

İMALAT YÖNTEMLERİNİN YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN'İN (YYPE) TEK EKSENLİ ÇEKME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Necmi DÜŞÜNCELİ ve Özgen Ü. ÇOLAK

Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü,
Yıldız, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Yarıkristal polimerlerden biri olan yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), başta yeraltı tesisat borularının ağırlıklı hammaddesi olmak ve özellikle hijyenik şartlar gerektiren durumlar için sanayinin birçok sahasında yaygın olarak kullanılmaktadır. YYPE'nin mekanik davranışının belirlenmesi üzerine çok sayıda analitik ve deneysel çalışma olmasına rağmen bunlardan çok azı üretim yöntemlerinin etkisini araştırmıştır. İmalat yöntemleri nihai ürün üzerinde çarpıcı etkiler doğurur. Farklı imalat yöntemleri farklı farklı iç yapı ve morfolojiler oluşmasına neden olur. Bu etkilerden dolayı değişik gerinim hızı seviyelerindeki deformasyon davranışlarının belirlenmesi, pratik uygulamalara yönelik önemli dizayn parametrelerinin belirlenmesini sağlar. Bu çalışmada, YYPE'nin mekanik davranışı üzerinde imalat yöntemlerinin etkileri araştırılmıştır. Ekstrüde borudan ve basınçta kalıplanmış levhadan elde edilen YYPE numuneleri monotonik yükleme şartlarında farklı şekil değiştirme hızlarında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları, YYPE'nin mekanik davranışının imalat yöntemlerine ve gerinim hızına bağımlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca YYPE'nin mekanik davranışının viskoelastik ve viskoplastik olduğu tesbit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek yoğunluklu polietilen, üretim yöntemleri, hız bağımlılığı, viskoelastisite, viskoplastisite

THE EFFECT OF MANUFACTURING METHODS ON UNIAXIAL TENSILE BEHAVIOR OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE)

ABSTRACT

High density polyethylene (HDPE) which is one of the semicrystalline polymers has been extensively used as a raw material in pipe manufacturing. Even though there are large numbers of experimental and analytical investigations on HDPE, a few of them has examined the effects of manufacturing techniques on the deformation behaviors of HDPE. Manufacturing method affects the property of end products. Different manufacturing methods result in different molecular morphologies and molecular structure at final product. In this study, the mechanical behaviors of HDPE associated with manufacture methods are investigated. The specimens are obtained from extruded HDPE pipe and compression molded sheets and are tested uniaxially at two different strain rates. These test results indicate that

mechanical behavior of HDPE depends on manufacturing method and strain rate. Moreover, it's found that the mechanical behavior of HDPE is viscoelastic and viscoplastic.

Keywords: High density polyethylene, manufacturing methods, strain rate depending, viscoelasticity, viscoplasticity.

1. GİRİŞ

Polietilen ilk olarak 1930'lu yıllarda sentez edildi. Daha sonra çeşitli proses metodları ve kristal sistemleri kullanılarak değişik uygulamalara yönelik polietilen türleri geliştirilmiştir. PE' nin ilk uygulamaları askeri amaçlı olmuştur. Yeraltı borularının kaplanması ve radar yalıtımı gibi bir çok sahada askeri amaçlı kullanımı II. Dünya savaşında önemli bir avantaj sağlamıştır. PE'nin en yaygın sınıflandırma biçimi yoğunluğa göre yapılanıdır. Yoğunluğuna göre dört ana grupta toplanır [1].

- I. 0.91-0.9250 g/cm³ Düşük Yoğunluklu Polietilen (AYPE)
- II. 0.926-0.940 g/cm³ Orta Yoğunluklu Polietilen (OYPE)
- III. 0.941-0.959 g/cm³ Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE)
- IV. 0.96 ve üzeri g/cm³ Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (ÇYMAPE)

YYPE yüksek kristalleşmeye sahip termoplastiktir. -80 °C ile 80 °C arası sıcaklıklarda kullanılabilir. YYPE'nin mikroyapısında amorf ve kristal olmak üzere iki faz bulunur. Bu her iki faz malzemenin makroskobik cevabını belirlemede önemli rol oynar. Oda sıcaklığında kauçuk gibi olan amorf faz, herhangi bir ayrılma olmaksızın kristal fazın belli miktarlarda hareket etmesine ve değişmesine müsaade eder. Bu deformasyon biçimi plastik olarak isimlendirilir, büyük miktarda toparlanabilir olan bu davranış moleküler zincirde herhangi bir kopma meydana gelmeden oluşur. Bu özellik yarıkristal polimerlerin yüksek tokluğa sahip olmasını sağlar [2].

