



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.10.2021
Kabul Tarihi : 02.11.2021

Received Date : 25.10.2021
Accepted Date : 02.11.2021

ÇEVİRİMSSEL ÖN YÜKLEMENİN POLİPROPİLEN'İN GEVŞEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

THE EFFECT OF CYCLIC PRE-LOADING ON RELAXATION BEHAVIOR OF POLYPROPYLENE

Necmi DÜŞÜNCELİ^{1} (ORCID: 0000-0002-2841-7882)*
Önder Çağdaş ÖZENSOY² (ORCID: 0000-0002-2072-9697)

¹ Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye
² PETLAS A.Ş. Kırşehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Necmi DÜŞÜNCELİ, ndusunceli@aksaray.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, oda sıcaklığında izotaktik polipropilen üzerinde yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme sonrası yapılan gevşeme testlerine dair gözlemler rapor edilmiştir. Deneysel veriler, gevşeme testinin başlangıcında maksimum gerilme ve başlangıç gerilmesi arasındaki farkın artmasıyla birlikte gevşeme eğrilerinin şekillerinde belirgin değişiklikler olduğunu göstermiştir. Testin başlangıcında gerilme geleneksel gevşemeden farklı olarak önce artıp sonra monoton olarak azalmaktadır. Basit gevşemeden karma gevşemeye geçişte ön yüklemenin etkisini araştırmak için farklı çevrim sayısı ve gerilme seviyelerinde testler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Izotaktik polipropilen, hasar birikimi, çevrimsel deformasyon, gevşeme.

ABSTRACT

In this study, some relaxation tests were undertaken on isotactic polypropylene after loading unloading and reloading at ambient temperature. Experimental data demonstrated pronounced variations in evolution of relaxation curves with difference between maximum stress and stress at the beginning of relaxation test. At the beginning of the relaxation test, the stress increases and then diminishes. To investigate effects of pre-loading on mixed relaxation of polypropylene, comprehensive experimental study was conducted both different range of cycle and stress level.

Keywords: Isotactic polypropylene, damage accumulation, cyclic deformation, relaxation.

GİRİŞ

Polimerik malzemeler birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanıldığı için yarı kristal polimer malzemelerin mekanik davranışı önemli araştırma konularındadır. Düşük maliyet, korozyona karşı direnç, ılımlı yük taşıma yeteneği ve kolay işlenebilirlik gibi özellikler polimerik malzemelerin kullanımını cazip kılmaktadır (Baral vd., 2019; Brusselle-Dupend & Cangémi, 2008; Caelers vd., 2016; N. Dusunceli vd., 2021; Mourad vd., 2009; Zrida vd., 2009).

Son altmış yılda, polimerik malzemelerin davranışını araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, gerinim hızı bağımlılığı, yükleme eğrisi üzerindeki gerilme/gerilme noktalarında başlatılan basit sünme ve gevşeme ve bunların modellenmesine odaklanmıştır.

ToCite: DÜŞÜNCELİ, N., & ÖZENSOY, Ö.Ç., (2021). ÇEVİRİMSSEL ÖN YÜKLEMENİN POLİPROPİLEN'İN GEVŞEME DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 359-370.

(Ariyama, 1993; Ayoub vd., 2010; Necmi Dusunceli & Colak, 2006; Gordeyev & Ward, 1999; Jourdan vd., 1989; M. I. Okereke vd., 2012; Michael I. Okereke & Akpoyomare, 2019). Bir kısım çalışmalar ise boşaltma eğrisi üzerindeki gerilme/gerinim noktalarında basit sünme ve gevşeme davranışlarına dairdir. Yükleme eğrisi üzerindeki noktalarda başlatılan sünme ve gevşeme testleri geleneksel sünme ve gevşeme davranışı cevaplarını içerir. Boşaltma eğrisi üzerinde başlatılan sünme ve gevşeme testleri ise geleneksel sünme ve gevşeme davranışından farklı olarak gerilme ya da gerinim seviyesinde artma-azalma, sadece azalma ve artma şeklinde olabilir(Necmi Dusunceli, 2012; Necmi Dusunceli & Aydemir, 2011; Heymans & Kitagawa, 2004; Kitagawa vd., 1995, 1999).

