

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLENİN VISKOELASTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ozan ÇELİKKAN**

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon

ŞUBAT 2011

**YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLENİN VİSKOELASTİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ozan ÇELİKKAN
(503071225)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 07 Şubat 2011**

**Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. İ. Mehmet PALABIYIK
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cemal BAYKARA
Y. Doç. Dr. Şahin AKKAYA**

ŞUBAT 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmaya başlamamı sağlayan, tezimin hazırlanmasında beni yönlendiren, bilgisini paylaşan değerli danışmanım Sayın Y. Doç. Dr. İ. Mehmet PALABIYIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni çalışmalarımı yaptığım DİZAYN Grup Teknoloji'ye kabul eden Ar-Ge Direktörü Dr. Zafer GEMİCİ'ye, değerli görüşleriyle çalışmaya zaman ayıran İTÜ İnşaat Fakültesi öğretim üyesi Sayın Y. Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU'na, deneyler ve tezimin hazırlanması sırasında hep yanımda olan, destekleyen DİZAYN Grup Teknoloji Ar-Ge çalışanı sevgili İsmınur GÖKGÖZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2010

Ozan Çelikkın

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 PE100 ve Karbon Siyahı	2
1.2 Literatürde Yapılmış Çalışmalar	4
2. POLİMERLERİN TEMEL YAPILARI	9
2.1 Polimerlerin Morfolojik Özellikleri	9
2.1.1 Polimerlerin molekül yapısı	9
2.1.2 Polimerlerdeki bağ kuvvetleri	10
2.1.3 Konformasyon	10
2.1.4 Polimer moleküllerinin yapısal şekli	11
2.1.5 Polimerlerin kristalleşmesi	12
2.2 Polimerlerin Fiziksel Özellikleri	17
2.2.1 Molekül ağırlığı.....	18
2.2.2 Molekül ağırlığı dağılımı	19
3. POLİMER MALZEMELERİN KARAKTERİSTİĞİ	21
3.1 Polimerlerin Mekanik Özellikleri.....	21
3.1.1 Gerilme-birim uzama	21
3.1.2 Malzemenin modülü.....	22
3.1.3 Gerilme-birim uzama davranışı.....	23
3.1.4 Mekanik özelliklere etkileyen faktörler	26
3.1.4.1 Sıcaklık etkisi.....	26
3.1.4.2 Çekme hızı etkisi.....	27
3.1.4.3 Kristallik etkisi.....	28
3.2 Polimerlerin Zamana Bağlı Davranışı.....	29
3.2.1 Viskoelastiklik.....	30
3.2.2 Polimerlerin sürünme davranışı	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
4.1 Deney Numuneleri	35
4.2 Çekme Sürünmesi Deney Tesisatı ve Deneyin Yapılışı.....	37
4.3 Deneysel Sonuçlar	41
4.4 Eğme Sürünmesi Deney Tesisatı ve Deneyin Yapılışı.....	50
4.5 Deneysel Sonuçlar	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

KISALTMALAR

ASTM	: American Society of Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneđi)
AYPE	: Alçak Yoğunluklu Polietilen
ÇYMAPE	: Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen
EDM	: Electrical Discharge Machining (Elektroerozyon İřleme)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
MFI	: Melt Flow Index (Erime İndeksi)
OYPE	: Orta Yoğunluklu Polietilen
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PN	: Nominal Pressure (Anma Basıncı)
PP	: Polipropilen
PS	: Polistren
PVC	: Polivinil Klorür
UFT	: Uzun Fiber Termoplastik
YYPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Polimerlerin Tg ve Tm değerleri	27
Çizelge 4.1 : PE100 Malzemenin diğer fiziksel özellikleri	35
Çizelge 4.2 : Kullanılan ağırlığa göre her tekrarda oluşan gerilme	42

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : PE malzemenin tonaj bakımından Avrupa’da artan kullanımı	3
Şekil 2.1 : Etilen monomeri ve Polietilen zinciri.....	9
Şekil 2.2 : Polimer zincirinin zigzag konformasyonu	10
Şekil 2.3 : Ana zincirdeki karbon atomlarının konumunun polimer zincirinin düzenine etkisi [16]	11
Şekil 2.4 : Farklı açılarla birbirine bağlı atomların oluşturduğu tek polimer zinciri [16]	11
Şekil 2.5 : a) Linear, b)-c) Dallı, d) Çapraz bağlı polimer.....	12
Şekil 2.6 : Püsküllü Demet (Fringed-Micelle) modeli [17].....	13
Şekil 2.7 : Katlanmış zincir (chain folded) modeli [16].....	14
Şekil 2.8 : Polietilenin üç fazlı morfolojisi.....	15
Şekil 2.9 : Küresel kristal yapının şematik gösterimi [19]	16
Şekil 2.10 : Küresel kristal genişlemesi ve birbirleriyle oluşturdukları sınır [16].....	16
Şekil 2.11 : Molekül ağırlığı-çekme dayanımı ve erime viskozitesi.....	19
Şekil 2.12 : Dar ve geniş molekül ağırlığı dağılımı [20]	19
Şekil 3.1 : Çekme durumunda oluşan boyut değişimi	21
Şekil 3.2 : Gerilme-birim uzama davranışındaki elastiklik modülleri [27].....	23
Şekil 3.3 : Polimer malzemenin gerilme-birim uzama davranışı [22].....	24
Şekil 3.4 : a)Polimer molekülünün uzaması b)Bağlı molekül zincirinin açılması c)Moleküller arası kayma [22]	25
Şekil 3.5 : Farklı malzemeler için gerilme-birim uzama davranışları [15].....	26
Şekil 3.6 : Tipik bir polimerin gerilme-birim uzama eğrileri ve farklı sıcaklıklardaki elastiklik modülü [25].....	27
Şekil 3.7 : Farklı uzama hızlarında ve 23 ⁰ C’de YYPE’nin çekme gerilmesine karşı yüzde şekil değişimi [26]	28
Şekil 3.8 : Modül-sıcaklık eğrisi üzerinde kristallik etkisi [15]	29
Şekil 3.9 : İdeal elastik davranış [23]	29
Şekil 3.10 : Saf viskoz davranış [23]	30
Şekil 3.11 : İki farklı zamanda elastik ve viskoelastik malzemelerin gerilme-birim uzama davranışı [31]	31
Şekil 3.12 : Zamana bağlı yüzde şekil değişimi [32].....	33
Şekil 4.1 : PE100 malzemenin çekme davranışı.....	36
Şekil 4.2 : Enjeksiyonla kalıplanmış çekme sürünmesi numunesi.....	37
Şekil 4.3 : Enjeksiyonla kalıplanmış eğme sürünmesi numunesi.....	37
Şekil 4.4 : Üç istasyonlu çekme sürünmesi cihazı.....	38
Şekil 4.5 : Sürünme cihazı manivela sistemi.....	38
Şekil 4.6 : Çekme çenesi ve numune	39
Şekil 4.7 : Çekme sürünmesi testlerinde kullanılan program ara yüzü	40
Şekil 4.8 : Çekme sürünmesi testlerinde kullanılan uzama ve sıcaklık göstergeleri	41
Şekil 4.9 : 2 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	42

Şekil 4.10 : 3.4 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	43
Şekil 4.11 : 5.6 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	43
Şekil 4.12 : 6.1 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	44
Şekil 4.13 : 6.8 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	44
Şekil 4.14 : 8 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	45
Şekil 4.15 : 9.3 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	45
Şekil 4.16 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama birim uzama-lineer zaman ilişkisi.....	46
Şekil 4.17 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama birim uzama-logaritmik zaman ilişkisi	47
Şekil 4.18 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama sürünme birim uzaması-logaritmik zaman ilişkisi.....	48
Şekil 4.19 : Malzemenin gerilme-birim uzama ilişkisi.....	48
Şekil 4.20 : Sürünme modülü-log zaman ilişkisi.....	49
Şekil 4.21 : Eğme sürünmesi test cihazı	50
Şekil 4.22 : Eğme sürünmesi testi şeması.....	51
Şekil 4.23 : Eğme sürünmesi testi düzeneği	52
Şekil 4.24 : Eğme sürünmesi testlerinde kullanılan program ara yüzü	53
Şekil 4.25 : 2 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi	54
Şekil 4.26 : 5.6 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi	54
Şekil 4.27 : 8 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi	55
Şekil 4.28 : Ortalama eğme sürünmesi birim uzama-lineer zaman ilişkisi	55
Şekil 4.29 : Eğme gerilmesi-Eğme birim uzaması ilişkisi.....	56
Şekil 4.30 : Eğme sürünmesi modülü-logaritmik zaman ilişkisi.....	56

SEMBOL LİSTESİ

D	: Çekme Kompliansı
E	: Elastiklik Modülü
L₀	: Başlangıç boyu
s_t	: Toplam çökme
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
σ	: Gerilme
σ_t	: Gerçek Gerilme
ε	: Birim Uzama
ε_c	: Sürünme Birim Uzaması
ε_e	: Elastik Birim Uzama
ε(%)	: Yüzde Uzama
ε̇	: Birim Uzama Hızı
ε_t	: Gerçek Birim Uzama
η	: Viskozite
τ	: Kayma Gerilmesi
v	: Poisson oranı

YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLENİN VİSKOELASTİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

PE, boru üretim endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir hammaddedir. Korozif şartlara karşı direnç, toprak altında kullanmak için yeterli dayanım ve kolay montaj edilebilmesi sayesinde altyapı sistemlerinde, akışkanların toprak altında taşınmasında önemli bir yere sahiptir. Bunun dışında, plastik boruların mekanik özelliklerinin beton ve çelik gibi geleneksel malzemelerinden karmaşık olduğu iyi bilinir. Borunun toprak altında yüklendiğinde göstereceği davranış malzemenin mekanik davranışıyla ilişkilidir.

YYPE malzeme zamana bağlı davranış göstermektedir. Bu çalışmada, YYPE malzemenin viskoelastik davranışlarını tanımlamak üzere iki farklı sürünme deneyi yapılmıştır. Deneylerden ilki, YYPE malzemenin lineer, non-lineer bölgesini belirlemek için yapılan çekme sürünmesi deneyleridir. Kaşık tipi numune sabit yük altında 24 saat boyunca çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Uygulanan gerilmeler 2 MPa ile 9.3 MPa arasında değişen 7 farklı değerdedir. Deformasyonun çoğu ilk 1000 sn'de meydana gelmiş daha sonrasında ya çok az ya da hiç değişim olmamıştır. Birincil ve ikincil sürünme bölgesi gözlemlenmiştir. Ancak üçüncül sürünme bölgesine geçiş gözlemlenmemiştir. Meydana gelen maksimum yüzde uzama en büyük gerilme seviyesinde test sonunda %5 civarındadır. Uygulanan gerilme değerinin artmasıyla birim uzama değeri de artmaktadır. Numune yaklaşık 6.1 MPa gerilme seviyesinden sonra lineer viskoelastik davranıştan non-lineer viskoelastik davranışa geçmiştir.

Deneylerden ikincisi ise eğme sürünmesi deneyidir. Bu deney, plastik boruların halka rijitliğinin belirlenmesi için gerekli olan malzemenin eğme sürünmesi modülünü bulmaya yönelik bir ön çalışmadır. Malzemenin modülü, üç nokta eğme testiyle sabit yük altında 24 saat sonunda numune üzerinde oluşan toplam çökme değerinden elde edilmiştir. Uygulanan eğilme gerilmesi seviyesi arttıkça meydana gelen çökme artmıştır. Çökmenin çoğu ilk 1000 sn'de meydana gelmiş, daha sonrasında yavaşlayarak artmaya devam etmiştir. Oluşan maksimum yüzde uzama yaklaşık %2 civarındadır. Malzemenin 8MPa gerilme seviyesine kadar olan davranışı lineer viskoelastik karakterdedir. Malzemenin modülü, çökmenin değerinin hızlı bir şekilde arttığı zaman aralığında hızlıca düşmüş ve 24 saatlik deney sonuna doğru, farklı gerilmeler için eğilme modülleri birbirine yakın değerlere düşmüştür. Boruların halka rijitliğinin tespiti için yapılan bu ön çalışmada PE100 malzemenin 2 MPa'lık eğme gerilmesi altında elde edilen eğme modülü değeri istenen seviyededir.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE

SUMMARY

PE has been widely used in piping manufacturing industry as a raw material. Due to resistance against corrosive environment, adequate strength for usage in underground and easy installation, it has an important place in fluid transfer for infrastructure systems. Furthermore, It is well known that the mechanical properties of plastic pipes is more complicated than traditional materials as concrete and steel. How the pipe behaves underground when it is loaded is related with the mechanical behaviour of material.

HDPE material exhibits time-dependent behaviour. In this work, to identify viscoelastic behaviour of HDPE material, two type of creep experiments have been performed. The first of experiments is tensile creep experiment which is done to characterize linear, non-linear region. Dog-bone type specimen was subjected to tensile stress for 24 hours under constant load. Applied stresses are seven different value changing between 2 MPa and 9.3 MPa. The large of deformation occurred within the first 1000 seconds and then either very little or none deformation observed. Primary and secondary creep stage have been observed. However, tertiary creep stage has not been observed. At highest stress level, maximum strain per cent was roughly 5% at the end of the experiment. With increasing in applied stress, strain increases. After reaching about 6.1 MPa stress level, specimen passes from linear viscoelastic response to non-linear viscoelastic response.

The second of experiments is flexural creep experiment. This experiment is a preliminary work aiming at flexural creep modulus which is necessary to define the stiffness of plastic pipe. Modulus of the material has been obtained from total deflection value at the end of 24 hours by using three point bending experiment under constant load. Deflection increases with increasing in applied flexural stress level. The large of deflection occurred within in first 1000 seconds, after that, continued to increase slowly. Maximum strain per cent occurred was about 2%. Material exhibited linear viscoelastic response to 8 MPa stress level. Modulus of material decreased while deflection value was rapidly increasing, and then toward the end of experiment for 24 hours, flexural modulus closed to each other for different stress level. In this preliminary work which was done to define the ring stiffness of pipe, under 2 MPa stress level for PE100, flexural modulus value that has been obtained is desired level.

1 GİRİŞ

Günümüzde polimerik malzemeler, üretim teknolojisinin ve tecrübesinin gelişimine bağlı olarak giderek artan bir kullanıma sahiptir. Bu malzemelerden biri de genellikle toprak altında atık su, yağmur suyu...vb akışkanların taşınmasında kullanılan YYPE'dir. PE; hafiflik, düşük yoğunluk, üretim kolaylığı ve kolay şekillendirilebilme, kimyasal maddelere ve korozyona direnç, ekonomiklik ve uygun dayanımın gibi birçok özelliğin bir araya gelmesinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir malzemedir.

Polietilen oldukça basit bir zincir düzenine sahiptir. Polimer biliminde üzerinde en çok çalışılan malzemelerden biri olmasına rağmen, malzemenin mekanik özelliklerini; kimyasal ve morfolojik yapısı, yoğunluğu, molekül ağırlığı gibi bazı fiziksel özellikler, sıcaklık, nem gibi diğer birçok çevresel faktör etkilemektedir. Bu etki, malzemenin çimento ya da metal gibi geleneksel boru üretiminde kullanılan diğer malzemelere göre daha karmaşık ve anlaşılması zor hal almasına neden olmaktadır.

Polietilen, düz zincirli hidrokarbonların polimerizasyonu ile elde edilen ve iki farklı düzenden oluşan yarı kristalin bir malzemedir. Hem sıvı gibi akışkan özelliği hem de katı gibi elastik özelliği bir arada sergilemektedir. YYPE, zamana bağlı viskoelastik özellik göstermektedir. Malzemenin yük altındaki zamana bağlı davranışının bilinmesi, mühendislik tasarımında oldukça gerekli ve önemlidir. Ancak, malzemenin yük altında lineer davranış dışında nonlineer davranışta göstermesi, mekanik davranışın belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, standartlara göre hazırlanmış numuneler farklı gerilme seviyeleri altında zamana bağlı çekme ve eğme sürünme testlerine tabi tutulmuştur.

Bu çalışma, amacı doğrultusunda toplam beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler kısaca özetlenecek olursa;

İkinci bölümde, polimerik malzemelerin temelinden başlayarak zincir düzenlerinden ve molekül yapısından bahsedilmiştir. Malzemenin özelliklerini belirleyen kristalin-

amorf yapıların oluşumu, şekli ve meydana getirdikleri düzen hakkında detaylı bilgi sunulmuştur. Polimerlerin morfolojik özellikleri yanında, malzemenin davranışını etkileyen ve birbiriyle ilişkili bazı fiziksel özelliklere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, plastik boruların yapısal faktörler karşısında davranışının bilinmesi için gereken, polimerik malzemenin mekanik özelliklerinden bahsedilmiş, sıcaklık, çekme hızı ve kristallik oranı gibi bazı değişkenlerin malzemenin mekanik özelliklerine etkisine yer verilmiştir. Yapılan deneylere yönelik polimerik malzemelerin viskoelastik özellikleri ve sürünme davranışı incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak, kullanılan çekme ve eğme numunelerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiş, ardından her deney türü için deney tesisatı ve deneyin yapılışı anlatılmıştır. Yapılan deneyler ile malzemenin viskoelastik davranışının sınırlarının belirlenmesi amaçlanmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

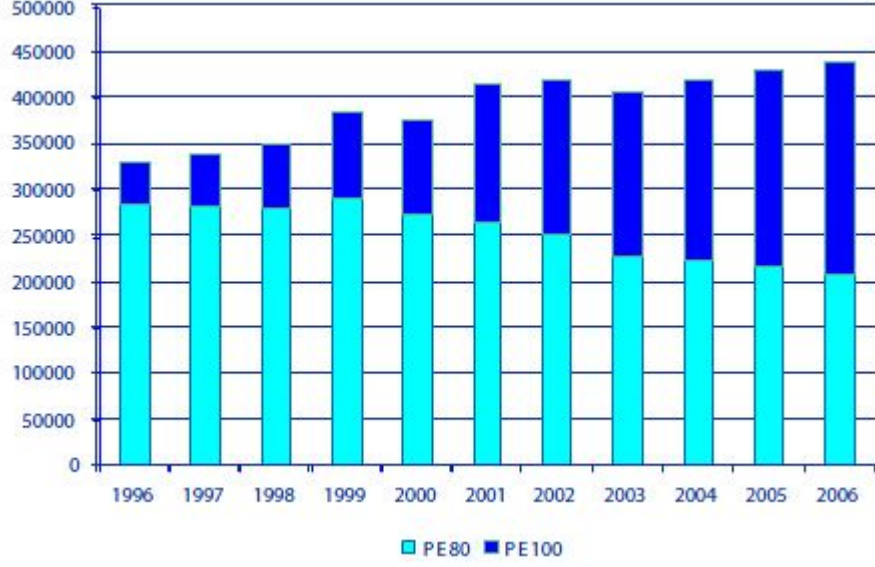
Beşinci bölümde, yapılan çekme ve eğme sürünmesi testlerinden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. İleri çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

1.1 PE100 ve Karbon Siyahı

Plastik teknolojisinin hızlı gelişimi hammadde üretiminde de önemli gelişmelerin yaşanmasını sağlamıştır. Artan talepler PE üreticilerini yeni araştırma ve geliştirmelere yönlendirmiştir. İlk olarak Avrupa'da 1990 da gaz ve su boru olarak kullanılmıştır.

Değeri PE32'lerden başlamış olup PE125 üzerinde çalışmalar devam etmektedir. PE100'ün en büyük avantajı yüksek bir gerilme mukavemetine ve güvenlik katsayısına sahip olmasıdır.

Bu mukavemet değerinin yükselmesi üretilen boruların daha düşük et kalınlıkları ile daha yüksek basınçlarda çalışması, aynı basınç sınıfı için et kalınlığının incilmesi anlamına gelmektedir. Bu ise hammadde tasarrufu ile PE 100 borunun iç çap değerinin artması anlamına gelmektedir. PE100 ile üretilen borularda ürün kalitesi artarken, %30'a varan malzeme tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır. Bu değerlerdeki iyileşmeler alternatif ürünler karşısında maliyet avantajı sunduğundan pazar payını arttırmaktadır. Şekil1.1'de 1996-2006 yılları arasında Avrupa'da PE kullanımının tonaj bakımından artışı gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : PE malzemenin tonaj bakımından Avrupa’da artan kullanımı

PE100 rakamı ürünün çevresel gerilme (σ) değeri olan 10.0 MPa’ya işaret etmektedir. Boru sınıflamasına temel olan MRS testi, PE100’ün 20 °C’de 10 MPa basınca minimum 50 yıl dayanacağını gösteren bir test olup, kullanım yerine göre formülasyonundaki emniyet katsayıları değişebilmektedir [1-3]

PE100 boruların kullanım alanları;

- Yeraltı ve yerüstü içme ve kullanma suyu şebekelerinde
- Deniz deşarj sistemleri
- Kanalizasyon deşarj sistemleri
- Atık su sistemleri
- Drenaj projelerinde
- Tarımsal Sulama sistemleri
- İlaç ve kimya sanayi
- Petrokimya sanayi
- Telekomünikasyon kablolama sistemleri

PE100 borunun avantajları;

- PE100 borunun ömrü en az 50 yıl olarak hesaplanmaktadır.
- YYPE malzeme esnektir.
- Çatlama ve darbe direnci yüksektir. Yükleme, taşıma ve dökmesi kolaydır.

- YYPE hammaddesi kimyasallara karşı yüksek direnç gösterir. Korozyondan etkilenmez, çürümez, aşınmaz.
- Toprak içindeki aşındırıcı maddelerden etkilenmez.
- İç yüzeyi pürüzsüzdür.
- İçindeki karbon siyahı sayesinde yıllarda güneş ışınlarından etkilenmez.
- Mükemmel kaynak özelliğinden dolayı kesin sızdırmazlık sağlar.
- Hafiftir, kolay ve çabuk döşenir.
- Basınç sınıfında çeşitlilik PN 4 den PN 32 ye kadar her türlü basınç sınıfında ve isteğe bağlı üretilebilir.
- PE 100 borular kir tutmaz, toksit içermez ve mikro organizmalara karşı dayanıklıdır.
- Donmaya karşı dayanıklıdır.
- Zemine göre kendini adapte eder. Yumuşak zemin ve deprem bölgelerinde emniyetle kullanılabilir.
- Kangal olarak şantiyede kullanılabilir.

Gaz veya sıvı haldeki karbonlu hidrojenlerden kısmi yanma veya termik parçalanma veya her iki türlü elde edilen ince dağılmış yapısal olarak grafit benzeyen karbon tanelerine “karbon siyahı” adı verilir.

Rengi siyahtır ve çoğunlukla tanecik ya da toz halindedir. Araba lastiği, kauçuk ve plastik ürünler ve mürekkep yapımında kullanılır. Dünyada yıllık 8.1 ton civarında üretim tonajına sahiptir. %90 plastik üretiminde kullanılır ve %9 renklendirme amaçlı kullanılır [4].