YYPE'nin yavaş soğutulması durumundaki kristalleşme oranı hızlı soğutulmasına göre daha yüksektir. Bu nedenle soğutma süreci malzemenin başlangıçtaki özelliklerinde önemli değişikliklere neden olur. Ekstrüzyon ya da enjeksiyon kalıplama sürecinde polimer eriyiğinin akışı değişik yönlenmelere ve bunun sonucunda anizotropik yapının oluşmasına neden olur. Bu durum mekanik özelliklerde büyük farklılıklar ortaya çıkarır. Moleküler oryantasyon; katılığın, mukavemetin, tokluğun ve çatlak direncinin artışına neden olur.

Yarıkristal polimerlerin mikroyapısı oldukça karmaşıktır. YYPE'nin fiziksel özellikleri birbiriyle ilişkili üç temel değişkene bağlıdır; yoğunluk, moleküler ağırlık ve moleküler ağırlık dağılımı. Çekme mukavemeti, rijitlik, yumuşama sıcaklığı ve kimyasal direnç yoğunlukla artar. Düşük sıcaklıktaki darbe mukavemeti, uzama, geçirgenlik ve çatlak direnci yoğunluğun artmasıyla azalır. Bir çok ticari YYPE granül 50000 ile 250000 (g/mol) moleküler ağırlığı arasında değişmektedir. Moleküler ağırlığı arttırarak çekme mukavemeti (akma ve kopma), uzama, tokluk, gerilme çatlak direnci, sünme direnci, kimyasal direnci, geçirimsizliği iyileştirilir. YYPE 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 [3].

Yarıkristal polimerlerin özellikleri, sadece kimyasal özelliklerine değil maruz kaldığı ısı işlemlere göre morfolojik ve kristalleşme yapısına bağlı olarak da değişir. Bu nedenle üretim prosesi şartları nihai ürün özellikleri üzerinde son derece etkilidir [4].

Yarıkristal polimerlerin mekanik özellikleri kristaller arasındaki moleküler bağlar aracılığı ile sağlanır. Zincir düzenlemeleri ve bağ molekülleri mekanik özellikler üzerinde etkili iki temel etkindir. Eğer moleküler bağlar kovalent bağlardan oluşmuyorsa kristaller zayıf van der Waals veya hidrojen bağlarıyla birarada tutulur. Zayıf van der Waals bağları kolay bir şekilde kaymalara ve ayrışmalara müsaade eder [5].

Yarıkristal polimerlerin büyük deformasyon çekmeleri (drawing), amorf faz içerisinde kristal fazın çekme yönünde oryantasyonuna neden olmaktadır, moleküler yapının yeniden düzenlenmesini, diğer bir ifade ile pekleşmeyi (deformasyon sertleşmesini, strain hardening) doğurmaktadır. Diğer taraftan küçük gerinim seviyelerinde (akma noktası altında) polimer morfolojisinde belirgin bir değişme gözlenmemektedir [5].

Yarıkristal polimerlerdeki elastik deformasyon mekanizması zincir moleküllerinin kararlı düzendeki halinden uzamaya zorlanmasıyla ilgilidir. Uygulanan gerilmeye malzemenin göstermiş olduğu tepki, zincirlerdeki güçlü kovalent bağların uzama ve bükülmesiyle meydana gelir ayrıca komşu moleküller arasında çok zayıf ikincil dirençler veya van der Waals bağlarının da etkileri vardır. Elastik davranış üzerindeki en önemli etki şüphesiz ki elastiklik modülüdür. Yarıkristal polimerler iki farklı fazdan meydana geldiğinden dolayı elastiklik modülü kompozit malzeme gibi düşünülerek, iki fazın çeşitli kombinasyonda bileşiminden hesaplanabilir [6].

Yarıkristal polimerlerin viskoplastik deformasyon mekanizması lameller ve komşu iki lamel arasındaki amorf fazın uygulanan gerilmeye gösterdiği cevaptan meydana gelir. Viskoplastik şekil değiştirme iç içe geçmiş bir çok mekanizmadan meydana gelir. Deformasyonun başlangıç aşamasında amorf fazdaki zincirlerin her biri yüklemeye yönünde kayar. Bu durum lameller ve lameler şeridinin birbirine ters yönde kaymasına, bağ (tie) zincirlerinin amorf faz içerisinde uzamasına neden olur. Deformasyonun ikinci aşamasında lamellerin eğilmesi meydana gelir bu yüzden zincir katlanması (chain-folded) lamelleri çekme yönünde düzenlenir. Son aşamada bloklar ve bağ zincirleri çekme yönünde yeniden düzenlenirler. Bu nedenle belirli miktardaki çekme deformasyonuna maruz kalan yarıkristal polimerler yüksek oryantasyona sahip yapıya dönüşürler [6].

