilirler [1,16,17].

4.2.1 Ekstrüzyon ile plastik boru üretimi

En genel anlamıyla ekstrüzyon, bir hammadde üzerine basma gerilmelerinin uygulanarak bir kalıp içerisinde geçirilmesiyle şekil verme işlemidir. Plastiklerin ekstrüzyonunda, toz veya granül halindeki plastik hammadde ısı ve basınç yardımıyla eritilip bir kalıptan geçirilerek istenilen uzunluklarda boru, profil gibi yarı mamüllerin üretilir. Plastik ile metal malzemelerin ekstrüzyonla üretilmeleri arasındaki en temel fark, plastiklerin ekstrüzyonunda ısıtma, basma ve besleme gibi görevi üstlenen vidalı extrüderlerin kullanılmasıdır. Plastik boruların üretiminde ekstrüzyon yönteminin kullanılması hem üretim hızı hem de maliyeti açısından avantajlıdır. Şekil 4.5’de bir plastik boru ekstrüzyon hattı görülmektedir, Şekil 4.6’da da ekstrüzyon hattının şematik gösterimi verilmiştir [18,19,20].



Şekil 4.5 : Tipik bir ticari ekstrüzyon hattı [10].

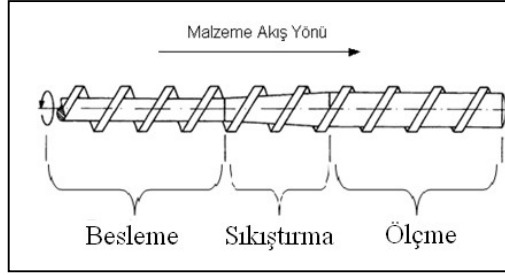


Şekil 4.6 : Ekstrüzyon hattının şematik gösterimi.

Plastik boruların ekstrüzyonu işleminde, ekstrüderde ısıtılan ve karıştırılan hammadde, ekstrüzyon kalıbından geçirilerek şekil alması sağlanır. Daha sonra soğuma ve son şekil verme işlemine tabi tutulan ürün, kesiciler tarafından istenilen uzunluklarda kesilir ve kullanıma hazır hale gelir [20].

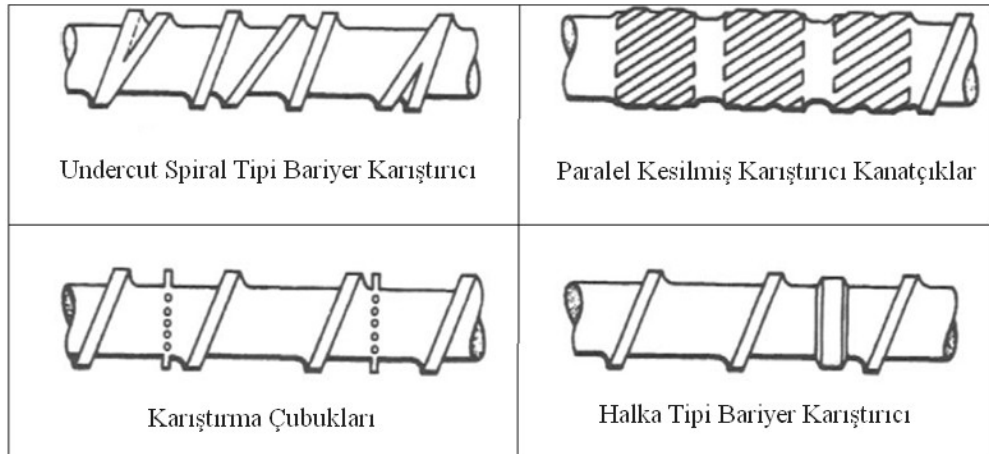
Ekstrüdere bağlı huniye konulan toz veya granül halindeki plastik hammadde, ekstrüder içerisine girerek vida tarafından ısıtılmaya ve karıştırılmaya başlanır. Ekstrüzyon vidasının görevi, ekstrüzyondan sürekli malzeme çıkışını sağlamak için hammaddenin akışını düzgün olarak sağlamak ve sıkıştırmaktır. Burada kullanılan vida üç bölümden oluşur; bunlar besleme, dönüşüm ve ölçme bölümleridir. Konik besleme ünitesinden giren toz veya granül halindeki malzeme vidanın besleme bölümüne girerek silindirin ileri doğru aktarılır. Vidanın sıkıştırma kısmında vida çapı artarak erimekte olan plastiği sıkıştırır ve karıştırarak homojen olmasını sağlar (Şekil 4.7). Erime işlemine yardımcı olması amacıyla kovan dışına ısıtıcılar

yerleştirilir. Vidanın ölçme kısmında ise plastik, istenilen sıcaklık ve basınca getirilmiş homojen bir karışım halini alır [20].



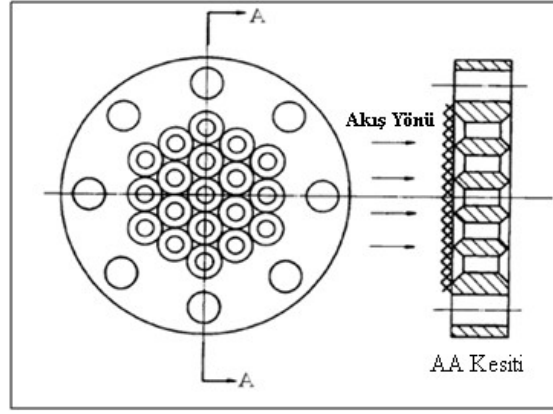
Şekil 4.7 : Ekstrüzyon vidasının bölümleri [9].

Çıkış ürünün kalitesini arttırmak amacıyla, ticari ekstrüderlerin vidalarında fazladan bölümler bulunabilmektedir. Örnek olarak, vida adımlarının azaltılması veya vida yönünün değiştirilmesi ile oluşturulmuş karıştırma bölgeleri bulunabilir. Böyle bir uygulamanın amacı daha homojen bir karışım elde edebilmektir ve bu tip bir uygulama, vidanın ölçme bölgesine yerleştirilir (Şekil 4.8) [9].



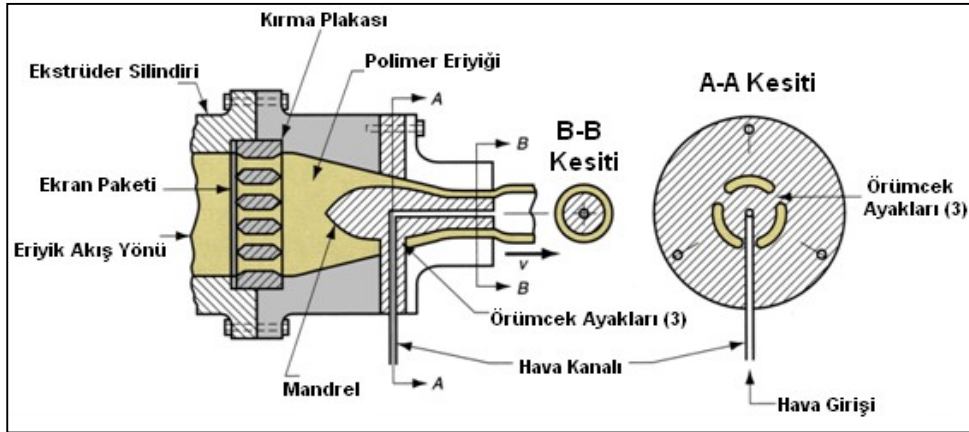
Şekil 4.8 : Çeşitli vida karıştırma bölgesi örnekleri.

Vidanın ölçme bölgesinden gelen hammadde, ekran paketi denilen filtreye doğru itilir. (Şekil 4.9). Plastik, asıl şeklini alacağı kalıba girmeden önce bu filtreden geçer. Burada kalıbı tıkayabilecek yabancı maddeler ve erimemiş plastik parçaları gibi istenmeyen unsurlar filtre edilir. Genellikle ekran paketlerinde, 120 μm 'den 150 μm 'ye kadar filtreleme yapılır. PE'den yapılmış basınçlı borular gibi uygulamalarda bu boyuttaki parçacıklar, ürün içerisinde çatlak oluşturabilecek hasarlara yol açabilir, bu yüzden bu gibi özel durumlarda ~45 μm 'ye kadar filtreleme yapan ekran paketi kullanımı, çıkış ürününün kalitesi açısından önemlidir [9].



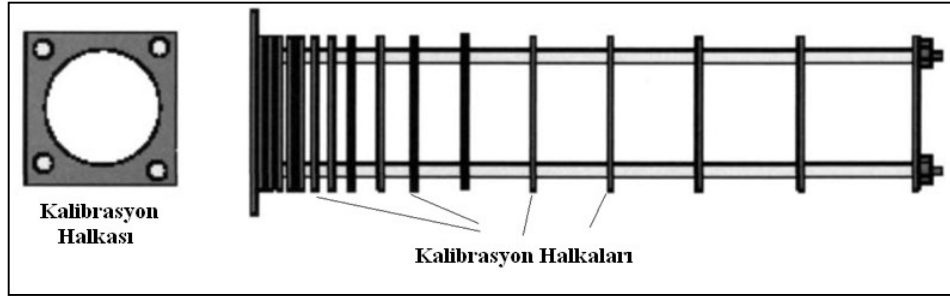
Şekil 4.9 : Ekran paketi.

Buradan çıkan homojen yapıdaki hammadde, son şeklini alacağı ekstrüzyon kalıbına girmeden önce, kalıbın önünde bulunan mandrelin etrafından dolaşır. Buradan da girişi parçalı, çıkışı ise tam dairesel olan kalıp içerisine girer. Kalıptan çıkan boru şeklindeki sıcak polimer, mandrelin içinden geçen hava kanalı sayesinde soğutulur. Boru üretiminde kullanılan ekstrüder kalıplarına örümcek kalıplar da denilmektedir. Şekil 4.10’da bir örümcek kalıp örneği görülmektedir [19].



Şekil 4.10 : Boru üretiminde kullanılan bir ekstrüder kalıbının şematik görünümü.

Kalıptan çıkan boru, hava ile çok az temas eder ve ani soğumanın gerçekleştiği soğutma ve boyutlandırma tankına girer. Borunun istenen şekilde boyutlandırılması için birkaç yöntem mevcuttur. Bunlardan biri, boyutlandırma halkaları veya tüpü bulunan vakumlu boyutlandırma tankı kullanmaktır. Şekil 4.11’de, boyutlandırma halkaları gösterilmiştir. Bu halkalar, ekstrüderden çıkan ürünün dış çapından biraz daha büyük bir iç çapa sahiptirler ve vakum ortamının oluşturulduğu, içi su dolu bir tankın içerisine yerleştirilirler. Kalıptan çıkan ürün, tankta bulunan düşük basınçla karşılaşınca genişlemeye çalışır ve boyutlandırma halkalarına dayanarak son şeklini alır [21].



Şekil 4.11 : Ürüne son şekli veren boyutlandırma halkaları [21].

Vakum tankı ile boyutlandırma yöntemi, küçük çaplı boru üretimlerinde güvenle kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan su sıcaklığı ve vakum seviyesi, oluşan ürünün fiziksel özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Kismikristalin polimerlerde, soğuk su kullanılarak ani soğutma yapılırsa, sıcak su kullanılarak yavaş soğutmaya göre nispeten az kristalleşme meydana gelir. Amorf polimerlerde ise hızlı soğutma, büzülme farklılıklarından dolayı yüksek artık gerilmeler oluşmaktadır. Daha büyük çaplı borular için vakum tankı veya su soğutmalı tank kullanımı pratik olarak zorluklara sebep olabilir. Bunun yerine su püskürtme gibi yöntemler kullanılabilir [21].

4.2.1.1 Korige boru üretimi

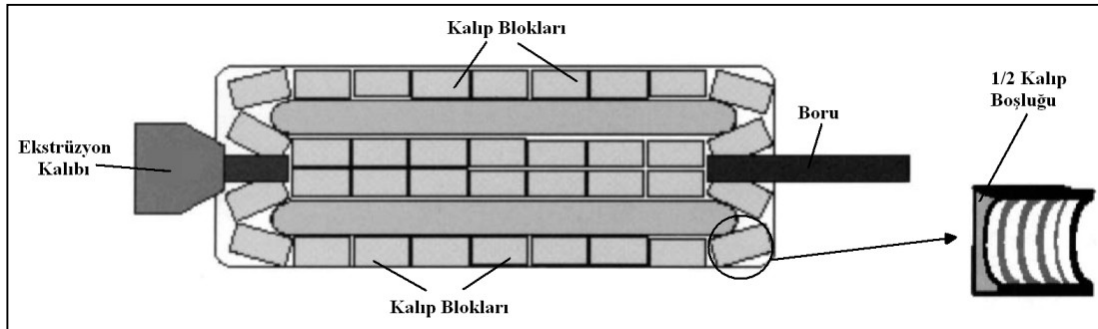
Özellikle yağmur suyu ve atık su iletim sistemlerinde kullanılan borular, toprak altına yerleştirildiklerinden dolayı, nispeten fazla yüklere maruz kalırlar ve herhangi bir hasara uğramadan bu yükleri taşımak zorundadırlar. Bunun için et kalınlığı fazla borular üretmek bir çözümdür; ancak, bunun yerine dayanımı arttıran profillere sahip boru üretmek, hem maliyet hem de boru ağırlığı açısından daha avantajlıdır. Korige borular da bu amaçla ortaya çıkmışlardır (Şekil 4.12).



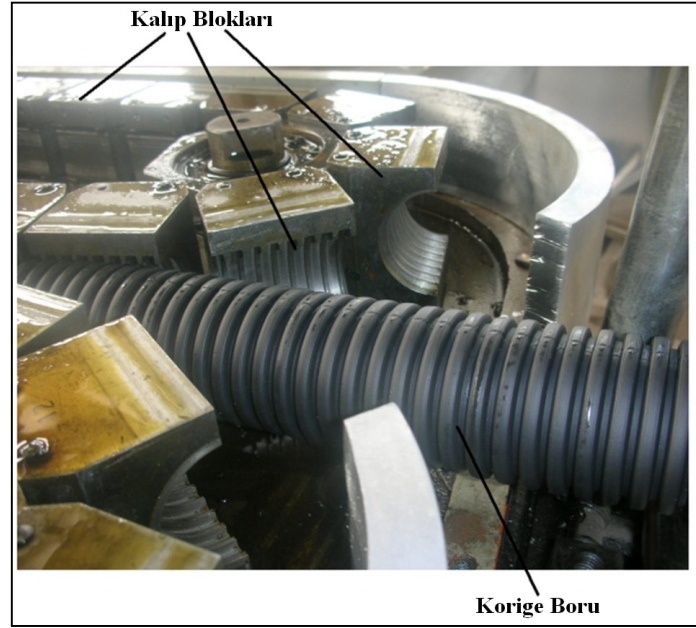
Şekil 4.12 : Bir korige boru örneği [22].

Korige boruların üretim şekli, profilsiz düz boru üretim şekline benzerdir; ancak korige borular, birden fazla hammaddenin aynı anda kullanıldığı *koekstrüzyon* yöntemiyle üretilirler. Borular, içteki boru katmanı ve dıştaki kaburga katmanı olarak iki katmandan oluşmaktadır. İçteki katman akışkanı taşıyan düz satırlı borudur. Dıştaki katman ise kaburgalı yapıdadır. Her iki katman da birbirlerine moleküler olarak bağlıdır. Dıştaki içi boş kaburgalı yapı, dolu yapıya yakın yük taşıyabildiği için hammadde tasarrufu ve borunun ağırlığının düşürülmesi için tercih edilmektedir [22].

Koekstrüzyonla üretilmiş çift katmanlı boru, ekstrüzyon kalıbından çıktıktan sonra korigasyonun negatif şekline sahip bir dizi kalıp içerisine girer ve burada soğutma ve kalıplandırma işlemi yapılır. Kalıplar kapandığında, içerilerindeki vakum sayesinde üstteki katmanı ayırarak kendi boşluğuna çeker ve şekillendirme gerçekleştirilir. İşlemin sürekliliğini sağlamak amacıyla bu kalıplar, tırtıl benzeri bir yapıyla dizilirler. Şekil 4.13’de, şematik korige boru kalıpları; Şekil 4.14’de ise korige boru kalıpları fotoğrafı gösterilmektedir [21].



Şekil 4.13 : Korige boru üretiminin şematik gösterimi.

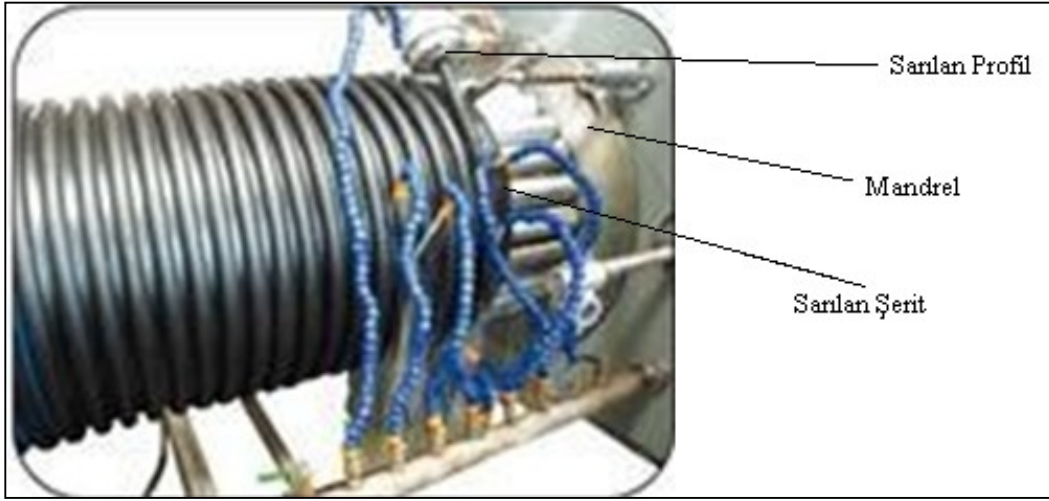


Şekil 4.14 : Korige boru kalıpları [23].

Boru şekilleri verildikten hemen sonra, soğutma işlemi yapılmalıdır. Aksi takdirde, kabartılan profiller tekrar yapışabilir. Bu amaçla bazı kalıp bloklarında su buharı püskürtme işlemi yapılmaktadır. Nispeten büyük korige boruların üretiminde, kalıp boşluğu boruya temas etmeden hemen önce soğuk suyla doldurulur. Boruya şekil verme esnasında kalıptaki su ısınırken boru soğur. Kalıp borudan ayrıldıktan sonra tekrar ilk pozisyonuna dönene kadar, içerisindeki ısınmış su tahliye edilir ve tekrar soğuk suyla doldurulur ve bu sayede çevrim tamamlanır [22].

4.2.1.2 Sarmal korige boru üretimi

Korige boru yöntemiyle üretilmeyecek kadar büyük çaplarda borular, sarmal korige boru yöntemiyle üretilirler. Bu yöntemde boru çapıyla aynı çapta bir mandrelin üzerine, şerit halinde ekstrüde edilen malzeme sarılır. Bu işlem ile aynı anda, dayanımı sağlayan profil de ekstrüzyon yöntemiyle üretilir ve şeritin üzerine sarılır. Bu yöntemde, mandrel hem kendi etrafında döner, hem de eksen yönünde ilerler. Böylece mandrelin uzunluğu kadar bir boru üretimi gerçekleşir (Şekil 4.15). Yöntemin avantajı, mandrelin dönme hızı ile aksenal ilerleme hızının değiştirilerek istenilen hatveye, aynı zamanda dayanıma, sahip borular üretilir [22].



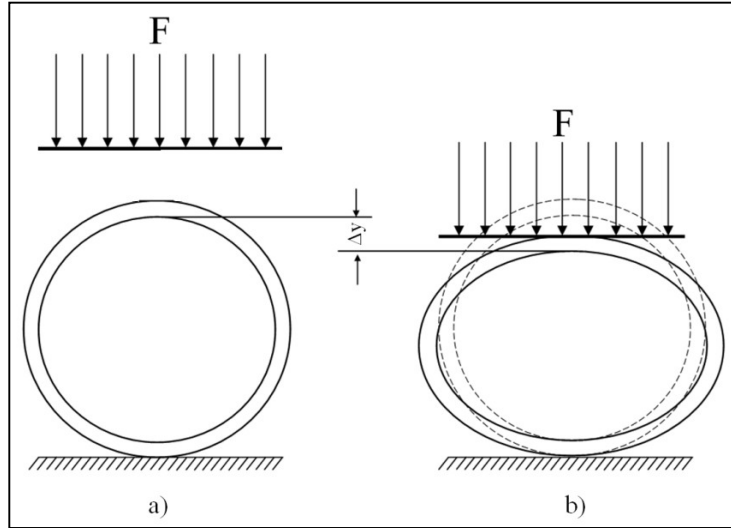
Şekil 4.15 : Sarmal korige boru üretimi [24]

5. PLASTİK BORULARIN (DRENAJ BORULARI) ÜRETİMİNDE KULLANILAN BAZI STANDARTLAR

5.1 Halka Rijitliği Standartları

Plastik boruların üretimi için kullanılan standartlardan bir kısmı üretilen borunun yeterli dayanıma sahip olup olmadığının test edilmesini içerir. Halka rijitliği, termoplastik borular ve bağlantı elemanlarının dayanımını temsil eden bir terimdir. DIN16961-2 ve ISO 9969’da İngilizce olarak “ring stiffness” olarak geçmektedir; ancak, ASTM D-2412’de “pipe stiffness” olarak adlandırılır. İsimleri farklı olmasına karşın, ISO 9969 ve ASTM D-2412’de halka rijitliğinin belirlenmesi, benzer yollarla yapılır. Her iki standartta da deney numunesi üzerine sabit deformasyon hızı oluşturacak şekilde kuvvet uygulanır, yani kuvvet sabit değildir. Buna karşın DIN 16961-2:2000’de uygulanan kuvvet sabittir. [25,26,27]

ASTM D-2412, Amerika Birleşik Devletleri’nde kullanılan bir standarttır, terim olarak boru rijitliğinin (pipe stiffness) bulunmasını amaçlar. ISO 9969, Avrupa’da kullanılan bir standarttır ve halka rijitliğinin (ring stiffness) bulunmasını amaçlar. DIN 16961-2 ise Alman standardıdır ve halka rijitliğinin (ring stiffness) bulunmasını amaçlar. Diğerlerinden farklı olarak DIN 16961-2’de paralel levha testi yerine levhalarla numune arasına çelik parçalar konularak da test yapılabilir. Bu üç standartta da numuneler toprak altına yerleştirilmeden test edilir, ancak uygulanan yöntemler farklılık gösterir. Şekil 5.1’de, halka rijitliğinin belirlenmesine kullanılan paralel levha testinin şematik resmi gösterilmektedir. Burada Δy , borunun iç çapındaki değişimi temsil etmektedir.



Şekil 5.1 : Paralel levha testinin şematik gösterimi. a) Kuvvet uygulanmadan önce. b) Kuvvet uygulandıktan sonra.