1.2 Literatürde Yapılmış Çalışmalar

Lai ve Bakker (1994), 20 °C’de YYPE’nin farklı gerilmeler altında kısa ve uzun süreli çekme sürünmesi testlerini yapmışlardır. Çalışmada, gerilmenin ve fiziksel yaşlanmanın sürünme kompliansı üzerine etkisini araştırmışlardır. Kısa süreli sürünme testlerinde, fiziksel yaşlanma etkisinin göz ardı edilebileceğini belirlemişlerdir. 2 MPa’dan 16 MPa’a kadar yaptıkları 1000 saniyelik sürünme testlerinde YYPE’nin güçlü bir non-lineer davranış gösterdiğini gözlemlemişler. Lineerliği sadece yok denebilecek kadar küçük gerilme değerleri için görmüşlerdir. Yaşlandırma etkilerinin uzun dönem sürünme davranışı üzerinde oldukça etkili

olduğunu belirlemişlerdir. Uzun dönem sürünme deneyi sonuçlarını modellerken, denklemlere mutlaka yaşlandırma etki katsayısının da dahil edilmesi gerektiği sonucu çıkarmışlardır [5].

Zhang ve Moore (1997), YYPE'nin nonlinear mekanik davranışını belirlemek üzere, değişik şartlarda et kalınlığı yüksek, ekstrüde borudan çıkarılmış numuneyi deneye tabi tutmuşlardır. Sabit çekme hızında yapılan tek eksenli basma deneyinde, çevresel ve uzunlamasına eksenden alınan malzemenin davranışları neredeyse aynı iken, radyal eksenden alınan numunede meydana gelen gerilmenin, %3'lük yüzde uzamadan sonra gittikçe arttığını tespit etmişlerdir. Maksimum farkı ise %15 yüzde uzama seviyesinde %4 civarında bulmuşlardır. Radyal eksenden alınmış numunenin, çevresel ve eksenel doğrultuda alınmış numuneye göre daha rijit olduğu görmüşlerdir. Sürünme deneylerinde, birincil ve ikincil sürünme bölgelerini olduğunu ancak 25.4 MPa gerilme seviyesinde bile üçüncül bölgenin olmadığını belirlemişlerdir. Uygulanan gerilmeye karşılık birim uzamanın açıkça nonlinear olduğunu gözlemlemişlerdir [6].

Beijer ve Spoormaker (1999), Modelleme çalışması için YYPE'nin 23 °C'de 8 hafta boyunca çekme sürünmesi testini gerçekleştirmişlerdir. Numuneyi ISO 527'ye göre enjeksiyon ile kalıplama yöntemiyle elde etmişlerdir. Çevrim süresini, iç gerilme ve anizotropiyi önlemek için 55 sn gibi uzun bir süre almışlardır. Sürünme sırasında yaşlanma etkisi göz ardı edilmiştir. Ölü ağırlık kullanarak, farklı ölçü boyunda farklı gerilmeler uygulamışlardır. 50 mm için 1 MPa - 6 MPa, 25 mm için 8 MPa ve 12.5 mm için 10 MPa - 12 MPa gerilme değerlerinde sürünme testi yapmışlardır. 10 MPa'lık gerilmenin altında 4000 sn civarında sürünme eğrisi dış bükey bir hat izlemektedir. 10 MPa'ın üzerindeki değerlerde birim uzama hızının, düşük gerilmelerin takip ettiği eğriden sapmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Birim uzama hızının, yüksek gerilmelerde daha az düştüğünü ve sonra denge haline gelip, tekrar arttığını tespit etmişlerdir. Sonrasında malzemenin akmaya başladığını ve çatlak oluştuğunu görmüşlerdir. Ölçüm sırasında maksimum yüzde uzama %20'nin altındadır [7].

Sezer (2004), Plastik boru üretiminde kullanılan YYPE (PE100) malzemenin kopma gerilmesini ve sürünme karakterini belirleyebilmek için numuneyi ASTM D 638'e göre hazırlamıştır. Deney numuneleri üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucu kopma gerilmesini yaklaşık olarak 23 MPa olarak bulmuştur. Kopma gerilmesinin

altında; lineer viskoelastik bölgedeki üç ve nonlinear viskoelastik bölgeyi de içeren dört gerilme durumu için 24 saatlik çekme sürünmesi deneyine tabi tutmuş ve bu deneylerden elde edilen verilere göre ANSYS programıyla değerleri teyit etmiştir. 0-8 MPa gerilme aralığından sonra eğrilerdeki doğrusallığın bozulduğu görülmüştür. PE100 malzemenin sadece lineer viskoelastik davranışlar gösterdiği bölgedeki üç gerilme durumu göz önüne alınarak elde edilen ANSYS sonuçları, deney sonuçlarıyla daha uyumlu sonuçlar verdiğini belirlemiştir. Nonlinear bölgede yapılan en büyük gerilme değerinde sonuçlar arasında sapma görmüştür [8].

Elleuch ve Taktak (2005), sıvılar için kullanılan ve YYPE malzemedan yapılan büyük konteynırların viskoelastik davranışlarını belirlemek üzere uzun süreli çekme sürünmesi ve basma sürünmesi testlerini gerçekleştirmişlerdir. Basma testi için kullanılan numune ekstrüzyonla elde edilmişken, çekme sürünmesi için gerekli numunenin kesme kalıpları hassas boyutta elde edilebilmesi için EDM ile üretilmiş ve her deney için minimum 5 numune direkt olarak konteynır üzerinden çıkarılmıştır. Farklı birim uzama hızlarında yapılan çekme ve basma testleri sonucu YYPE'nin birim uzama hızına bağlı davranış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Uzun süreli sürünme davranışların tespitinde (24 saatten fazla); numuneyi 3 MPa, 5 MPa ve 10 MPa'da hem çekme hem de basma sürünmesi testlerine tabi tutmuşlardır. Deney sonucunda numunelerin basma sürünmesi komplianslarının, uygulanan düşük gerilme değerlerinden dolayı birbirine benzer çıktığını, çekme sürünmesi değerlerini ise üç farklı sürünme bölgesinden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Hem çekme hem de basma testlerinde YYPE malzemenin, düşük gerilme durumunda viskoelastik davranışının lineer özellik gösterdiğini tespit etmişlerdir [9].

Liu (2007), Kısa süreli sürünme davranışı için boru üzerinden çıkarılmış YYPE ve OYPE numune, PE80 reçine ve 4 farklı YYPE reçineden elde edilen, yedi numune örneğini 24 saatlik çekme sürünmesi testine tabi tutmuştur. Reçineden elde edilen numuneleri belli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, plakalar arasında oda sıcaklığına soğutulduktan sonra ASTM 638-02a'ya göre gerekli boyutlarda işlemiştir. Her numune çeşidi, en küçüğü 2.58, en büyüğü 19.75 olmak üzere farklı gerilme değerlerinde test etmiştir. Yüksek gerilme seviyelerinde sürünme birim uzamasının, testin başlamasından itibaren hızlıca arttığını ve deformasyonun büyük çoğunluğunun birkaç saatte meydana geldiğini gözlemlemiştir. Seçilen PE malzemelerin sürünme davranışının güçlü bir nonlinear özellik gösterdiğini tespit

etmiştir. Malzemelerin kompians-zaman eğrisinde, gerilmenin de sürünme davranışında etkisi olduğunu belirlemiştir. Bu sürünme davranışından elde ettiği verileri YYPE'nin yapısal bir modelini geliştirmek için kullanmıştır. Uzun süreli davranış tespiti için çekme sürünmesi testini 14 gün sürdürmüştür. 14 günlük testlerde, ilk 24 saatten sonra 4.42 MPa gibi küçük gerilmelerde belirgin bir sürünme birim uzaması artışı gözlemlenmemişken, 8.15 MPa gibi daha büyük gerilmelerde 14 gün sonunda bile büyük oranda sürünme birim uzaması artışı gözlemlenmiştir [10].

Düşünceli ve Çolak (2007), YYPE'nin viskoelastik ve viskoplastik davranışlarını açıklamak üzere, basınçta kalıplanmış ve ekstrüde borudan çıkarılmış numuneyi çekme sürünmesi deneyine tabi tutmuşlardır. Deneyleri $1e-4$ 1/s şekil değiştirme hızında, malzemenin geçiş noktaları civarına yakın olduğunu tahmin ettikleri 8 MPa, 12 MPa ve 18 MPa gerilme seviyesine kadar yükleyip bu yükte 600 sn beklettikten sonra sıfır gerilmeye kadar boşaltma şeklinde gerçekleştirmişlerdir. 8 MPa-12 MPa gerilme seviyesinde birincil sürünme ve birbirine yakın oranda birim uzama miktarında artış gözlemlenmiştir. 18 MPa gerilme seviyesinde ise birim uzama miktarındaki artış daha fazladır. Basınçta kalıplanmış numunenin ekstrüde kalıplanmış numuneye göre daha fazla birim uzama artışı tespit etmişlerdir. İki tür numunedeki farklı birim uzama artışının, kristallik oranı ve imalat sırasındaki morfolojik yönelmeden kaynaklandığını düşünmektedirler. Malzemenin maksimum mukavemet değerleri seviyesinde olan 18 MPa gerilmelerde, sürünme deneylerinin viskoplastik özellik gösterdiğini belirlemiştir [11].

Nitta ve Maeda (2009), YYPE numunenin, farklı kristallik oranında ve sıcaklıklarda uygulanan sabit gerçek gerilme altındaki boy değişimini incelemiştir. YYPE54 malzemenin 22 °C'de, 4 MPa ile 20 MPa arasındaki gerilme değerlerinin malzemenin sürünme kompiansına etkisini araştırmışlardır ve davranışı tipik bir nonlineer viskoelastik davranış olarak bulmuşlardır. Sürünme kompiansı, gerilme seviyesinin artmasıyla artmaktadır ve gerilme artışı, sürünmeye karşı direnci düşürmektedir. 1000 sn'de 15 MPa gerilme seviyesinin üstünde, sürünme kompiansının uygulanan gerilme değerinden bağımsız olduğunu gözlemlenmiştir ve sürünme kompiansının sabit kaldığı bu noktayı kritik gerilme olarak adlandırmışlardır. 5 MPa gerilme seviyesinde artan sıcaklıkla malzemenin kompiansında artmaktadır. 22 °C'de 5 MPa gerilme seviyesinde kristallik oranı arttıkça kompiansının da azaldığını gözlemlenmiştir [12].

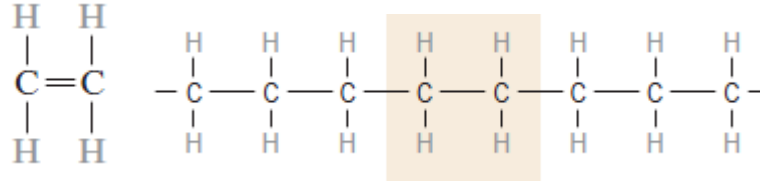
Chevali, Dean ve Janowski (2009), PA66, PP, YYPE'nin ve bunların uzun fiber termoplastik (UFT) kompozitlerinin ASTM 2990'a göre üç nokta eğilme sürünmesi davranışını incelemişlerdir. YYPE ve YYPE UFT; basınçlı kalıplama yöntemiyle elde edilmiş ve ASTM 2990'a göre uygun boyutlara getirildikten sonra, numuneyi test sıcaklığına ulaşması için ısıtmışlardır. Eğme testinde kullanılacak ölü ağırlığı, sönümlü titreşimi önlemek için 5 saniye içinde uygulamışlardır. PE malzemeye uygulanan gerilme; 7 MPa ile 14 MPa değerlerindedir. Yaklaşık 24 saat boyunca 5 farklı zamandan alınan değerler sonucu; en düşük sürünme kompliansının PA66'ya ait olduğunu gözlemlemişler. PA66'yı sırasıyla PP ve YYPE takip etmiştir. Saf polimerlerin sürünme kompliansını, fiber termoplastik kompozitlere göre daha yüksek bulmuşlardır. Hem saf hem de takviyeli kompozitlerin viskoelastik davranışının, orta seviyeden-yüksek seviyeli gerilme değerlerine kadar nonlineer davranış gösterdiğini belirlemişlerdir. Numunelerin 90 °C'de dokuz saat boyunca deformasyon değerleri karşılaştırdıklarında; PA66, fiber PA66 ve fiber PP'nin, diğer numunelere göre daha düşük değerler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. YYPE malzemenin kompliansını, fiber YYPE'den saf YYPE geçtiğinde %75 daha fazla bulmuşlardır [13].

2 POLİMERLERİN TEMEL YAPILARI

2.1 Polimerlerin Morfolojik Özellikleri

2.1.1 Polimerlerin molekül yapısı

Polimerler en basit tanımıyla, çok sayıda aynı veya farklı atomik grupların kimyasal bağlarla, az veya çok düzenli bir biçimde bağlanarak oluşturduğu uzun zincirli, yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Sentetik polimerler genellikle çok sayıda tekrarlanan “mer” veya “monomer” denilen basit birimlerden oluşur. “Poli” Latince bir sözcüktür ve çok sayıda anlamına gelir ki “mer” sözcüğü ile birleştirilerek, bu yüksek molekül ağırlıklı moleküllerin adlandırılmasında kullanılır [14]. Şekil 2.1’de polietilen monomeri ve bu monomerlerin tekrarı sonucu oluşan polietilen zinciri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Etilen monomeri ve Polietilen zinciri

Polimerler doğal veya sentetik olmalarına bakılmaksızın kimyasal bileşimlerine göre organik ve inorganik polimerler olarak sınıflandırılabilirler. Organik polimerler yapılarında başta karbon atomu olmak üzere hidrojen, oksijen, azot ve halojen atomları içerirler. Eğer polimer zinciri üzerinde dizili atomların hepsi aynı türden ise bu polimerlere “homopolimer”, farklı tür atomlar ise “heteropolimer” denir [14].

Monomer biriminin ısı, ışık ve kimyasal maddelerin etkisi ile tekrarlanan birimlerin meydana getirilmesi işlemine polimerizasyon denir [15].

2.1.2 Polimerlerdeki bağ kuvvetleri

2.1.2.1 Molekül içi bağ kuvvetleri

Makromolekülleri oluşturan monomer atomları birbirine atomik bağlarla (kovalent/birincil bağ) bağlanmıştır. Bu bağlar iki atomu bir arada tutan kuvvetler olarak düşünülebilir [15].

Polimer ana zinciri üzerinde sadece iki veya daha fazla değerlikli atomlar bulunabilir. Bu nedenle hidrojen ve halojenler ana zincirde yer alamazlar. Bu atomlar ve benzerleri ana zincirde bulunan atomlara kovalent bağlarla bağlanabilirler. İki veya daha fazla değerlikli her atom ana zincir üzerinde yer alamaz. Kararlı bir polimer zincirinin oluşabilmesi için ana zincir üzerindeki atomlar arası bağın yeterli enerjide olması gerekir. Kovalent bağlar genellikle yüksek enerjiye (35-150 kcal/mol) sahip bağlardır. Bu tür atomlar arası uzaklık kısadır (1.1-1.6 Å).

C-C bağı; çok kararlı, nötral bir bağıdır. Isıl ve UV kararlılığı yüksektir. Bağ enerjisi 83 kcal/mol ve bağ uzunluğu 1.54 Å dur.

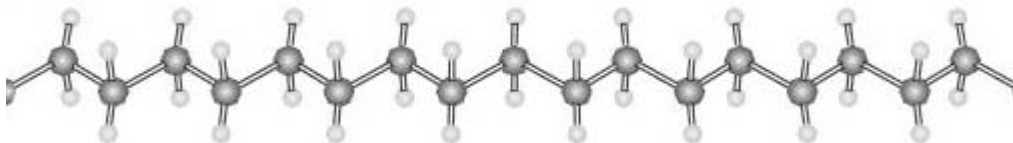
C-H bağı; ana zincirde bulunamaz. C-C bağı kadar nötral ve kararlı değildir. Oksijen, ısı ve ışık ile bozunur. Bağ enerjisi 99 kcal/mol ve bağ uzunluğu 1.09 Å dur [14].

2.1.2.2 Moleküller arası bağ kuvvetleri

Polimerik malzemelerdeki bağ kuvvetleri sadece molekül içindeki atomlar arasında değil aynı zamanda komşu moleküller arasında da bulunur [15].

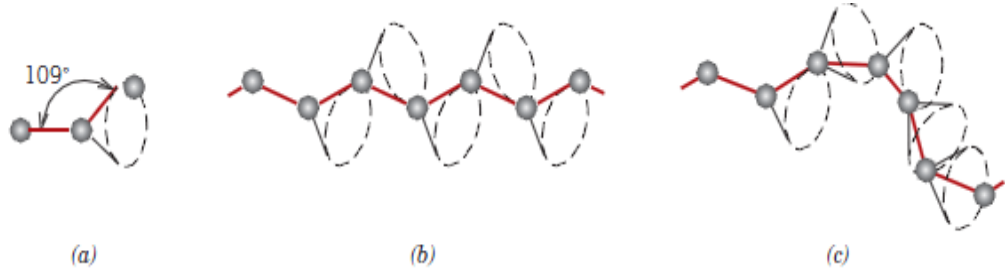
2.1.3 Konformasyon

Bir polimerde düzensizlik, sonuç ürünün özellikleri yönünden çok büyük önem taşımaktadır. Bir polimer zinciri için zigzag ve yumak şeklinde farklı konformasyonlar vardır. Zincir zigzag bir yapı aldığı gibi, gelişigüzel sarılmış bir yumak şeklinde de olabilir. Şekil 2.2'de polimer zincirinin zigzag konformasyonu gösterilmiştir. Polimer zinciri yeterli esnekliğe sahipse yüzey alanını, böylece serbest derecesini düşürmek için yumak haline gelmeye çalışır. Yumak durumunda polimer zincirinin uzunluğu değişmeden konformasyonu değişebilir.

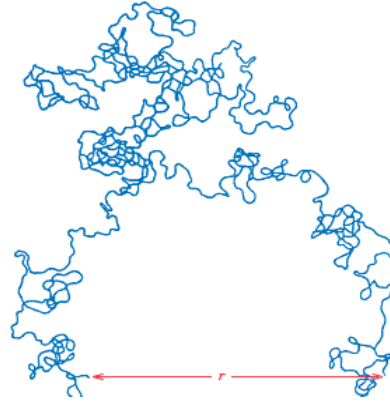


Şekil 2.2 : Polimer zincirinin zigzag konformasyonu

Öncelikle, omurga atomların zigzag düzeni yok sayılarak, polimer molekülleri lineer zincirler olarak gösterilmektedir. Tek zincirin bağları üç boyutta dönebilme ve eğilebilme yeteneğine sahiptir. Şekil 2.3a'daki zincir atomlarını göz önüne alırsak, üçüncü karbon atomu koni dairesinin herhangi bir noktasına uzanabilir ve hala diğer iki atom ile aralarındaki bağ ile 109° açı olacak şekilde durabilir. Ardışık zincir atomları Şekil 2.3b'de ki gibi hizalandığında, düz bir zincir segmenti oluşur. Diğer taraftan, Şekil 2.3c'de gösterildiği gibi zincir atomları diğer pozisyonlara gelecek şekilde döndüğünde, zincirin eğilip-bükülmesi olasıdır. Böylece, birçok zincir atomundan oluşan tek zincir molekülü Şekil 2.4'de şematik olarak gösterilen şekle benzer bir hal aldığı farz edilebilir. Üstelik şekilde gösterilen polimer zincirinin bir uçtan bir uca olan "r" mesafesi toplam zincir uzunluğundan çok daha küçüktür [16].



Şekil 2.3 : Ana zincirdeki karbon atomlarının konumunun polimer zincirinin düzenine etkisi [16]

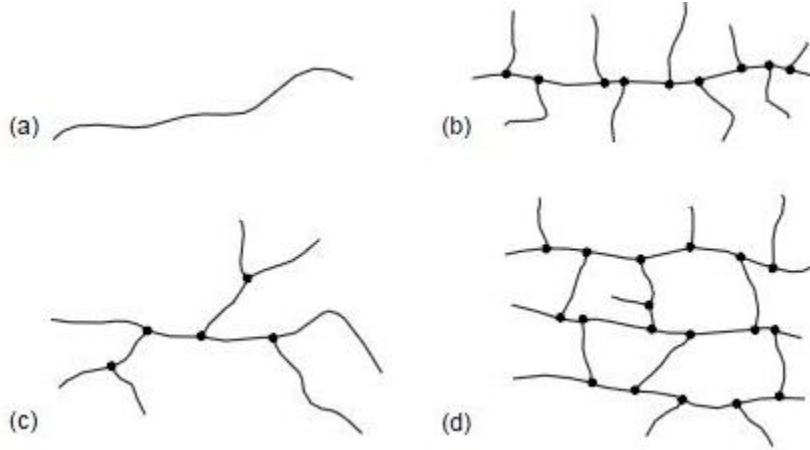


Şekil 2.4 : Farklı açılarla birbirine bağlı atomların oluşturduğu tek polimer zinciri [16]

2.1.4 Polimer moleküllerinin yapısal şekli

Polimerler moleküllerinin yapısal şekline göre lineer, dallı ve çapraz bağlı olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.5'de yapısal şekiller gösterilmiştir. Lineer polimerler sürekli bir şekilde birbirine bağlı tekrarlanan birimlerden oluşur. Lineer polimer

zincirlerinin birbiri ile bağlantısını Van der Waals ve hidrojen bağları sağlar. Ana polimer zinciri üzerinden düzensiz aralıklarla yan dallar çıktığında bu tip polimerler dallı polimerler olarak anılır. Dallar bir bütün yapı oluşturacak şekilde uzun veya kısa ya da dendiritik bir yapı oluşturacak şekilde ayrık olabilir. Bu yan dallar ile zincir yoğunlaşması azalmakta bu da polimer yoğunluğunun düşmesine neden olmaktadır [3,15].



Şekil 2.5 : a) Lineer, b)-c) Dallı, d) Çapraz bağlı polimer

2.1.5 Polimerlerin kristalleşmesi

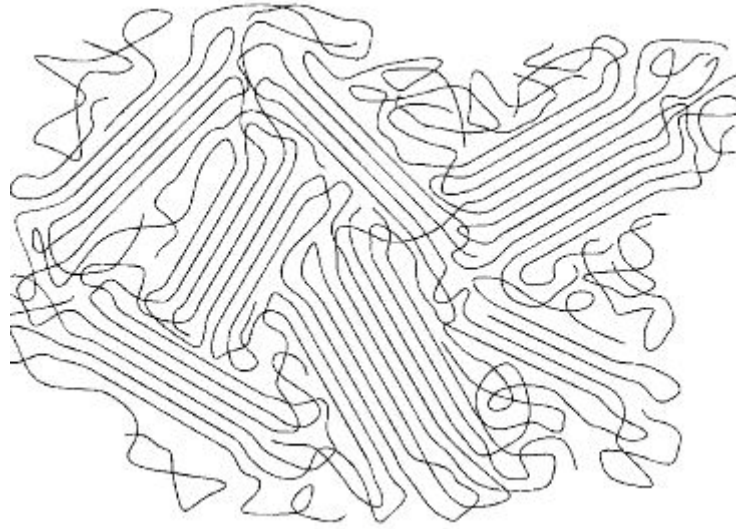
Polimerlerin yerel yapısını belirleyen kimyasal formülü yanı sıra, makro yapısını belirleyen morfolojisi de önemlidir. Morfoloji denilince polimeri katı halindeki yapısında kristalin veya amorf bölgelerin varlığı bunların büyüklüğü, biçimi, yerleşme düzeni ve yapı içindeki dağılımı akla gelir. Katı haldeki polimerlerde iki temel intermoleküler düzen söz konusudur. Bunlar amorf ve kristalin yapılardır [14].