Polimerik malzemelerin viskoelastik doğasından dolayı herhangi bir hasar sonrasında hasara bağlı oluşacak sünme ya da gevşeme davranışlarının sonuçları kullanım yerlerindeki güvenilirliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Sünme ya da gevşeme öncesi polimerik malzemenin içyapısından meydana gelecek birikmiş hasarın etkisinin belirlenmesi son yıllarda çalışılan güncel konulardandır. Bu tip yükleme geçmişine bağlı deformasyon davranışları daha önce (Hiss vd., 1999)'de polietilen ve etilen-(vinil asetat) kopolimerleri için, (Ayoub vd., 2010; Hong vd., 2004)'de polietilen için, (Detrez vd., 2011)'de polibüten, polikaprolakton ve poliamid için, (Lipinski vd., 2020)'de Nafion membranlar için ve (Kästner vd., 2012)'da PP için çalışılmıştır. Deneysel veriler, deformasyon geçmişine bağlı malzeme hafızasının yok olduğunu göstermektedir: N çevrimsel yükleme sayısını göstermek üzere, ilk N-1'inci çevrim boyunca farklılık gösteren ve daha sonra özdeş hale gelen yükleme programlarına tabi tutulan iki numunenin gerilme-gerinim diyagramları, N'inci çevrimden başlayarak çakışmaktadır. Başka bir deyişle, bir polimer maksimum gerinim seviyesi $\epsilon_{max}(N)$ 'ye ulaştığında, önceki deformasyon hafızasını kaybeder (Caelters vd., 2016; Tauheed & Sarangi, 2014). Deformasyon hafızası solma fenomeni Mullins etkisine benzer sabit bir maksimum uzama oranı ϵ_{max} ile çevrimsel yüklemeye maruz kalan bir numune bu değerini ötesine gerildiğinde, gerilme-gerinim eğrisi hızlı bir şekilde ham numunenin (çevrimsel yüklemeye tabi olmayan) mekanik cevabına ulaşır (Ghoreishy & Abbassi Sourki, 2018; Tauheed & Sarangi, 2014; Wang & Weiss, 2018).

Bu çalışmanın temel amacı, polimerik malzemelerin deformasyon mekanizmalarını anlamak ve birikimli hasarın gevşeme davranışı üzerindeki etkisini gözlemlemektir. Bu amaca yönelik olarak yaygın kullanılan bir ticari polimerik malzeme olan Polipropilen (PP)'nin tek eksenli çevrimsel çekme yükü altındaki mekanik davranışı araştırılmıştır. Deneysel temelli bir yaklaşım üzerine kurulu çalışmada tek eksenli çekme koşullar altında yapılan servo kontrollü testler, hasar birikimin etkilerini dair malzeme cevapları belirlenmiştir. Bu çalışmada yükleme geçmişi davranışı, hem farklı çevrim sayılarına (n) hem de farklı gerilme seviyelerine (σ_{maks}) bağlı olarak gevşeme davranışı açısından bir arada incelenmiştir.

MALZEME ve TESTLER

Malzeme ve Test Programları

İzotaktik polipropilen Moplen HP 400R (yoğunluk 0.90 g/cm³, eriyik akış hızı 25 g/10 dakika, erime sıcaklığı 161 °C) Lyondell Basell'den (Rotterdam, Hollanda) temin edildi. Mekanik testler için (ASTM standardı D-638) 10.1 mmx4.2 mm kesit alanına sahip çekme numuneleri Arburg 320C enjeksiyon kalıplama makinesi kullanılarak kalıplanmıştır (D638-14, 2014).

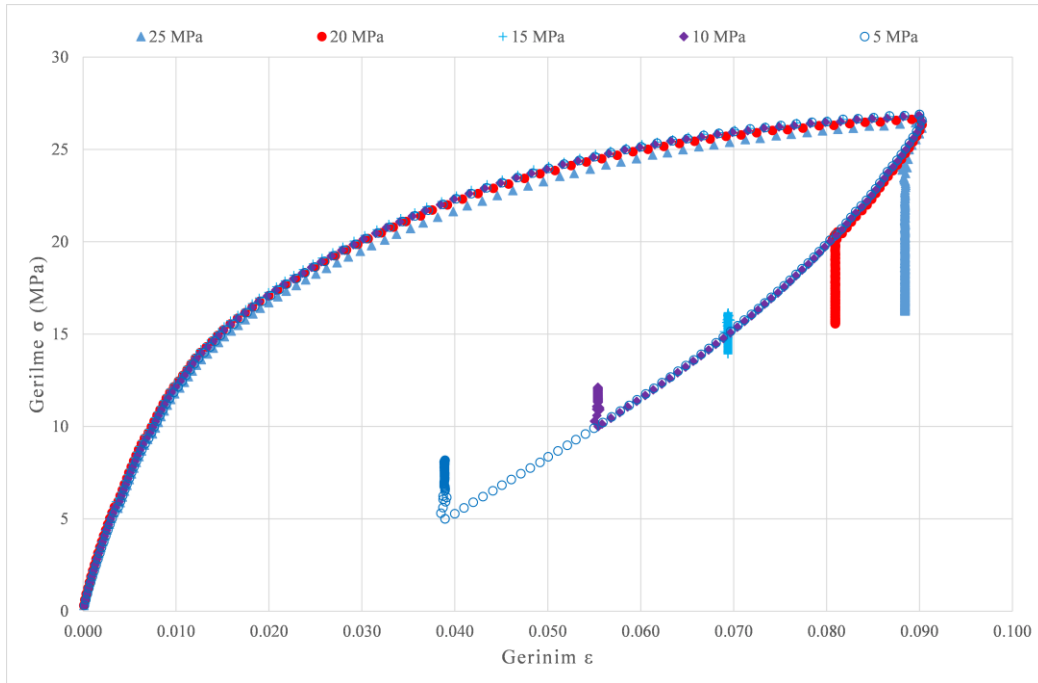
Tek eksenli çekme testleri, boyuna gerilmelerin kontrolü için bir elektro-mekanik sensörle donatılmış evrensel test makinesi olan Instron-5569 aracılığıyla oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme kuvveti 5 kN yük hücresi ile ölçülmüştür. Mühendislik gerilmesi (σ), eksenel kuvvetin deforme olmamış numunelerin kesit alanına oranı olarak belirlendi. Deneysel program, altı grup çevrimsel yükleme ve müteakibinde beş farklı gerilme seviyesinde gevşeme testi içerir. Her bir test yeni bir numune üzerinde gerçekleştirildi ve en üç kez tekrarlandı. Test sonuçlarına dair gözlemler, ölçümlerin iyi bir şekilde tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermiştir: farklı numuneler üzerinde ölçülen gerilmeler arasındaki sapmalar %3'ü geçmemiştir.