Yukarıda da genel hatları ile anlatıldığı gibi polimerik malzeme mukavemeti üzerinde başta hammadde özellikleri olmak üzere imalat yöntemleri ve üretim prosesi şartları son derece etkili olmaktadır. Polimerik malzeme ile mamül madde üretim yöntemleri genel olarak ekstrüde ve kalıplama şeklinde gerçekleştirilir. Üretim yönteminin seçiminde mamül maddenin boyutları, hammaddenin özellikleri, ekonomiklik ve işleme kolaylıkları gibi faktörler etkili olur. Polimerik malzemeler üretim yöntemi ve proses şartlarından dolayı farklı türde yapılara sahip olabilir, sonuçta nihai ürün aynı hammaddeden üretilmiş olsa proses şartlarından dolayı farklı mekanik özelliklere sahip olabilir. Bu çalışmada, üretim yönteminin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretim yöntemlerinin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini gözlemlemek üzere aynı türdeki YYPE granül malzemedeki ekstrüde boru ve basınçlı kalıplama levhadan numuneler elde edilmiştir. Her iki tür YYPE numune iki farklı gerinim hızında tek eksenli çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Bu deneyler ile YYPE'nin imalat yöntemine bağlı deformasyon davranışı-gerinim hızı, deformasyon davranışı-yüklemeye gerinim seviyesi ilişkisi ve kopma davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca malzemenin mukavemet değerleri belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

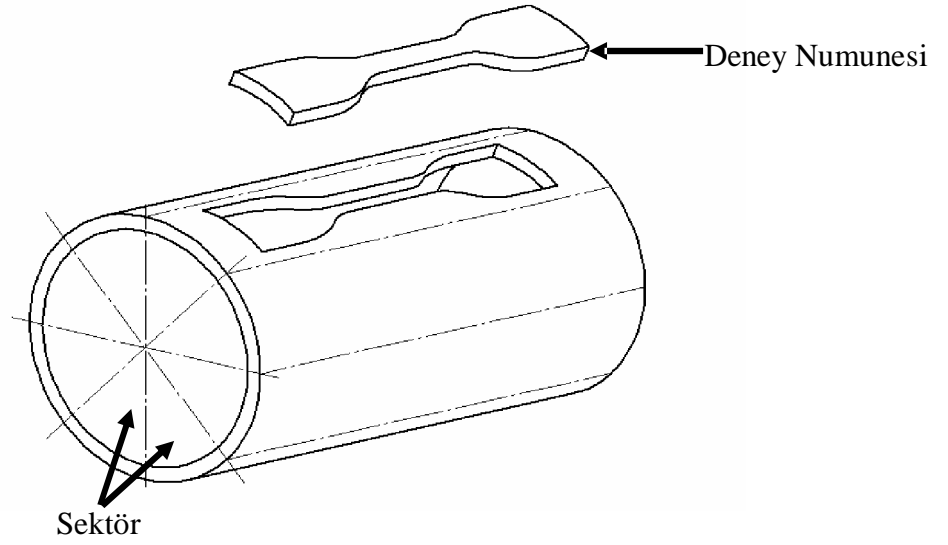
2.1 Deney Prosedürü

Çekme deneyi numuneleri, Fırat Kauçuk ve Plastik A.Ş. tarafından üretilen ekstrüde PE100 (YYPE) 160 mm çapındaki borudan 150 mm boyunda parçalar alarak ve daha sonra bu parçalardan kalıpta keserek çıkarmak suretiyle oluşturulmuştur. Numuneler borudan çıkarılma işleminden en az 15 saat sonrasında deneye tabi tutulmuştur. Her yükleme koşulunda en az beş adet deney yapılarak, sonuçların ortalaması alınmıştır. Çekme deneyi numunelerinin oluşturulmasında polimerik boruların kısa süreli çekme deformasyonunu özelliklerini belirlemek üzere yayımlanan ISO 6259-1 ve termoplastik borulardan polielefin boru için ISO 6259-3 standartları temel alınmıştır [11, 12]. Deneylerde bu standartlara göre gerçekleştirilmiştir.