5.1.1 ASTM D-2412

ASTM D-2412 standardı, “Plastik Boruların Dış Yük Karakteristiklerinin Paralel Levha Metodu ile Belirlenmesinin Test Standardı” olarak tanımlanmıştır. Test, kısa boylu bir boru numunesinin iki paralel levha arasında kontrollü bir şekilde sabit deformasyon hızıyla sıkıştırılması ile yapılır. Sonuç olarak borunun yük altındaki deformasyon karakteristiği elde edilir. Eğer kırılma, yüzey çatlaması, delaminasyon veya parçalanma olursa; o andaki yük ve oluşan deformasyon kaydedilir. Bu test sonucu elde edilen, plastik borunun dış yük özellikleri, şu amaçlar için kullanılmaktadır:

- Borunun rijitliğinin belirlenmesi. Bu rijitlik, boru boyutlarının ve borunun yapıldığı malzemenin fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur.
- Mühendislik tasarımında kullanılmak üzere, boru numunesinin yük altındaki deformasyon karakteristiğinin ve boru rijitliğinin belirlenmesi.
- Plastik boru ve ek parçalarının, boyutları ve deformasyon özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi.
- Boru biçimindeki çeşitli plastiklerin karakteristiklerinin karşılaştırılması.
- Test içerisinde oluşabilecek bazı özel durumların meydana geldiği deformasyon ve yük direncinin ölçülmesi [25].

Deney için gerekli basma makinesi, $12,5 \pm 0,5$ mm/dak deformasyon hızını sağlayabilmelidir. Kullanılacak levhalar çelikten yapılmış, düz, pürüzsüz ve temiz olmalıdır. Levha kalınlıkları, test esnasında herhangi bir hasara uğramayacak ölçüde

olmalı ve 6 mm'den ince olmamalıdır. Levha uzunluğu numunenin boyuna eşit veya daha büyük olmalıdır ve levha genişliği en az, maksimum boru deformasyonu olduğu sırada bile numuneye temas edebilecek durumdan 150 mm fazla olmalıdır.

Termoplastik borular için test numunesi uzunluğu 300 ± 3 mm olmalıdır. Her boru örneğinden en az 3 adet numune çıkarılarak test edilmelidir. Boru numuneleri testten önce 23 ± 2 °C sıcaklıktaki hava ile 4 saat şartlandırılmalıdır [25].

Her numune için aşağıdaki ölçümler yapılmalıdır:

- Numune çapında eşit aralıkta açılar oluşturacak şekilde en az 4 adet numune uzunluğu ölçümü yapılmalı ve bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınarak kaydedilmelidir.
- Numune duvar kalınlığı ölçümleri, ASTM D-2122'ye uygun olarak yapılmalı ve kaydedilmelidir.
- Ortalama dış çap, 0,2 mm hassasiyetliğinde ölçülmeli ve kaydedilmelidir.

Teste başlamadan önce numuneler, eksenleri levhalarla uzunlamasına paralel olacak şekilde ve test makinesinin tam merkezine yerleştirilmelidir. Daha sonra, numuneyi olduğu yerde tutacak kadar bir ön yük uygulanmalı ve levhaların bu pozisyonu, deformasyonun sıfır olduğu nokta olarak kabul edilmelidir. Numuneler, $12,5 \pm 0,5$ mm/dak hızında sıkıştırılmalı ve bu esnada da uygulanan yük ve o yüke karşılık gelen deformasyon miktarı (levhaların bağıl hareket miktarı) kaydedilmelidir. Çizgisel çatlama veya yüzey çatlama, duvar çatlama, duvar delaminasyonu, kırılma olaylarından herhangi birinin olduğu yük ve deformasyon miktarı gözlenmeli ve kaydedilmelidir. Sıkıştırma işlemi, artan deformasyon miktarına karşılık, deformasyona neden olan yük miktarının artışının sona erdiği ana kadar yapılmalıdır. Bu anda, yük-deformasyon miktarı eğrisinin en üst noktasına gelmiş demektir ve test sonlandırılmalıdır. Test sonlandırıldıktan sonra, eğer gerekli ise, aşağıdaki hesaplamalar yapılır [25]:

- Boru rijitliği (PS), denklem (5.1)'den hesaplanır. Burada Δy , iç çaptaki değişim miktarını; F, de kuvveti temsil eder.

$$PS = F/\Delta y \quad (5.1)$$

- Rijitlik faktörü (SF) denklem (5.2)'den hesaplanır. Burada r, ortalama yarıçaptır ve dış çaptan, boru duvarı kalınlığı çıkarılıp sonucun ikiye bölünmesi ile bulunur.

$$SF = 0.149 \cdot r^3 \cdot PS \quad (5.2)$$

- Borunun yüzde birim şekil değişimi, P, denklem (5.3)'den hesaplanır. Burada d, ortalama iç çaptır.

$$P = (\Delta y/d) \cdot 100 \quad (5.3)$$

5.1.2 ISO 9969

ISO 9969:2007 standardı, “Termoplastik Borular: Halka Rijitliğinin Hesaplanması” olarak tanımlanmıştır. Bu standartta, boru numunelerini sabit hızda şekil değiştirmeye zorlanır; uygulanan kuvvetin ve boru numunesinin şekil değişiminin ölçülmesi ile de halka rijitliği hesaplanır. Yatay olarak sabitlenmiş bir boru numunesi, sabit hızda hareket eden iki paralel levha arasına konularak radyal olarak basmaya maruz bırakılır. Bunun sonucu olarak bir kuvvet-şekil değişimi grafiği meydana gelir. Bu grafik üzerinde % 3'lük birim şekil değişimine karşılık gelen kuvvet değeri tespit edilir ve bu kuvvet kullanılarak da halka rijitliği hesaplanır. Numuneye uygulanacak şekil değişim hızı değeri sabit bir değer değildir, numune çaplarına göre değişkenlik gösterir. Çizelge 5.1'de, borunun anma çapına (d_n) göre uygulanması gereken şekil değişimi hızı değerleri gösterilmektedir [26].

Çizelge 5.1 : Boru anma çapına karşılık gelen şekil değiştirme hızı değerleri [26].

Borunun anma çapı, d_n , [mm]	Şekil değişimi hızı [mm/dak]
$d_n \leq 100$	$2 \pm 0,1$
$100 < d_n \leq 200$	$5 \pm 0,25$
$200 < d_n \leq 400$	$10 \pm 0,5$
$400 < d_n \leq 710$	20 ± 1
$d_n > 710$	$0,03 \times d \pm 5 \%$

Deney için, yeterince uzun bir borudan a,b ve c olarak adlandırılan 3 parça kesilmelidir. Öncelikle bir boru numunesi kesilerek “a” numunesi olarak adlandırılmalı; daha sonra boru 120° döndürülmeli ve başka bir numune kesilerek “b” numunesi olarak adlandırılmalıdır. Son olarak da boru aynı yönde 120° daha döndürülmeli ve bir numune daha kesilerek “c” numunesi olarak adlandırılmalıdır. Tüm bu numuneler, boru eksenine dik olarak kesilmeli ve her bir parçanın uzunluğunun, standart içerisinde belirlenen kriterlere uygun olmasına dikkat edilmelidir. Bu kriterlere göre; anma çapı 1500 mm'ye eşit ve daha az olan borular için deney numunesi ortalama uzunluğu 300 ± 10 mm; anma çapı 1500 mm'den daha fazla olan borular için ise deney numunesi ortalama uzunluğu, en az anma çapının

0.2 katı kadar olmalıdır. Burada boru numunesi ortalama uzunluğunun tespiti için numune üzerinden üçten altıya kadar ölçüm yapılmalıdır. Bu ölçümler, numunenin çapı üzerine eşit açılar oluşturacak şekilde yapılmalıdır. Boru anma çapı değerine karşılık gelen uzunluk ölçümü sayısı, Çizelge 5.2’de belirtilmiştir [26].

Çizelge 5.2 : Uzunluk ölçümü sayısı.

Borunun anma çapı, d_n , [mm]	Uzunluk ölçümü sayısı
$d_n \leq 200$	3
$200 < d_n \leq 500$	4
$d_n \geq 500$	6

Deney numuneleri üretimden sonra 24 saat boyunca 23 ± 2 °C sıcaklığında şartlandırılmalıdır. Deney için öncelikle bir ön-yük uygulanmalıdır. Bu yük, iç çapı 100 mm’ye eşit veya 100 mm’den daha küçük borular için 7,5 N olmalıdır. 100 mm’den daha büyük iç çapa sahip deney numuneleri için ise denklem (5.4)’ten ön-yük değeri hesaplanmalıdır.

$$F_0 = 250 \cdot 10^{-6} \cdot d_n \cdot L \quad (5.4)$$

Burada F_0 , ön-yük değerini; L de boru numunesi uzunluğunu temsil eder. Bu önyüklemeden sonra Çizelge 5.1’de belirtildiği üzere şekil değişimi hızı uygulanır. Bu esnada kuvvet ve şekil değişimi değerleri ölçülür ve kaydedilir. Şekil değişimi, anma çapının en az %3’ü olana kadar numune sıkıştırılmalıdır [26].

Üç adet deney sonucunda ortaya çıkan sonuçlara göre, Üç adet halka rijitliği değeri denklem (5.5a), (5.5b) ve (5.5c)’ye göre hesaplanır.

$$S_a = \left(0,0186 + 0,025 \frac{y_a}{d_i} \right) \cdot \frac{F_a}{L_a y_a} \cdot 10^6 \quad (5.5a)$$

$$S_b = \left(0,0186 + 0,025 \frac{y_b}{d_i} \right) \cdot \frac{F_b}{L_b y_b} \cdot 10^6 \quad (5.5b)$$

$$S_c = \left(0,0186 + 0,025 \frac{y_c}{d_i} \right) \cdot \frac{F_c}{L_c y_c} \cdot 10^6 \quad (5.5c)$$

Burada S_a , S_b ve S_c sırasıyla a,b ve c numunelerinin halka rijitliklerini; y_a , y_b ve y_c % 3,0 birim şekil değişimlerine karşılık gelen deformasyonu; d_i numunelerin iç çapını; F_a , F_b ve F_c % 3 şekil değişimine karşılık gelen kuvvet değerlerini; L_a , L_b ve L_c

numunelerin uzunluklarını belirtir. Halka rijitliği değeri de bu üç değerin ortalaması alınarak denklem (5.6)‘dan bulunur.

$$S = \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \quad (5.6)$$

Bulunan bu halka rijitliği değeri, boru numunesinin S_N (nominal stiffness) sınıfına göre değerlendirilir [26].

5.1.3 DIN 16961-2:2010-03

DIN 16961 standardı, “İç yüzeyi düzgün, dış yüzeyi profilli termoplastik borular ve bağlantı elemanları” konusunda bir standarttır. Bu standardın 2 bölümü mevcuttur. Birincisi “DIN 16961-1:2010-3” olarak kullanılan “Bölüm 1: Boyutlar” kısmıdır. Diğer bölüm ise “DIN 16961-2:2010-03” olarak tanımlanan “Bölüm 2: Teknik Teslim Şartları”dır. Birinci bölümde, üretilecek termoplastik boru ve bağlantı elemanlarının boyutları hakkında tanımlamalar yapılmıştır. İkinci bölümde ise üretilen boru ve bağlantı elemanlarının dayanım, su geçirmezlik gibi özellikleri hakkında tanımlamalar bulunmaktadır [27].

DIN 16961-2:2010-03’e göre halka rijitliği, hem sayısal olarak hesaplanır hem de deneysel olarak tespit edilir. Daha sonra bu iki değer karşılaştırılarak ürünün standarda uygun olarak üretilip üretilmediği tespit edilir. Öncelikle denklem (5.7)’den, teorik halka rijitliği değeri, $S_{R24(te)}$, tespit edilir. Burada E_{c24} , 24 saatlik sürünme modülü; I , 1 tane profilin atalet moment; r_n de nötral eksene kadar olan boru yarıçapıdır. I hesaplanırken, 1 hatve için hesaplanmalıdır [27].

$$S_{R24(te)} = \frac{E_{c24} \cdot I}{r_n^3} \quad (5.7)$$

E_{c24} değeri, standart içerisinde açıklanan sürünme testine göre belirlenir veya bunun yerine, Çizelge 5.3’ten de uygun değer okunabilir.

Çizelge 5.3 : En düşük sürünme modülü değerleri [27].

Yükleme Süresi	Sürünme Modülü ^a [kN/m ²]			
	PE-HD	PVC-U	PP	
			Homopolimer	Kopolimer
1 Dakika (kısa süreli) E_{ck}	8×10^5	30×10^5	$12,5 \times 10^5$	8×10^5
24 Saat E_{c24}	$3,9 \times 10^5$	22×10^5	$6,9 \times 10^5$	$4,4 \times 10^5$
2000 Saat E_{c2000}	$2,5 \times 10^5$	18×10^5	$4,8 \times 10^5$	$3,1 \times 10^5$
2 yıllık E_{c2}^b	$2,0 \times 10^5$	17×10^5	$4,0 \times 10^5$	$2,6 \times 10^5$
50 yıl E_{c50}^b	$1,5 \times 10^5$	15×10^5	$3,1 \times 10^5$	$2,0 \times 10^5$
^a Yüksek değerler, onaylanmış test yerlerinde deney yapılmasını gerektirir. ^b Bu değerlere, 2000 saat değerleri kullanılarak ekstrapolasyon ile ulaşılabilir. NOT Bkz. ATV-DVWK-A 127.				

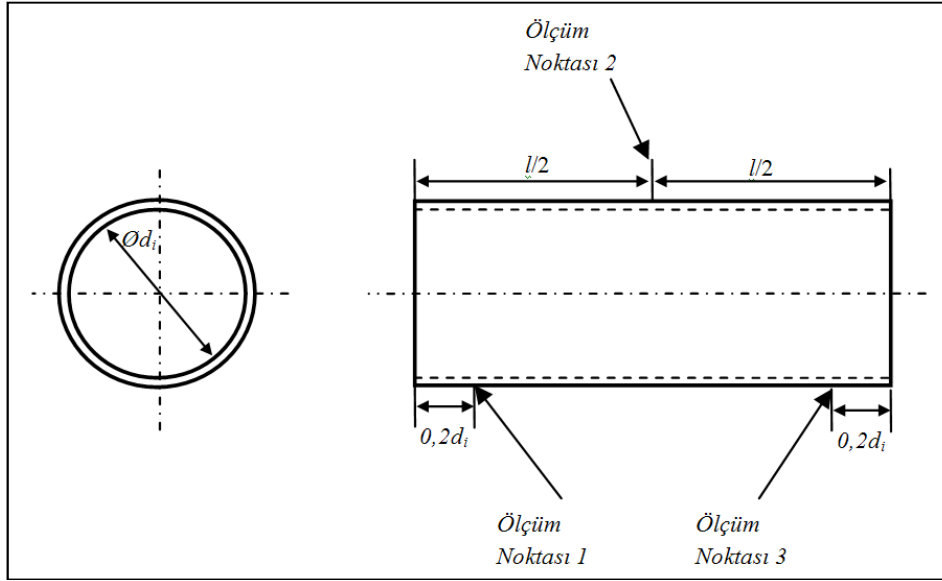
$S_{R24(te)}$ değeri, yukarıdaki denklemden belirlendikten sonra deney aşamasına geçilir. Deneyde uygulanacak kuvvet denklem (5.8)'e göre belirlenir. Δd_{iv} , izin verilen ortalama dikey çökme miktarı; L, deney numunesi uzunluğudur. ξ , deformasyon katsayısıdır ve ξ , standartta verilmiş çizelgeden okunur (Çizelge 5.4). S_{R24} testlerinde, izin verilen iç çap maksimum çökme miktarı, iç çapın %3'ü kadardır ve kullanılan deformasyon katsayısı değeri, buna karşılık gelen değerdir [27].

$$F = \frac{S_{R24(te)} \cdot \Delta d_{iv} \cdot L}{\xi} \quad (5.8)$$

Çizelge 5.4 : Yüzde deformasyon – deformasyon katsayısı.

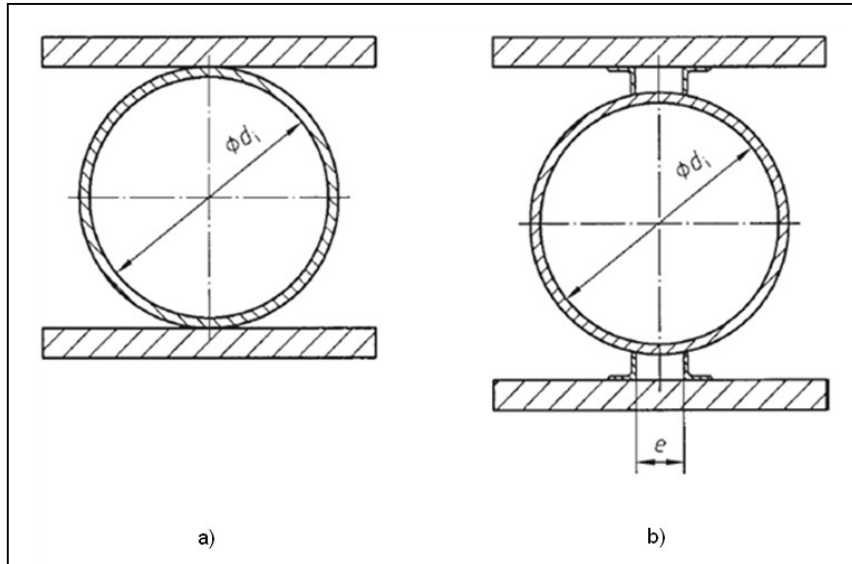
Deformasyon $\Delta d_{iv}/d_i$ [%]	Deformasyon Katsayısı, ξ [-]
0	0,1488
1	0,1508
2	0,1528
3	0,1548
4	0,1568
5	0,1588
6	0,1608
7	0,1628
8	0,1648
9	0,1668
10	0,1688
11	0,1708
12	0,1728
13	0,1748
14	0,1768
15	0,1788
NOT: Ara değerlere, doğrusal interpolasyon yapılarak ulaşılabilir.	

Test numunelerinin boyları 1m’yi geçmemek kaydı ile çapın iki katına eşit veya bu değerden daha büyük olmalıdır. Numuneler kesilirken eksenlere dik olarak kesilmelidir. Test, 23 ± 2 °C sıcaklığında yapılmalıdır. Deney kuvveti, boru eksenine dik olarak uygulanmalıdır. Boru iç çapı değeri, d_i , 3 farklı noktadan ölçülmelidir. Bunlardan birisi tam orta nokta, diğer ikisi de köşelerden iç çapın 0.2 katı kadar uzaklıklarda yapılmalıdır; ancak bu uzaklık 50 mm’yi geçmemelidir. Bu üç ölçümün aritmetik ortalamaları alınarak not edilmelidir. Şekil 5.2’de ölçüm noktaları gösterilmiştir [27].



Şekil 5.2 : İç çap değerleri ölçüm noktaları.

Test kuvveti, numune uzunluğu boyunca ve numuneye dik olarak uygulanmaktadır. Numune, Şekil 5.3a'daki gibi iki paralel levha arasında konularak veya Şekil 5.3b'deki gibi iki levha arası çelik parçalar konularak sıkıştırılabilir. Ancak Şekil 5.3b'deki gibi yerleşim yapılması durumunda "e" değeri, iç çapın 0,05 katını geçmemelidir. Her iki durumda da numune duvarına zarar vermemek için büyük özen gösterilmelidir [27].



Şekil 5.3 : Numunenin levhalar arasında yerleştirilmesi. a) Direkt yerleştirme. b) Çelik parça konularak yerleştirme [27].

Kuvvet uygulanmadan önce numunenin iç çapı ölçülmeli ve not edilmelidir. Kuvvet, on dakika içerisinde düzenli olarak artırılarak uygulanmalı ve onuncu dakika sonunda da test kuvvetine ulaşılmalıdır. Bu andan sonra da birinci, altıncı ve yirmi

dördüncü saatlerde numune iç çapı ölçülmelidir. Yirmi dört saat sonunda meydana gelen dikey çökme değeri kullanılarak, denklem (5.9)'dan ortalama dikey çökme (Δd_{ivm}) hesaplanır.

$$\Delta d_{ivm} = \frac{\Delta d_{iv}}{d_i} \quad (5.9)$$

Bu değerin Çizelge 5.4'teki karşılığı, doğrusal interpolasyon ile denklem (5.10)'dan hesaplanarak, düzeltilmiş deformasyon katsayısı ($\xi_{(\Delta divm)}$) değeri elde edilir. Düzeltilmiş deformasyon katsayısı, test sonucu elde edilen çökme değerinin kullanılması ile elde edildiğinden dolayı bu şekilde adlandırılmıştır. Buradan elde edilen deformasyon katsayısı değeri ile de denklem (5.11)'den S_{R24} değeri hesaplanır. [27].

$$\xi_{\Delta divm} = 0,1488 + (\Delta d_{ivm} \cdot 0,002) \quad (5.10)$$

$$S_{R24} = \frac{F}{\Delta d_{ivm} \cdot L} \cdot \xi_{\Delta divm} \quad (5.11)$$

Bulunan bu S_{R24} değeri ile numune sınıflandırılır ve bu sayede, kullanılabileceği koşullar ve dayanım özellikleri tespit edilmiş olur.

6. TEST DÜZENEĞİ VE NUMUNELERİN ÖZELLİKLERİ

6.1 Test Düzeneği ve Ekipman

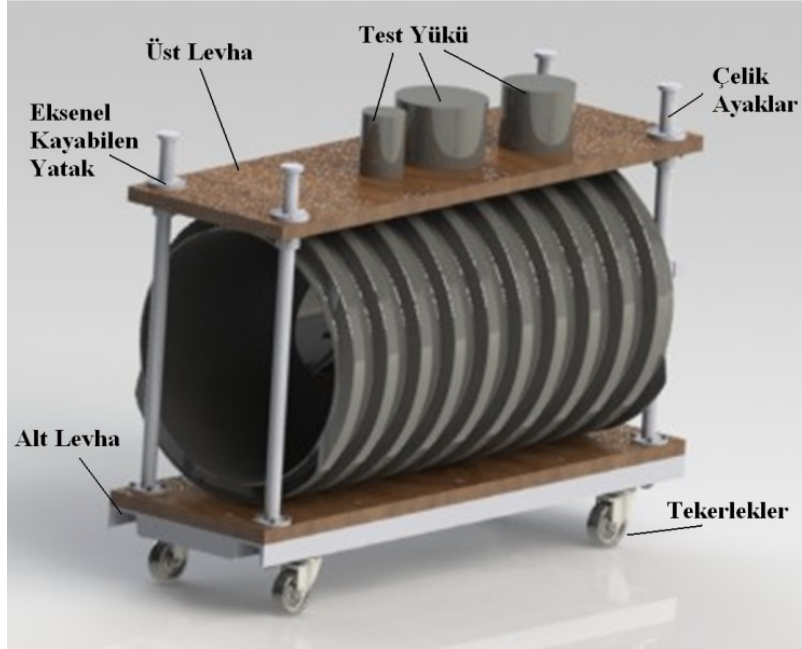
Testin yapıldığı ortam sıcaklığı, bir klima ile 23 °C’ de tutulmuştur. Numuneler, teste tabii tutulmadan en az 4 saat önce ortam içerisine alınarak bu sıcaklıkta şartlandırılmışlardır. Testlerde, basit bir paralel levha test aleti kullanılmıştır. Bu alet, 2 çelik levhanın 4 kol üzerine oturtulması ile elde edilmiştir. Alet üzerine, düşey çökme miktarını tespit etmek amacıyla bir komparatör bağlanmıştır. Test yükü olarak 10’ar, 5’er ve 1’er kg’lık kum çuvaları kullanılmıştır. Her numune üzerine, 4 adet strain-gauge yapıştırılarak 24 saat boyunca her 2 dakikada bir olmak üzere birim şekil değişimi değerleri alınmıştır. Bu değerler de, testler esnasında bir bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 : Test düzeneği.