Tek Eksenli Çevrimsel Yükleme Testleri

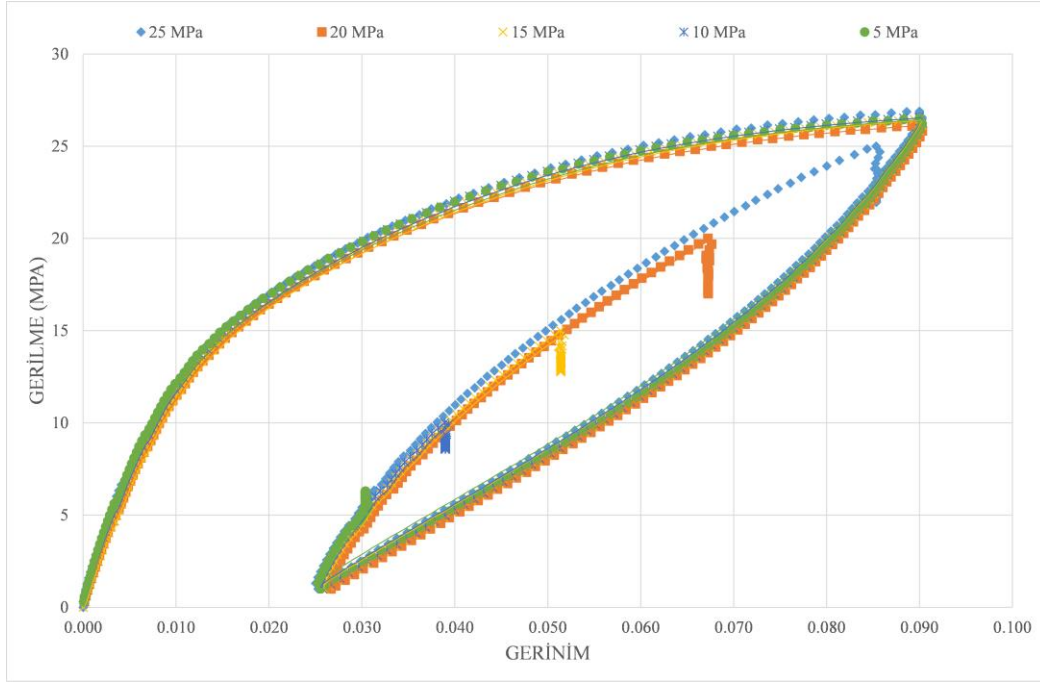
Çevrimsel testler hem gerinim seviyesi ϵ_{max} hem de gerilme seviyesi σ_{min} arasında sınırlandırılarak, 1 çevrim, 2 çevrim, 5 çevrim, 20 çevrim, 100 çevrim ve 200 çevrim salınımı içermektedir. Çekme test numunesi, çekme hızı 10 mm/dak (gerinim hızı = $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e karşılık gelir) ile maksimum gerinim $\epsilon_{max} = 0.09$ 'e kadar gerildikten sonra minimum gerilme $\sigma_{min} = 1 \text{ MPa}$ seviyesine kadar aynı gerinim hızında yükten boşaltılmıştır. Bu noktadan sonra numune aynı gerinim hızında ϵ_{maks} gerinim seviyesine kadar tekrar yüklenmiş daha sonra σ_{min} gerilme seviyesine kadar tekrar yükten boşaltılmıştır. Çevrimsel yükleme deneyleri farklı çevrim sayıları (n=1,2,5,20,100 ve 200 çevrim.) tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir.

Çevrim başına maksimum gerinim $\epsilon_{maks} = 0.09$ değeri, çekmedeki gerilme-gerinim eğrisinin altındaki alandan faydalanarak, akma noktasına yakın civarda seçildi Numunelerin yük boşaltması esnasında burkulmasını önlemek için $\sigma_{min} = 0$ MPa yerine çevrim başına minimum gerilme $\sigma_{min} = 1$ MPa seçilmiştir. Çevrim başına maksimum gerinim değerinin yüksek doğrulukla tekrar edilebilmesi için gerinim hızı $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ olarak seçildi, böylece Her bir çevrimin birbirleri arasındaki standart sapma değeri koşulundan seçildi %2 değerinin altında kaldı.