Amorf polimerler bir spagetti demetine veya bir canlı solucan grubuna benzetilebilir. Polimer moleküllerinin sürekli hareket halinde olması nedeniyle bir grup solucan daha iyi bir benzetmedir. Boşlukta sürekli hareket tüm solucanların birlikte hareketi değil, her birinin ayrı hareketi şeklindedir. Zincirler bir konformasyondan diğerine gelişigüzel dönme ve bükülme hareketleri yaparlar [14].

Kristalin polimerlerde atomlar belirli noktalara yerleşmiş ve hareketsiz bir düzen içine girmişlerdir. Polimerlerin kristallenebilme özelliğine bağlı olarak bu birim elemanlar daha büyük, çeşitli biçimlerde yapısal şekiller oluşturmak üzere bir araya gelir ve sonuçta polimerin morfolojisini belirlerler [14].

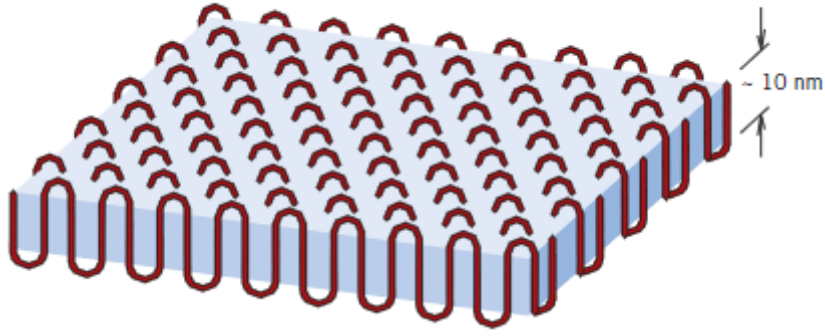
Polimerler katı halde iken, genellikle %100 kristalin yapı yerine amorf ve kristalin karışımı bir yapı gösterirler ki bunlara kısmikristalin polimerler denir. Bu morfolojik yapının biçimini açıklamaya yönelik çeşitli modeller vardır [14].

Fringed-Micelle/Püsküllü-Demet modelinde, kristalinler düzensiz zincirlerden oluşan matrisin içine rastgele yerleşmiş birbirine paralel olacak şekilde küçük bir demet (micelles) oluşturan uzun lineer zincir segmentleridir. *Fringed* terimi, nonkristalin zincir segmentinin kristalin kısma bağlanmasından gelmektedir. Şekil 2.6'da Püsküllü-Demet modeli gösterilmiştir. Püsküller, kristalin bölgeye göre nonkristalin bölgenin yoğunluğunun düşük olmasını sağlar. Demetlerin yanal boyutu püsküller tarafından sınırlandırıldığı düşünülmektedir. Genişleyen demet bölgesine yeni kristalin blokların eklenmesi halinde, kristalin blokların oryantasyonu ve püsküllü bölgedeki bitişik segmentler arasında gitgide artan büyük bir sapmaya neden olur. Bu durum, demet bölgesine başka zincir segmentlerinin ilavesini engellenerek, püskül bölgesinde yapısal engellemelerin artmasına neden olur [17].



Şekil 2.6 : Püsküllü Demet (Fringed-Micelle) modeli [17]

Diğer model daha yeni ve geçerli olan katlanmış zincir (chain folded) modelidir. Bu modelde polimer zincirinin belli bölgelerinin katlanmasıyla, amorf ve kristalin bölgeler üç boyutlu bir lameler katlanmış yapı meydana getirirler [11,14]. Şekil 2.7'de bir diğer model olan katlanmış zincir modeli gösterilmiştir.

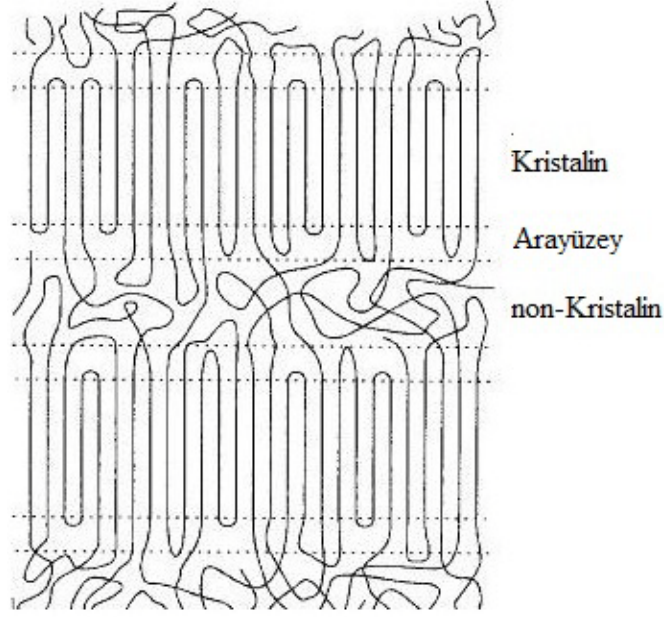


Şekil 2.7 : Katlanmış zincir (chain folded) modeli [16]

YYPE'in yapısında, kristalin ve amorf olmak üzere iki farklı faz mevcuttur. Yarıkristalin polietilenin düzenli fazı, zincir segmentlerinin düzenli bir sıra halinde dizildiği kristallerden meydana gelir. Kalıplanmış YYPE numunenin kristalin kalınlığı genellikle 80-200 Å arasındayken, yanal boyutu birkaç mikrometreye kadar çıkar. Kristalin bölgeden ayrı olan non-kristalin bölge yaklaşık olarak 50-300 Å aralığında değişir. Tipik bir polietilenin molekülünün açılmış boyu 10000 Å veya daha fazla olabilir ve bu uzunluk kristalinin kalınlığının kat kat fazlasıdır. Bu durumda, herhangi bir molekül segmenti bir veya daha fazla sayıda düzenli ve düzensiz bölgenin kalınlığı boyunca içinden birçok kez geçer [17]. Her iki faz bölgesi de malzemenin makroskopik davranışının belirlenmesinde önemli rol oynar. Amorf eleman, kristalin bölgenin biçimini kaybetmeksizin hareket etmesini ve şeklini değiştirmesini sağlar ve de genellikle oda sıcaklığında kauçuğumsu durumdadır. Bu tip deformasyon çoğunlukla plastik olarak tanımlanır. Moleküler zincirler kırılmazdır ve deformasyon çoğunlukla toparlanabilir. Yarı kristalin polimerlerde bu tip deformasyon yüksek tokluk sağlar [18].

Düzensiz/amorf bölge ve kristalin yüzeyleri arasındaki sınırdaki zincir segmentinden oluşan üçüncü bir faz vardır. Bu bölgeye arayüzey ya da kısmen düzenli bölge denir. Şekil 2.8'de birbirine bağlı halde olan kristalin, amorf ve arayüzey bölgeleri gösterilmiştir. Arayüzey bölgesinin karakteri iki ana faz arasında bağlantı sağladığı için çok önemlidir. Düzensiz ve kristalin bölge arasını birbirine bağlayan arayüzey katmanı olmazsa, polietilen zayıf bir malzeme olur. Arayüzey bölgesinin karakterini belirlemek güçtür. Çünkü farklı konformasyona sahip zincir segmentlerinden oluşur. Kristalin yüzeye komşu bu zincir segmentleri, düzensiz bölgeye göre çok daha

düzenli bir bölgedir. Düzensiz ve bu kısmen düzenli bölge arasındaki sınır belirsiz haldedir ve keskin bir çizgi ile ayrılmamaktadır [17].

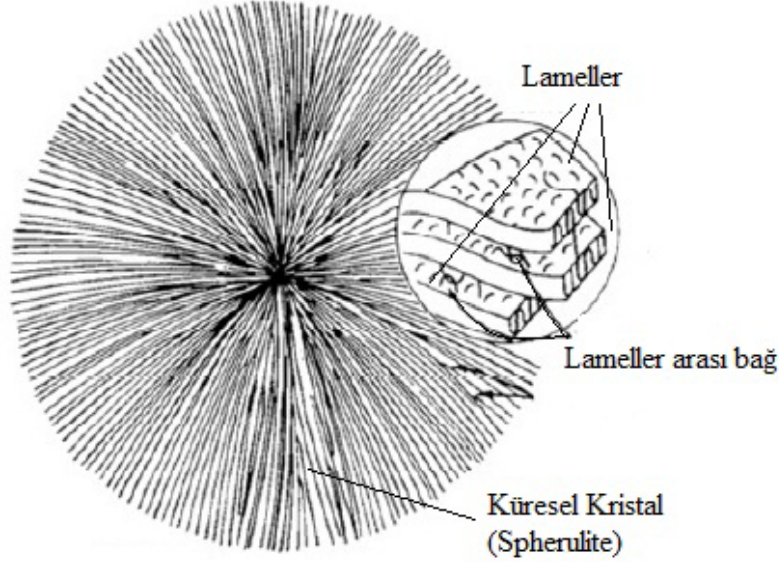


Şekil 2.8 : Polietilenin üç fazlı morfolojisi

Polietilen, kristalin ve nonkristalin bölgelerin birleşiminden oluşan bir malzemedir. Sadece kristalin matristen oluşan bir polietilen gevrek bir malzeme olurdu ve tamamen amorf bir malzeme olsaydı oldukça viskoz akışkan bir malzeme olurdu. Uygulamada, polietilen tok ve elastik bir malzemedir. Bu üç fazın birbirine göre düzeni, oranı ve bağlantı derecesi bir polietilen malzemenin özelliklerini belirler. Ne tamamen saf kristalin ne de tamamen saf amorf polietilen malzeme mevcut değildir [17].

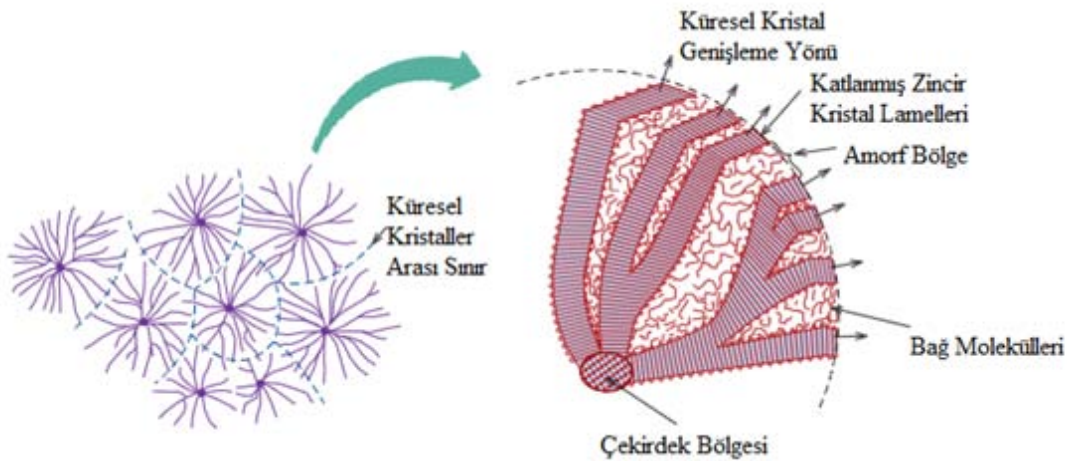
Polietilen genellikle eriyik halden kristal duruma gelir. Eriyik halden kristalleşmiş polietilenin küresel kristalli bir morfolojisi vardır. Burada küresel kristali oluşturan lameller bir amorf matris içine gömülü durumdadır ve merkez çekirdekten dışarı doğru yayılırlar. Küresel kristaller Şekil 2.9’da gösterildiği gibi ince düz lamellerden meydana gelmektedir. Lamellerin yapısı genellikle düzenli bir şekilde katlanmış zincir düzenlemesinden oluşur. Bir lamellin düzenli katlanmış (regularly folded) zincirlerinin genişlemesi; yanal yöndeki boyutu (1-50 μm) kalınlığından (2 -25nm) çok daha büyük bir kristale dönüşmesiyle sonuçlanır. Katlanmış zincir modeline ilaveten, düzensiz katlanmış (non-regularly folded), saç tokası (hair-pin) şeklinde ve de elektrik panosu (switch board) şeklinde düzenlenmiş lamel yapıları da mevcuttur. Çalışmalar, hem düzenli hem de düzensiz tür kristal yapının da eriyik halde

kristalleşmiş polietilende mevcut olduğunu göstermiştir. Polietilene yapılan çalışmalarda, düzenli katlanmış zincir modeli, düzensiz halde katlanmış zincir modelinden daha az kullanılmaktadır [19].



Şekil 2.9 : Küresel kristal yapının şematik gösterimi [19]

Küresel kristal oluşumu çekirdek merkezinden dairesel alanlar şeklinde yayılarak büyüme ile gerçekleşir ve bu büyüme ilerleyen yüzeyler birbiriyle karşılaştıklarında durur ve birincil kristalizasyon sonlanmış olur [14]. Şekil 2.10'da çekirdekten genişleyen bir küresel kristal ve küresel kristallerin genişleme sonucu birbiriyle karşılaşması gösterilmiştir.



Şekil 2.10 : Küresel kristal genişlemesi ve birbirleriyle oluşturdukları sınır [16]

Polietilenin kristalizasyonu, elde edilen numune oda sıcaklığına ısıtıldığında bile her zaman bitmez. İkincil kristalizasyon, düşük oranda da olsa oda sıcaklığında devam edebilir. Farklı numuneler, kalıplandıktan sonra birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişen aralıkta ortam sıcaklığında fiziksel değişikliklere uğrar. Fiziksel özelliklerdeki değişimler, kristallik derecesinde görülen kademeli bir artış yansıtır. Bu etki başlangıçta orta derecede kristallik oranına sahip bir parçada çok daha fazla fark edilebilir. ÇYMAPE eriyik halden oda sıcaklığına hızlıca soğutulduğunda yoğunlukta yavaş bir artış gözlenir. Yoğunluğun artışı iki şekilde açıklanabilir. (1) kristalin yüzdesinde artış veya (2) nonkristalin bölgede toparlanma sonucu bu bölgenin yoğunluğunda artış [17].

Eriyik polietilenin katılaşması sırasında, sıcaklığın erime noktasının altına düşmesiyle düzensiz durumdaki sıvı molekülleri düzenli kristalin duruma dönüşür. Kristalleşme süreci soğutma hızına bağlı olarak değişir. Polimer üretim sürecinde oluşan geniş sıcaklık gradyanı ürünün farklı kısımlarında farklı kristallik oranına neden olur. Bu da üründe yoğunluk farklılığına yol açar. Kristalleşmeyi kontrol ederek malzemenin morfolojisi ve malzemenin özelliklerinin kontrolü sağlanabilir. YYPE gibi yarıkristalin polimerik malzemenin de morfolojik özellikleri soğuma koşullarına göre değişir. Eriyik haldeyken yavaş soğutulan YYPE’de hızlı soğumaya göre kristallik oranı daha yüksektir [18].

2.2 Polimerlerin Fiziksel Özellikleri

Polietilen CH₂-CH₂ şeklinde tekrarlanan birimlerden meydana gelir. Ama farklı yapı farklılıklarından dolayı farklı özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir. Çeşitli polietilen türlerini birbirinden farklılaştıran ana özellikler; molekül ağırlığı, ortalama molekül ağırlığı, yoğunluk, kristal oranı ve uzun ve kısa zincir dalgalanmalarının derecesidir.

Polietilen malzemeler ASTM standartlarına göre yoğunluk bakımından dört sınıfa ayrılırlar.

- 0.91-0.925 g/cm³ Düşük yoğunluklu polietilen
- 0.926-0.940 g/cm³ Orta yoğunluklu polietilen
- 0.941-0.959 g/cm³ Yüksek yoğunluklu polietilen
- 0.96 ve üzeri g/cm³ Çok yüksek yoğunluklu polietilen

2.2.1 Molekül ağırlığı

Bir polimer molekülünün boyutu, molekülü oluşturan bütün atomların atomik ağırlığının toplamı olan molekül ağırlığıyla belirtilir. Molekül ağırlığının polimerin işlenebilirliği, son fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde büyük etkisi vardır.

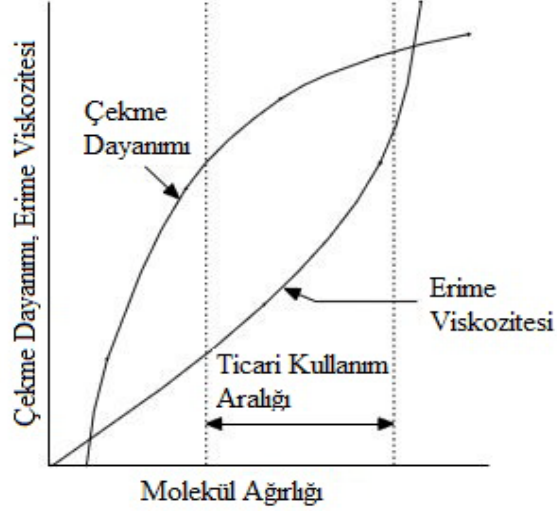
Molekül ağırlığı polimerizasyon sırasında kontrol edilebilir. Zincir uzunluğu; katalizör, polimerizasyon koşulları ve kullanılan üretim yöntemiyle belirlenir. Polietilenin üretimi sırasında tüm moleküller aynı uzunluğa ulaşmaz. Çünkü polimer farklı uzunlukta moleküller içerir molekül ağırlığı bir ortalama değer ile tarif edilir [20].

Molekül ağırlığı, bir polimerin dayanıklılığı ve bunun ile ilişkili özelliklerini belirleyen ana faktördür. Uzun süreli dayanım, tokluk süneklik ve yorulma dayanımı molekül ağırlığının artmasıyla gelişir [20].

Genellikle molekül ağırlığının artması sonucunda moleküller arası çekim kuvvetleri artar, polimerik yapının öncelikle mekanik ve ısıl özellikleri olmak üzere işlenebilirliği, elektriksel, optik ve kimyasal özellikleri önemli ölçüde değişir.

Moleküler ağırlığı arttırarak çekme mukavemeti (akma ve kopma), uzama, tokluk, gerilme çatlak direnci, sünme direnci, kimyasal direnci, geçirimsizliği iyileştirilir. YYPE geniş ve dar aralığa kadar değişik moleküler ağırlık dağılımında elde edilebilir. Dar aralıkta olması durumunda; düşük sıcaklık etkisi, tokluk, gerilme çatlak direnci ve yumuşama sıcaklığı artar. Geniş moleküler dağılımında düşük erime viskozitesi, yüksek enjeksiyon ve sünme direnci kazanılır. Çekme mukavemeti ve uzama özelliği moleküler ağırlık dağılımından etkilenmez [21].

Şekil 2.11’de örneklendiği gibi molekül ağırlığının artması ile polimerik yapının özellikleri (çekme gerilimi, çarpma direnci, erime-camsı geçiş sıcaklıkları, ısıl dayanıklılık v.b.) önce hızla artar ve sonra değişmez. Buna karşın, polimerik yapının erime viskozitesinde önce yavaş, daha sonra hızlı bir artma gözlenir. Yüksek molekül ağırlıklı hazırlanan polimerlerin mekanik özelliklerinde önemli bir gelişme sağlanırken, işlenebilirlikleri son derece zorlaşmaktadır. Hem kolay işlenebilir hem de yeterli mekanik özellikleri olan ticari polimerlerde molekül ağırlığının $10^4 - 10^6$ aralığında olması istenir [14]. Boru sistemlerinden kullanılan termoplastiklerin molekül ağırlığı 100.000’den fazladır. Ama üretim sırasında veya sonrasındaki işlemleri güçleştirecek kadar yüksek değildir [20].

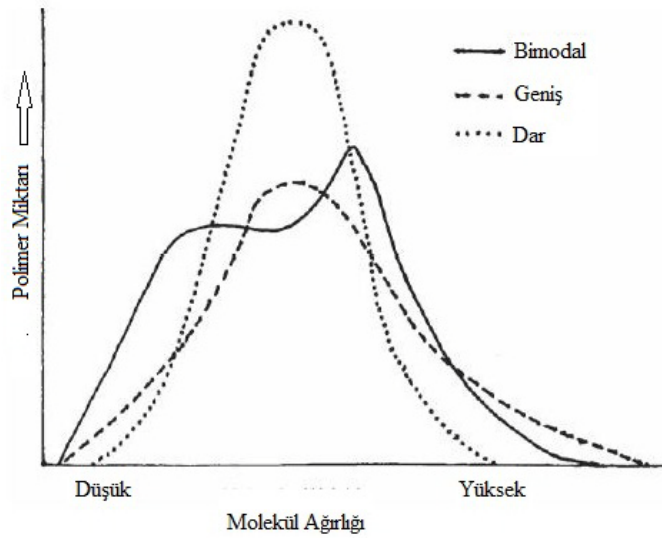


Şekil 2.11 : Molekül ağırlığı-çekme dayanımı ve erime viskozitesi

2.2.2 Molekül ağırlığı dağılımı

Bir polimerik yapı aynı boyutta polimer zincirlerinden oluşuyorsa bunlar *monodispers*dir. Ancak birçok polimerik yapı çok farklı uzunluklarda polimer zincirlerinden oluşur. Bu tip polimerler *polidispers* sistemlerdir. Bu yüzden tek bir molekül ağırlığına sahip değildirler. Yalnız molekül ağırlığı değil, polimerlerin bu heterojen yapısı yani molekül ağırlığı dağılımı, sonuç ürünün tüm özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir [14].

Polietilen malzeme hem dar hem de geniş aralıkta molekül ağırlığından oluşmuştur. Şekil 2.12’de dar ve geniş molekül ağırlığı dağılımı ve bunların birleşimiyle oluşan bimodal dağılım gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : Dar ve geniş molekül ağırlığı dağılımı [20]

Kısa zincirler proses esnasında labrikant (iç kaydırıcı) gibi davranıp akışı kolaylaştırırken uzun zincirler de mukavemeti belirlerler. Küçük zincirlerin nispeten daha fazla olması, kolay kristallenebilen zincirlerin fazla olmasını dolayısı ile malzemenin nispeten daha sert olmasına yol açar. Zincir uzunluklarının birbirinden çok farklı olması farklı büyüklükte ve yapıda kristal yapıların oluşmasına yol açarken küçük zincirler zayıf nokta gibi davranıp darbe mukavemetinin düşmesine yol açar; yani üzerlerine yük bindiğinde yeteri kadar mukavim olamazlar [15].

3 POLİMER MALZEMELERİN KARAKTERİSTİĞİ

3.1 Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Birçok polimerik malzeme diğer alternatif malzemelerde olmayan özelliklerden dolayı yaygın olarak kullanılır. Polimerik malzemelerle çalışılırken, farklı yapısal faktörlerin mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin bilinmesi gerekir.