6.1.1 Test Aleti

Test aleti; elik bir levhanın üzerine sabitlenmiş 4 adet elik çubuk ve bu çubukların üzerine oturtulan ve rahatça kayabilen başka bir elik levhadan oluşmaktadır. Ayrıca alet, tekerlekler üzerine oturtularak rahatça taşınabilmesi sağlanmıştır (şekil 6.2).

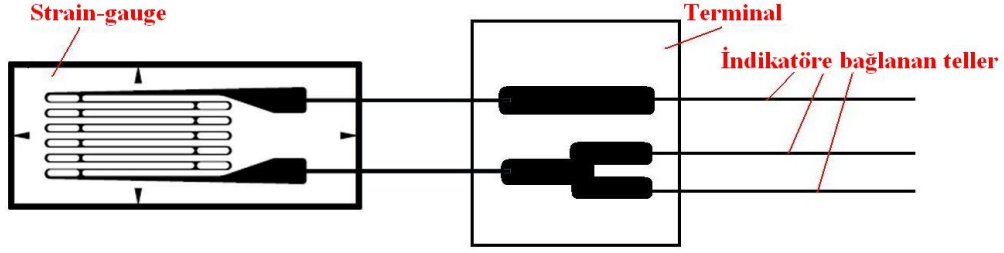


şekil 6.2 : Test aletinin, bilgisayarda çizilmiş katı modeli.

st levhanın ağırlığı, 103,75 kg'dır ve test yükü hesaplanırken, bu ağırlık da göz önüne alınmıştır.

6.1.2 Strain-gauge

Testlerde, TML marka tek eksenli ölçüm yapan strain-gaugeler kullanılmıştır (izelge 6.1). Bu tip strain-gaugelerde, iki adet, 3'er m uzunluğunda tel bağlıdır. Bu teller, strain-gaugenin iki teline bağlı haldedir. Ancak, strain-gauge tellerinden birine fazladan bir tel daha bağlanması gerekmektedir. Bu sebeple, strain-gaugeler yapıştırılmadan önce kabloları kesilmiş ve 3 adet kablo bağlantısı, terminal üzerinden gerçekleştirilmiştir (şekil 6.3).



Şekil 6.3 : Strain-gauge bağlantısının şematik gösterimi.

Çizelge 6.1 : Strain-gaugenin özellikleri.

Tip	GFLA-6-50-3L
Gauge Faktörü	$2,09 \pm 1\%$
Gauge Direnci	$120,4 \pm 0,5 \Omega$
Isıl Genleşme Katsayısı	$50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Gauge Faktörünün Sıcaklık Katsayısı	$+0,12 \pm 0,05 \%/10^{\circ}\text{C}$

6.1.3 Strain-gauge indikatörü

Strain-gauge indikatörü olarak, “Vishay – Model P3” marka 4 kanallı indikatör kullanılmıştır (Şekil 6.4). Cihaz, her kanalda çeyrek, yarım veya tam köprülü strain-gauge bağlantılarını desteklemektedir. Deney için her kanal çeyrek köprü düzenine ayarlanmıştır. Cihazın, kendi üzerine yerleştirilen MMC (Multimedia card) üzerine veri kaydetme özelliği bulunmaktadır; ancak burada, verilerin direkt olarak grafik haline getirilmeleri amacıyla bir bilgisayar üzerine veri kaydı yapılmıştır.



Şekil 6.4 : Vishay-Model P3 strain-gauge indikatörü.

6.1.4 Komparatör

Testlerde, dikey çökmenin ölçülmesi amacıyla, Mitutoyo marka, $\pm 0,01$ hassasiyetli analog komparatör kullanılmıştır. Komparatör, test aletinin ön kısmındaki ayakların arasında bulunan üçüncü bir ayağa sabitlenmiş ve komparatörün ölçü alan kısmı, numunenin levhanın altında kalan kısmının iç yüzeyine yerleştirilerek sıfırlanmıştır (Şekil 6.5). Bunun amacı, profillerde meydana gelen çökme sebebiyle, ölçülen değerlerde meydana gelebilecek hataların önüne geçmektir.



Şekil 6.5 : Test aleti üzerine yerleştirilmiş analog komparatör.

6.2 Malzeme Özellikleri

Testlerde, Ø 500 mm ve Ø 600 mm olmak üzere, iki farklı çapta numune kullanılmıştır. Ø 500'lük numuneler, PTT Chemical Public Company Limited tarafından üretilen “Innoplus 6000F” hammaddesi ile; Ø 600'lük numuneler ise Mehr Petrochemical Corporation tarafından üretilen “NPC 7000F” hammaddesi ile imal edilmişlerdir ve her iki hammadde de PE 100 sınıfına girmektedir (Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3). Bu hammaddelerin içerisine, yeterli miktarda karbon siyahı katılmıştır. Bunun amacı, ürünlere siyah renk vermek ve ürünleri güneşin ultraviyole etkisinden korumaktır.

Çizelge 6.2 : Innoplus 6000F malzemesinin özellikleri [28].

	Nominal Değer	Test Metodu
Yoğunluk	956 kg/m ³	ASTM D 1505
MFR	0,16 g/10 dak	ASTM D 1238
Teğetsel Gerilme-Çatlağı Direnci 25% Igepal, F50	> 500 sa	ASTM D 1693 B
Akma Anındaki Çekme Dayanımı	25,5 MPa	ASTM D 638
Kopma Anındaki Çekme Dayanımı	36,3 MPa	ASTM D 638
Kopma Anındaki Çekme Uzaması	950 %	ASTM D 638
Görünür Eğme Modülü	804 MPa	ASTM D 747
Eğilme Modülü	1080 MPa	ASTM D 790
Çentikli Izod Darbe Dayanımı	27 J/m	ASTM D 256
Durometre Sertliği (Shore D)	64	ASTM D 2240
Vicat Yumuşama Sıcaklığı	125 °C	ASTM D 1525
Erime Sıcaklığı	131 °C	ASTM D 2117

Çizelge 6.3 : NPC 7000F malzemesinin özellikleri [29].

	Nominal Değer	Test Metodu
Yoğunluk (23 °C)	952 kg/m ³	ISO 1183
MFR (190 °C/2,16 kg)	0,04 g/10 dak	ASTM D 1238
MFR (190 °C/21,6 kg)	- g/10 dak	ASTM D 1238
Akma Dayanımı	24,5 MPa	ASTM D 638
Kopma Dayanımı	38,2 MPa	ASTM D 638
Kopma Noktasındaki Uzama	> 500 %	ASTM D 638
Izod Darbe Dayanımı	297 J/m	ASTM D 256
Gerilme Çatlağı Direnci	> 600 sa	ASTM D 1693
Erime Noktası	131 °C	ASTM D 2117

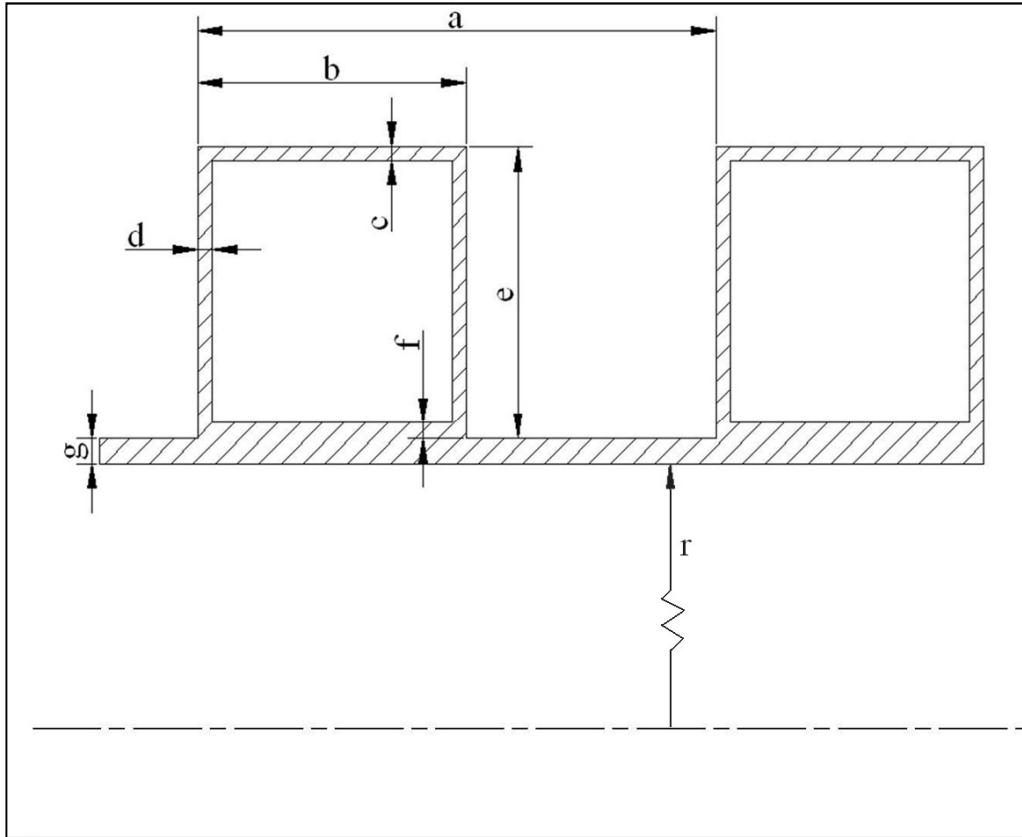
6.3 Numune Ölçüleri

Deneylerde, farklı çap ve sarım hatvesi değerlerine sahip sarmal korige boru numuneleri kullanılmıştır. Çizelge 6.4'te, numunelerin üretim özellikleri ve numunelere verilen numaralar gösterilmektedir.

Çizelge 6.4 : Numunelerin özellikleri.

Numune Numarası	İç Çap (mm)	Hatve (mm)
1	500	120
2	500	160
3	500	120
4	500	160
5	500	120
6	500	120
7	600	100
8	600	100
9	600	100
10	600	160
11	600	100
12	600	100

Numunenin gerekli boyutlarının ölçümü amacıyla, 0,01 hassasiyetli bir dijital kumpas kullanılmıştır. Üretim yönteminden dolayı hem numune hem de profil kalınlıklarının homojen olmaması sebebiyle, ölçülecek her boyut için altışar ölçüm yapılarak bunların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 6.6 ve Çizelge 6.5’te verilmiştir.



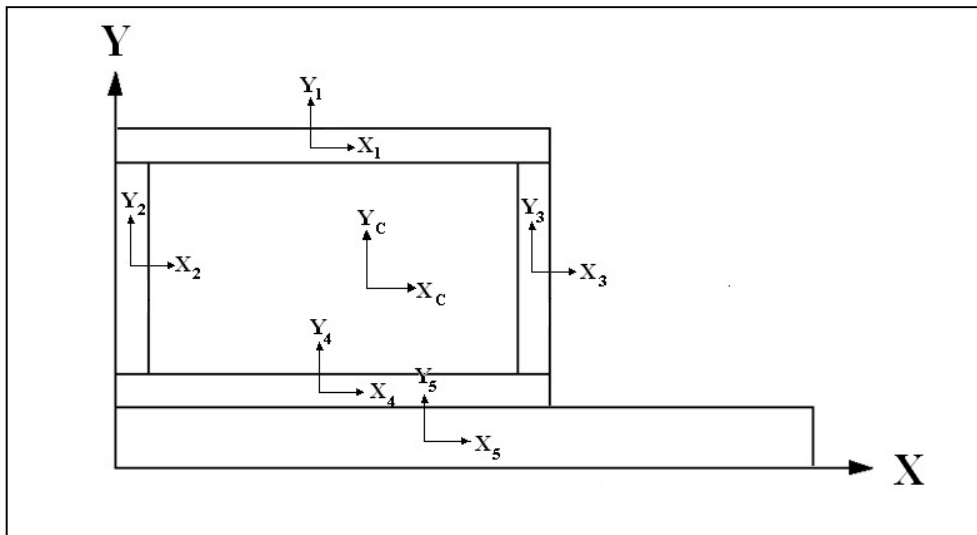
Şekil 6.6: Numune ölçüleri.

Çizelge 6.5 : Numune ölçüleri.

Numune No	İç Çap (r) (mm)	Uzunluk (mm)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)
1	486	596	115,3	46,49	2,00	2,16	42,18	1,96	3,40
2	488	842	154,8	47,88	2,24	2,22	42,38	2,10	3,41
3	489	884	117,3	49,46	2,28	2,46	43,92	2,48	4,55
4	489	829	153,4	46,56	2,46	2,30	43,09	2,22	3,83
5	496	606	117,8	47,66	1,96	1,96	42,94	1,74	4,46
6	496	684	117,8	47,66	1,96	1,96	42,94	1,74	4,46
7	604	635	96,8	54,96	2,69	2,45	53,24	2,90	6,21
8	606	506	99,4	53,71	2,49	2,45	53,44	2,87	5,95
9	614	932	103,6	47,14	1,88	2,13	57,52	1,83	3,89
10	615	872	159,9	45,25	1,89	1,92	56,30	1,96	3,66
11	618	881	103,6	44,99	1,76	1,85	49,34	1,85	4,66
12	621	828	102,4	45,29	1,80	1,94	48,02	1,75	4,57

6.3.1 Gerekli hesaplamalar

Test için gerekli hesaplamalarda, borunun hatvesi boyunca atalet momenti kullanılmaktadır. Kullanılacak olan bu atalet momenti, sistemin ağırlık merkezine göre ve borunun yarıçapı doğrultusunda alınmalıdır (yarıçap yönü, burada Y yönü olarak anılacaktır). Şekil 6.6’da görüldüğü üzere, borunun bir hatvesinde, bir profil ve bir miktar boru parçası bulunmaktadır ve öncelikle sistemin ağırlık merkezi bulunmuştur. Bunun için öncelikle herhangi bir noktaya eksen takımı atanmalıdır ve burada seçilen eksen takımı, Şekil 6.7’deki X-Y eksen takımıdır [30].



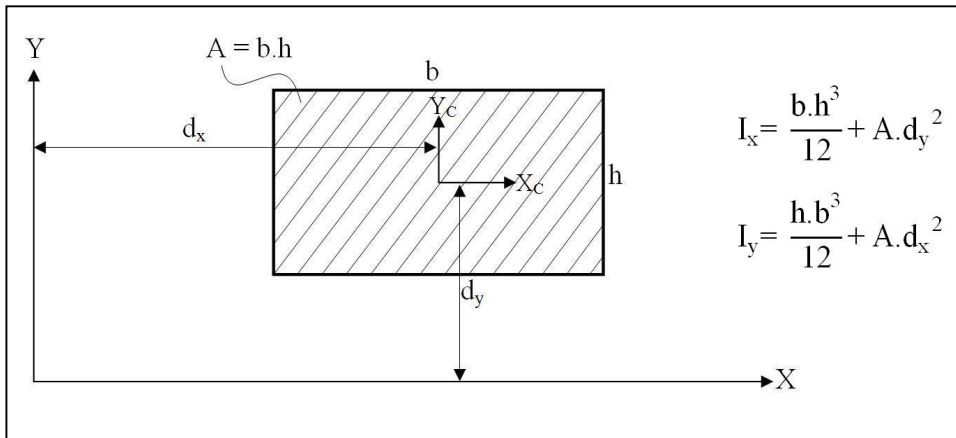
Şekil 6.7 : Bir hadvedeki boru parçası kesiti ve bu kesitin dikdörtgen elemanlara bölünmesi.

Daha sonra kesit şekli, 5 adet dikdörtgen elemana bölünmüş ve her elemanın ağırlık merkezlerinin, atanan bu eksen takımına göre x ve y koordinatları bulunmuştur. Bu elemanların x ve y koordinatları, 1'den 5'e kadar numaralandırılmış ve tüm sistemin ağırlık merkezinin koordinatları, denklem (6.1) ve denklem (6.2)'den hesaplanmıştır [30].

$$X_C = \frac{X_1 \cdot A_1 + X_2 \cdot A_2 + X_3 \cdot A_3 + X_4 \cdot A_4 + X_5 \cdot A_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5} \quad (6.1)$$

$$Y_C = \frac{Y_1 \cdot A_1 + Y_2 \cdot A_2 + Y_3 \cdot A_3 + Y_4 \cdot A_4 + Y_5 \cdot A_5}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5} \quad (6.2)$$

Burada A terimleri, dikdörtgen elemanların alanlarıdır. Ağırlık merkezinin bulunmasından sonra, tüm sistemin atalet momenti, Y eksenine doğrultusunda bulunmuştur. Bu işlem, paralel eksenler teoreminin her bir dikdörtgen elemana uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.8). Burada I_x , dikdörtgenin X eksenine göre olan atalet momenti; I_y , Y eksenine göre olan atalet momenti; b, dikdörtgenin genişliği; h, dikdörtgenin yüksekliği; d_x , dikdörtgenin ağırlık merkezinin Y eksenine uzaklığı ve d_y ise dikdörtgenin ağırlık merkezinin X eksenine uzaklığıdır [30].



Şekil 6.8 : Paralel eksen teoremi ile bir dikdörtgenin, ağırlık merkezinden geçmeyen bir eksen takımına göre atalet momentinin hesaplanması.

Dikdörtgen elemanların atalet momentlerin bulunmasının ardından, tüm sistemin atalet momenti, denklem (6.3)'ten hesaplanmıştır [27,30].

$$I = \frac{1}{a} \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5) \quad (6.3)$$

Burada a, hatve; I_1 , I_2 , I_3 , I_4 ve I_5 dikdörtgen elemanların atalet momentleri ve I da 1 hatve için atalet momenti değeridir. Testler için gerekli Y_c ve atalet momenti değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6 : Y_c ve I değerleri.

Numune No	Y_c [mm]	I [m ⁴ /m]
1	11,93	$1,328 \times 10^6$
2	12,54	$1,450 \times 10^6$
3	14,32	$2,251 \times 10^6$
4	12,68	$1,627 \times 10^6$
5	12,74	$1,829 \times 10^6$
6	12,74	$1,829 \times 10^6$
7	18,90	$5,060 \times 10^6$
8	18,47	$4,703 \times 10^6$
9	16,07	$2,723 \times 10^6$
10	15,05	$2,382 \times 10^6$
11	14,75	$2,555 \times 10^6$
12	14,88	$2,474 \times 10^6$

7. DENEYİN YAPILIŞI

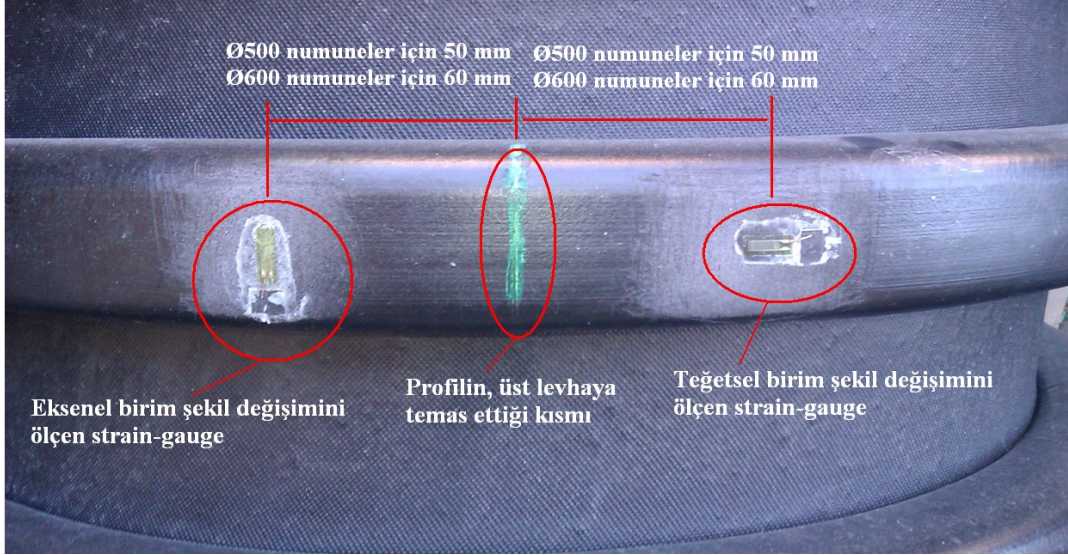
7.1 Strain-Gaugelerin Yerleştirilmesi

Her test için dört adet strain-gauge kullanılmıştır. Şekil 7.1’te görüldüğü üzere iki adet strain-gauge, yükün uygulandığı üst levhanın altında kalan profil kısmına, biri eksenel biri radyal birim şekil değişimlerini ölçecek şekilde yerleştirilmiştir. Diğer iki strain-gauge de eksenel ve radyal birim şekil değişimlerini ölçecek şekilde, numunenin yan kısmında kalan profil bölümüne yerleştirilmiştir.

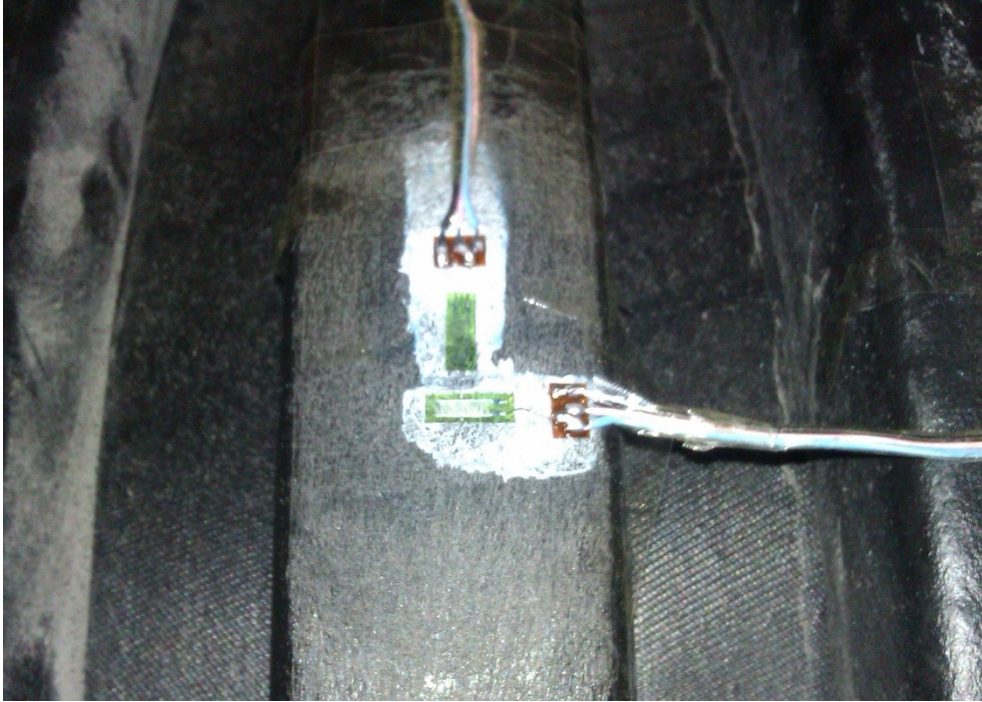


Şekil 7.1: Strain-gaugelerin yerleşimi.