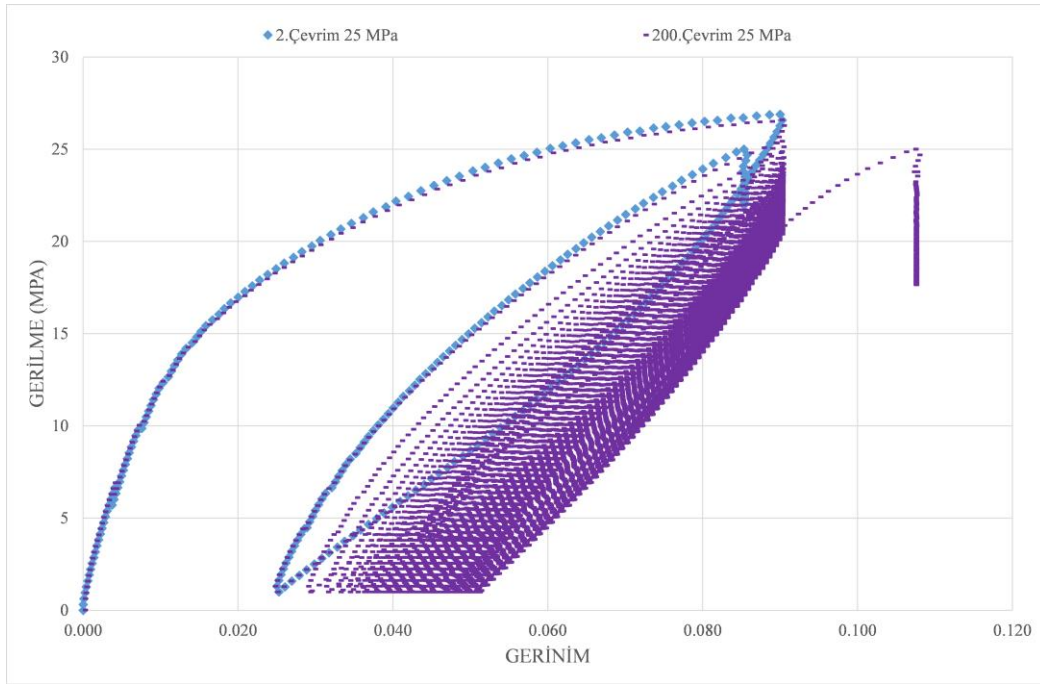
1 ve 2 çevrimli yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme gerilme-gerinim eğrileri sırasıyla Şekil 1 ve 2’de verilmiştir. Şekil 3’de görüleceği üzere diğer çevrim sayıları için gerilme-gerinim eğrilerinin yoğunluğundan doğacak karmaşadan kaçınmak için 5, 20, 100 ve 200 çevrimli testlere dair sadece son çevrimdeki boşaltma-yeniden yükleme eğirleri verilmiştir (Şekil 4, 5, 6 ve 7). PP’nin çevrimsel yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme grafiklerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır: (i) hem yükleme hem de boşaltma yüksek bir lineer olmayan özellik göstermektedir, (ii) maksimum gerilme σ_{maks} (Gerilme seviyesinin yükleme sınırı olduğu ϵ_{maks} ’a ulaşıldığında erişilen gerilme seviyesi.) artan çevrim sayısı ile azalmaktadır. Minimum gerinim ϵ_{min} (Gerilme seviyesinin yük boşaltma sınırı olduğu σ_{min} ’a ulaşıldığında erişilen gerinim seviyesi.) artan çevrim sayısı ile artmaktadır. (iii) histerezis enerjisi (Birbirini takip eden yükleme ve boşaltma eğirleri arasında kalan alanın ölçülmesi ile hesaplanan histerezis enerjisi artan çevrim sayısı (n) ile belirgin şekilde azalmaktadır (Şekil 8).



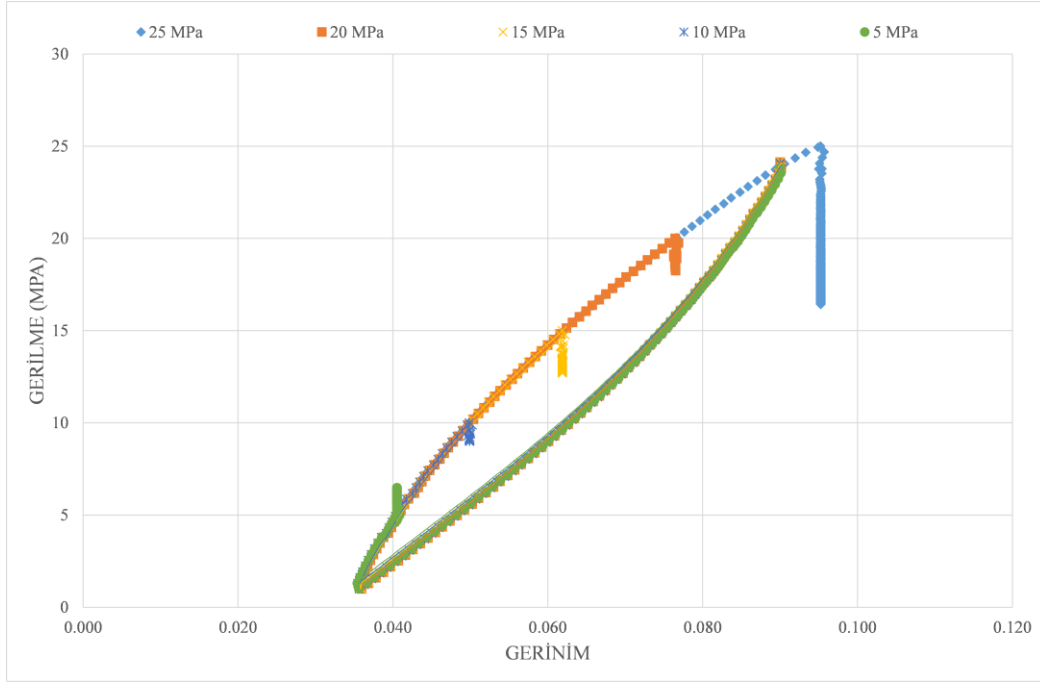
Şekil 1. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{maks} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=1 Yükleme-Boşaltma.