3.1.1 Gerilme-birim uzama

Bir parçaya etkiyen kuvvet ya da yük, parça üzerinde bir gerilme ve uzama yaratır. Gerilme; parça üzerindeki herhangi bir noktadaki kuvvetin şiddetini belirtir ve birim alana etkiyen kuvvet ile ölçülür. Bu gerilmenin parça üzerinde yaptığı boyutsal farka şekil değişimi denir.

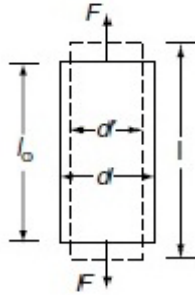
Uygulanan kuvvet parçadan dışarıya doğru olduğunda bu çekme kuvveti, bir çekme gerilmesi (σ_c) yaratır (Şekil 3.1).

Eğer kesit alanı olarak orijinal, deforme olmamış, kesit alanı kullanılırsa elde edilen gerilme mühendislik gerilmesidir. Çekme gerilmesi-birim uzama değerleri aşağıdaki denklem (3.1) ve (3.2)'den elde edilir [22].

Çekme gerilmesi(σ) ve birim uzama (ϵ),(mühendislik)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 : Çekme durumunda oluşan boyut değişimi

Malzemenin performansının daha doğru ölçülmesi için gerçek gerilme ve gerçek birim uzama davranışı elde edilmelidir. Gerçek gerilme belli bir uzunluktaki anlık kesit alanının (A) uygulanan kuvvete (F) oranıdır.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

3.1.2 Malzemenin modülü

Polimerik bir malzemenin modülü, küçük birim uzama durumunda en önemli mekanik özelliktir. Malzemenin rijitliğinin göstergesidir. Polimerik bir malzemenin modülü, çok küçük bir sınırlı birim uzama değerinde, malzemenin mekanik deformasyona karşı direncinin büyüklüğünü belirtir [24].

Genellikle üç çeşit malzeme modülü vardır. Bunlar; Elastiklik (Young) modülü E, Kayma modülü G ve Hacim (bulk) modülü K dır [25].

Elastiklik modülü E malzemenin tek eksenli çekmedeki direncidir. Elastiklik modülü $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ile tanımlanır. Bu denklem tek eksenli çekmede küçük bir şekil değiştirme meydana getirmek için gerekli gerilmenin elastiklik modülü ile orantılı olduğunu gösterir. Belirtilen bu orantı kanunu Hook kanunu olarak bilinir. Daha büyük malzeme modülü daha az deformasyon sağlar. Sabit bir yükleme hızında plastiklerin ölçülen gerilme-birim uzama davranışı kalite kontrol ve çeşitli plastiklerin değerlendirilmesinde bir temel sağlar [24].

Malzemenin modülü, hem polimer zincirindeki kovalent kimyasal bağlar ve van der Waals bağlarının dayanımı hem de birim kesit alandaki bu bağların sayısı ile orantılıdır. Her bağ belli bir yay sabiti olan bir yay gibidir. Polimerin modülü genellikle zincirin rijitliğinin artmasıyla ve kohesiv enerji yoğunluğunun artmasıyla artar. Malzemeye bir yük uygulandığında en zayıf bağ olan hidrojen ve van der Waals bağları, her bir zincir üzerindeki kuvvetli kovalent bağlardan çok daha kolay deforme olur. Böylece zincirler arasındaki bu bağların ağ ilişkisi, polimerik malzemenin modülünü belirlemede önemli rol oynar [24].

Tüm malzemelerin en basiti izotropik ve homojen olanıdır. İzotropik malzemelerin ayırt edici özelliği, malzemenin özelliklerinin tüm yönlerde aynı olmasıdır [25].

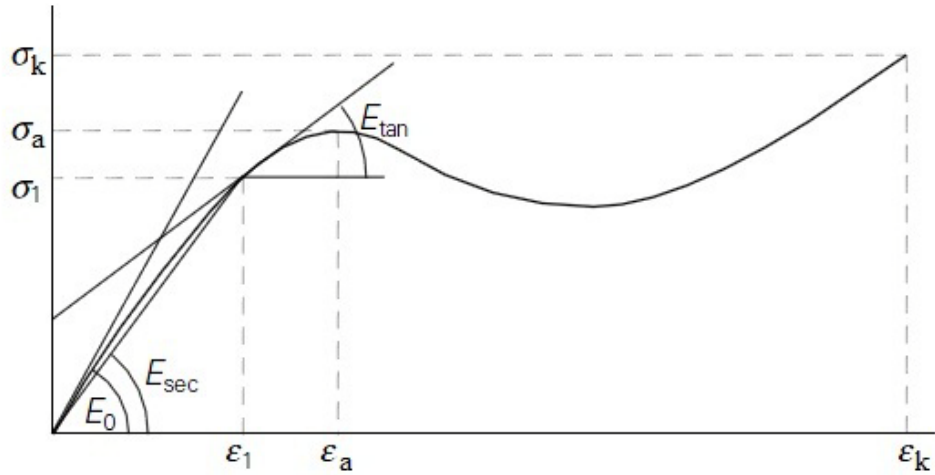
Tek eksenli çekme esnasında polimer malzemenin enine eksenindeki şekil değişiminin boyuna eksenindeki şekil değişimi poisson oranı (ν) olarak bilinir. Plastik

malzemelerde ise ν sabit değildir ve zaman, sıcaklık, gerilme vb. ile değişir. Birçok termoplastik için ise ortalama 0.4-0.45 dir [15].

3.1.3 Gerilme-birim uzama davranışı

Malzemelerin mekanik davranışlarının mühendislik uygulamalarında büyük önemi vardır. Bir malzemeye kuvvet etki ettiğinde, meydana gelen deformasyon malzemenin gerilme-birim uzama davranışını tanımlar. Gerilme-birim uzama davranışı, belli bir miktar şekil değiştirme sağlamak için gerekli gerilme değerini gösterir. Bu davranış birim uzamanın (ϵ), birim uzama hızının ($\dot{\epsilon}$) ve sıcaklığın (T) fonksiyonu olabilir [24].

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bir malzeme için belirlenebilecek iki tip yaygın olarak bilinen malzeme modülü vardır. İlki, orijinden başlayarak belirli bir birim uzama değerine karşılık çizilen bir doğruyla hesaplanan sekant modülüdür. Bu birim uzama değeri birçok rijit malzeme için %1 dir. İkincisi, belli bir birim uzama değerine karşılık belirlenen tanjant modülüdür. Başlangıç tanjant modülü ise orijinden başlayan ve eğrinin başlangıcıyla uyumlu bir doğrudan elde edilen eğimden hesaplanır. Genellikle başlangıç tanjant modül doğrusunun gerilme-birim uzama eğrisi üzerindeki belirsizliğinden dolayı sekant modülü tercih edilir [26].

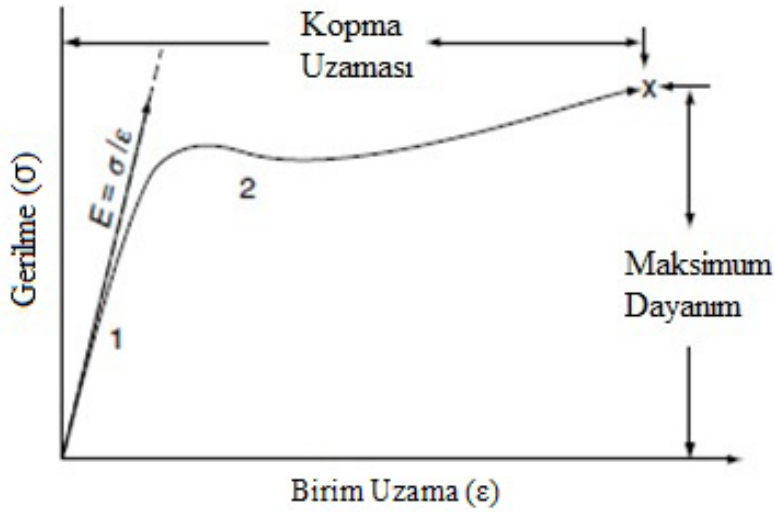


Şekil 3.2 : Gerilme-birim uzama davranışındaki elastiklik modülleri [27]

Şekil 3.2’deki grafiğe göre sekant modülü $E_s = \sigma_1/\epsilon_1$ oranından, başlangıç tanjant modülü $\epsilon=0$ için $E_0 = d\sigma/d\epsilon$ oranından ve tanjant modülü $\epsilon = \epsilon_1$ için $E_t = d\sigma/d\epsilon$ oranından elde edilir [27].

Farklı malzemeler için eğrinin genel şekli birbirine benzer. Ama elde edilen değerler ve de eğrinin kopmadan önce ne kadar bir şekil değiştirmeye maruz kaldığı farklılık gösterebilir [22].

Plastiklerin sabit bir yükleme hızında ölçülen gerilme-birim uzama davranışı kalite kontrol ve çeşitli plastiklerin karşılaştırılmalı değerlendirilmesi için temel teşkil eder. Şekil 3.3'de sabit yükleme hızında çekme testinden elde edilmiş tipik bir gerilme-birim uzama diyagramı gösterilmiştir [22].

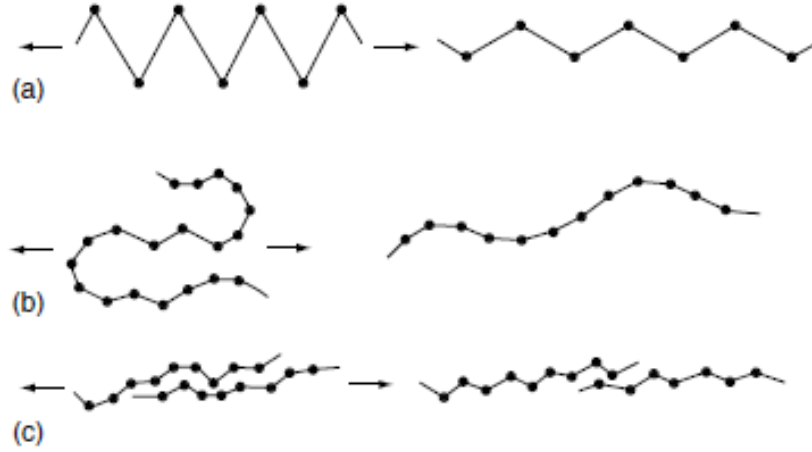


Şekil 3.3 : Polimer malzemenin gerilme-birim uzama davranışı [22]

Şekil 3.3'de, 1 noktasına kadar polimerik malzeme lineer bir gerilme-birim uzama artışı gösteren elastik bir katı gibidir. Meydana gelen deformasyon küçüktür. Bu küçük deformasyon polimer zincirinin atomları ile atomların kendi içlerindeki bağların uzaması ve kıvrılmalarıyla alakalıdır (Şekil 3.4a). Bu deformasyon anlık gelişir, toparlanabilirdir ve moleküllerin konumu birbirine göre değişmez [22].

Şekil 3.4'de ki 1 ve 2 noktası arasında, çekme gerilmesi söz konusuysen deformasyon birbirine sarılı haldeki molekül zincirlerinin açılarak düzleşmesiyle alakalıdır. Basma gerilmesi etkisi altında ise tersi söz konusudur. Moleküller arası kayma olmaksızın meydana gelir. Deformasyon oldukça toparlanabilirdir ama ani olarak gerçekleşmez ve bu nedenle non-lineer bir yayın davranışına benzer. Orantı sınırını geçen bir gerilme noktasında deformasyon meydana gelmesine rağmen moleküller arası düzende kalıcı bir değişiklik olmaz. Toparlanabilir ve non-lineer karakterdeki bu deformasyon kauçuk durumda çok belirgindir [22].

Polimerik malzemeler için toparlanabilir olan en büyük uzama elastik sınırı gösterir. Bu noktadan sonra malzemenin uzaması Newtonian bir sıvının akmasındaki gibi moleküllerin birbirine göre kaymasıyla meydana gelir (Şekil 3.4c). Bu kaymış durumdaki moleküllerin eski orijinal konumlarına geri dönme eğilimi yoktur. Bu yüzden bu deformasyon kalıcı ve toparlanamazdır [22].

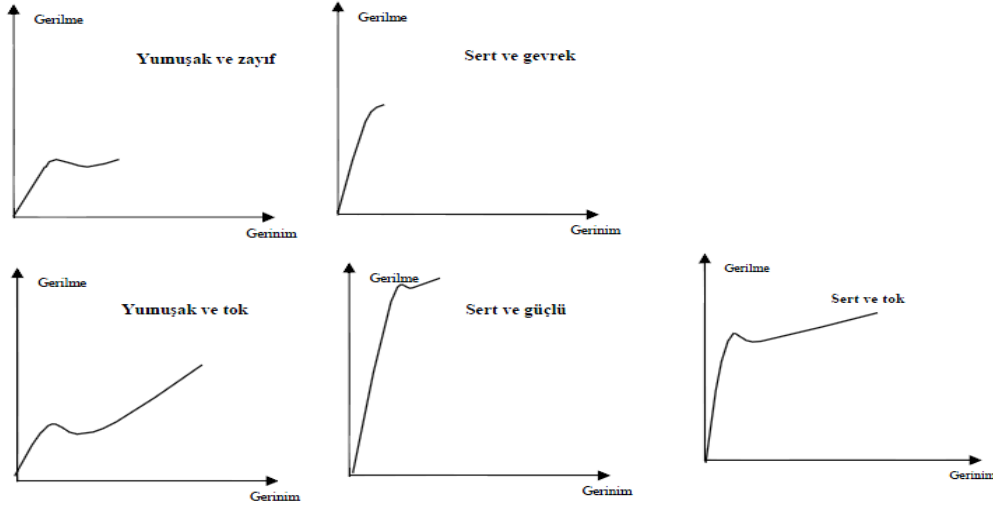


Şekil 3.4 : a)Polimer molekülünün uzaması b)Bağlı molekül zincirinin açılması
c)Moleküller arası kayma [22]

Gerilme-birim uzama diyagramı plastiklerin sınıflandırılması için bir temel oluşturur. Tüm malzemeler dış yük etkisi altında deformasyona uğrarlar. Bazı durumlarda oldukça büyük ve fark edilebilir bir deformasyona uğrarken bazı durumlarda ise deformasyon fark edilemeyecek kadar küçük olabilir [23].

Uygulanan yüke bağlı olarak malzemenin davranışı kopmadan önceki deformasyon boyutuna göre sünek veya kırılğan olarak tanımlanır. Sünek malzemeler plastik deformasyona uğrarken, kırılğan malzemeler ya hiç ya da çok az plastik deformasyona uğrarlar, bölgesel akma davranışı göstermezler [28].

Şekil 3.5’de farklı malzemeler için gerilme-birim uzama davranışı gösterilmiştir. Güçlü malzemeler zayıf malzemelere göre daha yüksek kopma dayanımına sahiptir. Sert ve kırılğan malzemeler yumuşak malzemelere göre daha yüksek elastiklik modülüne sahiptir. Birim hacim başına yüksek birim uzama enerjili tok malzemeler yüksek bir uzamaya sahiptir [22].



Şekil 3.5 : Farklı malzemeler için gerilme-birim uzama davranışları [15]

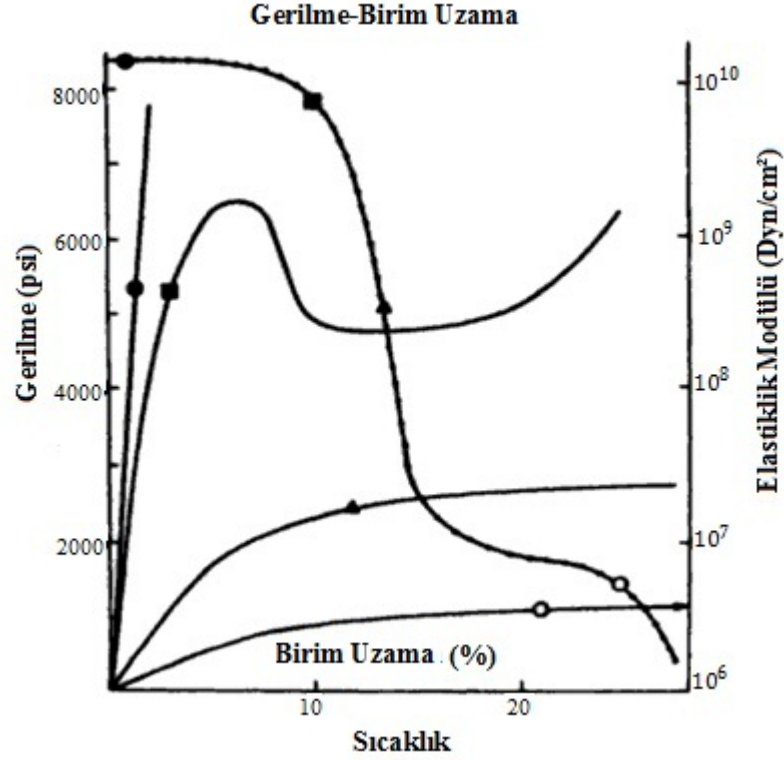
3.1.4 Mekanik özelliklere etkiyen faktörler

Plastik numunenin gösterdiği gerilme-birim uzama davranışı numunenin hazırlanması, hazırlanma koşulları ve test koşullarına göre farklılık gösterir. Polimerik malzemelerin mekanik davranışlarının doğasını belirleyen birçok yapısal, moleküler ve çevresel faktörler vardır.

3.1.4.1 Sıcaklık etkisi

Polimer malzemelerin moleküler yapısı, sürünme ve diğer mekanik özellikleri sıcaklıktan büyük oranda etkilenir.

Şekil 3.6'da polimerik bir malzemenin gerilme-birim uzama davranışı ve sıcaklığın- elastiklik modülü üzerine etkisi gösterilmiştir. Polimerik malzemenin modülü sıcaklığın yükselmesiyle azalır. Ama bu azalış uniform bir şekilde gerçekleşmez. Tg sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda modülün düşüşü yavaştır. Çünkü termal enerji, polimer moleküllerinin dönmesi ve ötelenmesi için yeterli değildir. Bu bölgede malzeme modülü yüksek, polimer ise rijit ve camsıdır. Molekül hareketliliğinin yaşandığı sıcaklıklarda daha belirgin bir şekilde düşüş meydana gelir. Moleküllerin hareketlenmesine yol açacak bir sıcaklık seviyesine gelindiği geçiş bölgesinde gevşeme süreci başlar ve malzemenin modülü hızlıca düşer. Polimer sert ve kırılğan katı durumundan yumuşak duruma geçer. Geçiş bölgesinden sonraki kauçuğumsu bölgede çok büyük oranda zincir hareketi yoktur. Lineer polimerlerde sıcaklığın artmasıyla geniş oranda zincir hareketi meydana gelir ve malzeme modülü düşer [30].



Şekil 3.6 : Tipik bir polimerin gerilme-birim uzama eğrileri ve farklı sıcaklıklardaki elastiklik modülü [25]

Çok düşük sıcaklıklarda esasen malzemenin akma noktası yoktur ve sonuç olarak polimerik malzeme kırılmandır. Polimerik malzemenin akma gerilmesi sıcaklığın artmasıyla azalır [25].

Çizelge 3.1'de farklı polimerik malzemelerin camsı geçiş ve erime sıcaklığı verilmiştir.

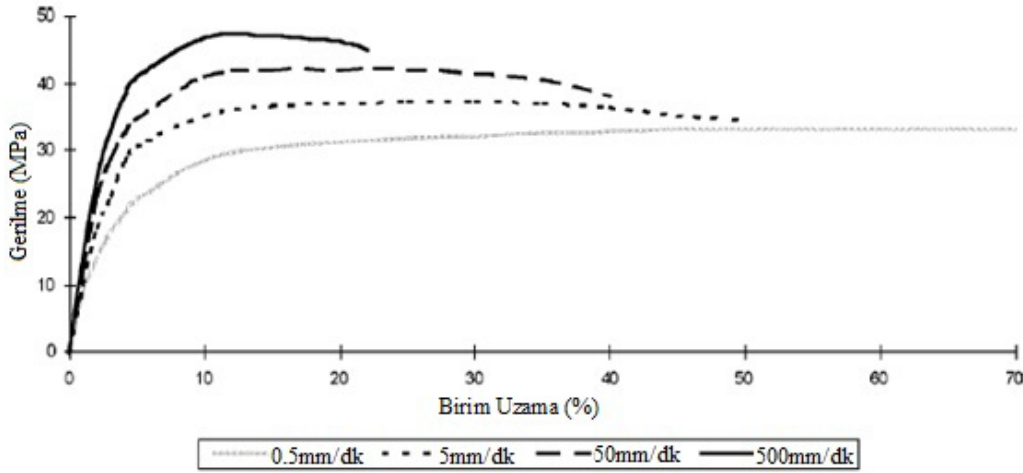
Çizelge 3.1 : Polimerlerin Tg ve Tm değerleri

Polimer	Tg (°C)	Tm (°C)
PET	65-75	200-265
PP	-14	165
DYPE	-80	60-100
OYPE	-80	80-120
YYPE	-80	100-140
PVC	85	180
PS	100	140

3.1.4.2 Çekme hızı etkisi

Çekme hızı değerinin malzemenin deformasyon davranışı üzerinde karmaşık ve dramatik bir etkisi vardır. Mekanik özellikler ve deformasyon davranışı, uygulanan çekme hızına oldukça bağlıdır.

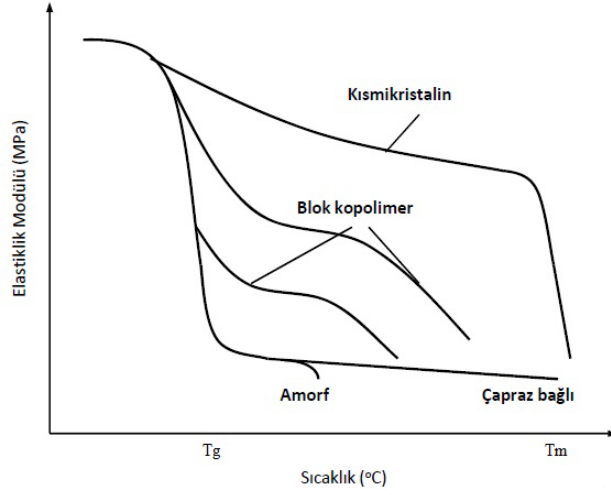
Şekil 3.7’de YYPE nin farklı çekme hızlarında gerilme-birim uzama davranışı gösterilmiştir. Malzemenin modülü test hızının artmasıyla artar. En düşük test hızında malzemenin akma noktası belirgin durumda değildir. Bu durumdaki malzeme soğuk bir şekilde akar. Çünkü bu çekme hızında, YYPE’nin molekülleri uygulanan kuvvete karşı sabit bir direnç gösterirken, meydana gelen deformasyona karşı kendilerini hizalayacak yeterli zamana sahiptir. Birim uzama hızının artmasıyla, diğer eğriler üzerinde akma noktasının oluşma eğilimi artar ve malzeme kırılğan bir davranış gösterir [26].