Üst levhanın altında kalan kısma yerleştirilen strain-gauge’ler, levha tarafından ezilmelerini engellemek amacıyla, levha ile profilin temas ettiği yerden bir miktar mesafe ile yerleştirilmiştir (Şekil 7.2). Numunenin yan kısmındaki profil kısmına yerleştirilen strain-gaugeler, Şekil 7.3’te gösterilmiştir.



Şekil 7.2: Üst levha ile profil arasına yerleştirilen strain-gaugelerin konumları.

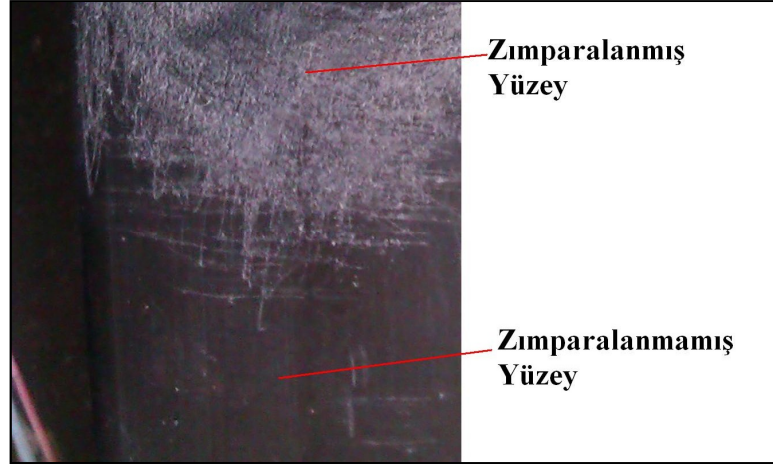


Şekil 7.3: Numunenin yan tarafına yerleştirilen strain-gaugelerin konumları.

7.1.1 Yüzeyin hazırlanması

Boru numunesi yüzeyi, istenen pürüz seviyesine sahip olmadığı için, öncelikle bu yüzeyin istenen hale getirilmesi işlemi yapılmıştır. Bunun için 120'lik zımpara kağıdı kullanılmıştır; ancak, zımparalama işleminden önce de numune üzerindeki kir, yağ gibi istenmeyen unsurların zımparalama işleminde yüzey içerisine girmesini engellemek amacıyla yüzey temizleme işlemi yapılmıştır. Üzerine ticari aseton

damlatılan sentetik pamuk sarılı çubuklar kullanılarak yapılan temizleme işlemi, yüzey üzerinde istenmeyen madde kalmayınca kadar uygulanmıştır. Daha sonra 120'lik zımpara kullanılarak yüzey kaba olarak zımparalanmıştır. Bu işlemi takiben yüzey tekrar temizlenmiş ve 420'lik zımpara kullanılarak yüzey pürüzlüleştirme işlemi tamamlanmıştır. Son olarak yüzey temizleme işlemi tekrar yapılarak zımparalama sonucu oluşan plastik parçacıklar yüzeyden uzaklaştırılmıştır (Şekil 7.4).



Şekil 7.4 : Yapıştırma yüzeylerinin, zımparalamadan sonraki görüntüsü.

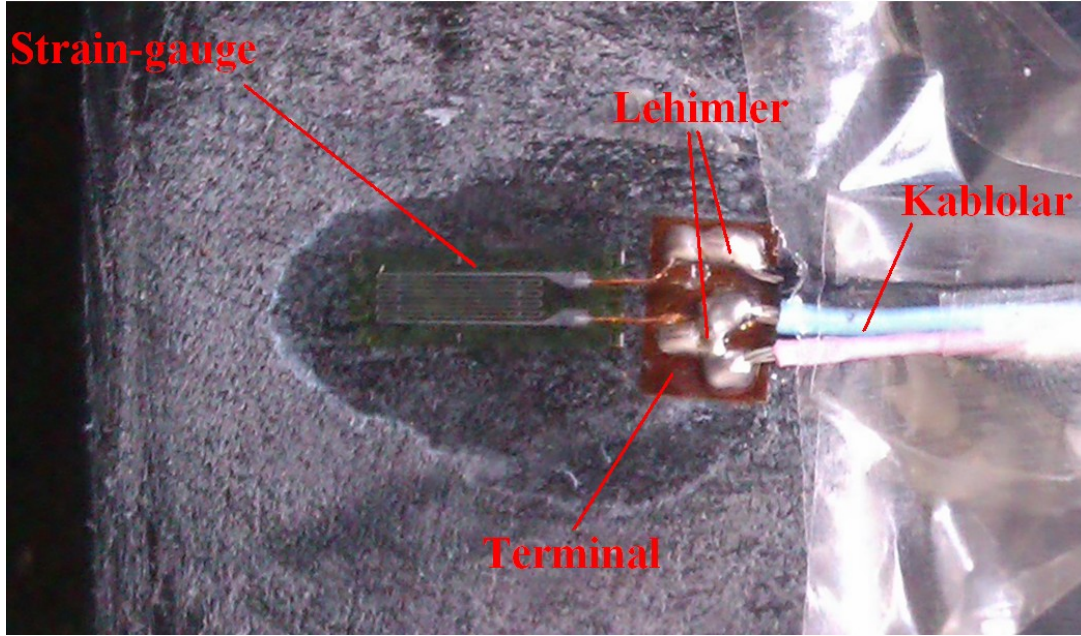
7.1.2 Strain-gaugelerin yapıştırılması

Strain-gauge ve terminal, bir koli bandı üzerine uygun şekilde konumlandırılmıştır. Daha sonra bant, strain-gauge yapıştırılacağı yere tam denk gelecek şekilde numune üzerine yapıştırılmıştır. Sonra bantın bir ucu kaldırılarak yüzey üzerine katalizör sıvı sürülmüştür. Bu sıvının amacı, strain-gauge ile yüzey arasına uygulanacak olan yapıştırıcının etkisini güçlendirmektir. Katalizörün sürülmesinden hemen sonra yapıştırıcı sıvı, yüzey üzerine uygulanmış ve bant kapatılarak yaklaşık 2 dakika boyunca el ile kuvvet uygulanmıştır. Yapışma meydana geldikten sonra koli bandı ortamdan uzaklaştırılmıştır.

7.1.3 Lehimleme

Yapıştırma işleminden sonra terminalin konumuna bağlı olarak strain-gauge telleri kısaltılmıştır. Bu teller, terminalde lehim yapılacakları yere doğru şekillendirildikten sonra lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir. %40 Pb, %60 Sn içeren lehim teli kullanılan bu işlemde öncelikle terminal, 15 W'lık bir havya yardımı ile bir miktar

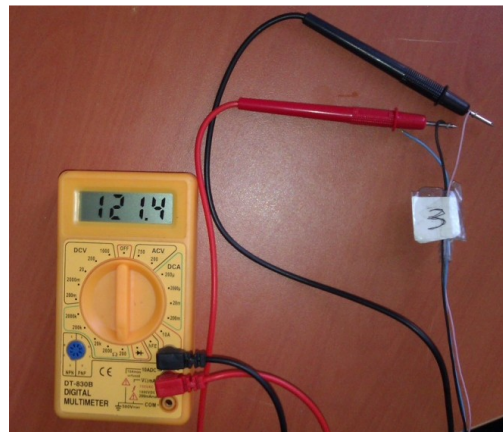
ısıtılmış ve daha sonra lehim teli uygulanmıştır. Strain-gauge tellerinin terminale lehimlenmesinden sonra, her strain-gauge için 3'er adet olmak üzere toplam 12 adet 1,5 m uzunluğunda kablo da terminal üzerindeki yerlerine lehimlenmiştir (Şekil 7.5). Her strain-gauge için 3 adet kablo lehimlenmesinin sebebi, devre içerisinde kablolardan dolayı oluşan direncin, indikatör tarafından sistemden çıkarılmasıdır.



Şekil 7.5: Yerleştirilmiş bir strain-gauge.

7.1.4 Devre Kontrolü

Strain-gaugeler lehimlendikten sonra, lehimlemenin düzgün yapıldı yapılmadığını kontrol etmek amacıyla basit bir multimetre kullanılmıştır. Burada amaç, strain-gaugeleri, indikatöre bağlamadan önce devrelerinin tam olarak kurulduğundan emin olmaktır. Eğer devrede bir temassızlık veya kısa devre varsa, erken teşhis yapılarak deney esnasında meydana gelebilecek sorunların önlenmesi sağlanır (Şekil 7.6).



Şekil 7.6: Multimetre ile devre kontrolü.

7.2 Deneyin Yapılışı ve Gerekli Hesaplamalar

DIN 16961-2:2010-03'e göre; öncelikle denklem (5.7)'deki $S_{R24(te)}$ hesaplanmıştır. Burada geçen E_{c24} değeri, 230000 [kN/m²] alınmıştır. Daha sonra test yükü, denklem (5.8)'den hesaplanmıştır (Çizelge 7.1). Bu hesaplamalardan sonra numune, test cihazına yerleştirilmiştir. Bu işlem, cihaz üzerindeki levhanın, basit bir el vinci yardımıyla havada sabit tutulması sayesinde gerçekleştirilebilmiştir. Daha sonra strain-gauge kabloları, indikatördeki yerlerine takılarak tüm köprü devreleri dengelenmiştir ve indikatör de bilgisayara bağlanarak veri kaydı işlemi başlatılmıştır. Bu işlemden sonra komparatör yerleştirilmiş ve sıfırlanmıştır. Daha sonra üst levhayı tutan vinç, yavaşça numune üzerine bırakılmıştır. Her numune için, standarda göre hesaplanan miktarda ölü ağırlık, kademe kademe üst levha üzerine bırakılmıştır (Çizelge 7.1). Bu işlemden sonra, birinci ve altıncı saatte komparatördeki değerler okunarak kaydedilmiştir.

Çizelge 7.1 : $S_{R24(te)}$ ve deney yükü değerleri.

Numune No	$S_{R24(te)}$ [kN/m ²]	Test Yüğü [Kg]	F [N]
1	18,44	105,5	1034,90
2	19,76	160,4	1573,34
3	29,86	255,0	2501,75
4	22,00	176,2	1728,50
5	23,73	140,9	1382,48
6	23,73	159,1	1560,42
7	35,22	266,8	2617,66
8	32,56	197,2	1934,76
9	18,57	210,0	2059,68
10	16,32	172,9	1696,50
11	17,32	186,3	1827,22
12	16,52	167,8	1645,93

Test sonrasında, yirmi dördüncü saatte okunan değer (Δd_{iv}) kullanılarak denklem (5.9)'daki, iç çapın ortalama çökme değeri (Δd_{ivm}) hesaplanmıştır. Bundan sonra da denklem (5.10)'dan doğrusal interpolasyon yapılmış ve her test sonucundaki Δd_{ivm} değerleri için deformasyon katsayıları ($\xi_{\Delta divm}$) hesaplanmıştır (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2 : Kg cinsinden test yükü ve çökme miktarları.

Numune No	Çökme miktarı (Δd_{iv}) [mm]			Ortalama Dikey Çökme d_{ivm} [%]	Düzeltilmiş Deformasyon Katsayısı $\xi_{\Delta divm}$ [-]
	1 saat	6 saat	24 saat		
1	12,58	13,51	14,48	2,979	0,1548
2	12,39	13,30	14,11	2,891	0,1546
3	12,23	13,18	14,03	2,869	0,1545
4	12,51	13,74	14,34	2,933	0,1547
5	12,75	14,09	14,82	2,988	0,1548
6	13,41	14,21	14,79	2,982	0,1548
7	16,09	18,02	19,55	3,237	0,1553
8	16,17	18,15	19,49	3,216	0,1552
9	15,26	16,79	18,12	2,951	0,1547
10	15,34	16,92	18,21	2,961	0,1547
11	15,75	17,29	18,24	2,951	0,1547
12	15,83	17,32	18,39	2,961	0,1547

Hesaplanan değerler kullanılarak da denklem (5.11) yardımıyla, deneysel S_{R24} değeri bulunmuştur (Çizelge 7.3).

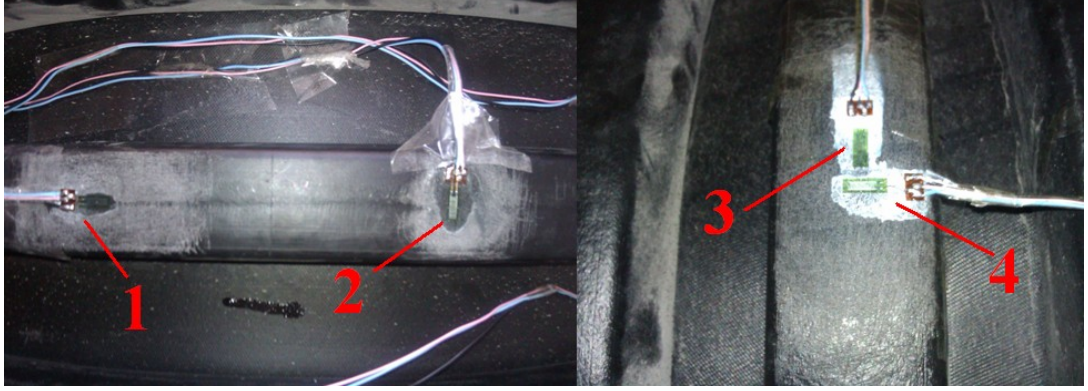
Çizelge 7.3 : Deneysel S_{R24} değerleri.

Numune No	Deneysel S_{R24} [kN/mm ²]
1	18,56
2	20,47
3	31,17
4	22,49
5	23,83
6	23,87
7	32,74
8	30,45
9	18,87
10	16,53
11	17,59
12	16,72

7.3 Ölçülen Değerler

Deneylerde, strain-gaugeler 1'den 4'e kadar rakamlandırılmıştır. Şekil 7.7'de görüldüğü üzere, üst levhanın altında kalan strain-gaugelerden, radyal birim şekil değişimini ölçen 1; eksenel birim şekil değişimini ölçen, 2 olarak numaralandırılmıştır. Numunenin yan tarafında ise radyal birim şekil değişimini ölçen 3; eksenel birim şekil değişimini ölçen, 4 olarak numaralandırılmıştır. Sonuç

olarak elde edilen negatif değerler, o noktada basma gerilmesinin olduğunu yani, strain-gaugenin boyunun kısaldığını; pozitif değerler ise o noktada çekme gerilmesi olduğunu, yani strain-gaugenin uzadığını göstermektedir.



Şekil 7.7: Deney düzeneğindeki strain-gaugelerin numaralandırılması.

Ek A’da, indikatörden elde edilen verilerle oluşturulmuş, birim şekil değişimi-zaman grafikleri verilmiştir.

8. SONUÇ

8.1 Halka Rijitliği

Test edilen numuneler için hesaplanan halka rijitliği değerleri ($S_{R24(te)}$) ve deneysel halka rijitliği değerleri, Çizelge 8.1’de verilmiştir.

Çizelge 8.1 : Teorik ve deneysel halka rijitliği değerleri.

Numune No	$S_{R24(te)}$ [kN/mm ²]	S_{R24} [kN/mm ²]
1	18,44	18,56
2	19,76	20,47
3	29,86	31,17
4	22,00	22,49
5	23,73	23,83
6	23,73	23,87
7	35,22	32,74
8	32,56	30,45
9	18,57	18,87
10	16,32	16,53
11	17,32	17,59
12	16,52	16,72

Bu verilerden görülmektedir ki; teorik olarak hesaplanan değerler, deney sonucu elde edilen değerlerle tutarlılık göstermektedir. Buradan da, deneysel halka rijitliği değerleri kullanılarak, numunelerin kullanım koşullarının belirlenmesi için gerekli olan sınıflandırma yapılmaktadır (Çizelge 8.2).

Çizelge 8.2 : Halka rijitliği değerlerine göre boru serisi sınıflandırması [27].

Boru Serisi RR	0	1	2	3	4	5	6	7
Halka Rijitliği- S_{R24} [kN/mm ²]	<2	≥2	≥4	≥8	≥16	≥31,5	≥63	≥125

Çizelge 8.2’ye göre, deney numunelerinin boru serisi sınıflandırmaları ise Çizelge 8.3’te verilmiştir.

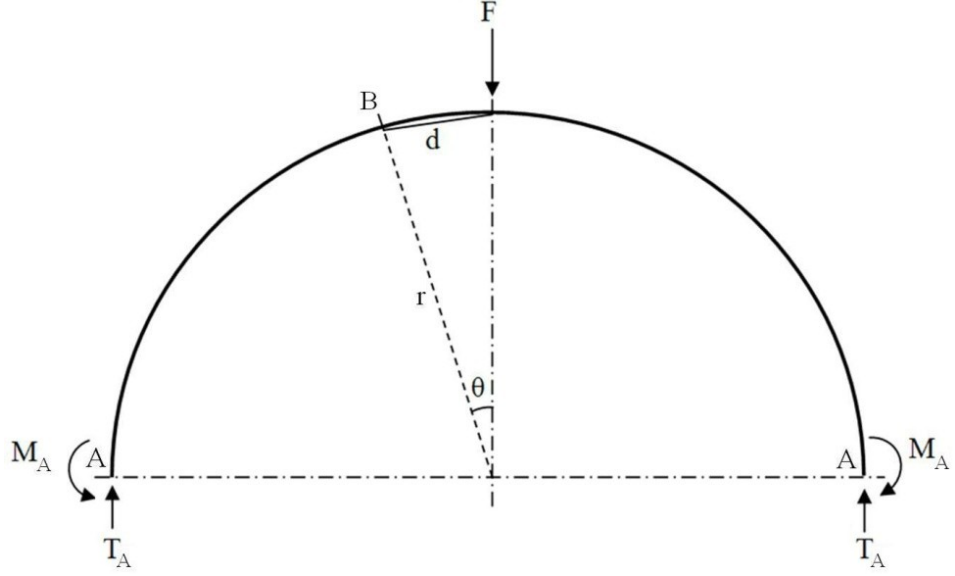
Çizelge 8.3 : Numunelerin, deneysel S_{R24} değerlerine göre boru serisi sınıflandırılması.

Numune No	S_{R24} [kN/mm ²]	Boru Serisi
1	18,56	4
2	20,47	4
3	31,17	4
4	22,49	4
5	23,83	4
6	23,87	4
7	32,74	5
8	30,45	4
9	18,87	4
10	16,53	4
11	17,59	4
12	16,72	4

8.2 Gerilme Analizi

Numuneler üzerine yapıştırılan 1 ve 3 numaralı strain-gaugelerden elde edilen teğetsel birim şekil değişimi değerleri kullanılarak, malzemenin eğme sürünmesi modülünün değişimi tespit edilmiştir. Bunun için, öncelikle bu strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki gerilme değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 8.1’de, 180°’lik bir boru kesitinde meydana gelen kuvvet ve gerilmeler gösterilmiştir. Burada F, paralel levha yükü; d, B noktasının (1 numaralı strain-gaugenin yerleştirildiği nokta) üst levhanın boruya temas ettiği noktadan doğrusal olarak uzaklığı; M_A , A noktasında (3 numaralı strain-gaugenin yerleştirildiği nokta) oluşan moment; T_A , A noktasında meydana gelen normal kuvvet; θ da, B noktasının merkez açısıdır [17,30].



Şekil 8.1 : Paralel levha testinde, 180° lik bir boru kesitinde oluşan kuvvet ve momentler.

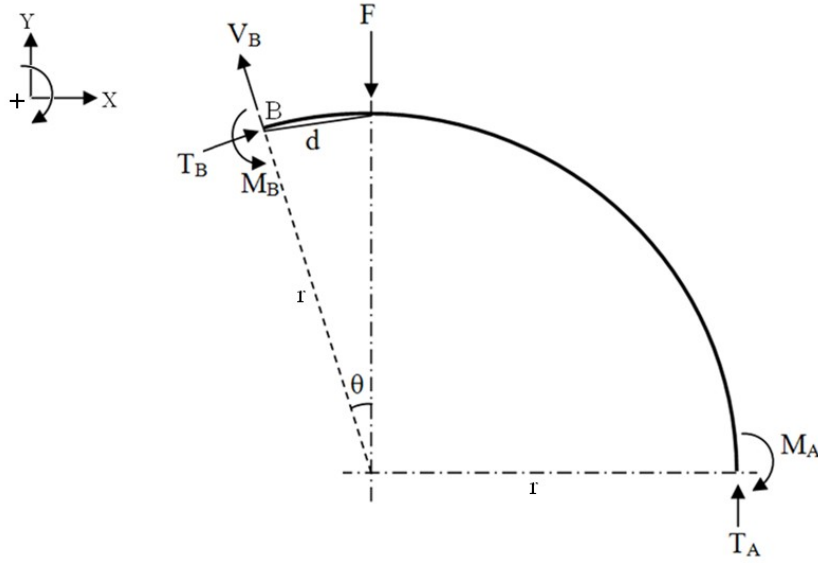
Öncelikle, A noktasındaki, yani 3 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı noktadaki T_A ve M_A değerleri, denklem (8.1) ve (8.2)'den hesaplanır [17].

$$T_A = \frac{F}{2} \quad (8.1)$$

$$M_A = (\pi - 2) \cdot \frac{F \cdot r_n}{2 \cdot \pi} \quad (8.2)$$

Burada r_n , boru kesitinin nötral eksene kadar olan yarıçap mesafesidir. F değeri kullanılırken, 1 hatveye etki eden yayılı yük değeri alınmalıdır (Çizelge 8.4). Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki; burada bahsi geçen moment değerleri, nötral eksenin alt kısmındaki değerler olduğundan dolayı, strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki moment değerleri, burada elde edilen değerlerin ters işaretlisidir.

B noktasında oluşan momenti ve kuvvetleri bulmak için, öncelikle boruyu bu noktadan hayali olarak kesmek gereklidir (Şekil 8.2). Burada V_B , B noktasındaki kesme kuvvetidir [17,30].



Şekil 8.2 : B noktasındaki moment ve kuvvetler.