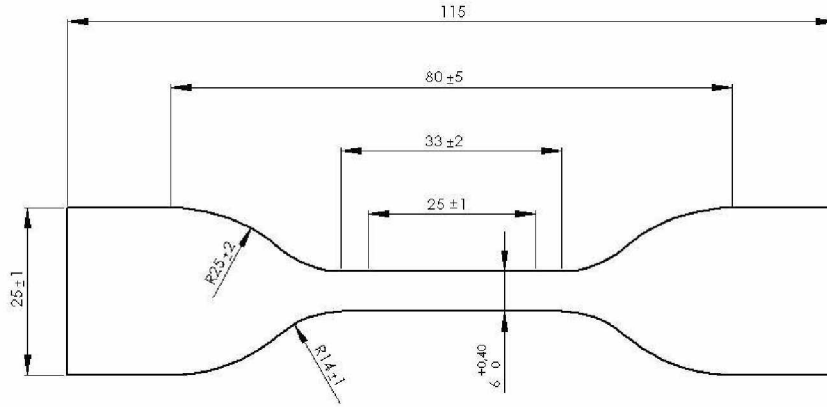
ISO 6259 standartları temel olarak polimerik malzemelerin çekme özelliklerini belirlemek üzere ortaya konan ISO 527 standartlarını içerir ve borular için uyarlama şeklindedir [13, 14]. Mamül borudan çekme numunesi çıkarılması, 63 mm den büyük dış çapa sahip borunun 150 mm'lik bir kısmı kullanılarak yapılır. 150 mm boyundaki bu kısımdan numunelerin çıkarılması için boru çevresi boyunca eşit mesafede sektör (borunun bölünerek levha haline getirilmesi) kesilerek oluşturulmuştur. Numuneler boru et kalınlığı 12 mm den küçük veya eşitse kalıpta kesilerek çıkarılacağı gibi frezede işlenerek çıkarılabilir fakat 12 mm den büyük et kalınlıklarında sadece frezede işlenerek çıkarılabilir. Numuneler boru et kalınlığı 5 mm olduğundan dolayı ISO 6259-3 standardında belirtilen ve Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilen tip 2'ye uygun olarak kalıpta kesilmek suretiyle çıkarılmıştır. Numune çıkarılırken, kalıp boru iç yüzeyine konularak üzerine basınç uygulanmıştır.

İkinci tür numuneler ise basınçta kalıplama yöntemi ile elde edilmiştir. PETKİM Petrokimya Holding bünyesinde bulunan basınçlı kalıplama cihazında 2 mm kalınlığında YYPE levhalar üretilmiş daha sonra ISO 527 şartlarına göre bu levhalardan kalıpta kesme suretiyle numuneler elde edilmiştir. Ekstrüde boru numuneler ile basınçlı kalıplanmış numuneleri aynı boyutlardadır (Şekil 2).

Hammadde olarak erime akış indeksi (MFI): 0.32 g/10 min, yoğunluğu: 0.954 g/cm³ ve Total XS10B ticari isimli granül malzeme kullanılmıştır. Deneyler Zwick Z010 marka çekme deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın yükleme hücresi kapasitesi 10 kN'dur. Ölçmeler cihaz üzerinde bulunan elektronik ekstansometre ile gerçekleştirilmektedir. Cihaz üzerinde gerçekleştirilen deneyler "TestXpert" isimli bilgisayar programı ile değerlendirilmiş ayrıca yapılan deneylerin ortalaması da aynı program ile hesaplanmıştır.



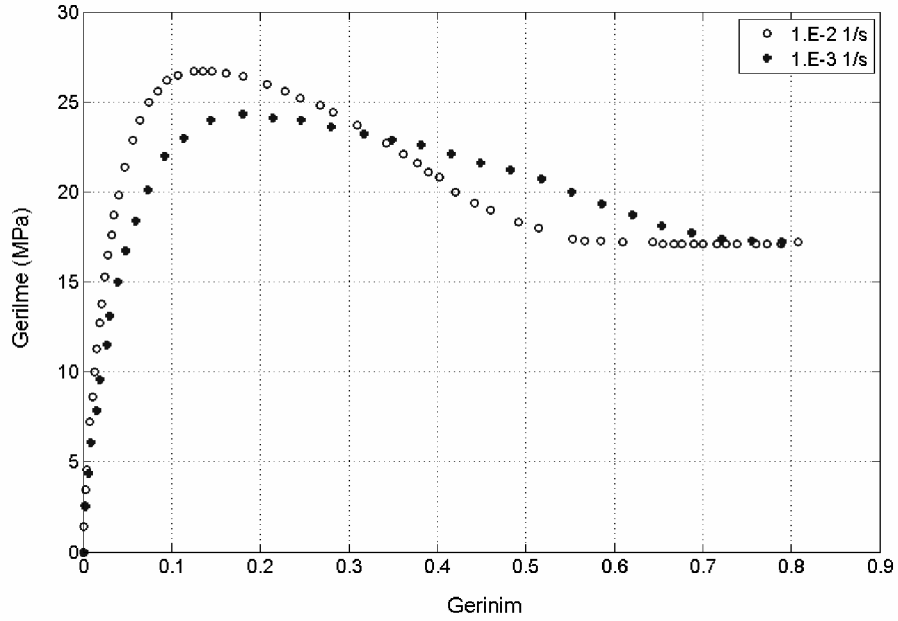
Şekil 1. Boru parçasından deney numunesinin çıkarılması