Şekil 3.7 : Farklı uzama hızlarında ve 23⁰C’de YYPE’nin çekme gerilmesine karşı yüzde şekil değişimi [26]

3.1.4.3 Kristallik etkisi

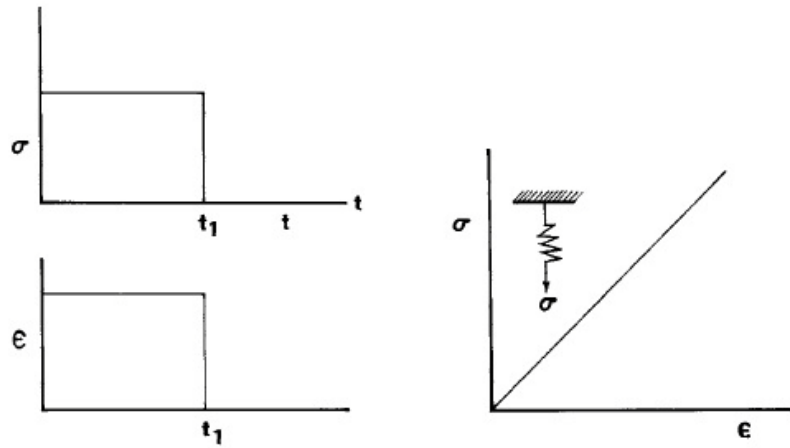
Kristaller, amorf matris içindeki sert katkıları olarak düşünülebilir. Çünkü kristaller amorf yapıya göre daha yüksek malzeme modülüne sahiptir. Şekil 3.8’de farklı kristallik değerlerine göre malzeme modülü sıcaklık eğrileri gösterilmiştir. Camı geçiş sıcaklığının altında, kristallik oranının malzeme modülü üzerine sadece küçük bir etkisi vardır [23]. Ama camı geçiş sıcaklığı üzerindeki belirgin bir etkisi vardır. T_g sıcaklığında malzeme modülünde düşüş vardır. Bu düşüş şiddeti kristallik derecesinin artmasıyla azalır. Erime sıcaklığında ise kristalin malzemelerin modülündeki düşüş daha keskindir.



Şekil 3.8 : Modül-sıcaklık eğrisi üzerinde kristallik etkisi [15]

3.2 Polimerlerin Zamana Bağlı Davranışı

İdeal elastik malzeme zamana bağlı davranış göstermez ve atalet kuvvetlerini yok sayar. Malzemenin üzerine uygulanan yük kaldırıldığında, parça ani olarak toparlanarak, orijinal haline tamamen döner. Meydana gelen birim uzama her zaman uygulanan gerilmeyle orantılı, deformasyon hızından bağımsızdır. Şekil 3.9’da ideal bir elastik malzemenin davranışı gösterilmiştir [23].



Şekil 3.9 : İdeal elastik davranış [23]

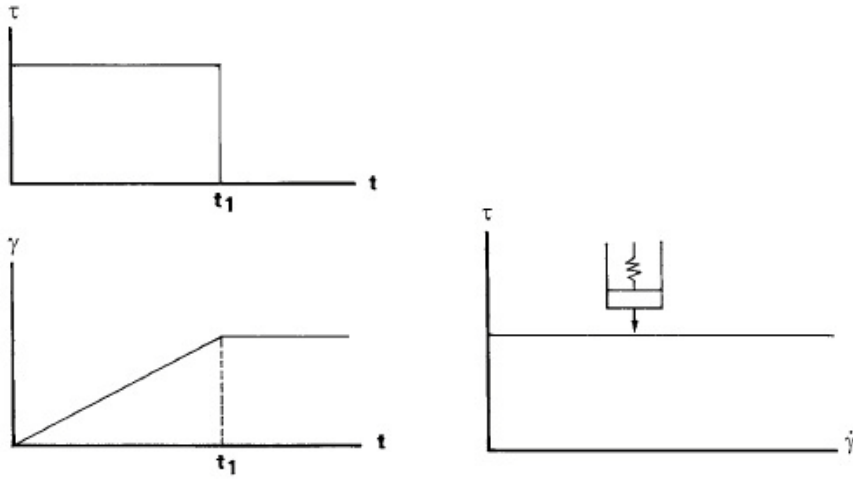
İdeal elastik davranış, bir yayın gerilme-birim uzama davranışı ile gösterilir. Bu yay birim uzama veya test hızından bağımsız bir sabit modüle sahiptir. Gerilme sadece birim uzama değerinin fonksiyonudur [23].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.4)$$

Sıvıların elastik karakteristiği yoktur. Sıvıların baskın özelliği katılarda elastikliğe denk gelen viskozitesidir. Newton kanuna göre bir kayma gerilmesine karşı bir sıvının davranışı viskoz akış şeklindedir.

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (3.5)$$

η viskozite ve $\frac{d\gamma}{dt}$ şekil değiştirme hızıdır. Böylece ideal elastik davranışın aksine birim uzama, uygulanan harici gerilme değerinde zamanın lineer fonksiyonudur. Uygulanan yükün kaldırılmasıyla deformasyonda kalıcı durum ortaya çıkar. Şekil 3.10'da saf viskoz davranışı gösterilmiştir. Saf viskoz akış içinde newtonian sıvı bulunan ve bir silindir içinde hareketli pistonu olan bir sönümlenme elemanının davranışını gösterir. Bir sönümlenme elemanının modülü yoktur. Ama harekete karşı direnç test hızıyla (şekil değiştirme hızı) orantılıdır [23].



Şekil 3.10 : Saf viskoz davranış [23]

3.2.1 Viskoelastiklik

Polimerler gibi viskoelastik malzemeler hem elastik hem de viskoz malzemelerin karakterinin bir araya geldiği malzemelerdir. Elastik katı üzerine bir dış yükün etkisiyle yeni denge şekline gelir. Bu deformasyon sırasında katı kendine etkileyen kuvvetten elde ettiği enerjiyi biriktirir ve yükün kaldırılmasıyla biriktirdiği enerjiyle eski orijinal şekline geri döner. Viskoz sıvılarda ise belirli bir şekil yoktur, yük etkisiyle geriye dönüşü olmayacak şekilde akar [28].

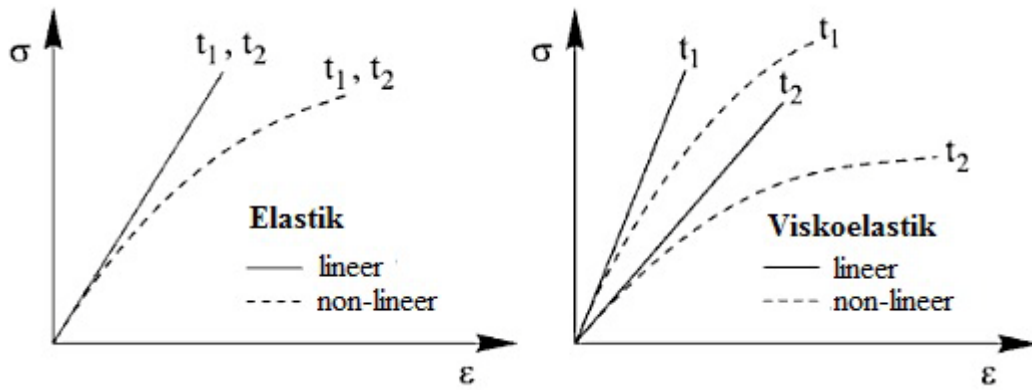
Polimerik malzemeler zamana bağılı olarak elastik katı ve viskoz sıvının özellikleri arasında davranış gösterir. Viskoelastik bir malzemede gerilme sadece zaman bağılı olarak değişiyorsa lineer karakterdedir. Gerilme, birim uzama değeriyle orantılı olarak değişir. Sürünme ve gerilme gevşemesi davranışları da sadece zamanla değişir.

$$\varepsilon = \sigma f(t) \quad (3.6)$$

Viskoelastik malzemenin gerilme değeri sadece zamanla değil, gerilme değeriyle de değişiyorsa malzeme nonlinear karakterdir [25].

$$\varepsilon = f(\sigma, t) \quad (3.7)$$

Elastik ve viskoelastik malzemelerin çekme karşısındaki lineer ve nonlinear gerilme-birim uzama davranışları Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Elastik malzeme için davranış zamandan bağımsızdır. Bu yüzden farklı zamanlar için tek bir eğri vardır. Nonlinearlık ise gerilme-birim uzama davranışının lineerlikten saptığı bir eğri olarak gözükür. Lineer viskoelastik malzeme için çekme davranışı lineerdir. Ama gerilme birim uzama davranışı farklı zamanlarda birbirinden ayrıldığından malzemenin modülü zamanla azalır. Viskoelastik malzeme nonlinear davranış gösterdiğinde, çekme deneyi sonucunda gerilme-birim uzama davranışı belirli bir gerilmeden sonra lineerlikten sapar [31].



Şekil 3.11 : İki farklı zamanda elastik ve viskoelastik malzemelerin gerilme-birim uzama davranışı [31]

3.2.2 Polimerlerin sürünme davranışı

Sürünme plastik bir nesnenin sabit bir yük altında zaman bağılı olarak boyutlarında meydana gelen değişimdir. Metallerde sürünmeye uğrarlar. Ama oda sıcaklığında metallerde meydana gelen sürünme genellikle yok sayılır. Bir metal malzemenin

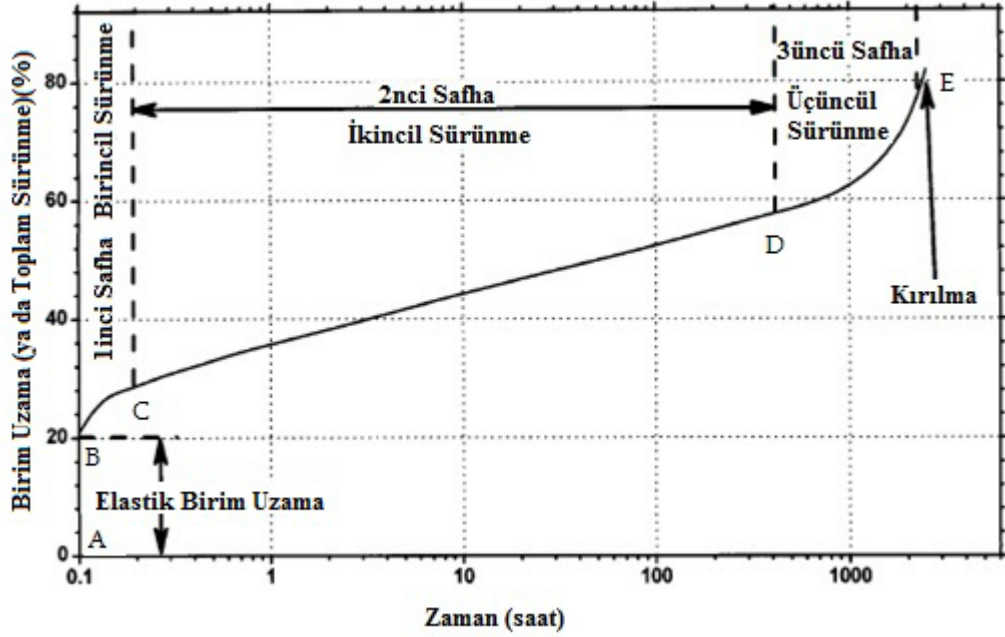
modülü yüksek sıcaklıklar hariç sabit sayılır. Ama polimerik bir malzemenin modülü sabit değildir. Metallerde, tasarım prensibi genelde parçanın kırılmasına neden olmayacak bir gerilme değeri tespit etmek iken plastikler için yüksek deformasyon değeri çalışma gerilmesinin seçiminde sınırlayıcı faktördür [32].

Sürünmede sabit bir yük numune üzerine etki ettirilir. Bundan sonra numunenin tepkisi zamana göre ölçülür. Bu tepki genelde viskoelastik davranış olarak ifade edilir. Çünkü katı numunenin tepkisi hem bir elastik bileşenden hem de bir viskoz bileşenden oluşur [24].

$$\sigma_0 = E(t) \cdot \varepsilon(t) \quad (3.8)$$

Sürünme testi çoğunlukla çekme şeklinde yapılır. Ama bu sürünme deneyler kayma, burulma, eğme ve basma şeklinde de yapılabilir. Sürünme verileri uzun süre sabit bir ölü yük altında kalacak olan polimerik malzemenin seçiminde önemli bilgi sağlar [23].

Şekil 3.12’da sabit yük altındaki polimerik bir malzemenin şekil değiştirme-logaritmik zaman grafiği verilmiştir. Bu şekilde yaklaşık olarak başlangıçtaki ani şekil değiştirmeyi gösteren AB’yi takip eden eğri üç bölgeye ayrılmıştır. Bunlar; BC arasındaki birincil ya da geçiş sürünmesi bölgesi, CD arasındaki ikincil ya da kararlı hal sürünmesi bölgesi ve DE arasındaki üçüncül ya da hızlanmış sürünme bölgesidir. Birincil sürünme bölgesinde malzemenin sürünme hızı süratle azalır. Bu bölgede ki durum gecikmiş bir elastiklik mekanizmasına benzer ve yük kaldırıldığında deformasyon toparlanabilir. İkincil sürünme esas olarak viskoz karakterdedir ve bu yüzden toparlanabilir değildir. Bu bölgedeki şekil değiştirme hızı sürünme hızı olarak anılır ve malzemenin ömrünü belirlemede kullanılır. Üçüncül sürünme artan bir hızda gerçekleşir. Çünkü numunede meydana gelen boyun vermeden dolayı gerçek gerilme değeri artar [22].



Şekil 3.12 : Zamana bağlı yüzde şekil değişimi [32]

Birincil sürünme bölgesi, ikincil sürünme bölgesine göre karşılaştırıldığında çok kısa bir zaman periyodunda meydana gelir. Üçüncül sürünme bölgesi çok kısa zamanda oluşur ve genelde çatlak oluşumu, patlama, boyun verme gibi hasarların başlangıcında olur.

Genellikle sürünme eğrileri logaritmik zaman ölçeğinde çizilir. Böylece uzun bir zaman periyodu için birim uzamanın zamana bağımlı değişimi görülebilir. Eğer malzeme, lineer olarak viskoelastik ise belirlenen bir zamanda sürünme eğrilerindeki her bir eğri aynı oranda birim uzama eksenini boyunca birbirinin ötelenmiş hali olur. Plastikler için bu tip lineer bir davranış, düşük birim uzamada ve kısa süreli ölçekte gözlenmesine rağmen birçok durumda plastiklerin davranışı nonlineerdir [22].

Malzemenin modülü onun rijitliğinin ölçüsüdür. Malzemenin kompliansı ise onun yumuşaklığının ifadesidir. Sürünme deneylerinde zamana bağlı komplians $D(t)$ ifadesi kullanılır.

Herhangi bir deformasyon türüne ait komplians o deformasyon türünün modülünün tersidir.

$$D = \frac{1}{E} \quad (3.9)$$

4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Günümüzde yüksek yoğunluklu polietilen malzeme dayanımı, hafifliği ve fiyatı gibi birçok avantajından dolayı gittikçe artan bir kullanıma sahiptir. Yeni ürünlerin tasarımı ve kullanımı için polietilen malzemenin viskoelastik davranışlarının belirlenmesi çok önemlidir.

Bu çalışmada, YYPE malzemenin sürünme davranışlarının belirlenmesi için 24 saat boyunca farklı gerilmeler altında enjeksiyonla kalıplanmış çekme ve eğme numuneleri ISO standartlarına göre teste tabi tutulmuştur.

4.1 Deney Numuneleri

Deneylerde; PE100 olarak bilinen granül halde ki polietilenden elde edilen ve %2 karbon siyahı katkılı yüksek yoğunluklu polietilen malzeme kullanılmıştır. Malzemenin 190°C de 2.16 kg'a göre yapılan Erime İndeksi değeri (MFI) 0.07 gr/10dk yoğunluğu ise 0.948 g/cm³ dir. Kristallik değeri yaklaşık %57 civarındadır. PE100 ile ilgili diğer özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

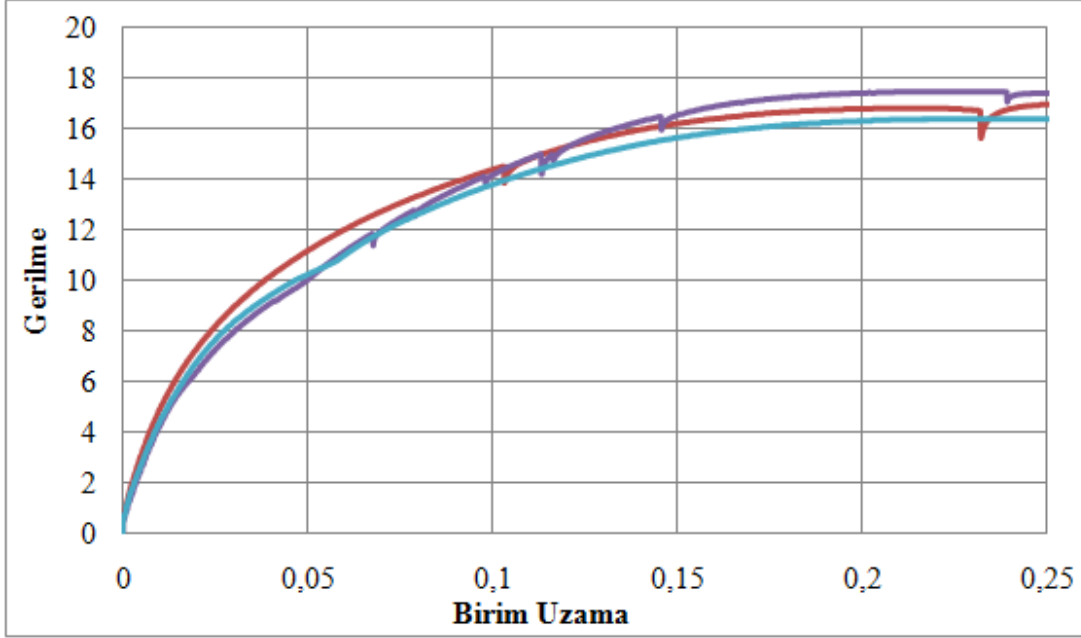
Çizelge 4.1 : PE100 Malzemenin diğer fiziksel özellikleri

Özellikler	Test Standardı	Değer	Birim
Erime İndeksi (190 °C-5 kg)	ASTM D 1238	0.35	g/10min
Çekme Dayanımı (Akma 50 mm/dk)	ASTM D 638	255	kg/cm ²
Maksimum Uzama (50mm/dk)	ASTM D 638	>600	%
IZOD Darbe Dayanımı	ASTM D 790	10000	kg/cm ²
Vicad Yumuşama Noktası	ASTM D 3895	>40	dk

Numuneler ticari bir firmadan temin edilmiş, enjeksiyonla kalıplanması sırasında numune eksenini doğrultusunda tek yolluktan akış sağlanmış ve herhangi bir anizotropi ve iç gerilmenin olmaması için çevrim süresi yeterli uzunlukta tutulmuştur.

PE100 malzemeye uygulanacak gerilme değerlerinin elde edilmesi için kaşık numunesi 5mm/dk hızla çekme testine tabi tutulmuştur. Toplam üç tekrar yapılmıştır.

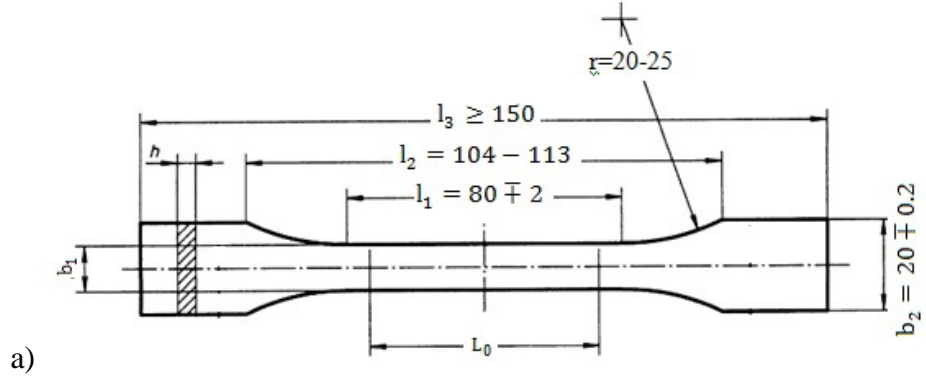
Kopma gerilmesi yaklaşık 14 MPa seviyesindedir. Malzemenin üst akma gerilmesi ortalama 17.2 MPa, %1 sekant modülü 450 MPa ve %2 sekant modülü 340 MPa değerindedir.



Şekil 4.1 : PE100 malzemenin çekme davranışı

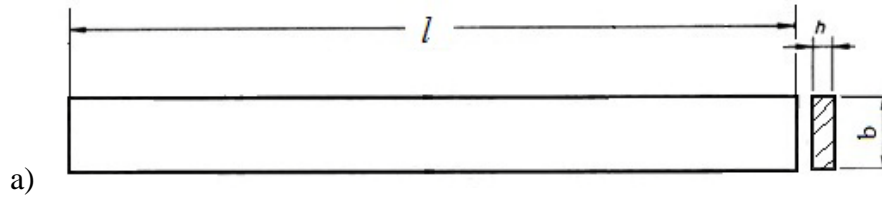
Çekme testi sırasında malzemede, küçük gerilme değerlerinde malzemenin lineer davranış gösterdiği bölge ve sonrasında gerilme ve birim uzamanın nonlineer bir şekilde değiştiği nonlineer viskoelastik bölge mevcuttur. Bu bölgede numunede ki deformasyon homojendir. Bu bölgeyi %20 birim uzama civarında viskoplastik değişimin başlaması ve numune üzerinde bir boyunun oluşması takip etmiştir. Artan birim uzama ile birlikte malzemenin molekül düzeni yeniden düzenlenerek bir gerilme yumuşamasının gerçekleştiği bölge ve sonra birim uzamanın artmasına rağmen gerilmenin sabit kaldığı soğuk şekil değiştirme bölgesi bulunmaktadır. Bu nokta %180 uzamaya kadar devam etmiş ve sonra pekleşme meydana gelmeden numune kopmuştur.

Çekme sürünmesi testleri için kalıplanmış plastiklerin çekme özelliklerini belirleyen ISO 527-2 1A kullanılmıştır. Bu standarda göre numunenin kalınlığı (h) 4 ± 0.2 mm genişliği (b_1) 10 ± 0.2 mm'dir. Ölçü boyu (L_0) yaklaşık 70 mm alınmıştır. Şekil 4.2'de numunenin şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Enjeksiyonla kalıplanmış çekme sürünmesi numunesi

Eğme sürünmesi testlerinde numune boyutlarının tayini için plastik malzemelerin eğme özelliklerini belirleyen ISO 178 standardı kullanılmıştır. Şekil 4.3’de numune gösterilmiştir. Numune kalınlığı (h) yaklaşık 3.15 mm, genişliği (b) yaklaşık 12.4 mm, numune boyu (l) yaklaşık 120 mm’dir.