Şekil 8.2'deki bilinmeyen kuvvetler ve momenti hesaplamak için, denge denklemlerinden yararlanılır. X ve Y yönündeki kuvvetler toplamı ve B noktasındaki toplam moment sıfır olmalıdır. Buna göre; denklem (8.3), (8.4) ve (8.5)'ten yararlanılarak B noktasındaki bilinmeyenler bulunur [17,30].

$$\sum F_X=0; \quad T_B \cdot \cos \theta - V_B \cdot \sin \theta = 0 \quad (8.3)$$

$$\sum F_Y=0; \quad -F + T_A + T_B \cdot \sin \theta + V_B \cdot \cos \theta = 0 \quad (8.4)$$

$$\sum M (B \text{ noktası}) = 0; \quad M_A + F \cdot r \cdot \sin \theta - T_A \cdot r \cdot (1 + \sin \theta) - M_B = 0 \quad (8.5)$$

Buradan hesaplanan değerlerle de A ve B noktalarındaki gerilmeler, σ_A ve σ_B , denklem (8.6) ve (8.7)'den hesaplanır [17,30].

$$\sigma_A = - \frac{T_A}{A} + \frac{M_A \cdot c}{I} \quad (8.6)$$

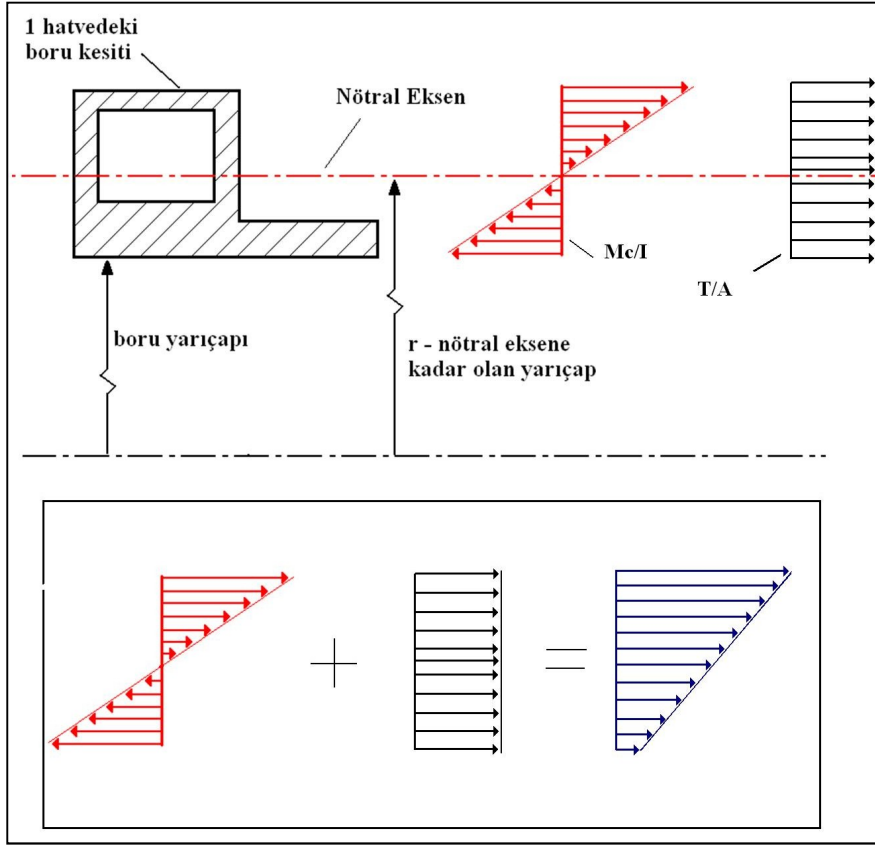
$$\sigma_B = - \frac{T_B}{B} - \frac{M_B \cdot c}{I} \quad (8.7)$$

Bu denklemlerde c, boru kesitinin nötral ekseninden en uzak noktası; A, 1 hatvedeki boru kesiti alanı; I, 1 hatvedeki boru kesitinin atalet momentidir ancak burada I terimi hesaplanırken, denklem (6.3)'ten farklı olarak hatve uzunluğuna bölünmez. Çizelge 8.4'te, 1 hatveye etki eden F yükü, c ve I değerleri verilmiştir.

Çizelge 8.4 : 1 hatveye etki eden F yükü, c ve I değerleri.

Numune No	F [N]	c [mm]	I [m ⁴]
1	269,60	33,65	2,062E-07
2	289,22	33,25	2,245E-07
3	331,85	34,15	2,640E-07
4	319,76	34,24	2,495E-07
5	268,83	34,66	2,155E-07
6	268,83	34,66	2,155E-07
7	398,87	40,55	4,896E-07
8	380,19	40,92	4,676E-07
9	345,79	45,34	4,261E-07
10	311,17	44,91	3,809E-07
11	214,81	39,25	2,646E-07
12	203,53	37,71	2,533E-07

Denklem (8.6) ve (8.7)'de, basma gerilmesi negatif, çekme gerilmesi ise pozitif işaretlenmiştir. Şekil 8.3'de, boru kesitindeki oluşan örnek bir gerilme dağılımı gösterilmiştir. Nötral eksen, yani sistemin ağırlık merkezinin geçtiği yatay eksen, eğmeden dolayı oluşan moment değeri sıfırdır. Bu noktadan uzaklaştıkça moment değeri artar; ancak bu artış, ters işaretlidir. Bunun doğal sonucu olarak da, nötral eksenin üst ve alt kısmında ters gerilmeler, yani bir tarafta basma gerilmesi, öbür tarafta da çekme gerilmesi oluşur. Buna ek olarak boru kesitinde, test yükünden dolayı normal gerilme oluşur. Bu gerilme değeri, boru kesitinin farklı noktalarında farklı değerlere sahiptir. Bu sebeple, eğme gerilmesi ve normal gerilme, büyüklüklerine göre farklı biçimlerde boru kesitine etki edebilir [17].



Şekil 8.3 : Boru kesitindeki gerilme dağılımı.

8.2.1 Testlerde meydana gelen gerilmeler

Bulunduğu konum itibariyle ilk olarak, 3 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı A noktasında meydana gelen moment ve gerilme denklem (8.2) ve (8.6)'dan hesaplanarak Çizelge 8.5'te verilmiştir.

Çizelge 8.5 : 3 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı noktadaki normal kuvvet, eğme momenti ve teğetsel gerilme değerleri.

Numune No	T_A [N]	M_A [N.m]	σ_A [MPa]
1	134,8	12,49	1,884
2	144,6	13,48	1,837
3	165,9	15,60	1,847
4	159,9	14,94	1,887
5	134,4	12,74	1,891
6	134,4	12,74	1,891
7	199,4	23,26	1,752
8	190,1	22,21	1,773
9	172,9	20,30	1,989
10	155,6	18,24	1,988
11	107,4	12,64	1,742
12	101,8	12,03	1,664

Burada, T_A normal kuvvetinden dolayı basma gerilmesi meydana gelmektedir. M_A momenti de strain-gaugenin yapıştırıldığı A noktasında çekme gerilmesi oluşturmaktadır.

1 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı B noktasında meydana gelen kuvvet, moment ve gerilme değerleri, denklem (8.3), (8.4), (8.5) ve (8.7)'den hesaplanarak Çizelge 8.6'da verilmiştir.

Çizelge 8.6 : 1 numaralı strain-gaugenin yapıştırıldığı noktadaki normal kuvvet, kesme kuvveti, eğme momenti ve teğetsel gerilme değerleri.

Numune No	θ [°]	d [mm]	V_B [N]	T_B [N]	M_B [N.m]	σ_B [MPa]
1	11,8	50	108,1	22,59	13,56	-2,239
2	11,8	50	116,0	24,16	14,61	-2,191
3	11,7	50	133,2	27,67	16,71	-2,191
4	11,7	50	128,3	26,67	16,20	-2,249
5	11,6	50	108,3	22,16	13,91	-2,263
6	11,6	50	108,3	22,16	13,91	-2,263
7	11,4	60	161,2	32,50	25,07	-2,105
8	11,4	60	153,7	30,89	24,04	-2,132
9	11,2	60	140,2	27,80	22,46	-2,417
10	11,2	60	126,2	24,99	20,32	-2,421
11	11,1	60	87,2	17,18	14,14	-2,118
12	11,1	60	82,7	16,22	13,49	-2,028

Burada da, A noktasına benzer şekilde T_B normal kuvvetinden dolayı basma; M_A eğme momentinden dolayı da çekme gerilmesi oluşmaktadır. Numunelerin deformasyonu, çapın %3'ünden az olduğu için, deformasyonun elastik sınırdaki kaldığı söylenebilir.

Elde edilen gerilme değerleri ve strain-gaugelerden elde edilen birim şekil değişimi değerleri kullanılarak denklem (8.8) yardımıyla malzemelerin sürünme modüllerinin değişimi hesaplanmış ve Ek B'de verilmiştir. Denklem (8.8)'deki E_c , sürünme modülünü temsil etmektedir [9].

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad (8.8)$$

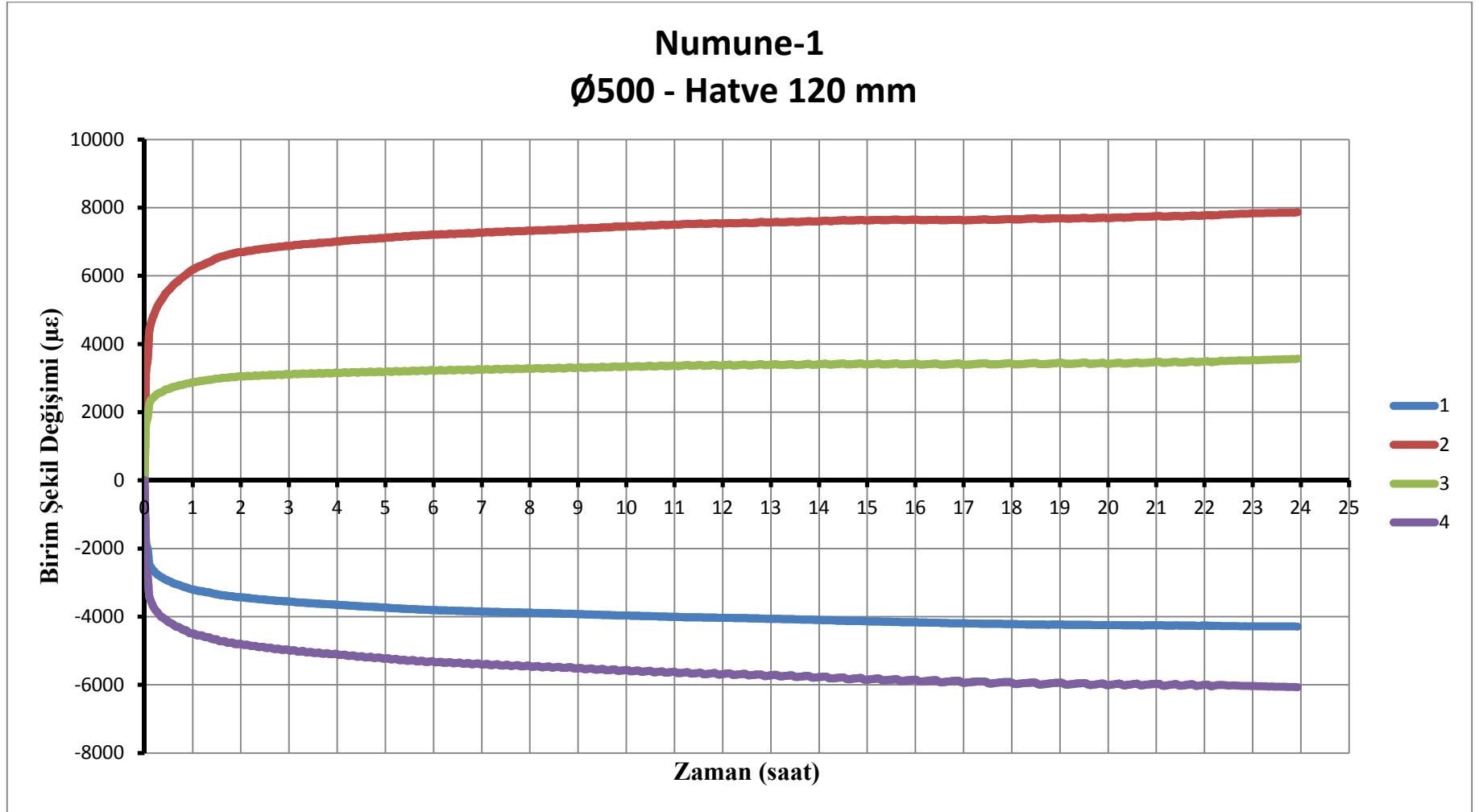
KAYNAKLAR

- [1] **Najafi, M.**, 2005. *Trenchless Technology - Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*. McGraw-Hill
- [2] **Moore, I., D.**, 1994. Local strain in corrugated pipe: Experimental measurements to test a numerical model. *Journal of Testing and Evaluation*.
- [3] **Selig, E., T., DiFrancesco, L., C. And McGrath, T., J.**, 1994. Laboratory test of buried pipe in hoop compression. *Buried Plastic Pipe Technology: 2nd Volume*.
- [4] **Selig, E., T., DiFrancesco, L., C. And McGrath, T., J.**, 1994. Stiffness of HDPE pipe in ring bending. *Buried Plastic Pipe Technology: 2nd Volume*.
- [5] **Moore, I., D. ve Hu, F.**, 1994. Linear viscoelastic modeling of profiled high density polyethylene pipe. *Can. J. Civ. Eng. Vol. 23*.
- [6] **McGrath, T., J. ve Schafer, B., W.**, 2003. Parallel plate testing and simulation of corrugated plastic pipe. *Transportation Research Board Annual Meeting*.
- [7] **Palabıyık, M.**, 2009. Polimer kompozit malzemeler ile konstrüksiyon ve imalat, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [8] **Chanda, M. and Roy, S., K.**, 2009, *Plastics Fundamentals, Properties, and Testing*. CRC Press, pages A7-1 – A7-3.
- [9] **Crawford, R., J.**, 1998. *Plastics Engineering*. Third Edition. Elsevier Ltd.
- [10] **Bilgin, Ö., O'Rourke, T., D. ve Stewart, H., E.**, 2007. Thermal and mechanical properties of polyethylene pipes. *ASCE*.
- [11] **Gabriel, L., H.**. Url-2 <<http://www.plasticpipe.org>> alındığı tarih: 18.02.2011.
- [12] **Brydson, J., A.**, 1999. *Plastics Materials*. Seventh Edition.
- [13] **Peacock, A., J.**, 2000. *Handbook of Polyethylene Pipe: Structures, Properties and Applications*. Exxon Chemical Company, Baytown Texas
- [14] **Cheng, J., J., Contreras, J., A., A., Penlidis, A. ve Polak, M., A.**, 2010. Chain entanglements and mechanical behaviour of high density polyethylene. Vol. 132 / 011016-1
- [15] **Url-1** <http://www.engineeringtoolbox.com/pe-pressure-grades-d_668.html>, alındığı tarih: 18.02.2011.
- [16] **Plastic Pipe Institute**. *Handbook of Polyethylene Pipe*. Second Edition.
- [17] **Anderson, L., R. ve Watkins, R., K.**, 2000. *Structural Mechanics of Buried Pipes*. CRC Press LLC
- [18] **Aran, A., Demirkol, M.**, Plastik şekil verme teknolojisi. İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.

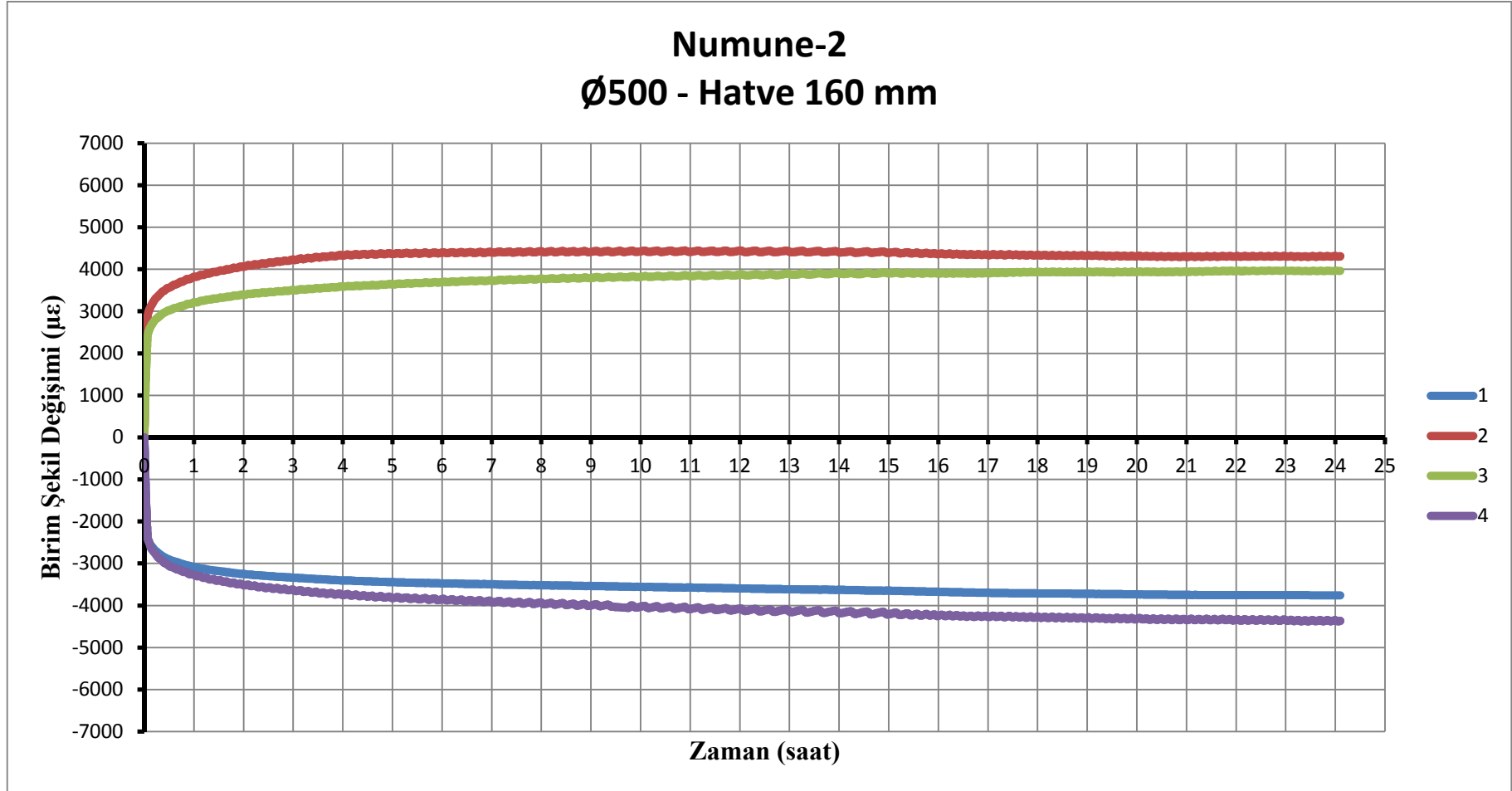
- [19] **Vural, M.**, 2007. İmal usulleri ders notları. İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [20] **Palabıyık, M.**, 2010. Ekstrüzyon ders notları. İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul.
- [21] **Giles, H., F., Jr., Wagner, J., R., Jr. ve Mount, E., M.**, 2005. *The Definitive Processing Guide and Handbook*. William Andrew Publishing/Plastics Design Library, New York.
- [22] **Url-4** < <http://www.dizayngrup.com>>, alındığı tarih: 21.03.2011.
- [23] **Url-6** < <http://www.machsources.com>>, alındığı tarih: 21.03.2011.
- [24] **Url-5** < <http://www.plasticextruders.net>>, alındığı tarih: 21.03.2011.
- [25] **ASTM D-2412**, 1996. Standard test method for determination of external loading characteristics of plastic pipe by parallel-plate loading. *American Society for Testing and Materials*
- [26] **ISO 9969**, 2007. Thermoplastics pipes - Determination of ring stiffness. *International Organization for Standardization*.
- [27] **DIN 16961-2**, 2010. Thermoplastics pipes and fittings with profiled outer and smooth inner surfaces Part 2: Technical delivery conditions. *Deutsche Norm*.
- [28] **PTT Chemical Public Company Limited**, 2011. Innoplus HD600F datasheet. *IDES-The Plastics Web*.
- [29] **Petrochemical Commercial Co.**, 2011. HD-7000F datasheet.
- [30] **Ferdinand P. B., Russell E. J. Jr.**, 2003. *Cisimlerin Mukavemeti*.

EKLER

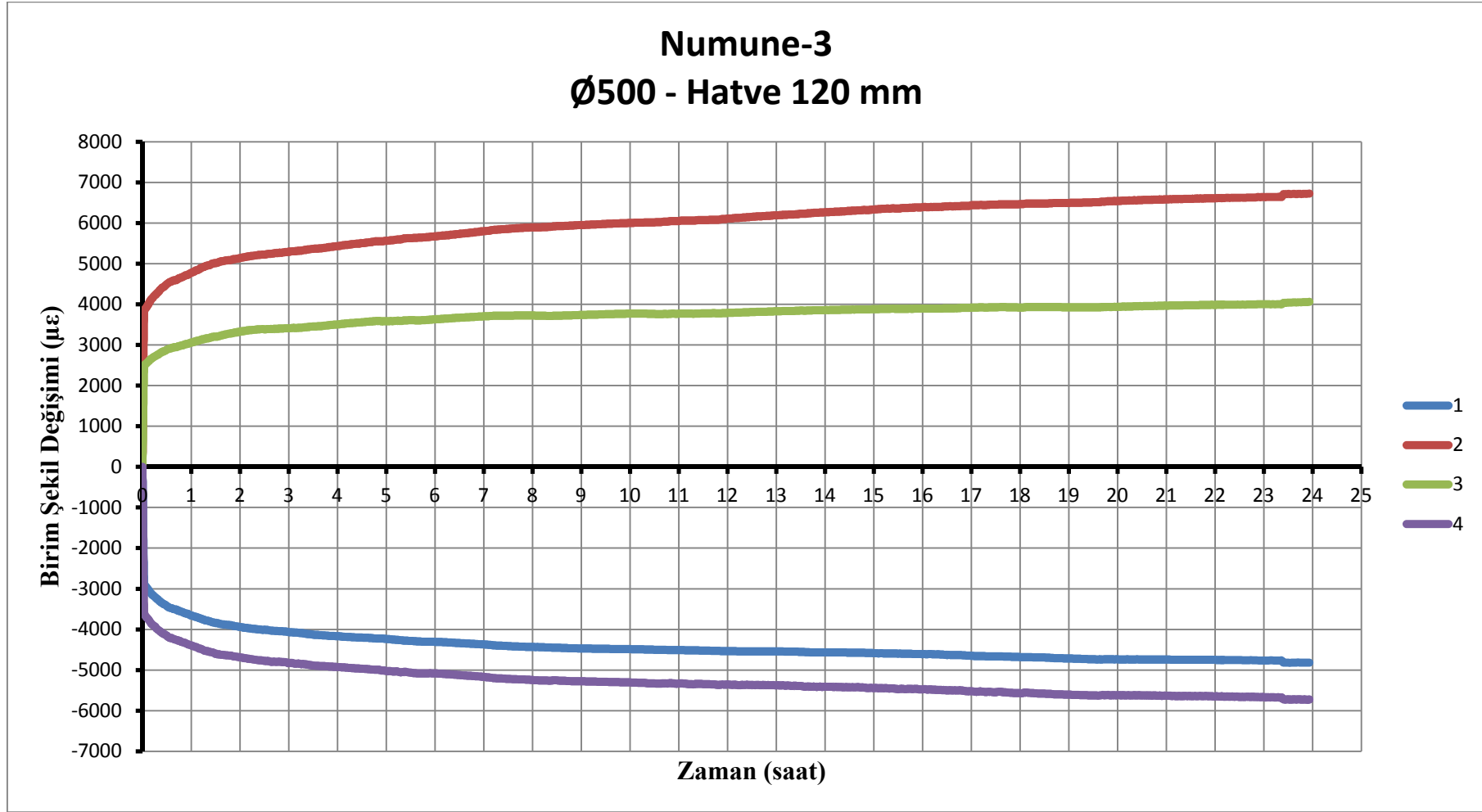
EK A : Tüm strain-gaugelerden elde edilen birim şekil değişimi-zaman grafikleri.