Şekil 2. Deney numunesi boyutları (ISO 6259-3 tip 2)

2.2 Deney Sonuçları

Ekstrüde borudan ve basınçta kalıplanmış levhadan çıkarılmış olan deney numuneleri 1.E-2 ve 1.E-3 1/s gerinim hızlarında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Herbir gerinim hızında beşer adet deney yapılmıştır. Şekil 3’de ekstrüde numunenin 1.E-2 ve 1.E-2 1/s şekil değiştirme hız grafiklerinden görüldüğü üzere YYPE’nin mekanik davranışı akma başlangıcına kadar elastik ve viskoelastik davranışların içiçe geçmesinden meydana gelmektedir. Akma noktasından sonra viskoplastik deformasyon meydana gelmektedir.



Şekil 3. Ekstrüde YYPE'nin 1.E-2 ve 1.E-3 1/s gerinim hızlarında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırması.

YYPE'nin mekanik davranışının değişimi kopma gerinim seviyesi ve soğuk çekme başlangıcı gerinim seviyesi olmak üzere iki farklı gerinim seviyesinde incelenmiştir. Şekil 4 ve 5 sırasıyla 1.E-2 ve 1.E-3 gerinim hızında her iki numunenin soğuk çekme bölgesine kadar gerinim seviyesindeki gerilme-gerinim eğrilerini göstermektedir. Akma noktasına kadar elastik ve viskoplastik davranış gelişmektedir. Akma başlangıcı ile birlikte viskoplastik akış oluşmaktadır. Viskoplastik akışın başlamasından sonra malzeme akma gerilmesine erişmektedir. Malzeme akma gerilmesine ulaştıktan sonra artan gerinim seviyesine karşılık gerilme seviyesinde hızlı bir düşüşün yaşandığı homojen olmayan bir deformasyon bölgesi gözlemlenmektedir (strain softening). Bu homojen olmayan deformasyon aşaması gerilme seviyesinin sabit kaldığı soğuk çekme (cold drawing) bölgesine kadar devam etmektedir. Malzeme soğuk çekme bölgesinde artan gerinime karşın gerilme seviyesinin sabit kaldığı bir deformasyon davranışı sergilemektedir. Bu çalışmada gözönüne alınan üretim yöntemlerinin soğuk çekme aşamasına kadar ki deformasyon aşamalarındaki başlıca farklılıklar kısaca şöyle özetlenebilir: Çizelge 1'de malzeme özelliklerinde de belirtildiği üzere, her iki tür YYPE numune hıza bağımlı bir davranış göstermektedir. Gerinim hızına bağımlılık özellikle elastisite modülü, akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve kopma gerinimi üzerinde etkili olmaktadır.

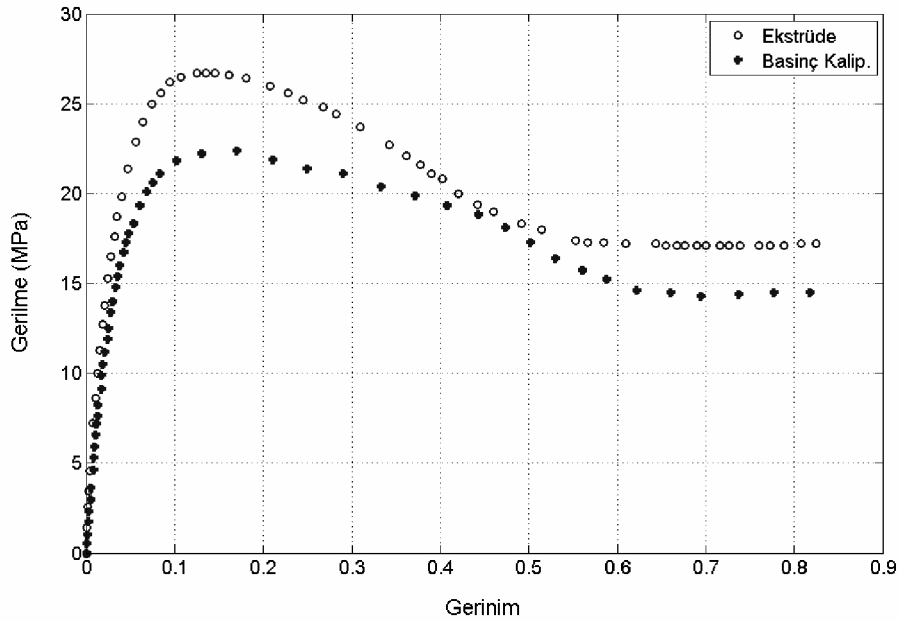
Çizelge 1. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE'nin mukavemet değerleri