Şekil 4.3 : Enjeksiyonla kalıplanmış eğme sürünmesi numunesi

4.2 Çekme Sürünmesi Deney Tesisatı ve Deneyin Yapılışı

Çekme sürünmesi testleri DİZAYN Grup Teknoloji Ar-Ge Ltd.Şti bünyesinde bulunan üç istasyonlu sürünme cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’de kullanılan sürünme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Üç istasyonlu çekme sürünmesi cihazı

Cihazın üst kısmında bulunan manivelanın bir ucuna bağlı üst çeneye kaşık numunesi dikey olarak bağlanmıştır. Alt çene ise numunenin boyuna göre yükseltip veya alçaltılıp önceden sabitlenmiştir. Manivelanın diğer ucunda ise belirlenmiş ölü ağırlık yerleştirilmiştir. Ağırlık yerçekimi etkisiyle bir çekme kuvveti oluşturularak numuneyi yukarı doğru çekmektedir. Manivela kollarının birbirine oranı 10:1 olduğundan oluşan statik çekme kuvveti uygulanan ağırlığın 10 katına denk gelmektedir. Şekil 4.5’de manivela sistemi, Şekil 4.6’da çekme çenesi ve kullanılan numune gösterilmiştir.

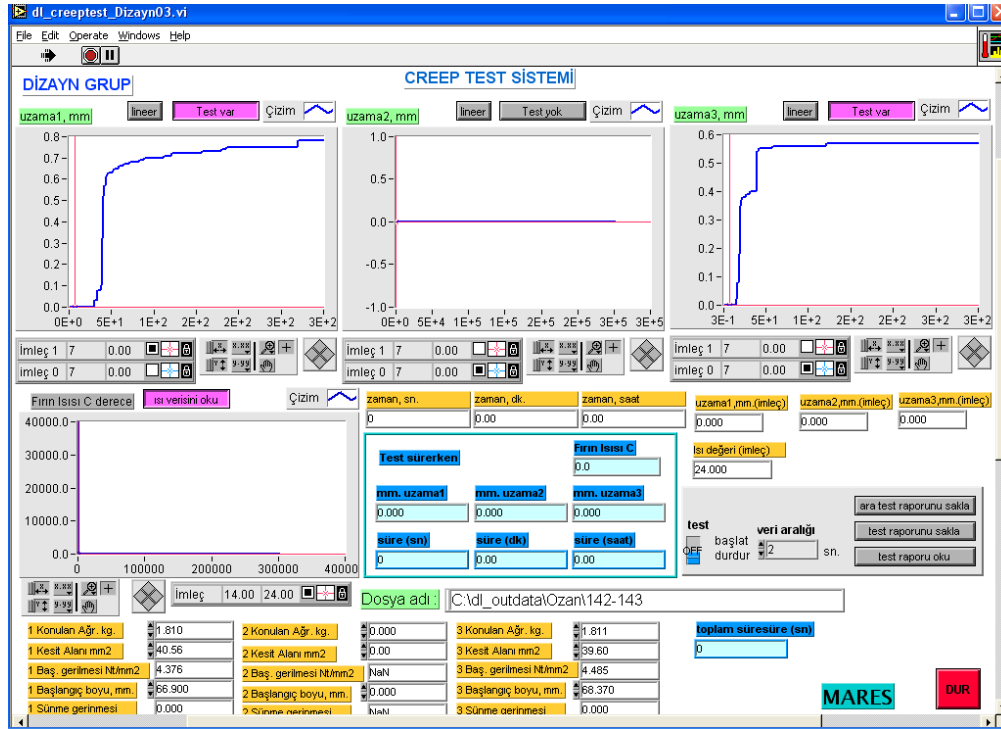


Şekil 4.5 : Sürünme cihazı manivela sistemi



Şekil 4.6 : Çekme çenesi ve numune

Zamana bağlı meydana gelen değişimi ölçmek için ekstansometre yerine cihazın her istasyonda bulunan sinyal üreticilerden yararlanılmıştır. Ölçü boyu olarak alt ve üst çeneler arasında ki açıklık kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Uzamalar sinyal üretici vasıtasıyla bağlı olduğu göstergelerden ve bilgisayardan okunmaktadır. Kullanılan sinyal üreticiler 0.01 mm hassasiyetindedir. Şekil 4.7’de sürünme testinde kullanılan program ara yüzü gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Çekme sürünmesi testlerinde kullanılan program ara yüzü

YYPE malzemeden elde edilen, çekme sürünmesi numunelerinin farklı yükler altındaki zamana bağlı deformasyon davranışlarının tespiti için plastik malzemelerin çekme sürünme özelliklerini belirlenmesinde kullanılan ISO 899-1 standardı kullanılmıştır. ISO 527-2 standardına göre kalınlığı yaklaşık 4 mm, genişliği yaklaşık olarak 10 mm olan numunede, malzemenin zamana bağlı davranışının belirlenmesi için mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim uzaması kullanılmıştır. Oluşan gerilme, kullanılan ağırlığın başlangıç kesit alanına oranıyla elde edildiğinden tüm test boyunca sabittir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Numunenin kalınlığı ve genişliği üç farklı noktadan ölçülüp, bunların ortalaması alınmıştır. Numunenin ölçüleri alınıp cihaza bağlandıktan sonra değerler, bilgisayarda bulunan sistem ile entegre programa girilmekte ve uzama göstergeleri sıfırlandıktan sonra data alma işlemi başlatılmıştır. Manivelaya bağlı olan kefeye uygulanmak istenen gerilmeye göre belirlenen ağırlıklar sistemde bir salınımın olmaması için yavaşça ve parça parça koyulmuştur. Ağırlığın koyulmasından uzamanın hızlı bir şekilde gerçekleştiği zamana kadar data alma süresi 1 sn seçilmiş

daha sonra değişimin yavaşlaması ile bu süre 180 sn'ye çıkarılmıştır. Deney süresi yaklaşık 24 saattir. Her gerilme için en az 8 tekrar yapılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{L_t - L_0}{L_0} = \frac{(\Delta L)_t}{L_0} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F.L_0}{A.(\Delta L)_t} \quad (4.3)$$

Çekme sürünmesi testleri sırasında ortamın sıcaklığı termokupl ile ölçülmüş ve bilgisayara uzamayla eş zamanlı olarak aktarılmıştır. Test sıcaklığı ortalama $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ' dir. Şekil 4.8'de kullanılan uzama ve sıcaklık göstergeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Çekme sürünmesi testlerinde kullanılan uzama ve sıcaklık göstergeleri

4.3 Deneysel Sonuçlar

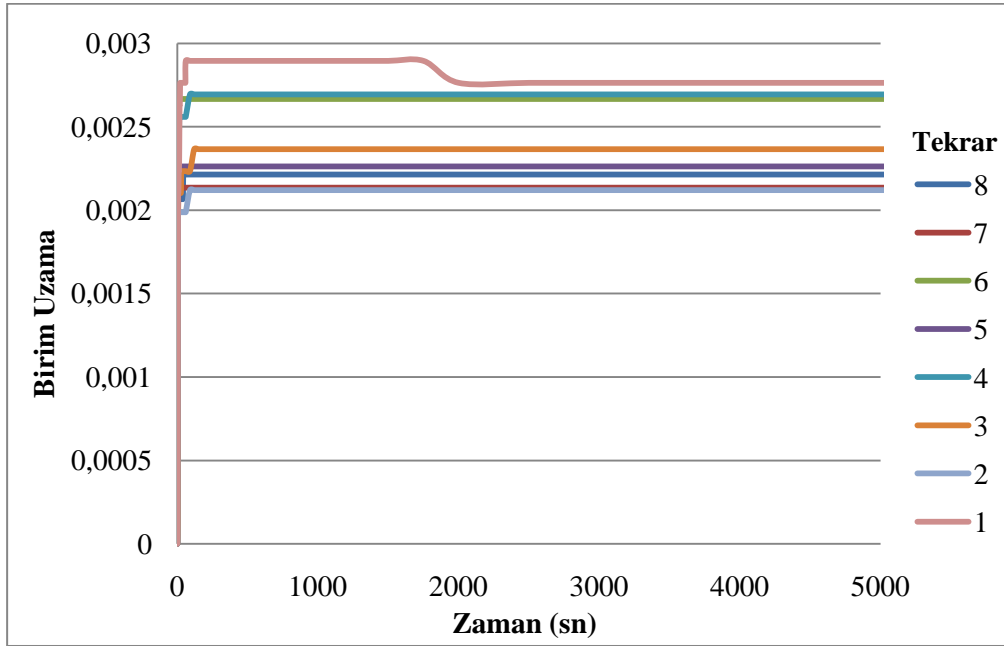
Çekme sürünmesi testleri için PE100 malzeme, yaklaşık 24 saat boyunca farklı gerilmeler altında teste tabi tutulmuştur.

Deneyler 10:1 oranlı manivela sistemli bir cihazda gerçekleştirildiğinden ağırlık numuneye, kullanılan ağırlığın 10 katı olarak etki etmektedir. Her farklı gerilme için sırasıyla 813 gr, 1397 gr, 2269 gr, 2470 gr, 2753 gr, 3263 gr ve 3770 gr kullanılmıştır. Her tekrar ve her gerilme için numunede oluşan gerilme Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Kullanılan ağırlığa göre her tekrarda oluşan gerilme

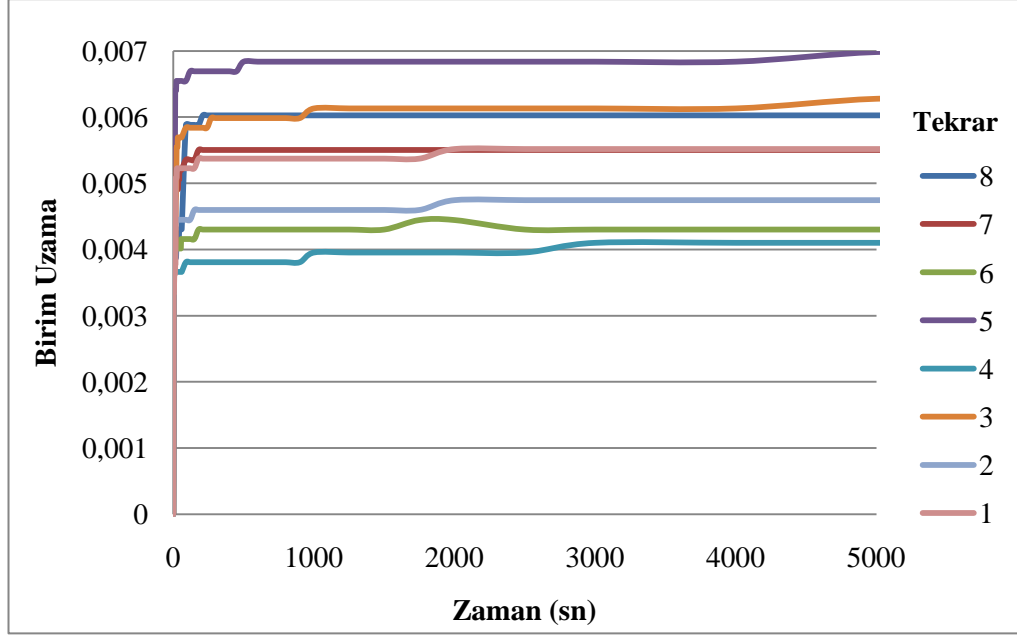
	Gerilme1 (MPa)	Gerilme2 (MPa)	Gerilme3 (MPa)	Gerilme4 (MPa)	Gerilme5 (MPa)	Gerilme6 (MPa)	Gerilme7 (MPa)
Tekrar 1	1.978	3.448	5.591	6.103	6.819	8.088	9.288
Tekrar 2	1.986	3.455	5.538	6.092	6.77	7.94	9.268
Tekrar 3	1.986	3.438	5.551	6.017	6.824	8.169	9.39
Tekrar 4	2.015	3.44	5.613	6.023	6.797	8.099	9.334
Tekrar 5	1.984	3.399	5.552	6.126	6.715	8.062	9.305
Tekrar 6	1.982	3.424	5.648	6.119	6.841	8	9.207
Tekrar 7	1.993	3.42	5.513	6.126	6.807	7.908	9.31
Tekrar 8	2.01	3.456	5.51	5.994	6.803	7.932	9.178
Ortalama	1.991	3.435	5.564	6.075	6.797	8.024	9.285

Şekil 4.9’da Gerilme 1 (≈ 2 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 2 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0027, 0.0021, 0.0024, 0.002693, 0.0023, 0.0026, 0.0021, 0.0022’dir.



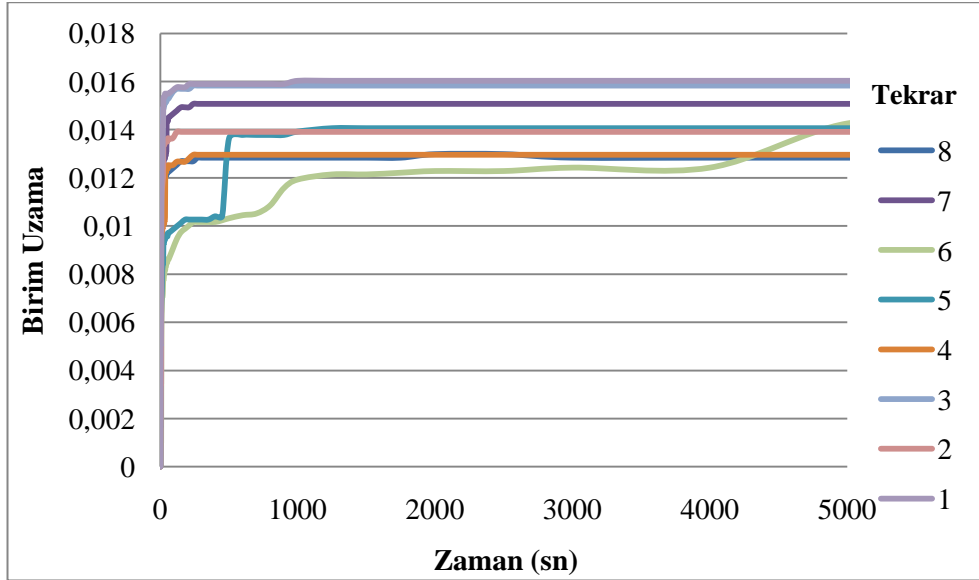
Şekil 4.9 : 2 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.10’da Gerilme 2 (≈ 3.4 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 3.4 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0059, 0.0048, 0.0062, 0.0040, 0.0071, 0.0044, 0.0055, 0.0060’dir.



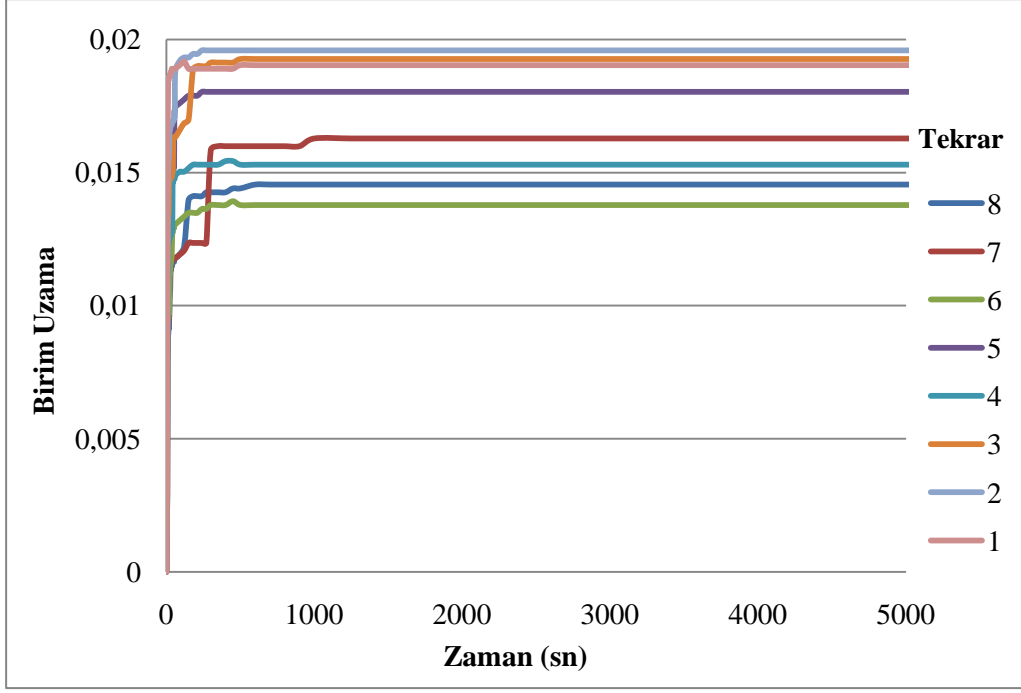
Şekil 4.10 : 3.4 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.11'de Gerilme 3 (≈ 5.6 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 5.6 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0160, 0.0139, 0.0158, 0.0129, 0.0140, 0.0182, 0.0150, 0.0128'dir.



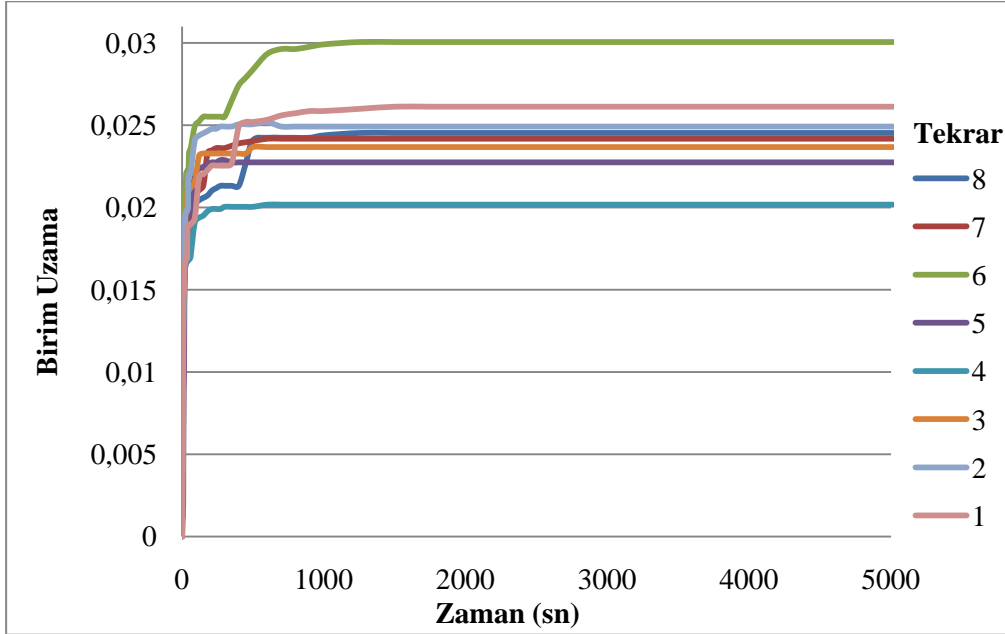
Şekil 4.11 : 5.6 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.12'da Gerilme 4 (≈ 6.1 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 6.1 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0190, 0.0195, 0.0192, 0.0152, 0.0188, 0.0137, 0.0162, 0.0145'dir.



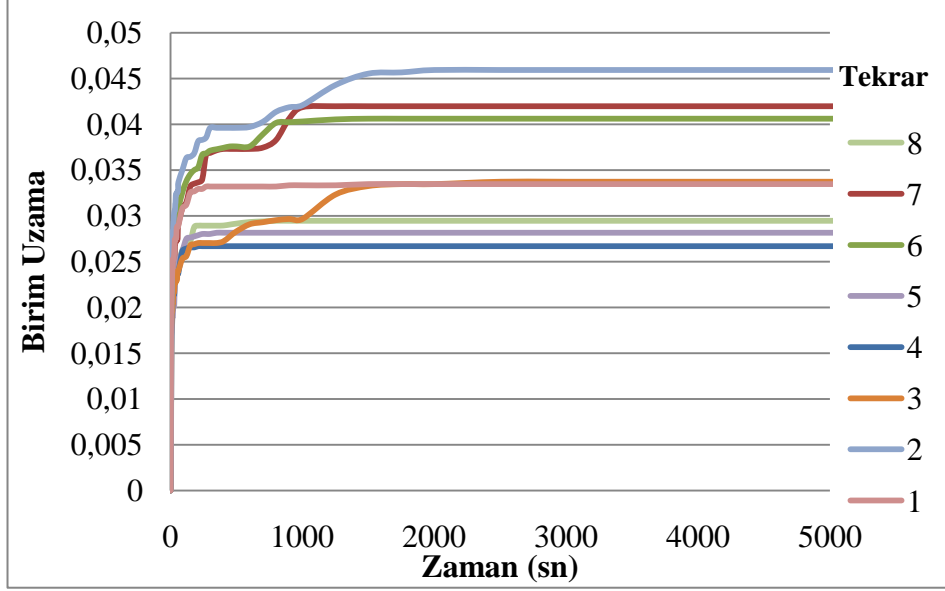
Şekil 4.12 : 6.1 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.13’de Gerilme 5 (≈ 6.8 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 6.8 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0261, 0.0249, 0.0236, 0.0200, 0.0227, 0.0300, 0.0241, 0.0245’dür.



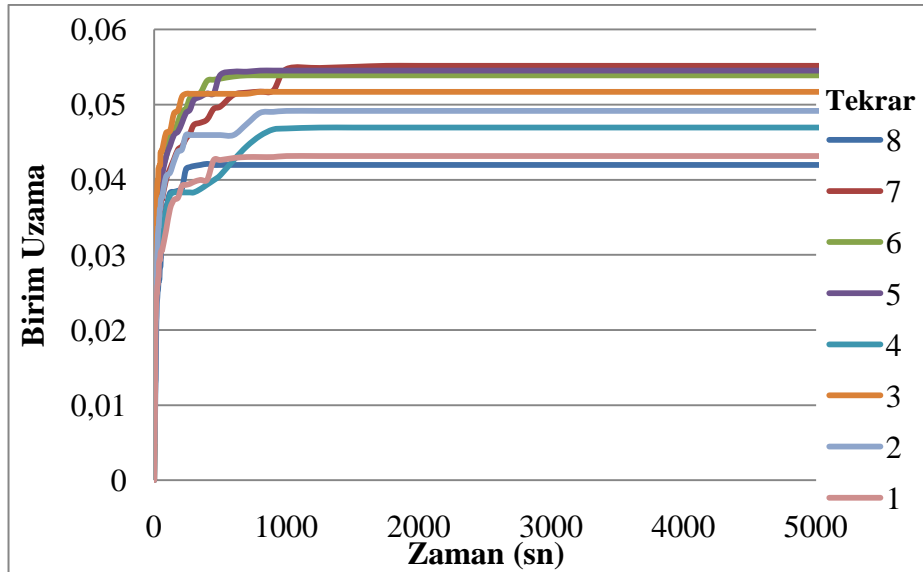
Şekil 4.13 : 6.8 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.14'de Gerilme 6 (≈ 8 MPa) için her tekrarda oluşan birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 8 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0334, 0.0459, 0.0337, 0.026677, 0.0281, 0.0294, 0.0406, 0.0419'dir.