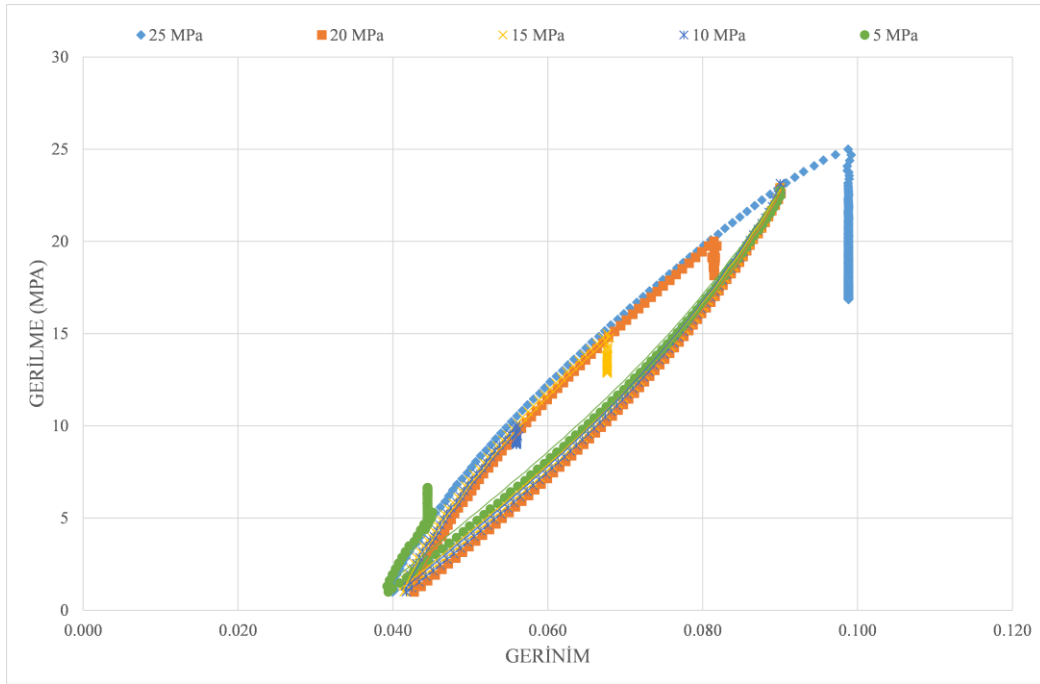
Şekil 2. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=2 Yükleme-Boşaltma.



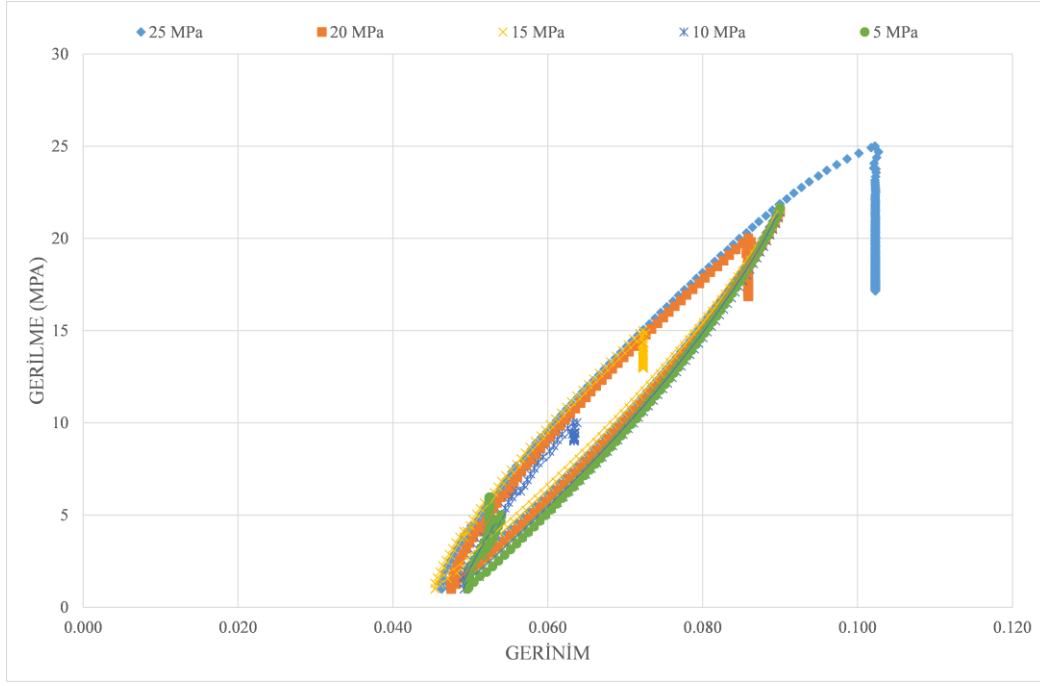
Şekil 3. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25$ MPa. N=2 ve 200 Yükleme-Boşaltma.