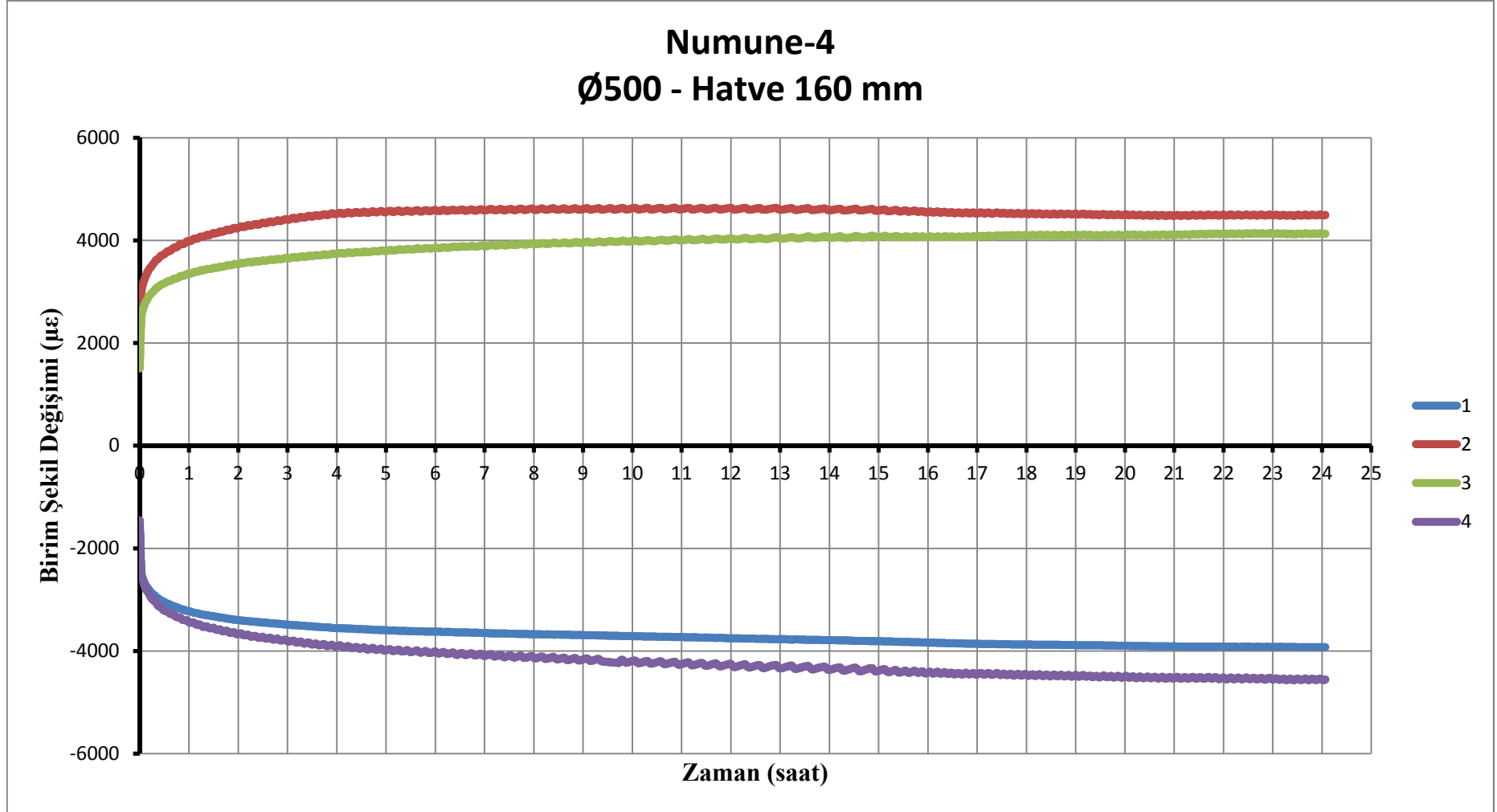
Şekil A.1 : Numune-1'in birim şekil değişimi-zaman grafiği.



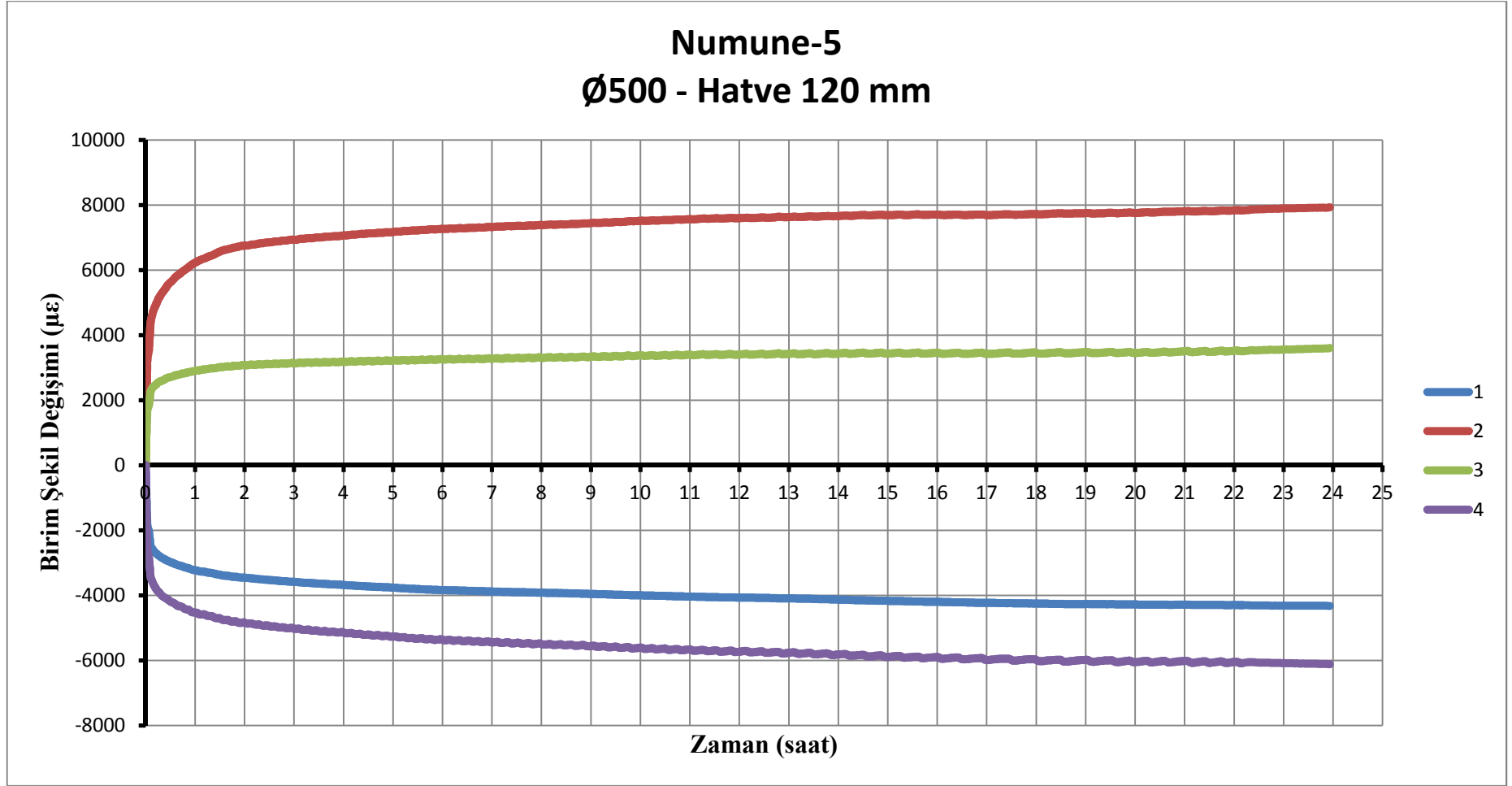
Şekil A.2 : Numune-2'nin birim şekil değişimi-zaman grafiği.



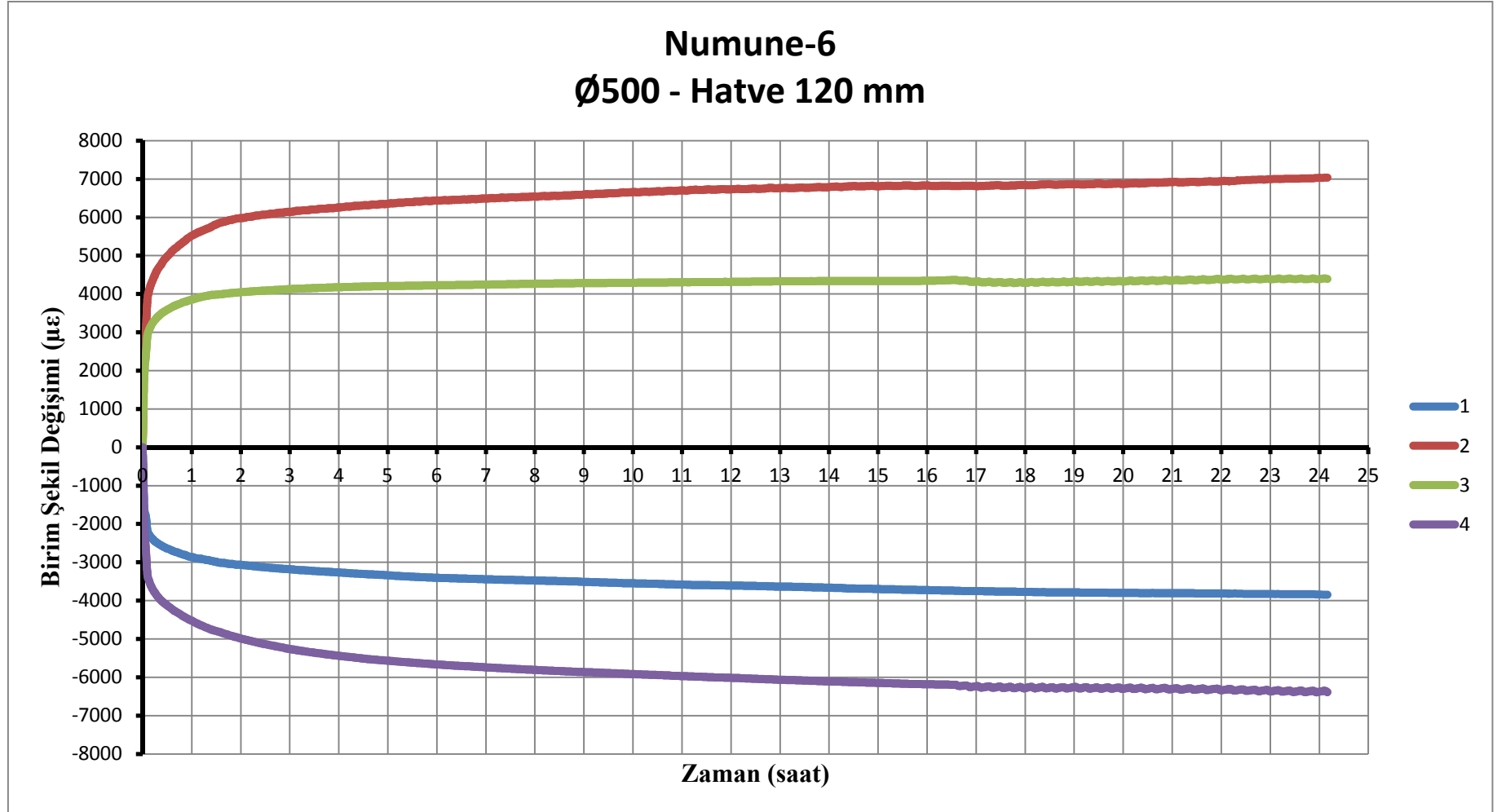
Şekil A.3 : Numune-3'ün birim şekil değişimi-zaman grafiği.



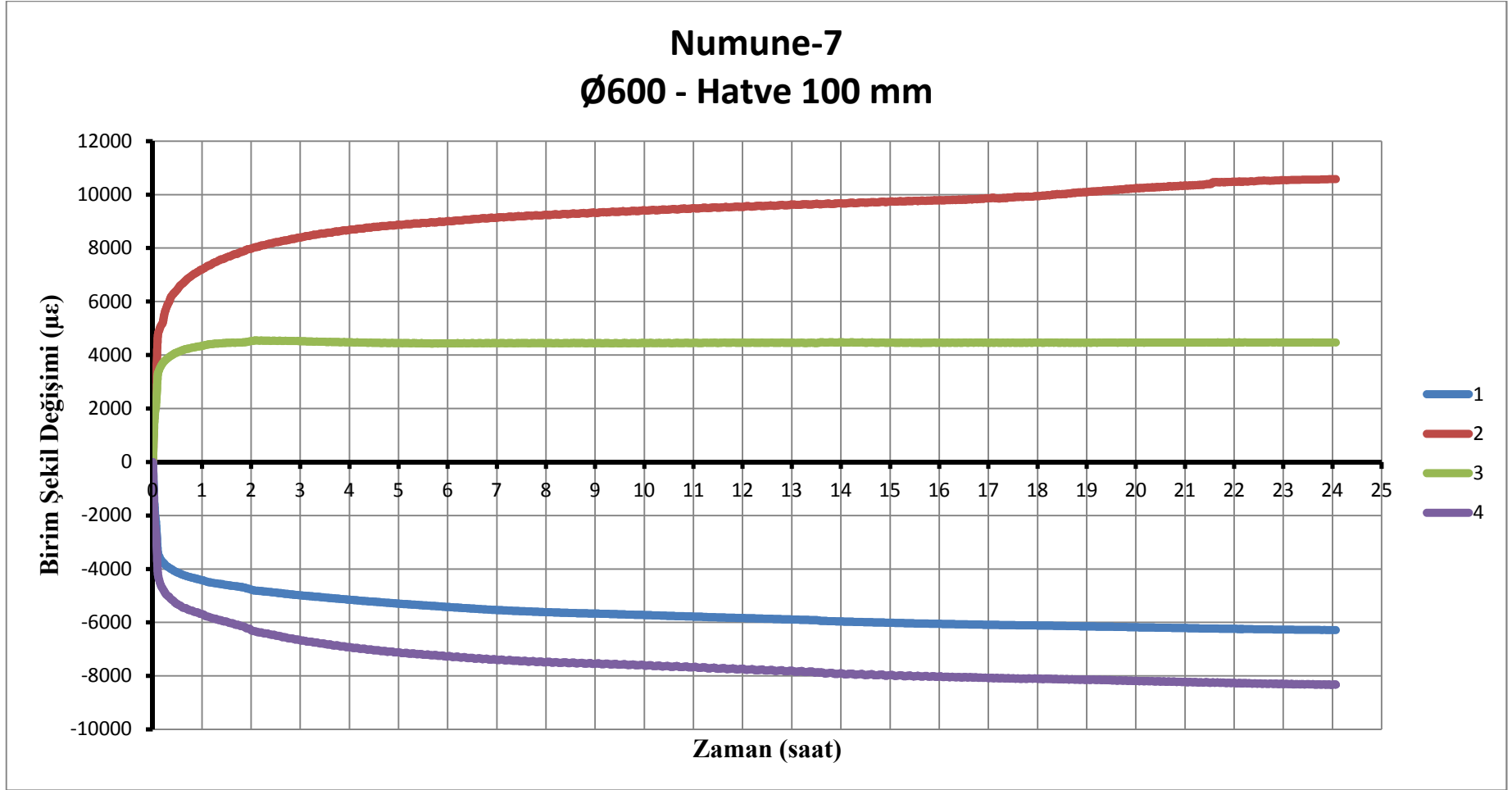
Şekil A.4 : Numune-4'ün birim şekil değişimi-zaman grafiği.



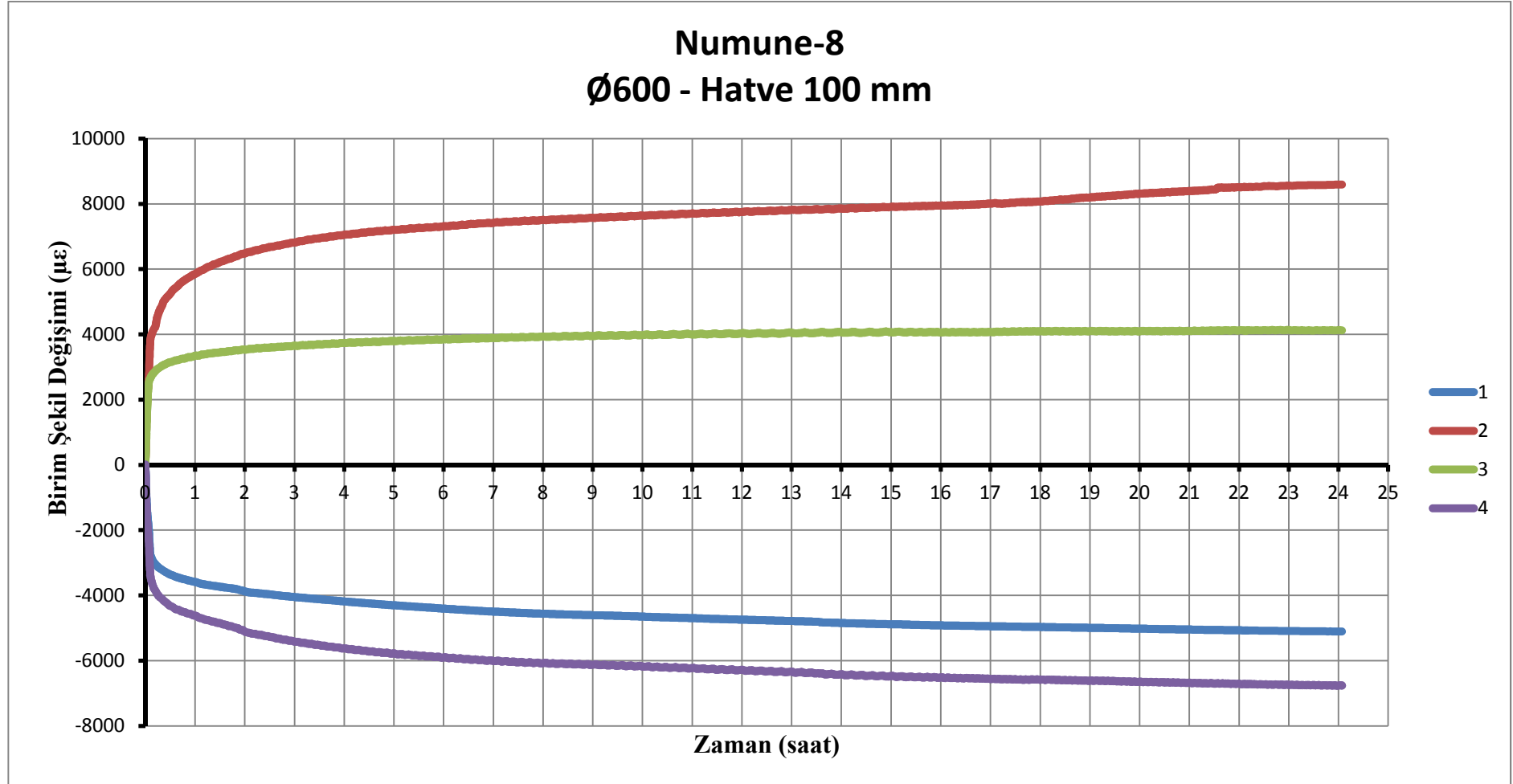
Şekil A.5 : Numune-5'in birim şekil değişimi-zaman grafiği.



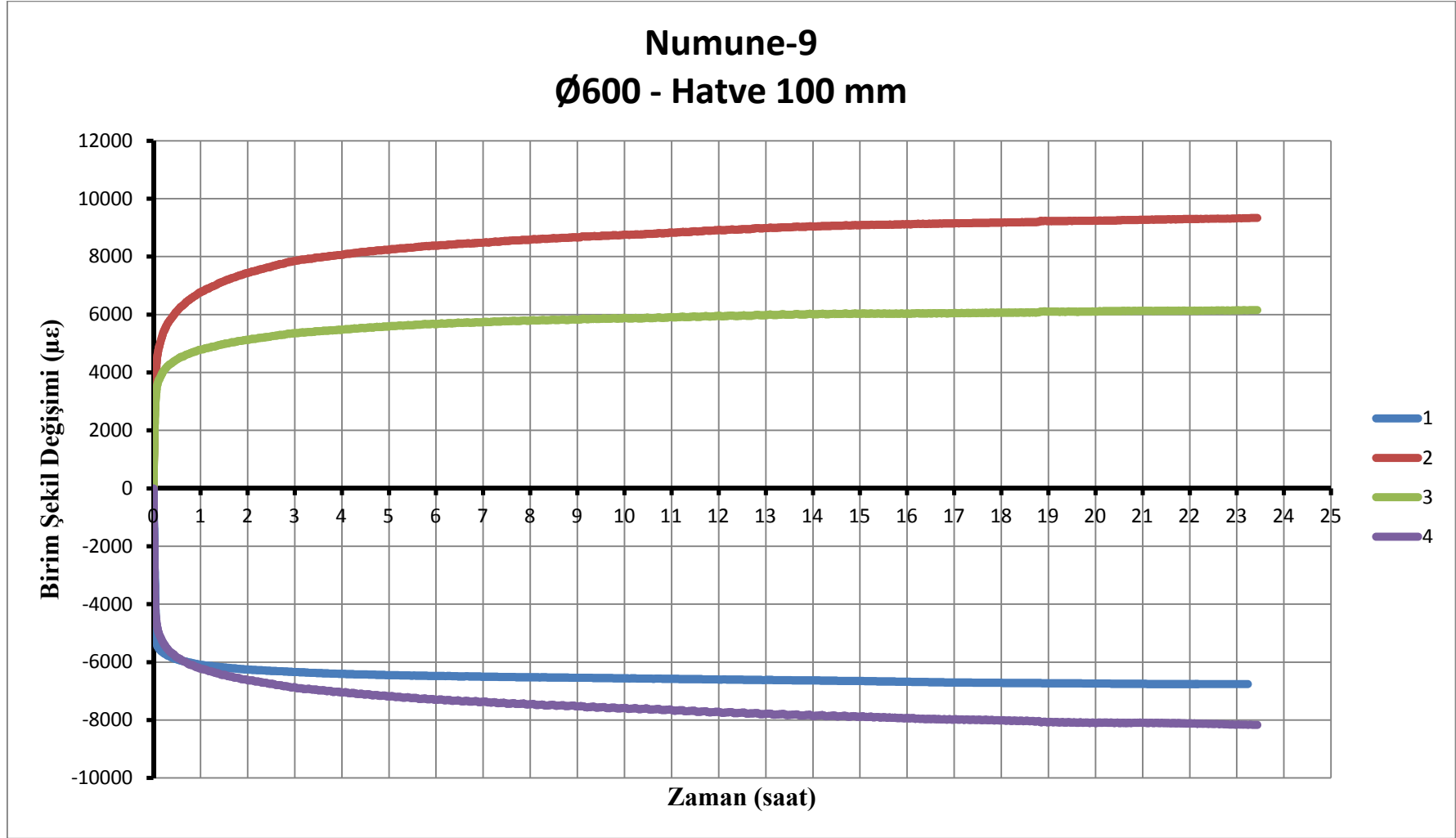
Şekil A.6 : Numune-6'nın birim şekil değişimi-zaman grafiği.