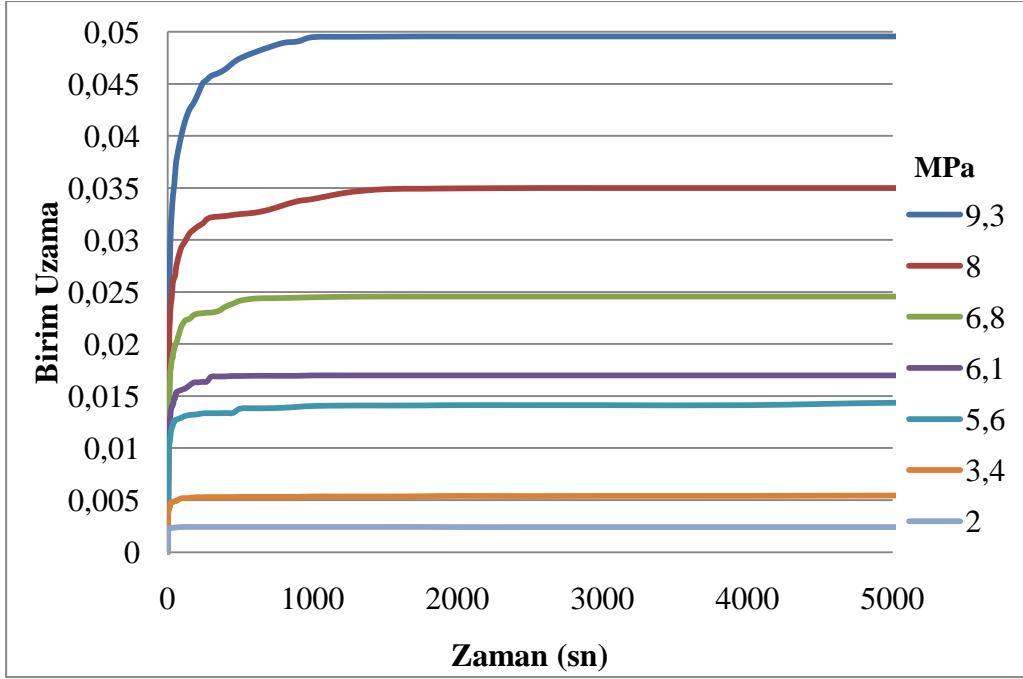
Şekil 4.14 : 8 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.15'de Gerilme 7 (≈ 9.3 MPa) için her tekrarda birim uzama -zaman grafiği verilmiştir. 9.3 MPa gerilme altında 24 saat sonunda her bir numunede meydana gelen birim uzama (ϵ) değerleri sırasıyla 0.0436, 0.0491, 0.0517, 0.0469, 0.0545, 0.0538, 0.0551, 0.0419'dur.



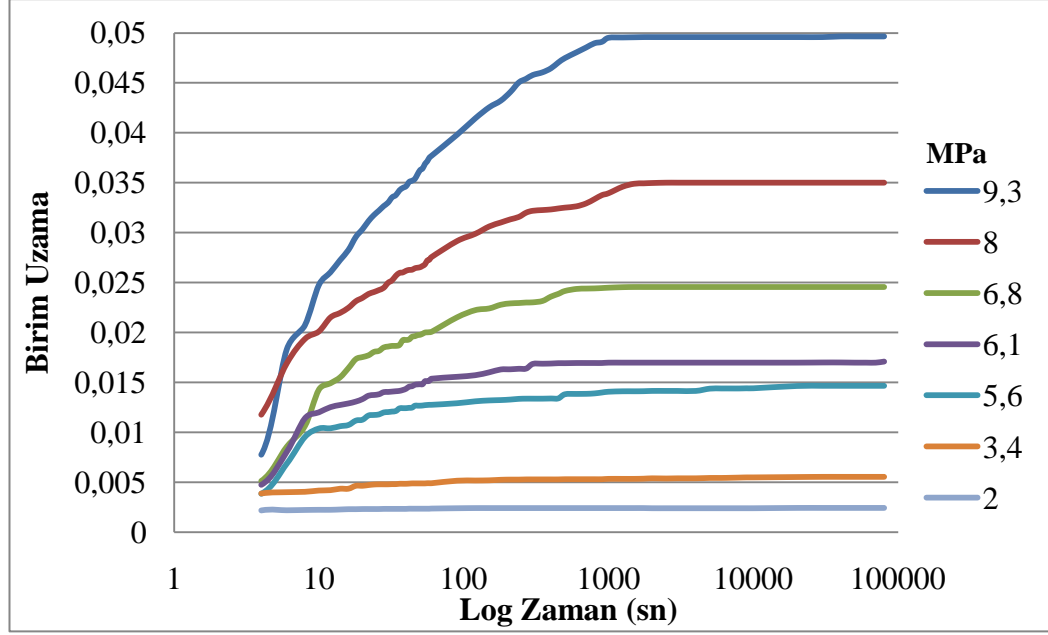
Şekil 4.15 : 9.3 MPa gerilme altında birim uzama-lineer zaman ilişkisi

Şekil 4.16'da ortalama gerilme değerine göre 5000 sn'ye kadar birim uzama-zaman grafiği verilmiştir. 24 saat sonunda tüm gerilme seviyelerinde maksimum birim uzama değerleri (ϵ) 2 MPa'dan 9.3 MPa'ya doğru sırasıyla 0.0024, 0.0055, 0.0146, 0.0169, 0.0245, 0.0349 ve 0.0496 dir.



Şekil 4.16 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama birim uzama-lineer zaman ilişkisi

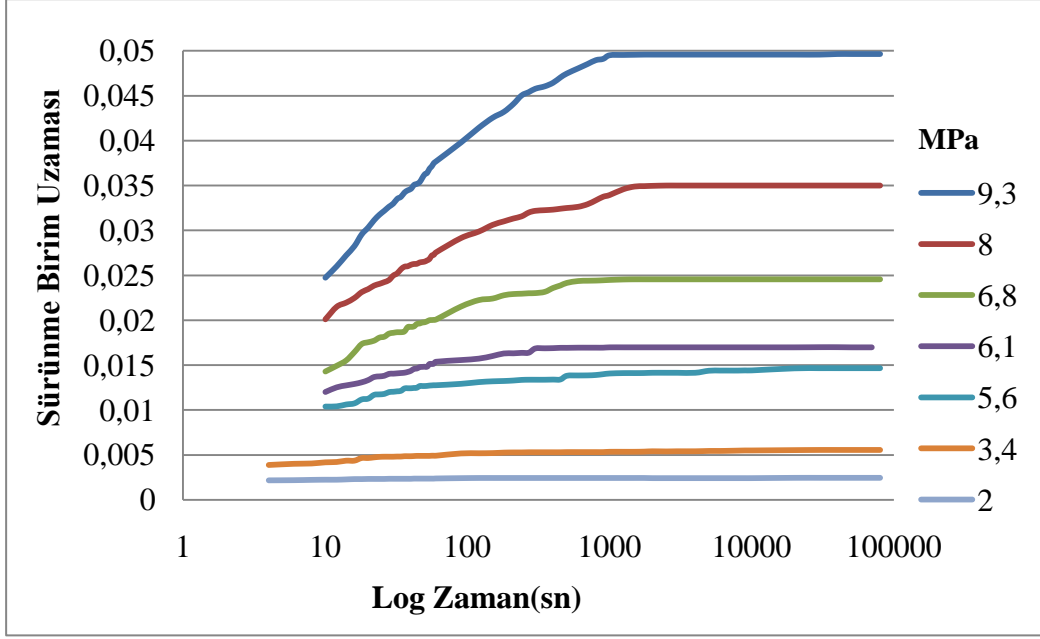
Sürünme, plastik bir nesnenin sabit bir yük altında zaman bağı olarak boyutlarında meydana gelen değişimdir. Genellikle sürünme eğrileri logaritmik zaman ölçeğinde çizilir. Böylece uzun bir zaman periyodu için birim uzamanın zamana bağımlı değişimi görülebilir. Şekil 4.17'de 80000 sn'ye kadar birim uzama-logaritmik zaman grafiği verilmiştir. Sürünme birim uzaması, yükün uygulanmaya başlamasıyla çok hızlı artmış ve deformasyonun çoğu büyük gerilme değerlerinde 1000 sn'de meydana gelmiştir. Daha küçük gerilme seviyelerinde bu süre daha kısadır. Bu süreden sonra şekil değişimi ya çok az ya da hiç yoktur.



Şekil 4.17 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama birim uzama-logaritmik zaman ilişkisi

Polimerik malzemelerin sürünme davranışı üç ayrı safhadan meydana gelir. Birincil bölgede sürünme ani ve elastikken, ikincil bölgede sürünme hızı sabittir. Üçüncül sürünmede ise malzeme kopar. Bu çalışmada, sürünme birim uzaması-logaritmik zaman grafiğinde numunenin birincil sürünme bölgesinden sonra ikincil sürünme bölgesine geçtiği görülmektedir. Numuneler üçüncül sürünme bölgesine geçmemiştir. Bunun için 24 saatlik test süresi oldukça kısadır.

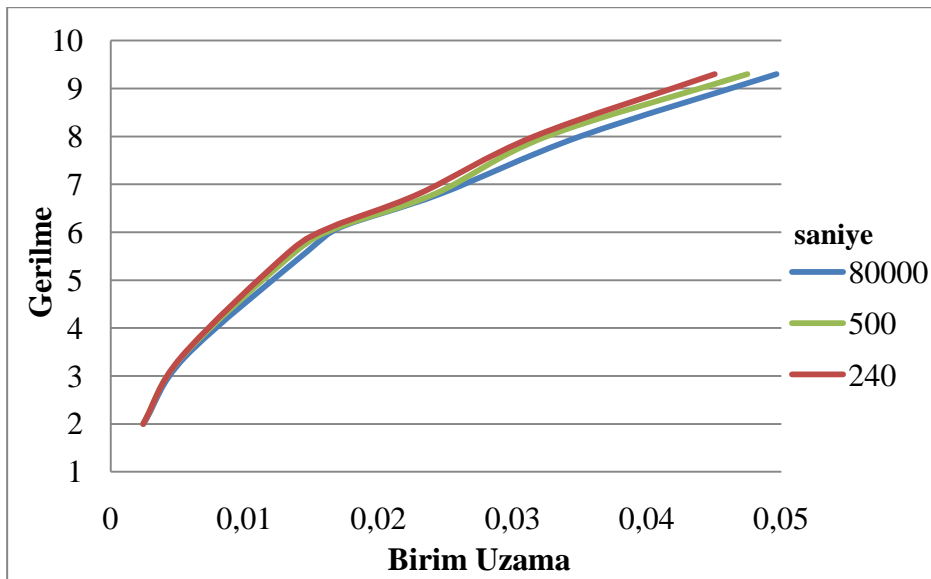
Sürünme uzaması değeri, toplam uzama değerinden elastik uzama değerinin çıkarılmasıyla elde edilir. Bu çalışmada da, elde edilen toplam birim uzama (ϵ) değerinden elastik şekil değiştirme sonucu elde edilen birim uzama (ϵ_e) çıkartılarak sürünme birim uzaması (ϵ_c) değerleri elde edilmiştir. Yapılan testler sonucunda 9.3 MPa, 8 MPa, 6.8 MPa, 6.1 MPa ve 5.6 MPa için elastik uzamanın 10 sn'de ve 3.4 MPa ve 2 MPa için elastik uzamanın 4 sn'de tamamlandığı kabul edilerek Şekil 4.18'de tüm gerilme seviyelerinde ortaya çıkan sürünme birim uzaması-logaritmik zaman ilişkisi verilmiştir. Numuneye uygulanan gerilme seviyesi arttıkça, birim uzama miktarı da artmaktadır. En büyük gerilme seviyesinde meydana gelen maksimum yüzde uzama %5 civarındadır. Bu değer malzemede herhangi bir kesit daralmasına neden olacak büyüklükte olmadığından dolayı mühendislik birim uzaması kullanılmasının bir sakınca olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.18 : Tüm gerilme seviyelerinde ortalama sürünme birim uzaması-logaritmik zaman ilişkisi

Elde edilen sonuçlara göre YYPE malzemenin lineer viskoelastik davranış gösterdiği ve nonlineer viskoelastik davranışa girdiği bölgenin tespit edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.21’de uygulanan gerilmeye göre sürünme birim uzaması miktarındaki artış 9.3 MPa için %100.6, 8 MPa için %74.17, 6.8 MPa için %72, 6.1 MPa için %41.42, 5.6 MPa için %41.16 ve 3.4 MPa için %42.60 ve 2 MPa için %12.3’dür.

Şekil 4.19’da malzemenin 240 sn, 500 sn ve 80000 sn’deki izokronos grafiği verilmiştir.

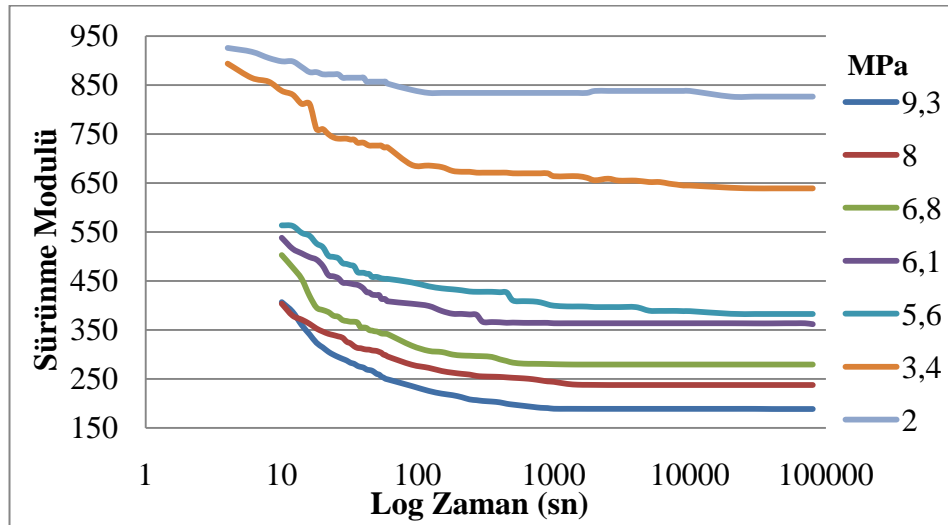


Şekil 4.19 : Malzemenin gerilme-birim uzama ilişkisi

Bu sonuçlara göre, 6.1 MPa üstü gerilmeler için numunenin sürünme birim uzaması artışı sadece zaman değil, bunun yanında gerilme değerine göre de değiştiğinden, YYPE malzemenin davranışı lineer bölgeden nonlinear bölgeye geçmektedir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da yaklaşık 6.1 MPa'dan sonra eğriler arasındaki mesafe açılmaktadır.

Polimerik malzemenin belirli bir süre zarfında rijitliğin göstergesi olan sürünme modülünün nasıl değiştiğini bilmek mühendislik uygulamalarında oldukça önemli bir unsurdur. Sürünme eğrisinin herhangi bir noktasındaki gerilme-birim uzama oranı malzemenin sürünme modülünü verir. Şekil 4.20'de elastik kısım yok sayılarak, sürünme sırasındaki sürünme modülü-logaritmik zaman ilişkisi gösterilmiştir. 2 MPa gerilme altında sürünme modülündeki düşüş çok küçükken, uygulanan gerilme seviyesinin artmasıyla sürünme modülü aynı zamanda daha fazla düşmektedir.

2 MPa gerilme altında sürünme modülü %10.74 düşerek 925 MPa'dan 826 MPa'a, 3.4 MPa gerilme altında sürünme modülü %28.45 düşerek 893 MPa'dan 639 MPa'a, 5.6 MPa gerilme altında sürünme modülü %32.10 düşerek 563 MPa'dan 382 MPa'a, 6.1 MPa gerilme altında sürünme modülü %32.43 düşerek 538 MPa'dan 363 MPa'a, 6.8 MPa gerilme altında sürünme modülü %44.38 düşerek 503 MPa'dan 279 MPa'a, 8 MPa gerilme altında sürünme modülü %41.09 düşerek 403 MPa'dan 237 MPa'a, 9.3 MPa gerilme altında sürünme modülü %53.61 düşerek 407 MPa'dan 188 MPa'a düşmüştür.



Şekil 4.20 : Sürünme modülü-log zaman ilişkisi

4.4 Eğme Sürünmesi Deney Tesisatı ve Deneyin Yapılışı

Eğme sürünmesi testleri DİZAYN Grup Teknoloji Ar-Ge Ltd.Şti bünyesinde bulunan çekme-basma deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21’de kullanılan sürünme cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.21 : Eğme sürünmesi test cihazı

Yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden elde edilen, eğme sürünmesi numunelerinin farklı yükler altındaki zaman bağılı deformasyon davranışlarının tespiti için plastik malzemelerin üç nokta eğme sürünmesi özelliklerini belirlenmesinde kullanılan ISO 899-2 standardı kullanılmıştır. ISO 178 standardına göre uygun boyutlarda hazırlanan numunelerde, uygulanan eğme gerilmesi sonucu oluşan eğme sürünmesi birim uzaması ve eğme sürünmesi modülü sırasıyla denklem (4.4), (4.5) ve (4.6)'a göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{3.F.L}{2.b.h^2} \quad (4.4)$$

Burada, F uygulanması gereken yük, L destekler arası uzaklık, b numune genişliği, h numune kalınlığı ve σ uygulanmak istenen gerilmedir.

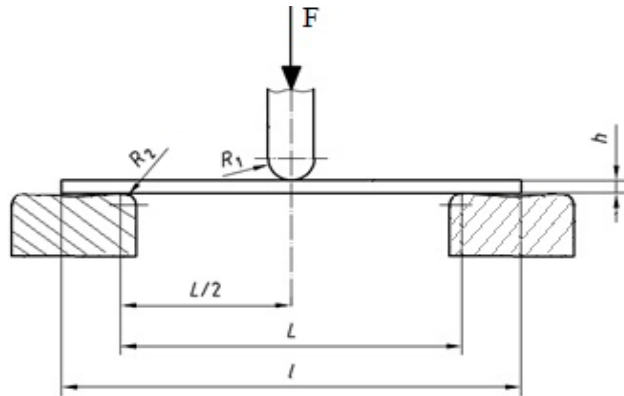
$$\varepsilon_t = \frac{6.s_t.h}{L^2} \quad (4.5)$$

Burada, s_t uygulanan yük sonucu oluşan çökme, ε_t ise oluşan eğme birim uzamasıdır.

$$E_t = \frac{L^3.F}{4.b.h^3.s_t} \quad (4.6)$$

Burada, E_t eğme sürünmesi modülüdür.

Cihazın yükleme hücresi 5 kN olarak seçilmiştir. Deney numunesi Şekil 4.22'de gösterildiği gibi iki destek arasına yerleştirilmiştir. Destekler arasındaki mesafe (L) $(16 \pm 1).h$ denklemine yaklaşık 50 mm hesaplanmıştır. ISO 899-2'ye göre kalınlığı 3 mm'den fazla olan numuneler için $R_1 = 5 \mp 0,1$ ve $R_2 = 5 \mp 0,2$ dir. Şekil 4.23'de eğme sürünmesi düzeneği gösterilmiştir.



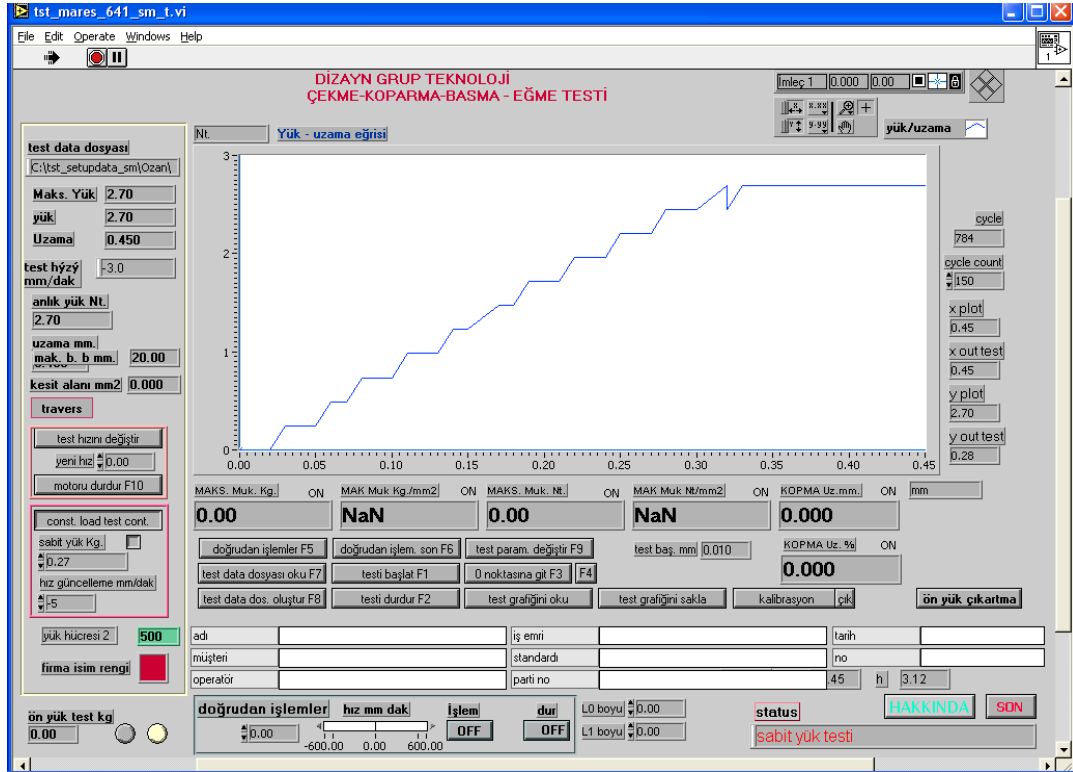
Şekil 4.22 : Eğme sürünmesi testi şeması



Şekil 4.23 : Eğme sürünmesi testi düzeneği

Numunenin kalınlığı ve genişliği üç farklı noktadan ölçülüp, bunların ortalaması alınmıştır. Bar tipi numunelerin ölçüleriyle birlikte, uygulanmak istenen gerilmeyi oluşturacak yük değerleri, bilgisayarda bulunan sistem ile entegre programa girilmekte ve yük-çökme göstergesi sıfırlandıktan sonra test başlatılmaktadır. Cihaz ilk etapta malzemenin yaklaşık 5 sn de tam yüke ulaşması için gerekli hıza ayarlanmıştır. Tam yüke ulaştıktan sonra bu hız oldukça düşürülerek uygulanan yükün olabildiğince sabit kalması sağlanmaktadır. Her eğme gerilmesi için 3 tekrar yapılmıştır.

Eğme testi sırasında ortamın sıcaklığı yaklaşık $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ölçülmüştür. Şekil 4.24'de eğme sürünmesi deneylerinde kullanılan programın ara yüzü gösterilmiştir.