Gerinim Hızı (1/s)	Numune Tipi	Tanjant Modülü (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1.E-2	EkstrüdeBoru	1320	26.7	32.5	912
	BasınçtaKalıplanmış	1312	22.4	28.5	1060
1.E-3	Ekstrüde Boru	1106	24.31	34.2	985
	BasınçtaKalıplanmış	1099	20.7	30.7	1120

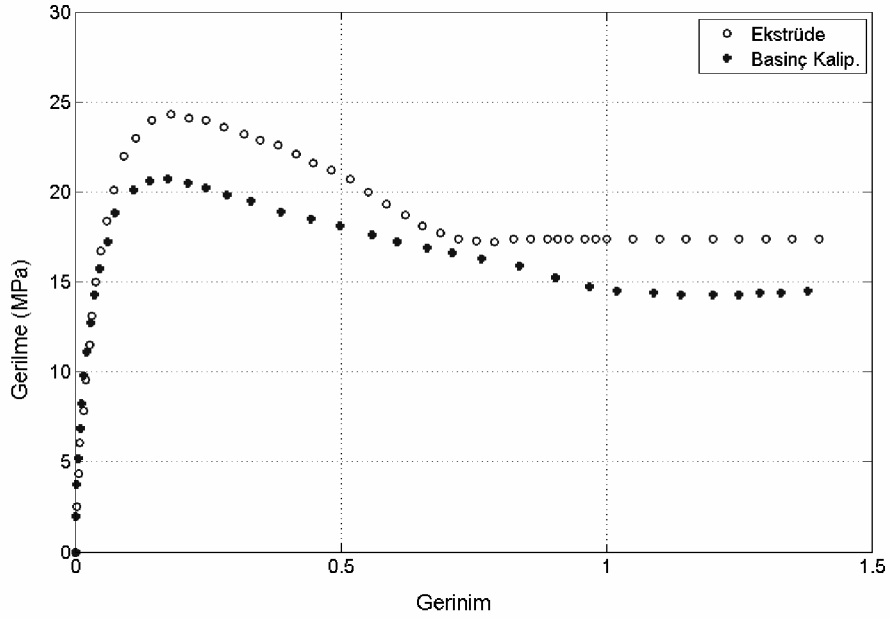
Gerilme seviyesinin sabit kaldığı soğuk çekme bölgesindeki gerilme seviyesi üzerinde ise gerinim hızının etkisi bulunmamaktadır. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE numuneler elastisite modülü, akma gerilmesi açısından karşılaştırıldığında ekstrüde numune daha yüksek değerlere sahiptir. Soğuk çekme davranışının başlangıç seviyeleri açısından karşılaştırma yapıldığında, ekstrüde numune, basınçta kalıplanmış numuneye göre daha düşük gerinim seviyesinde soğuk çekmeye başlamakta ve soğuk çekme bölgesi daha kısa sürmektedir (Çizelge 2). Gerinim hızı seviyesi, soğuk çekme davranışına geçme gerinim seviyesi üzerinde etkili olmaktadır Çizelge 2’de görüldüğü gibi artan gerinim hızı ile daha düşük gerinim seviyelerinde ve daha büyük gerinim aralığında soğuk çekme davranışı gözlemlenmektedir.