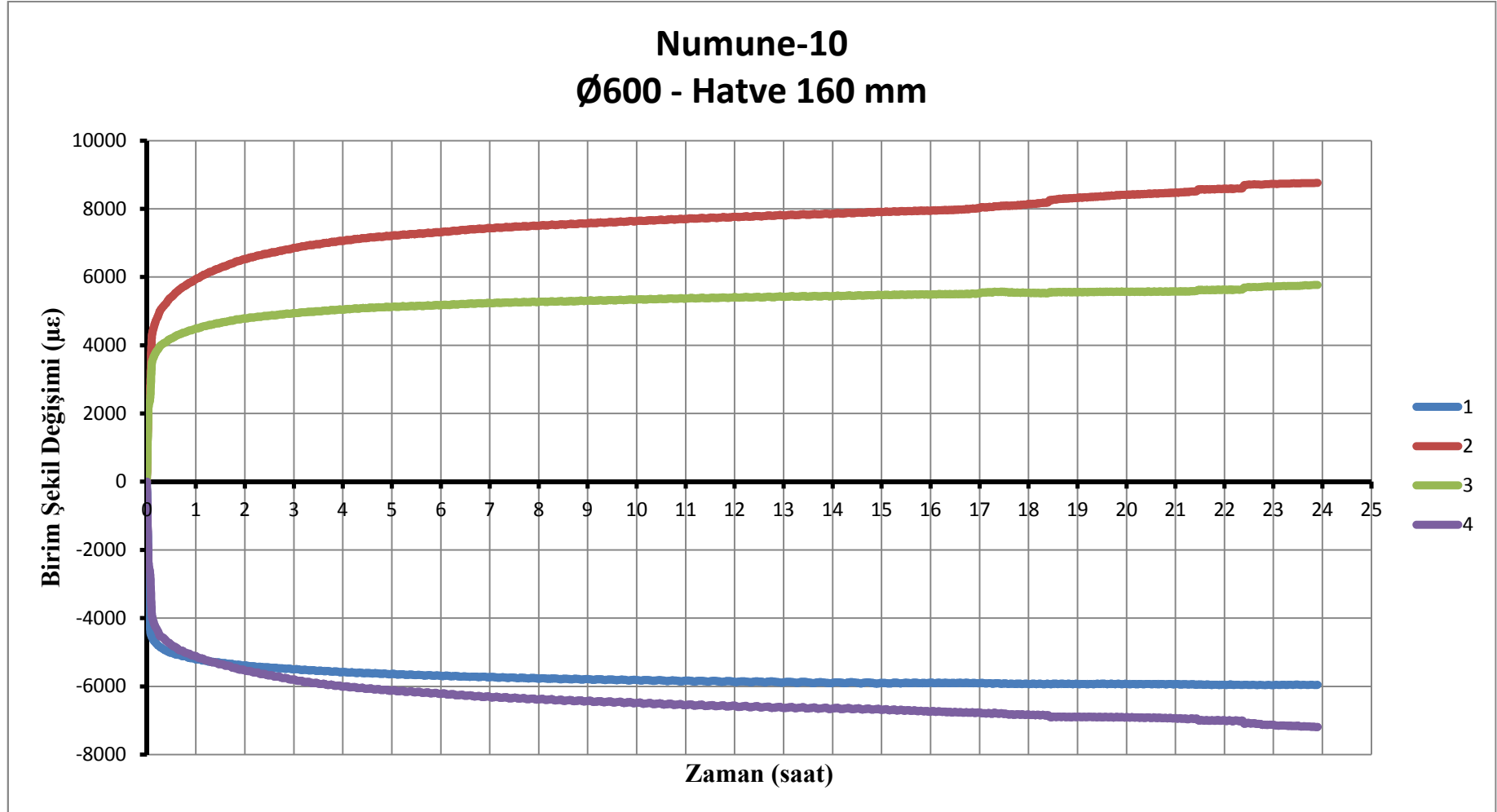
Şekil A.7 : Numune-7'nin birim şekil değişimi-zaman grafiği.



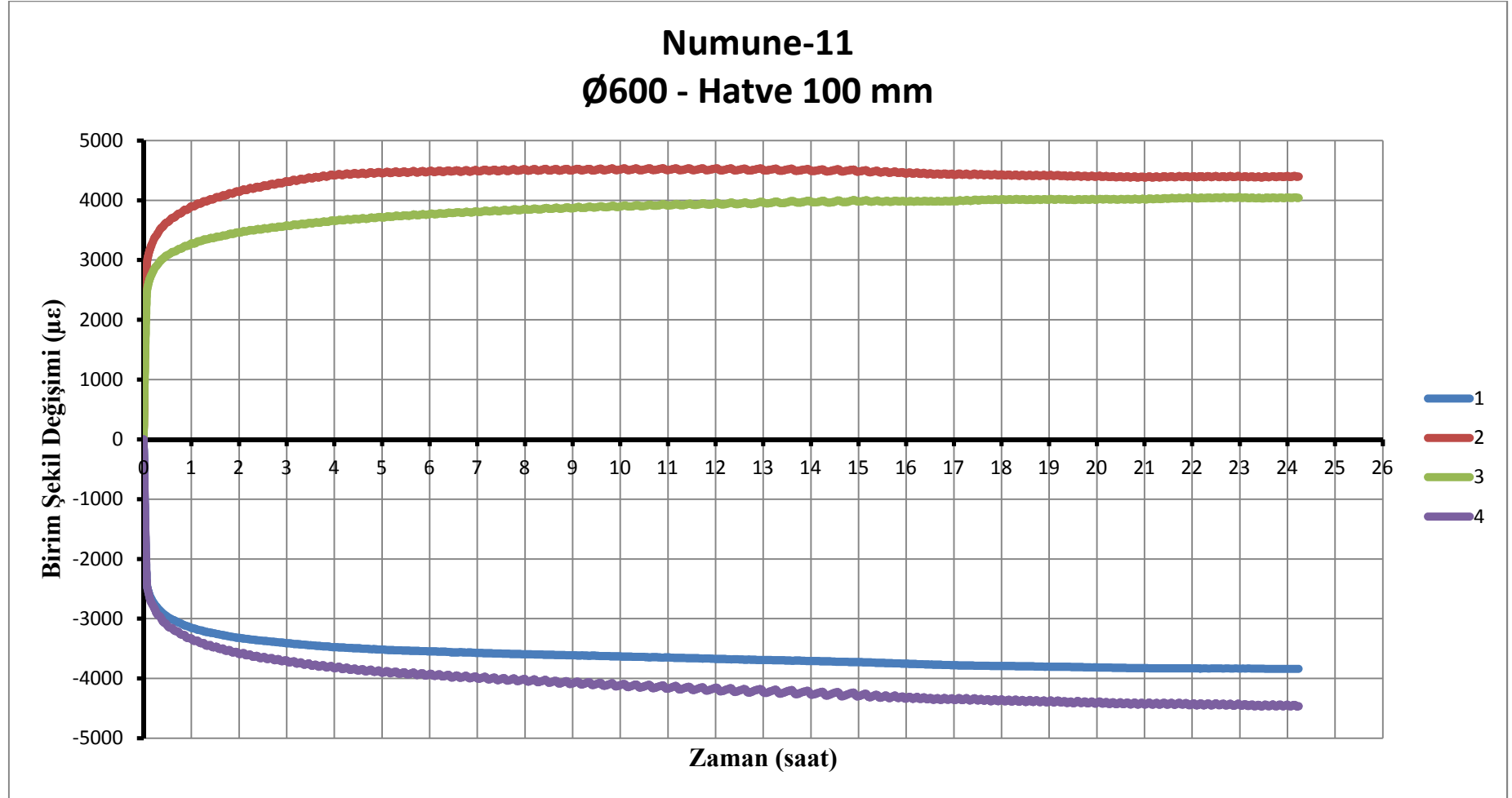
Şekil A.8 : Numune-8'in birim şekil değişimi-zaman grafiği.



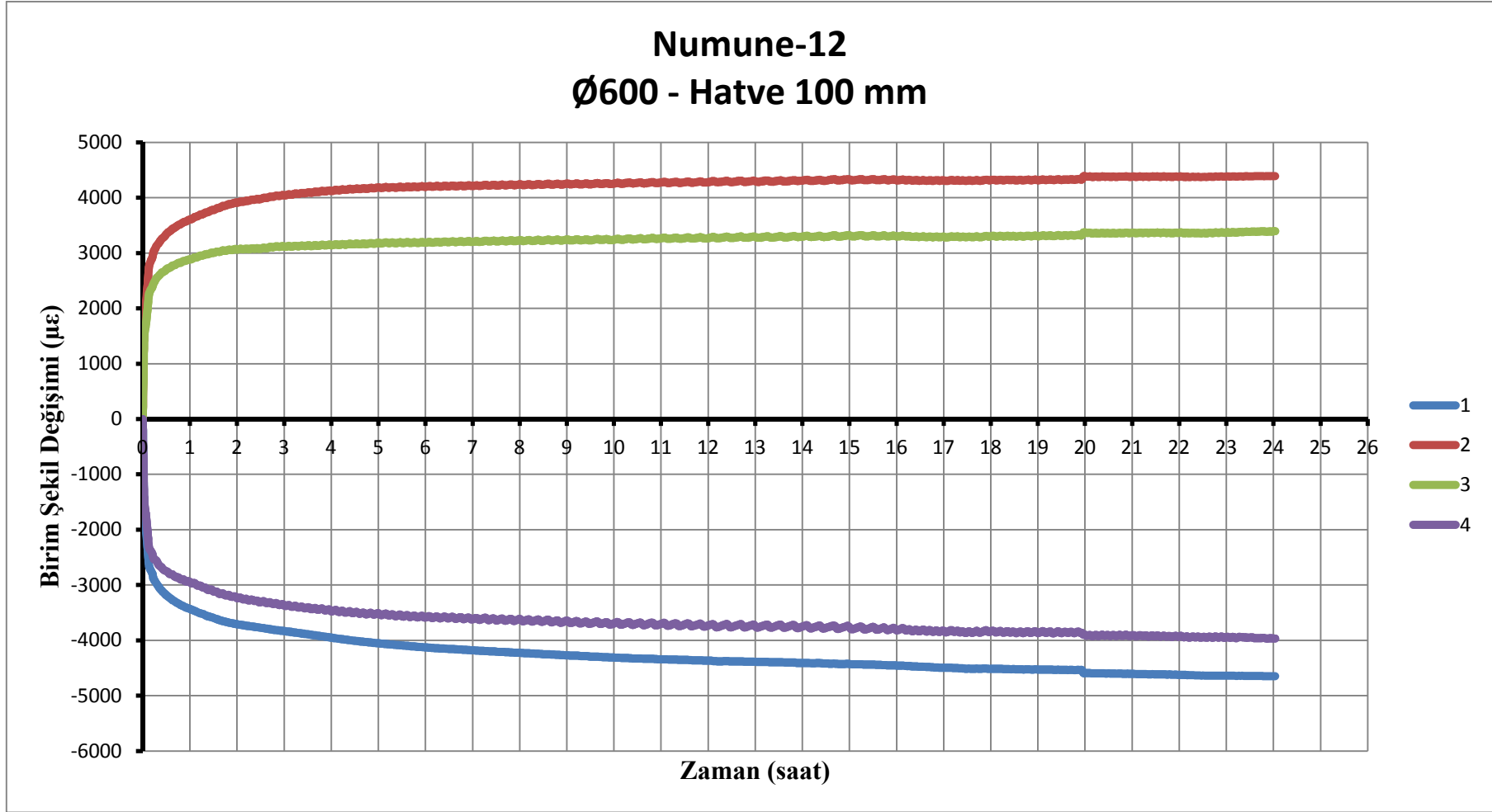
Şekil A.9 : Numune-9'un birim şekil değişimi-zaman grafiği.



Şekil A.10 : Numune-10'un birim şekil değişimi-zaman grafiği.

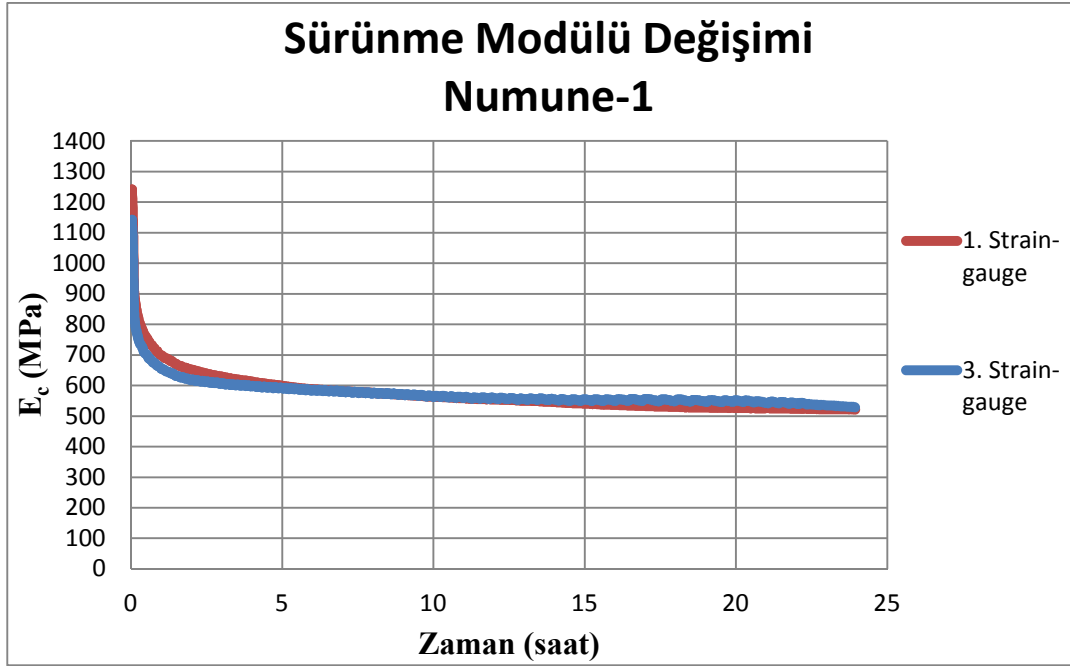


Şekil A.11 : Numune-11'in birim şekil değişimi-zaman grafiği.

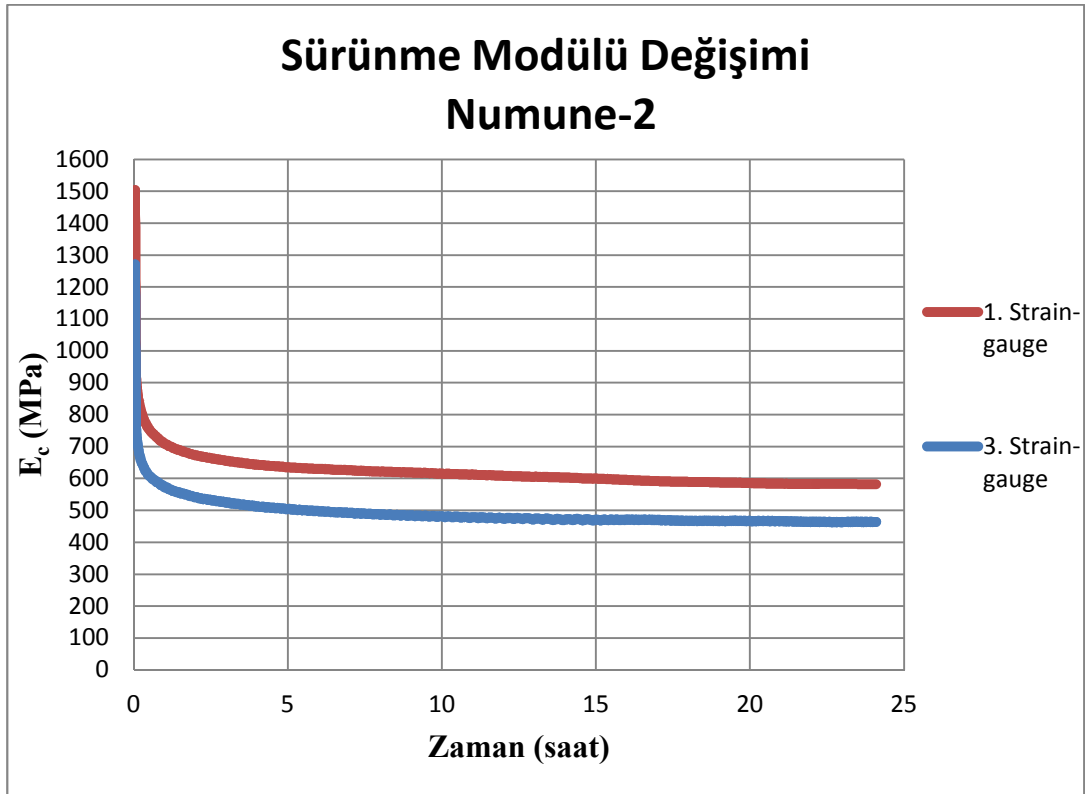


Şekil A.12 : Numune-12'nin birim şekil değişimi-zaman grafiği.

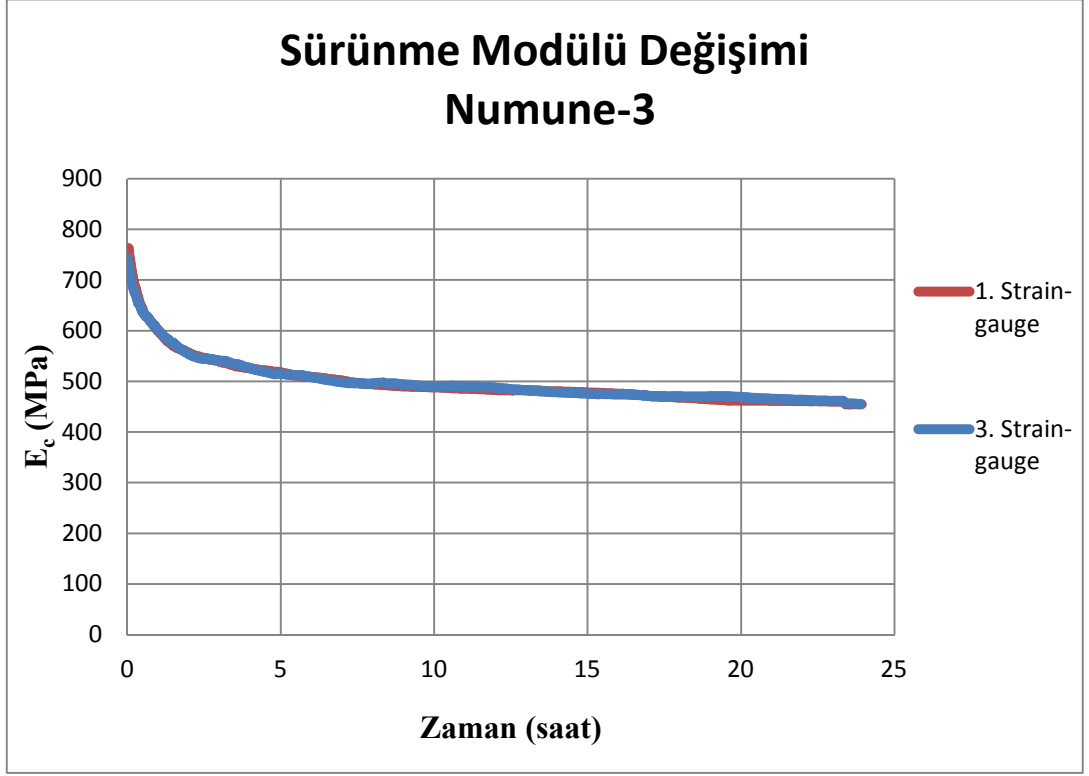
EK B : 1 numaralı strain-gaugeden elde edilen birim şekil değişimi değerleri için sürünme modülü-zaman grafikleri.