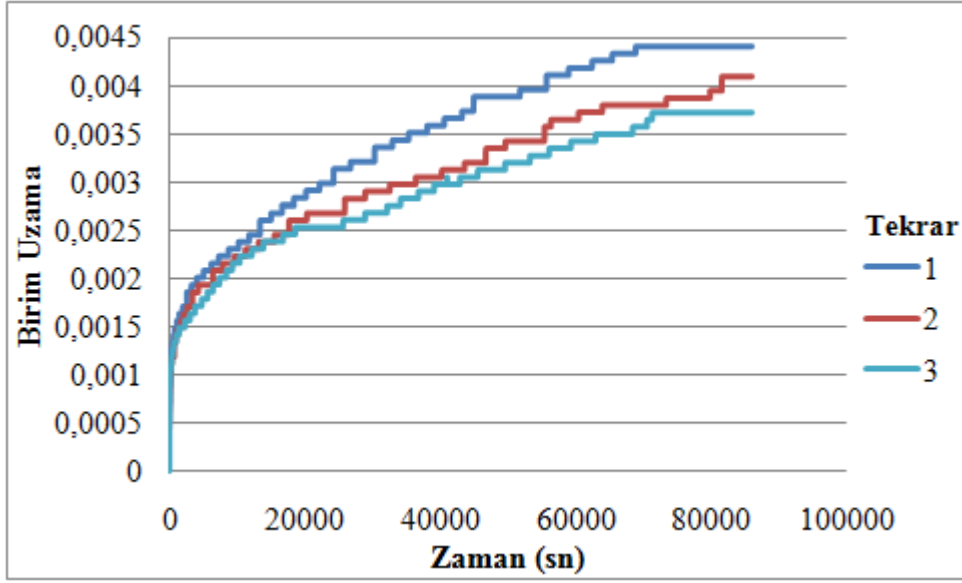
Şekil 4.24 : Eğme sürünmesi testlerinde kullanılan program ara yüzü

4.5 Deneysel Sonuçlar

Eğme sürünmesi testleri için PE100 malzeme, yaklaşık 24 saat boyunca farklı gerilmeler altında teste tabi tutulmuştur.

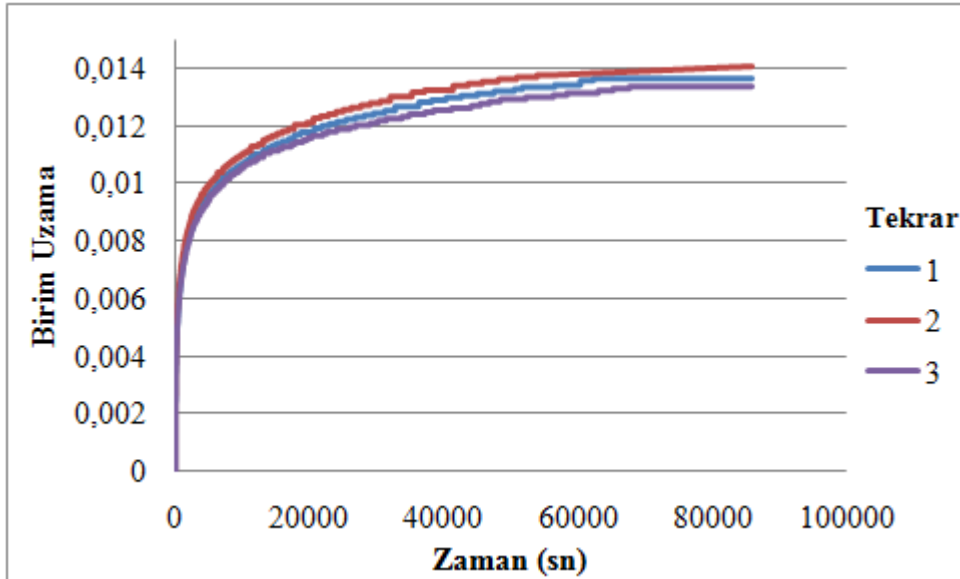
Eğme sürünmesi deneyleri için çekme sürünmesi deneylerinde uygulanan 2 MPa, 5.6 MPa ve 8 MPa'lık 3 farklı eğme gerilme değeri seçilmiştir. Bu değerlere göre numunelere uygulanan yük değerleri sırasıyla 0.275 kg, 0.925 kg ve 1.3 kg dir.

Şekil 4.25'de 2 MPa gerilme altında oluşan eğme birim uzaması-zaman grafiği verilmiştir. Numune tam yüke ulaştıktan sonra 24 sonunda meydana gelen çökme sırasıyla 0.59 mm, 0.55 mm ve 0.50 mm ve oluşan eğme birim uzaması sırasıyla 0.0044, 0.0041 ve 0.0037'dir.



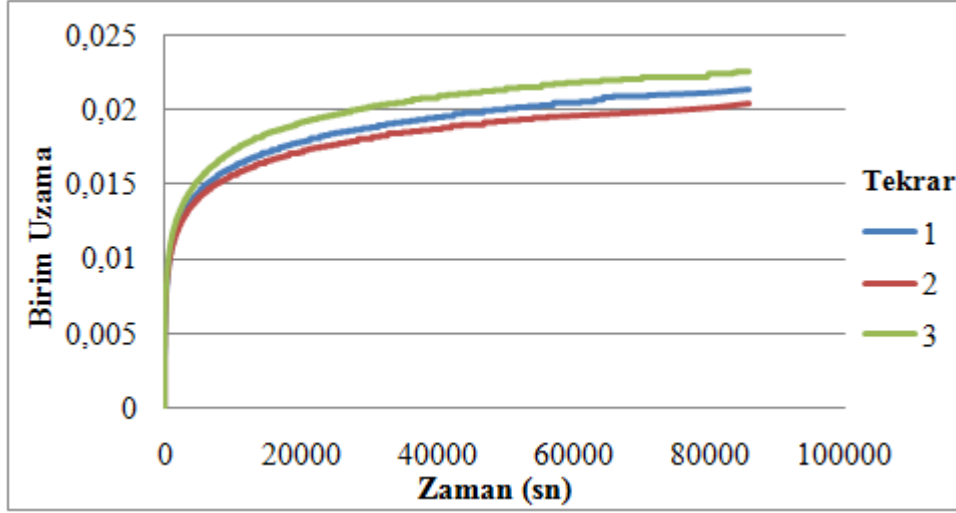
Şekil 4.25 : 2 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi

Şekil 4.26'da 5.6 MPa gerilme altında oluşan eğme birim uzaması-zaman grafiği verilmiştir. Numune tam yüke ulaştıktan sonra 24 sonunda meydana gelen çökme sırasıyla 1.82 mm, 1.87 mm ve 1.79 mm ve oluşan eğme birim uzaması sırasıyla 0.0136, 0.0140 ve 0.0133'dir.



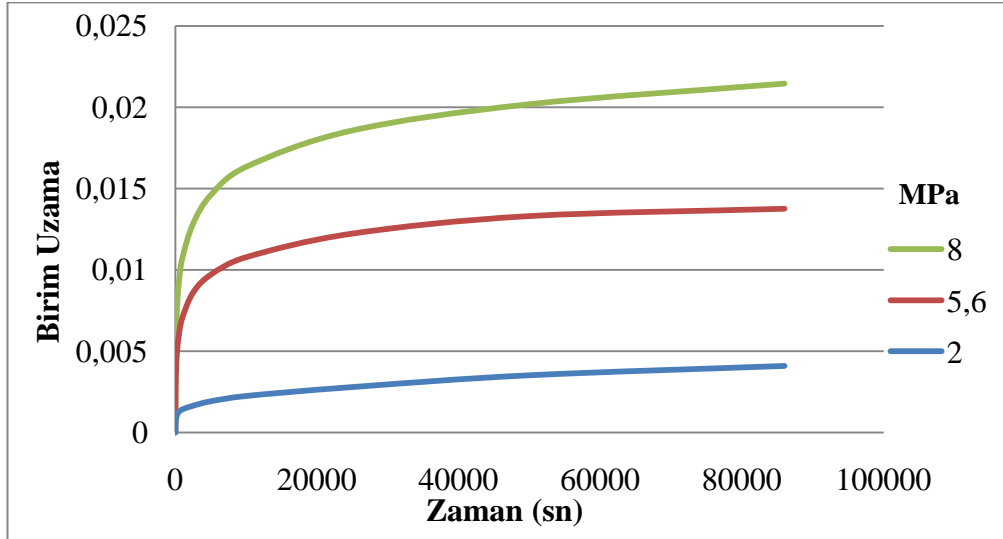
Şekil 4.26 : 5.6 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi

Şekil 4.27'de 8 MPa gerilme altında oluşan eğme birim uzaması-zaman grafiği verilmiştir. Numune tam yüke ulaştıktan sonra 24 sonunda meydana gelen çökme sırasıyla 2.86 mm, 2.74 mm ve 3.04 mm ve oluşan eğme birim uzaması sırasıyla 0.0213, 0.0203 ve 0.0226'dir.



Şekil 4.27 : 8 MPa eğme gerilmesi altında oluşan birim uzama-zaman ilişkisi

Şekil 4.28'de uygulanan 2 MPa, 5,6 MPa ve 8 MPa eğme gerilmesi altında oluşan eğme sürünmesi birim uzaması lineer zaman ilişkisi verilmiştir. Yaklaşık 24 saat sonunda meydana gelen toplam çökme miktarı sırasıyla 0.54 mm, 1.83 mm ve 2.88 mm'dir. Son birim uzama değerleri sırasıyla 0.0040, 0.0135 ve 0.0214'dir. Uygulanan eğilme gerilmesi seviyesi arttıkça meydana gelen çökmede artmıştır. Çökmenin çoğu ilk 1000 sn'de meydana gelmiş, daha sonrasında yavaşlayarak artmaya devam etmiştir.



Şekil 4.28 : Ortalama eğme sürünmesi birim uzama-lineer zaman ilişkisi

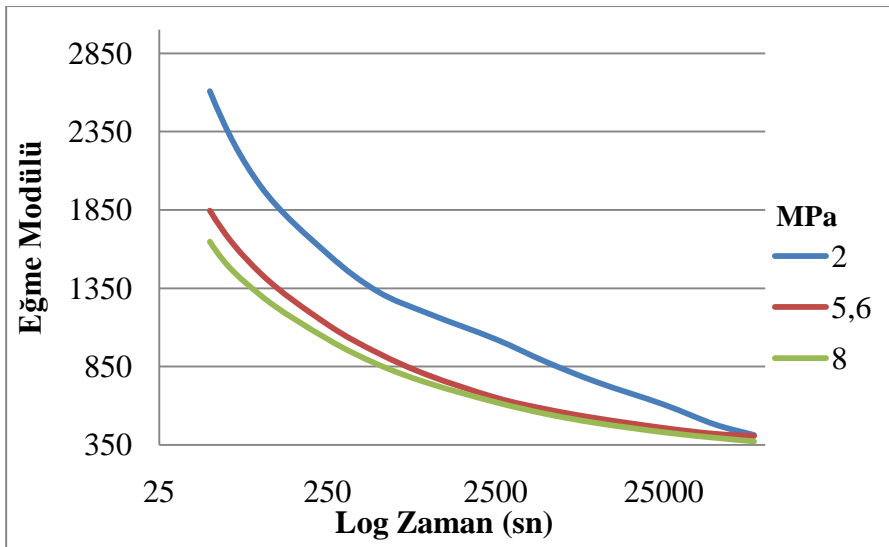
Şekil 4.29'da 1000. sn, 10000. sn ve 86000. sn olmak üzere üç farklı zamandan elde edilen değerler ile izokronos grafiği oluşturulmuştur. Malzemenin bu gerilme

seviyesine kadar olan davranışı lineer viskoelastik karakterdedir. Oluşan maksimum yüzde uzama yaklaşık %2 civarındadır.



Şekil 4.29 : Eğme gerilmesi-Eğme birim uzaması ilişkisi

Şekil 4.30'da çökme miktarıyla değişen eğilme modülünün logaritmik zamana göre değişimi gösterilmiştir. Malzemenin modülü, çökmenin değerinin hızlı bir şekilde arttığı zaman aralığında hızlıca düşmüş ve 24 saatlik deney sonuna doğru eğilme modülleri birbirine yakın değerlere doğru düşmeye devam etmiştir. Deney sonunda eğme gerilmesi altında malzemenin modülü 2 MPa'da 414 MPa'a, 5,6 MPa'da 408 MPa'a ve 8 MPa'da 372 MPa'a düşmektedir. Boruların halka rijitliğinin tespiti için yapılan bu ön çalışmada PE100 malzemenin 2 MPa 'lık eğme gerilmesi altında elde edilen eğme modülü değeri istenen seviyededir.



Şekil 4.30 : Eğme sürünmesi modülü-logaritmik zaman ilişkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sürünme deneyleri malzemenin yük taşıma kabiliyetinin belirlenmesi için önemli bir deney türüdür. Bu çalışmada, PE100 malzemenin viskoelastik davranışlarını tanımlamak üzere iki farklı sürünme deneyi yapılmıştır.

Deneylelerden ilki, YYPE malzemenin lineer, non-lineer bölgesini belirlemek için yapılan çekme sürünmesi deneyleridir. Kaşık tipi numune sabit yük altında 24 saat boyunca çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Uygulanan gerilmeler 2 MPa ile 9.3 MPa arasında değişen 7 farklı değerdedir. Deformasyonun çoğu ilk 1000 sn'de meydana gelmiş daha sonrasında ya çok az ya da hiç değişim gözlenmemiştir. Birincil ve ikincil sürünme bölgesi gözlemlenmiş ancak üçüncül sürünme bölgesine geçiş gözlemlenmemiştir. Meydana gelen maksimum yüzde uzama en büyük gerilme seviyesinde test sonunda %5 civarındadır. Elastik uzamanın tamamlanma süresinin, çok küçük gerilme seviyelerinde daha büyük gerilme seviyelerine göre daha az süre aldığı görülmüştür. Buna göre, 6.1 MPa üzeri gerilme seviyelerinde, sürünme birim uzamasındaki artış miktarı daha küçük gerilme seviyelerine göre daha fazladır. Farklı zamanlar için sürünme deneylerinden elde edilen gerilme-birim uzama eğrileri 6.1 MPa'dan sonra birbirinden ayrılmaktadır. Sürünme modülündeki en büyük düşüş, en büyük gerilmenin uygulandığı seviyede gerçekleşmektedir.

Deneylelerden ikincisi ise eğme sürünmesi deneyidir. Bu deney, plastik boruların halka rijitliğinin belirlenmesi için gerekli olan malzemenin eğme sürünmesi modülünü bulmaya yönelik bir ön çalışmadır. Malzemenin modülü, üç nokta eğme testiyle sabit yük altında 24 saat sonunda numune üzerinde oluşan toplam çökme değerinden elde edilmiştir. Uygulanan eğilme gerilmesi seviyesi arttıkça meydana gelen çökmede artmıştır. Çökmenin çoğu ilk 1000 sn'de meydana gelmiş, daha sonrasında yavaşlayarak artmaya devam etmiştir. Oluşan maksimum yüzde birim uzama yaklaşık %2 civarındadır. Malzemenin 8MPa gerilme seviyesine kadar olan davranışı lineer viskoelastik karakterdedir. Malzemenin modülü, çökmenin değerinin hızlı bir şekilde arttığı zaman aralığında hızlıca düşmüş ve 24 saatlik deney sonuna doğru eğilme modülleri birbirine yakın değerlere doğru düşmeye devam etmiştir.

Boruların halka rijitliğinin tespiti için yapılan bu ön çalışmada PE100 malzemenin 2 MPa'lık eğme gerilmesi altında elde edilen eğme modülü değeri istenen seviyededir.

Alt yapı sistemlerinde akışkanların taşınması için kullanılan plastik malzemelerin, toprak altına gömüldüğünde yük taşıma kabiliyetini iyi anlamak gereklidir. Bu çalışmada da yer altında kullanılan PE100 hammaddesinin 24 saatlik çekme sürünmesi davranışı incelenmiştir. Uzun vadeli davranışın belirlenmesi için 24 saat oldukça kısadır. Sürünme deneyleri akma sınırında içine alacak şekilde, daha sık gerilme seviyelerinde daha uzun süreli gerçekleştirilebilir. Malzemenin karakteristiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için sürünme deneyleri sonrası toparlanma deneylerini de gerçekleştirilebilir ve kalıcı deformasyonun durumu incelenebilir. Malzemenin hangi yük durumunda ne kadar süre içinde fonksiyonunu kaybedeceğini ve hasara uğrayacağını belirlemek için sürünme kopması sınırı belirlenebilir.

Hammaddenin karakteristiği dışında ekstrüde boru üzerinden alınan numunelerle bu testlerin tekrar edilebilir. Böylece imalat yöntemlerinin malzemenin karakteristiğine etkisi gözlemlenebilir. Boru üzerinden alınan numunelerin farklı eksenlerde olması da proses etkisinin anlaşılmasını sağlayabilir.

YYPE geniş bir kullanım sıcaklığına sahiptir. Bu çalışmada, numuneler oda sıcaklığında test edilmiştir. Daha yüksek ve daha alçak sıcaklıklarda numunelerin davranışı değişebileceğinden, sıcaklığın mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.

PE100 malzemenin mekanik davranışı üzerinde, malzemenin iç yapısının büyük etkisi vardır. Daha farklı kristallik oranlarına sahip PE100 numunelerin çeşitli deneylerinin gerçekleştirilmesi malzemenin tanınması açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <http://www.faberrobu.com/tr/pdf/PE100_hakkinda_teknik_bilgi.pdf>, alındığı tarih 5.12.10
- [2] **Url-2** <http://www.pilsa.com.tr/pdf/pe100bolum1_2005.pdf>, alındığı tarih 5.12.10
- [3] **Url-3** <<http://www.dizayngrup.com/kataloglar/ingilizce/corrugates-pipes-and-fittings-or-sewage-discharge.pdf>>, alındığı tarih 5.12.10
- [4] **Url-4** <<http://carbon-black.org/carbonblackuserguide.pdf>>, alındığı tarih 5.12.10
- [5] **Lai, J. and Bakker, A.**, 1994. Analysis Of The Non-Linear Creep Of High-Density Polyethylene, *Polymer*, **36**, 93-99.
- [6] **Zhang, C. and Moore, I. D.**, 1997. Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene. Part I: Experimental Investigation and Model Evaluation, *Polymer Engineering And Science*, **37**,no.2, 404-413.
- [7] **Spoormaker, J. L. and Beijer, J. G. J.**, 2000. Modelling Of Creep Behaviour In Injection- Moulded HDPE, *Polymer*, **41**, 5443-5449.
- [8] **Semih, S.**, 2004, Analysis Of Creep Behavior Of Polyethylene Material Used In Plastic Pipe Manufacturing, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, **3**, 73-83.
- [9] **Elleuch, R. and Taktak, W.**, 2006. Viscoelastic Behavior of HDPE Polymer using Tensile and Compressive Loading, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **15**, 111-116.
- [10] **Liu, H.**, 2007. Material Modelling for Structural Analysis of Polyethylene, University of Waterloo, Canada
- [11] **Düşünceli, N. ve Çolak, Ö.**, 2007. Polimerik Malzemelerin Viskoelastik-Viskoplastik Davranışlarının Belirlenmesi Ve Modellenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [12] **Nitta, K and Maeda, H.**, 2010. Creep Behavior Of High Density Polyethylene Under A Constant True Stress, *Polymer Testing*, **29**, 60-65.
- [13] **Chevali, V. S., Dean, D. R. and Janowski, G. M.**, 2009. Flexural Creep Behavior Of Discontinuous Thermoplastic Composites: Non-Linear Viscoelastic Modeling And Time–Temperature–Stress Superposition, *Composites, Part A* **40**, 870-877.
- [14] **Erturan, S. ve Deniz, S.**, 2009. Polimer mühendisliği esasları ders notları, YTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul
- [15] **Palabıyık, M.**, 2009. Polimer kompozit malzemeler ile konstrüksiyon ve imalat, İTÜ. Makine Fakültesi, İstanbul

- [16] **Callister, W. D.**, 2007. Materials science and engineering: An introduction, Department of Metallurgical Engineering, The University of Utah
- [17] **Peacock, A. J.**, 2000. Handbook of polyethylene structures, properties, and applications, Exxon Chemical Company, Baytown Texas
- [18] **Zhang, C.**, 1996. Non-Linear mechanical response of high density polyethylene in gravity flow pipes, The University of Western Ontario, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Science, London-Ontario
- [19] **Cheng, J. J.**, 2008. Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene: Effects of Microstructure on Creep Characteristics, The University of Waterloo, Chemical Engineering, Canada
- [20] **Handbook of Polyethylene Pipe**, 2007. *Plastic Pipe Institute*, First Edition
- [21] **Bartczak, Z.**, 2005. Effect of chain entanglements on plastic deformation behaviour of linear polyethylene, *Macromolecules*, **38**, 7701-7713
- [22] **Chanda, M. And Roy, S.K.**, 2009. Plastic Fundamentals, Properties, and Pesting, Plastic Engineering Series
- [23] **Ebewele, R. O.**, 2000. Polymer Science and Technology, Department of Chemical Engineering, University of Benin, Benin City, Nigeria
- [24] **Bicerano, J.**, 2002. Prediction Of Polymer Properties, Third Edition, The Dow Chemical Company, Michigan, U.S. A.
- [25] **Nielsen, L.E. and Landel, R. F.**, 1994. Mechanical Properties of Polymers and Composites, Second edition
- [26] **Brown, R.**, 2002. Handbook of polymer testing: Short term mechanical test, Rapra Polymer Testing Series
- [27] **van der Vegt, A.K.**, 2002. From polymers to plastics, Netherland
- [28] **Ward, I.M. and Sweeney, J.**, 2004. An Introduction to The Mechanical Properties of Solid Polymers, Second edition
- [29] **Cheng, J.J., Alvarado-Contreras, J.A., Polak, M.A. and Penlidis, A.**, 2010. Chain entanglements and mechanical behaviour of high density polyethylene, *Journal of Engineering Materials and Technolog*, january, vol 132,
- [30] **Martinez- Guerrero, J.N.**, 1999. Flexural creep analysis of recycled polymeric structural elements, Louisiana State university, The Department of Civil and Environmental Engineering, Mexico, december
- [31] **Brinson, H.F. and Brinson, L.C.**, 2008. Polymer Engineering Science and Viscoelasticity: An Introduction, *Springer*
- [32] **McKeen, L.**, 2009. The effect of creep and the other time related factors on plastics and elastomers, *PDL handbook series*, Second Edition,
- [33] **ISO 899-1**, 2003. Plastics-Determination of creep behaviour, Part 1 Tensile creep, *International Organization for Standardization*
- [34] **ISO 899-2**, 2003. Plastics-Determination of creep behaviour, Part 2 Flexural creep by three point loading, *International Organization for Standardization*

- [35] **BS EN ISO 527-2**, 1996. Plastics-Determination of tensile properties, Part 2
Test conditions for moulding and extrusion plastics, *British Standard*
- [36] **DIN EN ISO 178**, 2006. Plastics-Determination of flexural properties,
Deutsche Norm

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Ozan ÇELİKKAN
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul / 1984
Adres : Ortaköy / İstanbul
Lisans Üniversite : Kocaeli Üniversitesi / Makine Mühendisliği