Çizelge 2. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE’nin soğuk çekme davranışının karşılaştırılması

Gerinim Hızı (1/s)	Numune Tipi	Soğuk Çekme Başlangıç Gerinim Seviyesi (%)	Soğuk Çekme Bitiş Gerinim Seviyesi (%)
1.E-2	Ekstrüde Boru	60	540
	Basınçta Kalıplanmış	70	640
1.E-3	Ekstrüde Boru	80	480
	Basınçta Kalıplanmış	110	670

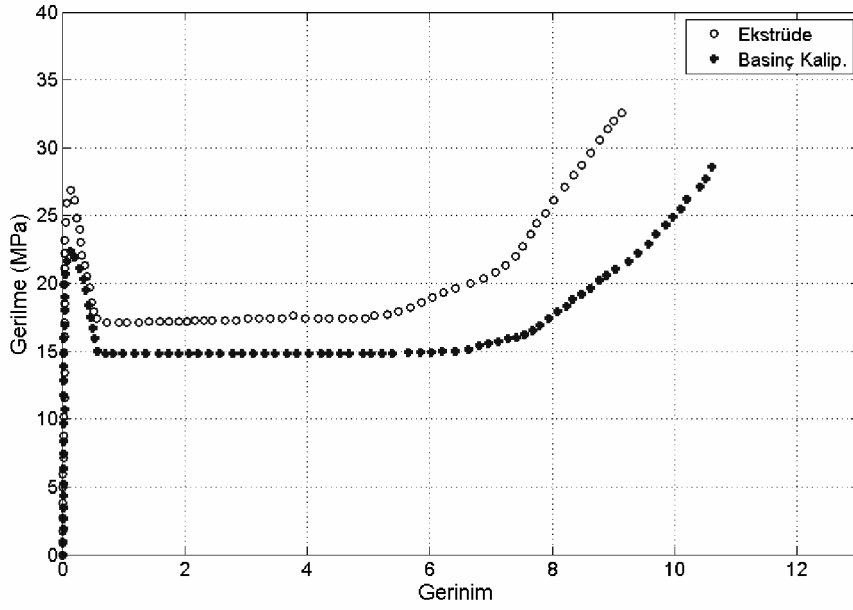


Şekil 4. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE’nin 1.E-2 1/s gerinim hızında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırması.

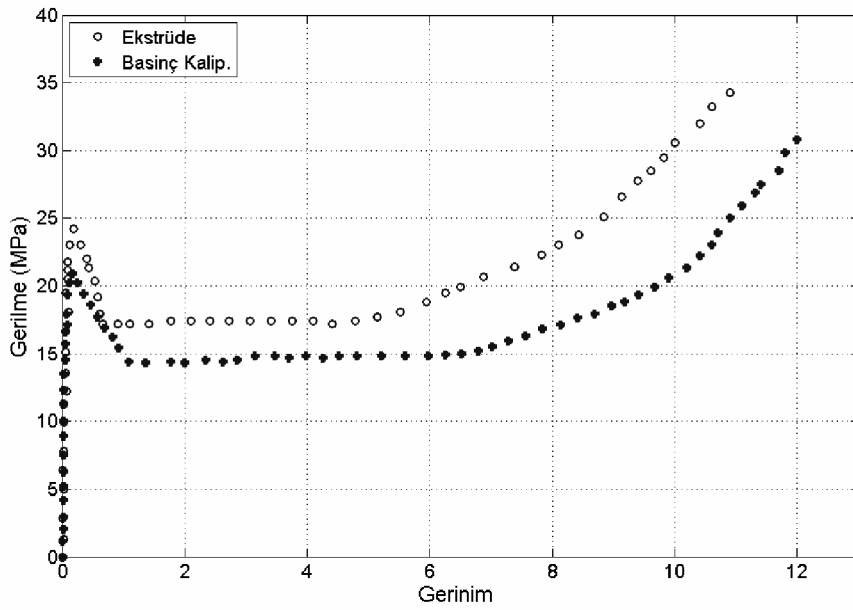


Şekil 5. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE'nin 1.E-3 1/s gerinim hızında deneysel tek eksenli çekme gerilme-gerinim eğrisi karşılaştırması.

Çalışmada YYPE numunelere ait gerilme-gerinim eğrileri kopmanın meydana geldiği gerinim seviyeleri açısından da incelenmiştir. Şekil 6 ve 7'da sırasıyla 1.E-2 ve 1.E-3 1/s gerinim hızlarında her iki tür numunenin kopma davranışını gösteren gerilme-gerinim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü üzere daha önce bahsedilen soğuk çekme davranışının son bulmasından sonra, artan gerinim seviyesi ile birlikte gerilmenin yüksek bir oranda arttığı pekleşme (strain hardening) davranışı başlamaktadır. Pekleşme davranışının son bulunduğu noktada ise kopma meydana gelmektedir. Kopma davranışı üzerinde gerinim hızının etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere artan gerinim hızı ile kopma gerilme ve kopma gerinimi azalmaktadır. Çekme hızı azaldıkça pekleşme esnasında malzemenin yeniden oryantasyonuna müsade edilen süre arttığından dolayı kopma gerilmesi artmaktadır. Kopma gerilme ve gerinim seviyesi açısından her iki tür numune karşılaştırıldığında, ekstrüde numune daha yüksek kopma gerilmesi değerine sahipken buna karşın daha düşük kopma uzamasına sahiptir. Basınçta kalıplanmış numuneler daha sünek bir yapı gösterirken, ekstrüde numuneler daha mukavim özellikler sergilemektedir. Soğuk çekme davranışı esnasındaki gerilme seviyesinin gerinim hızından bağımsız olduğunu daha önce söylemiştik, imalat yöntemleri açısından bakıldığında ise bu bölgede ekstrüde numune basınçta kalıplanmış numuneye göre daha yüksek gerilme seviyesine sahiptir.



Şekil 5. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE'nin 1.E-2 1/s gerinim hızında tek eksenli çekme deneyi sonuçları



Şekil 6. Ekstrüde ve basınçta kalıplanmış YYPE'nin 1.E-3 1/s gerinim hızında tek eksenli çekme deneyi sonuçları

4. SONUÇLAR

YYPE'nin deformasyon davranışı açısından imalat yöntemlerinin ve gerinim hızının etkilerini araştırmak üzere gerçekleştirilen deney sonuçlarından, genel olarak YYPE'nin mekanik davranışının elastik-viskoelastik-viskoplastik davranışlardan meydana geldiği görülmüştür.

Deneysel iki farklı gerinim hızında gerçekleştirilmiş ve hız bağımlılığının olduğu, artan gerinim hızı ile elastiklik modülü ve akma gerilmelerin arttığı tespit edilmiştir. Artan gerinim hızı ile kopma gerinimi seviyesi ters orantılıdır. Ekstrüde numune daha mukavim özellikler sergilerken, basınçta kalıplanmış numune daha yüksek kopma uzması değerlerine erişmektedir. Gerilme-gerinim eğrileri bir bütün olarak değerlendirildiğine, yük altında yüksek yoğunluklu polietilenin deformasyon aşamaları: 1) Çok küçük gerinim seviyelerinde gerilme ile gerinimin orantısız arttığı lineer bölge. 2) Gerilme ile gerinim arasındaki ilişkinin lineer olmayan özellik gösterdiği viskoelastik bölge. Bu bölgede numune üzerindeki deformasyon homojendir. 3) Viskoplastik değişimin ve boyun vermenin meydana geldiği bölge. Bu bölgede homojen olmayan deformasyon meydana gelir. 4) Malzeme bünyesindeki molekül zincirlerinin yeniden düzenlendiği ve artan gerinime karşılık gerilmede hızlı bir düşüşün yaşandığı gerilme yumuşaması bölgesi (Strain softening). 5) Artan gerinime karşılık gerilme seviyesinin neredeyse sabit kaldığı soğuk çekme (Cold drawing) bölgesi. 6) Moleküler zincir düzenlemelerinin son bulduğu ve gerinimle gerilmenin çarpıcı bir şekilde arttığı pekleşme (Strain hardening) ve kopmanın meydana geldiği bölgedir.

TEŞEKKÜR

FIRAT Kauçuk ve Plastik A.Ş.'ne ve kalite kontrol laboratuvarı teknisyeni Metin ÖZCAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkıran, İ., Yağcı, M.A., Cöbek M ve Bilgiç T., **Polimerler I**, Pagev Yayınları, İstanbul, (1999).
2. Shepherd J. E., McDowell D. L. ve Jacob K. I., "Modeling Morphology Evolution and Mechanical Behavior During Thermo-Mechanical Processing of Semi-crystalline Polymers", **Journal of Mechanics and Physics Solids**, 54:467-489, (2006).
3. Bartczak, Z., "Effect of Chain Entanglements on Plastic Deformation Behavior of Linear Polyethylene", **Macromolecules**, 38:7702-7713, (2005).
4. Zhang, C., "Nonlinear Mechanical Response of High Density Polyethylene in Gravity Flow Pipes", Ph.D. Thesis, **The University of Western Ontario**, Ontario, (1996).
5. Seguela, R., "Critical Review of the Molecular Topology of Semicrystalline Polymers: The Origin and Assessment of Intercrystalline Tie Molecules and Chain Entanglements", **Journal of Polymer Science PartB: Polymer. Physics**, 43:1729-1748, (2005).
6. William, D. ve Callister, Jr., **Materials Science and Engineering an Introduction**, John Wiley & Sons, New York, (2003).
7. International Standard ISO 6259-1, (1997).
8. International Standard ISO 6259-3, (1997).
9. International Standard ISO 527-1, (1997).
10. International Standard ISO 527-2, (1997).