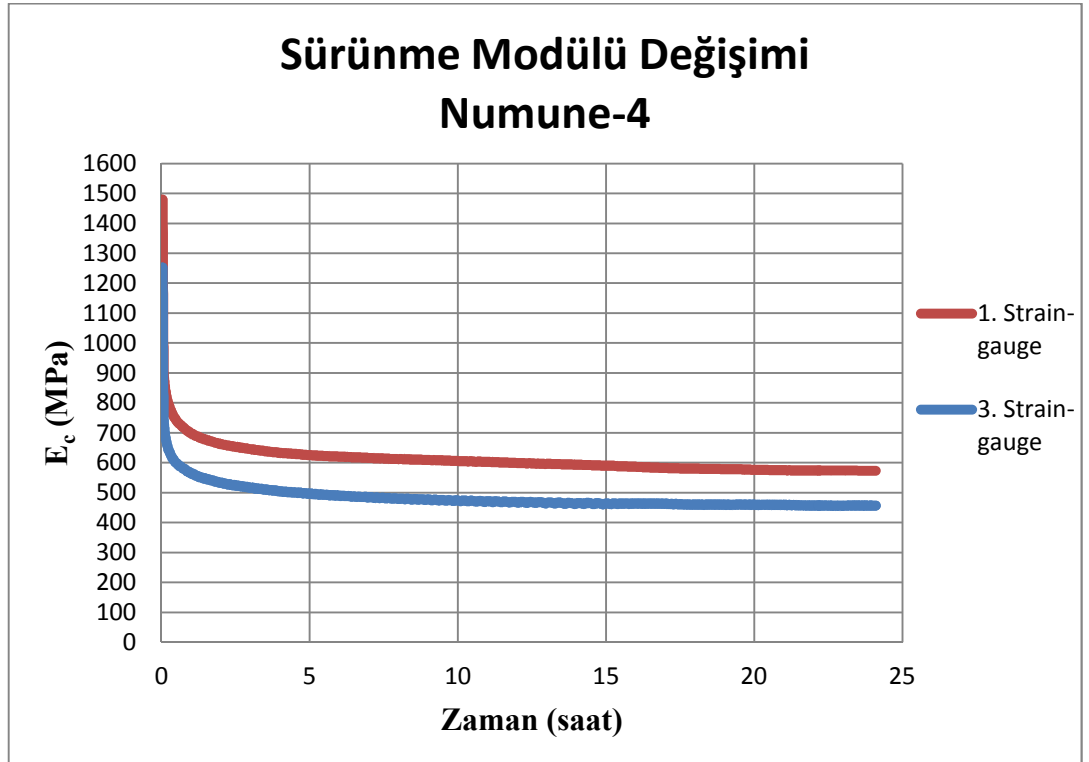
Şekil B.1 : Numune-1 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



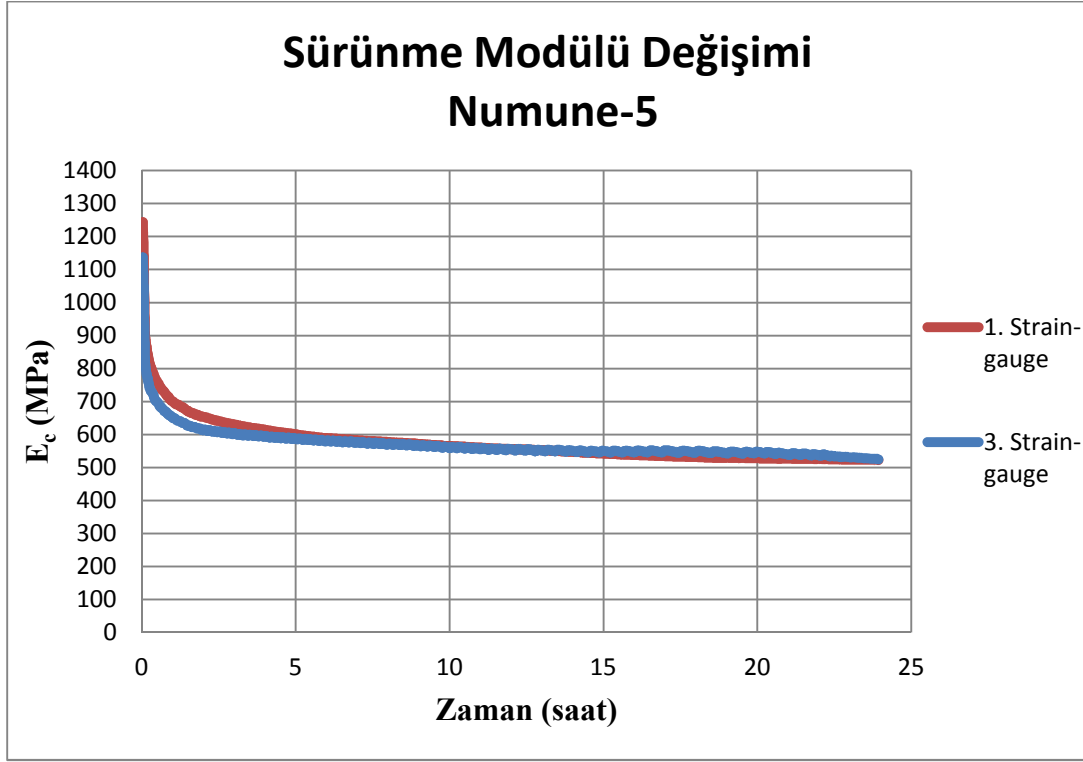
Şekil B.2 : Numune-2 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



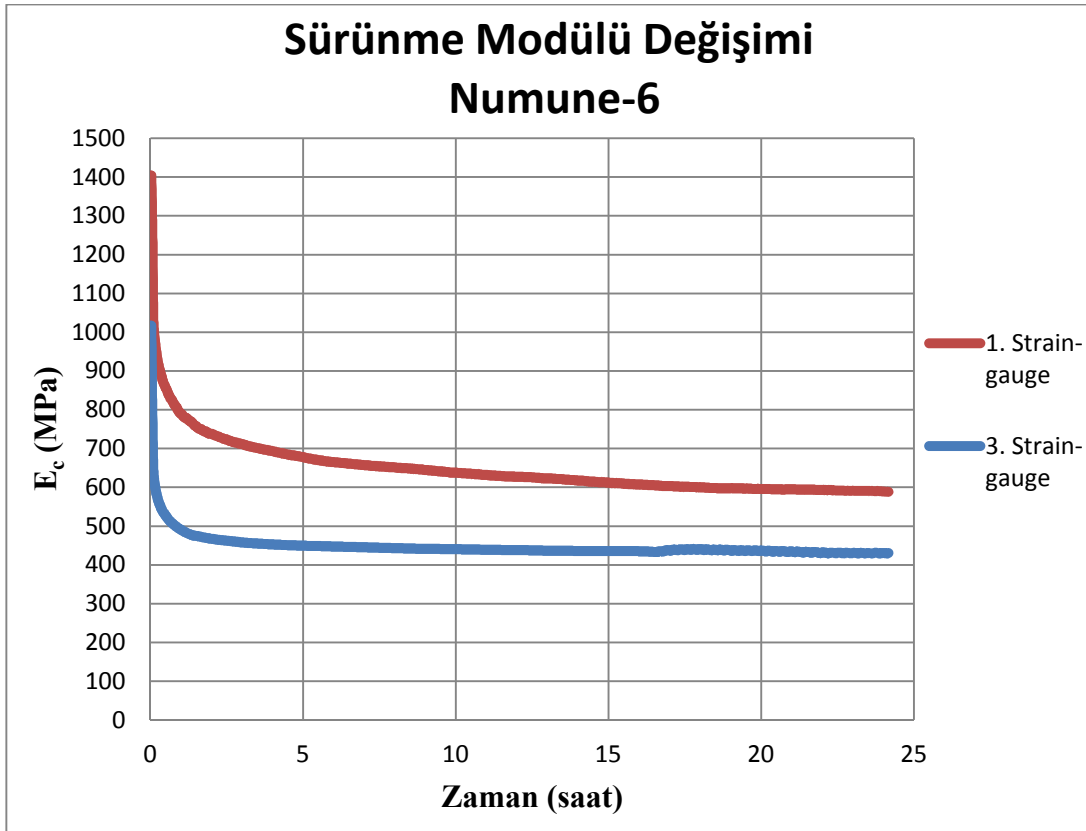
Şekil B.3 : Numune-3 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



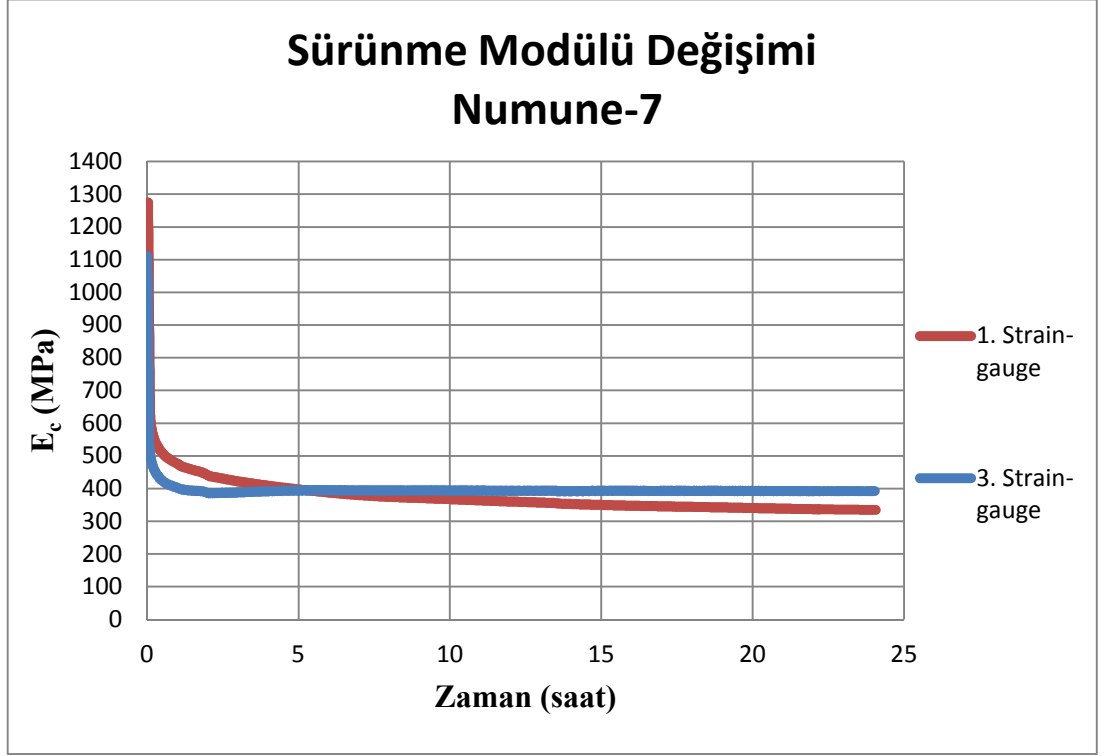
Şekil B.4 : Numune-4 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



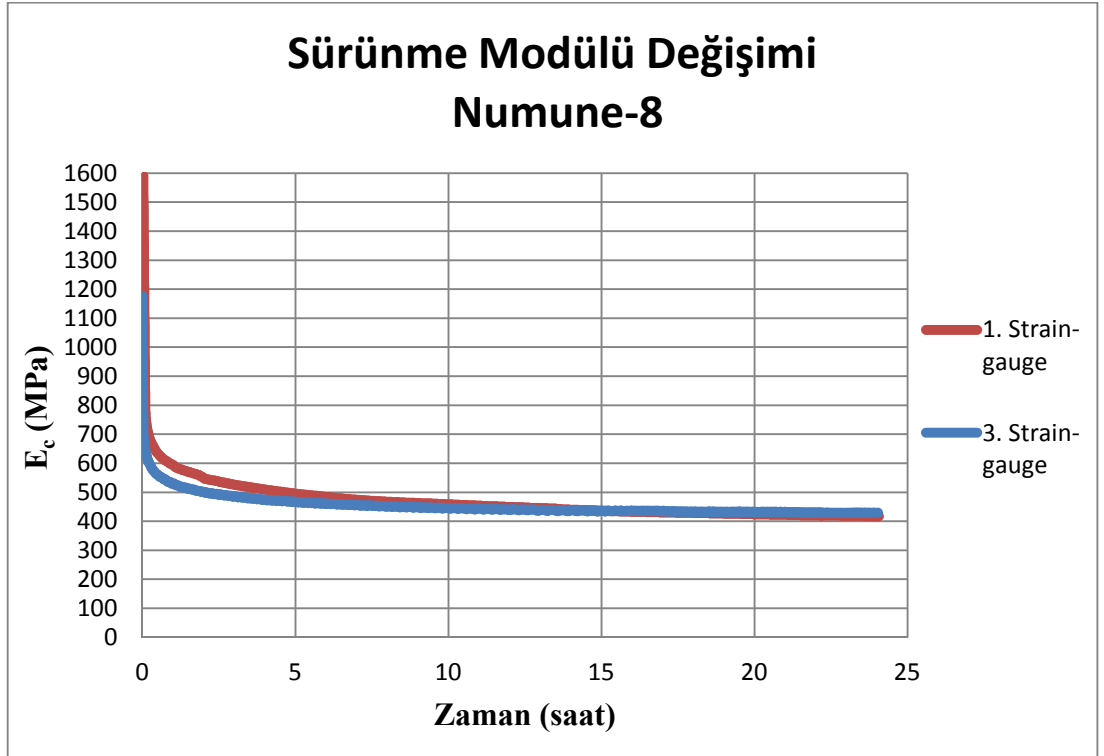
Şekil B.5 : Numune-5 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



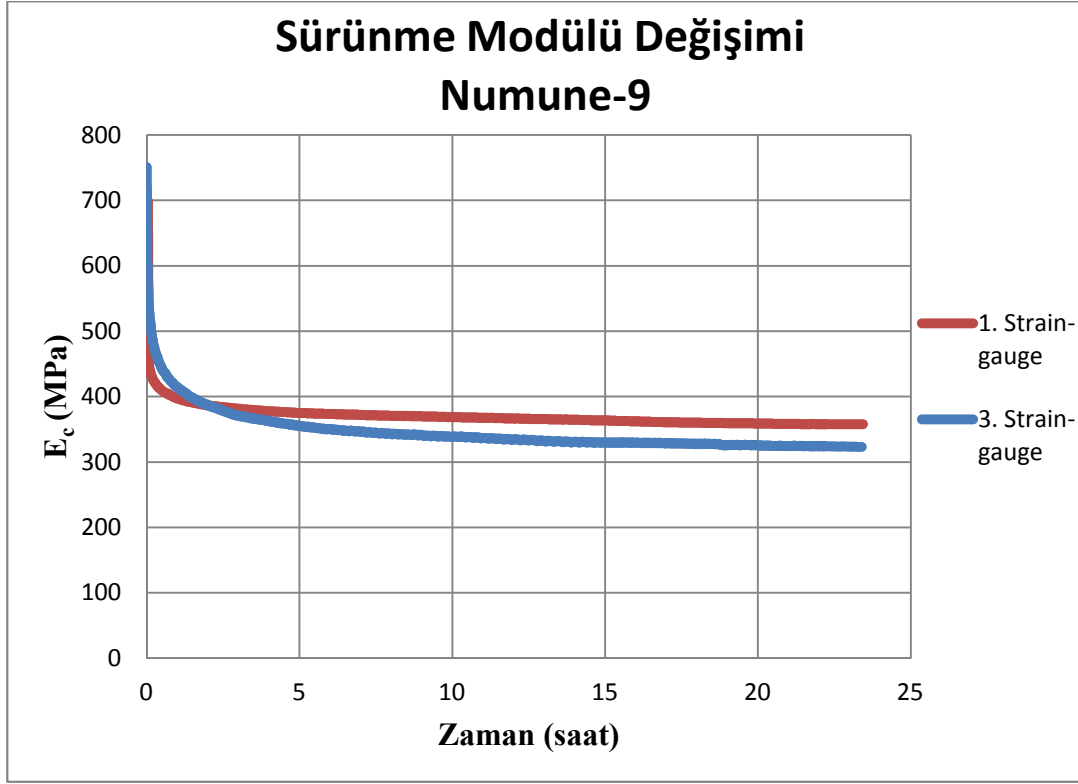
Şekil B.6 : Numune-6 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



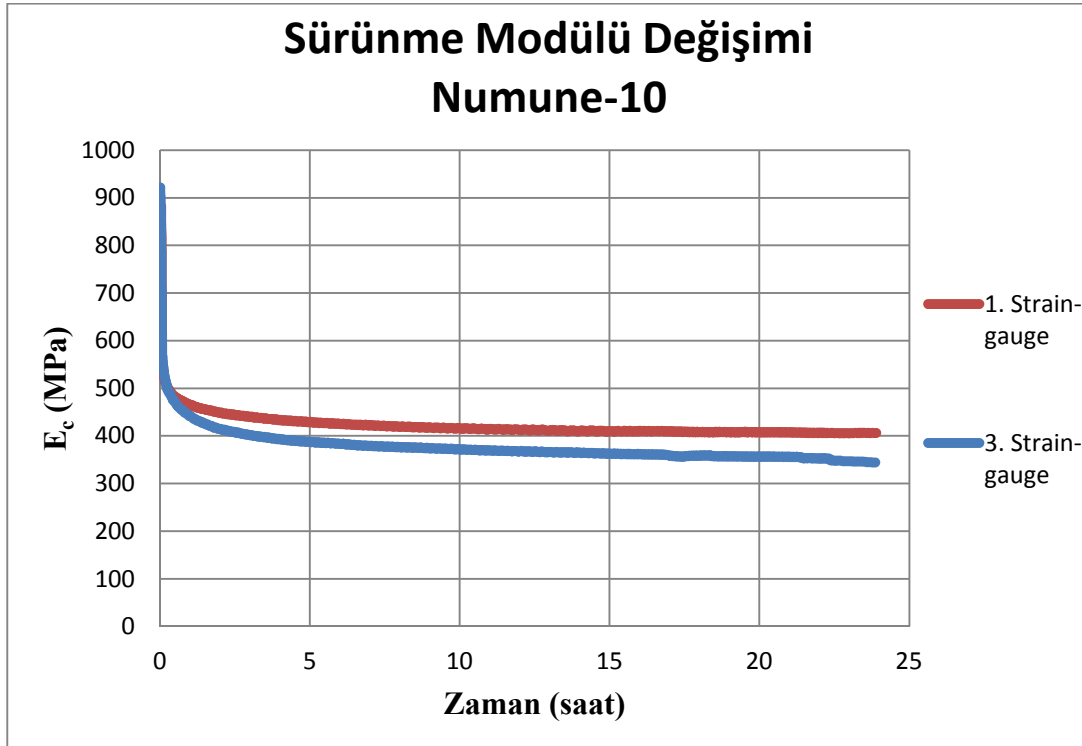
Şekil B.7 : Numune-7 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



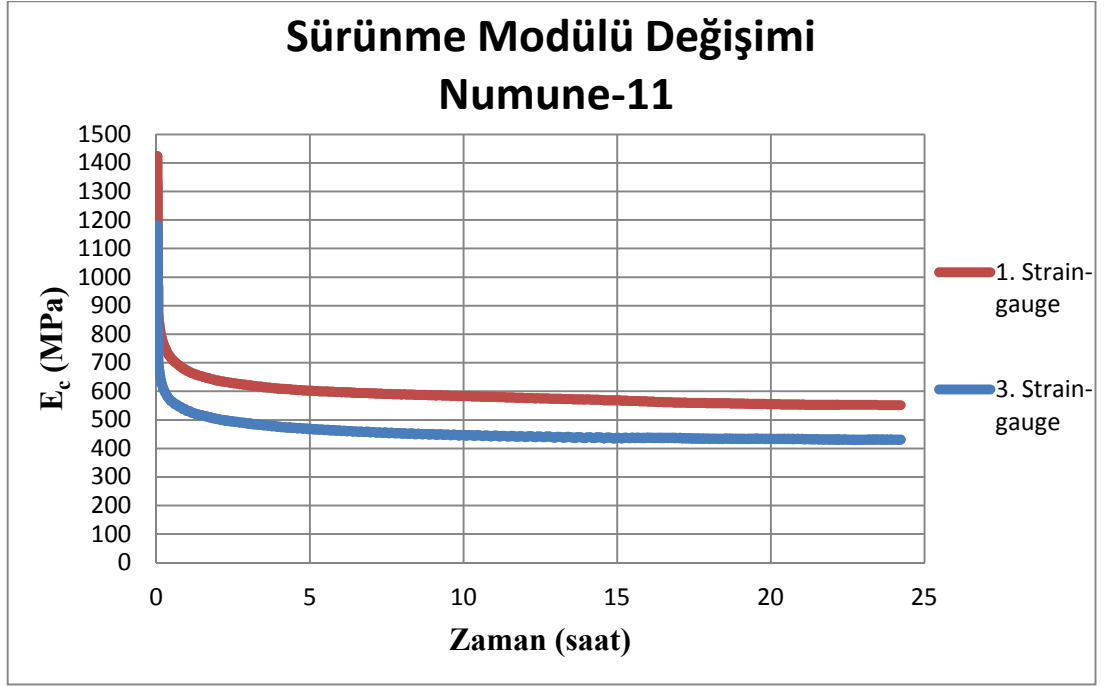
Şekil B.8 : Numune-8 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



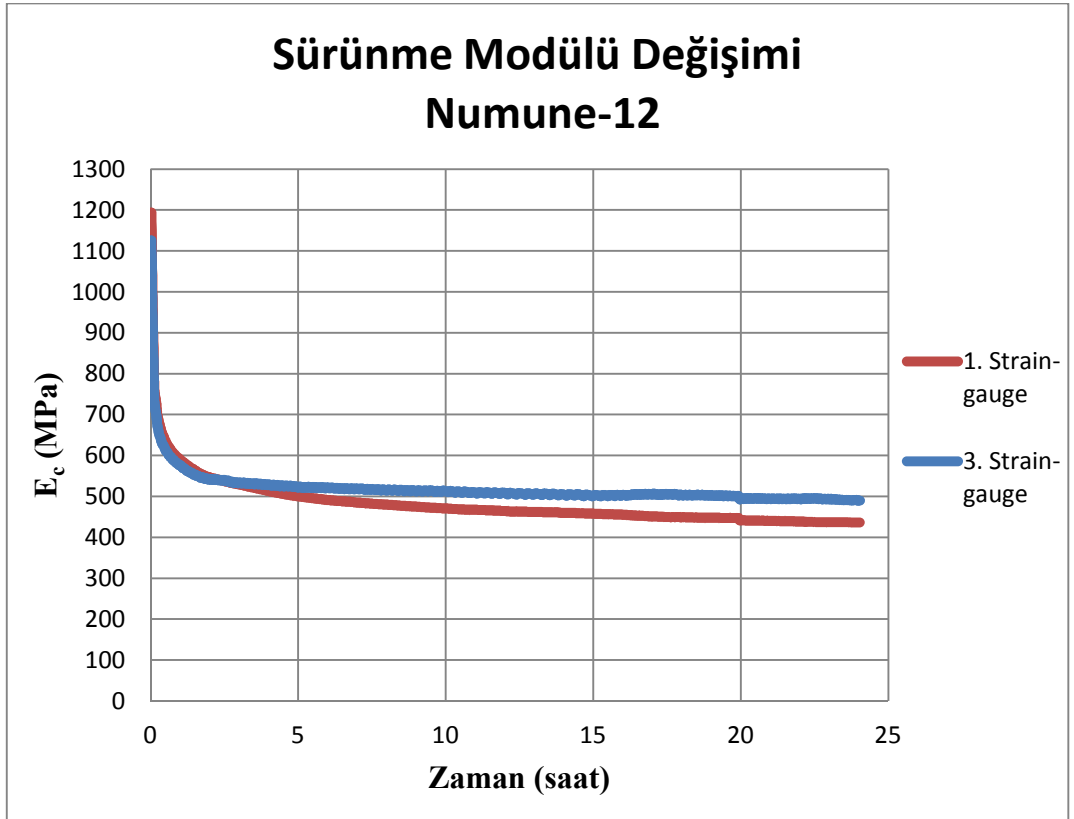
Şekil B.9 : Numune-9 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



Şekil B.10 : Numune-10 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



Şekil B.11 : Numune-11 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.



Şekil B.12 : Numune-12 için, 1. ve 3. Strain-gaugelerin yapıştırıldığı noktalardaki sürünme modülü değişimi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Abdi Orhan YAVUZ

Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir / 1986

Adres : Mecidiyeköy / İstanbul

Lisans Üniversite : İstanbul Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği