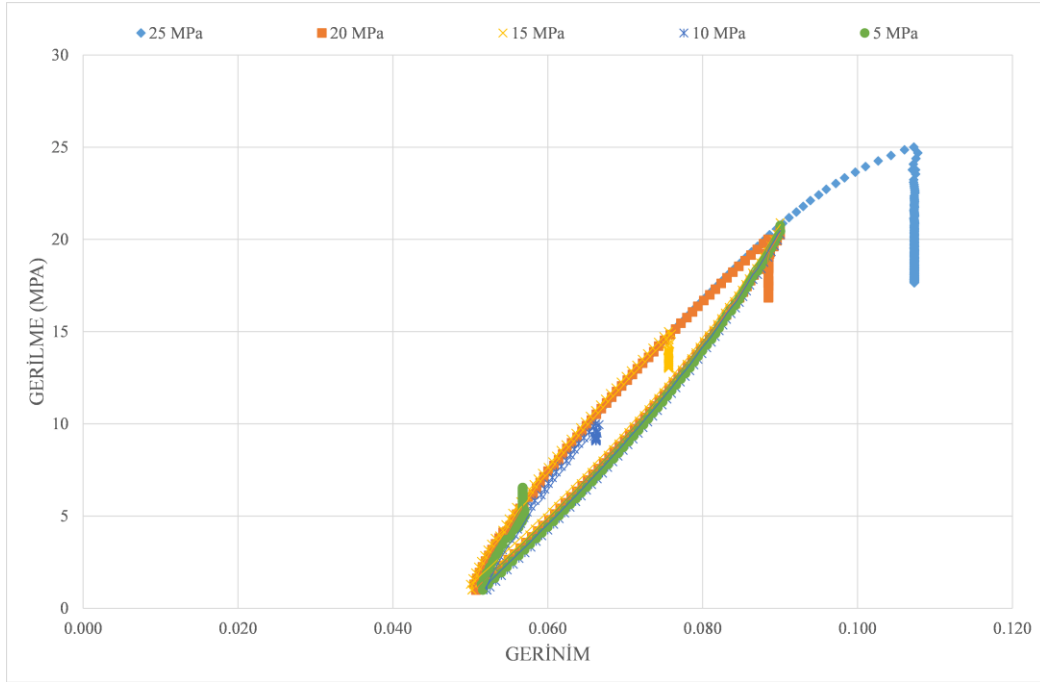
Şekil 4. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=5 Yükleme-Boşaltma.



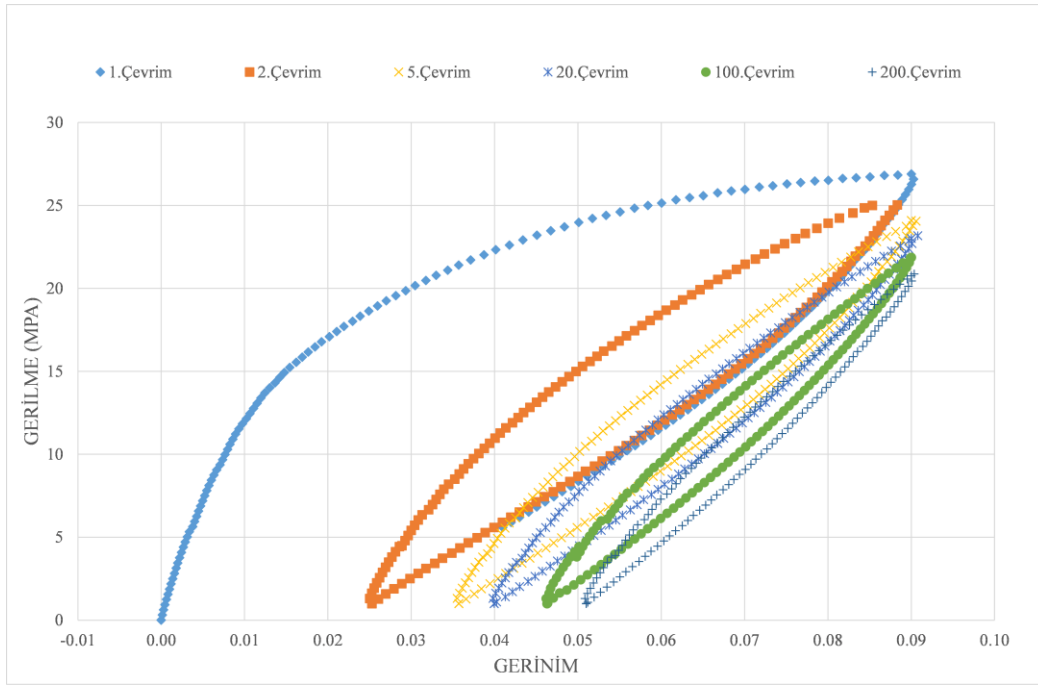
Şekil 5. Gerilim-Gerinim eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=20 Yükleme-Boşaltma.



Şekil 6. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=100 Yükleme-Boşaltma.

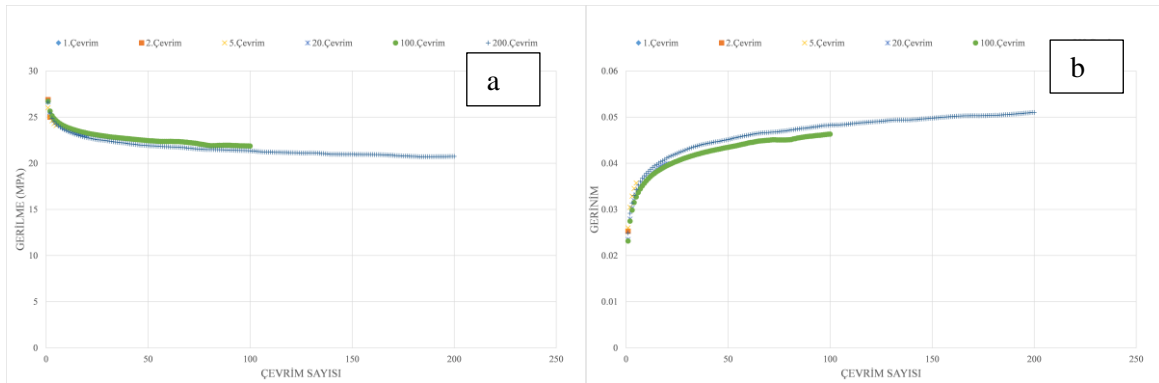


Şekil 7. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_0 = 25, 20, 15, 10$ ve 5 MPa. N=200 Yükleme-Boşaltma.



Şekil 8. Gerilim-Gerinim Eğrisi. $\epsilon_{\max} = 0.09$ ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa. N=1, 2, 5, 20, 100 ve 200 Histerisiz Miktarı

Çevrimsel yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme esnasında çevrim sayısına bağlı olarak maksimum gerilme σ_{\max} seviyesinde azalma ve minimum gerinim seviyesindeki ϵ_{\min} artış gelişimi, sırasıyla Şekil 9 a ve b'de verilmiştir. Grafikler Gerilme (MPa)-Çevrim sayısına ve Gerinim-Çevrim sayısına olacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 9 a'dan maksimum gerilme σ_{\max} seviyesinin artan çevrim sayısı (n) ile ilk başta belirgin bir şekilde azalmaktadır, 175 çevrim sayısından sonra göreceli olarak sabit bir değere erişmektedir. Minimum gerinim ϵ_{\min} seviyesinin ise artan çevrim sayısı (n) ile monoton olarak artmaktadır.



Şekil 9. a. Çevrim Sayısı ile Maksimum Gerilim σ_{\max} Azalışı. $\epsilon_{\max} = 0.09$.

b. Çevrim Sayısı ile Minimum Gerinim ϵ_{\min} Artışı. $\sigma_{\min} = 1$ MPa.

Gevşeme Testleri

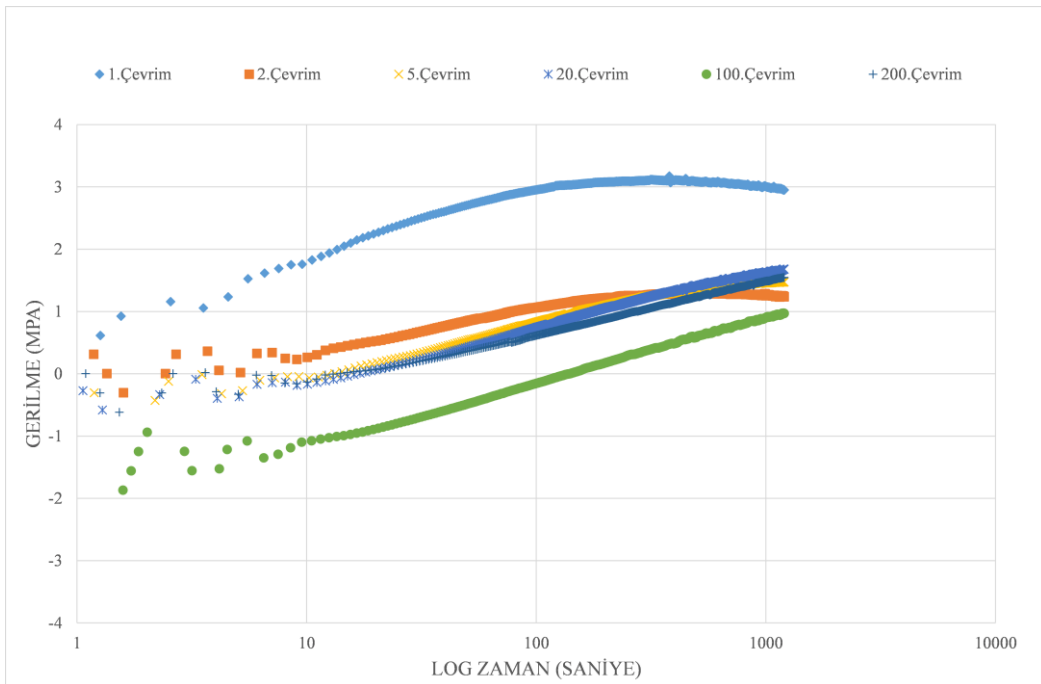
Polipropilen'in zamana bağlı cevaplarını değerlendirmek için yukarıda anlatıldığı gibi her bir numune birikimli hasara uğratılmak için farklı çevrim sayılarında bir maksimum gerinim ϵ_{\max} seviyesinden bir minimum gerilme σ_{\min} seviyesine kadar yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme işlemine tabi tutuldu. Bu tip bir yüklemenin müteakibinde boşaltma eğrisi ve yeniden yükleme eğrisi üzerinde farklı 5 gerilme seviyesinde ($\sigma_0=25$ MPa, 20 MPa, 15 MPa, 10 MPa ve 5 MPa) gevşeme testleri başlatıldı. İlk olarak numuneler çekme hızı 10 mm/dk ($1.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) ile yüklendi-boşaltıldı ve yeniden yüklendi test başlangıç noktasına gelindiğinde gerinim değeri sabitlendi, gerilmedeki σ azalma zamanının t bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Kısa süreli gevşeme test süresi, ASTM E-328 standardına istinaden $t_{\text{gevşeme}} = 20$ dakika olarak seçilmiştir (E328-02(08), 2013).

Her bir gevşeme testi seviyesi için sonuçlar sırasıyla Şekil 10, 11, 12, 13 ve 14’de verilmiştir. Gevşeme test süresi uzun dönem davranış hakkında bir öngörü yapabilmek amacı ile yaygın uygulanan yarı logaritmik şekilde zaman şeklinde verilmiştir. $\log = \log_{10}$ ’dur.

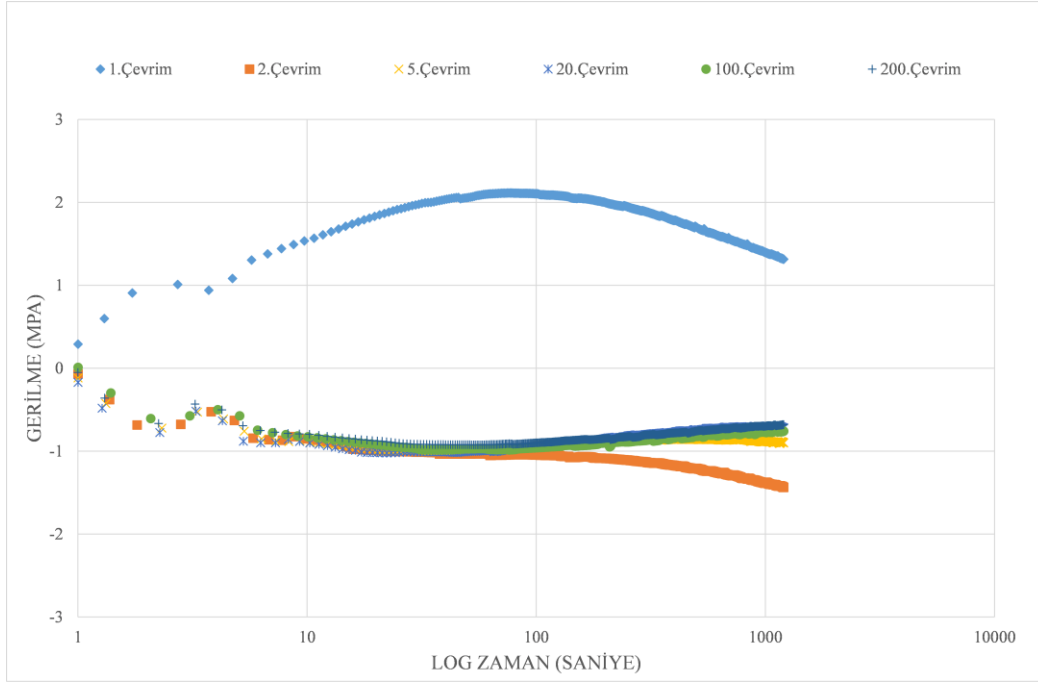
Yarı kristalli polimerler özellikle boşaltma eğrisi üzerinde gerçekleştirilen gevşeme testlerinde geleneksel gevşeme test sonuçlarından farklı özellikler sergilerler, bu olağandışı zamana bağlı tepki ilk olarak (Kitagawa vd., 1995, 1999)’de rapor edilmiştir. Bu tip davranışta gevşeme eğrilerinin şekillerinde gözle görülür değişiklikler mevcuttur. Bir maksimum gerinim ϵ_{\max} seviyesine kadar yüklenen ve çeşitli gerilme σ_0 seviyelerine kadar yük boşaltması yapıp başlatılan testler: (i) gerilme seviyesi farkı $\delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_0$ küçük ise çekme gerilme seviyesi σ zamanla monotonik olarak azalır. Burada σ_{\max} , gerilme altındaki maksimum gerilme seviyesini ve σ_0 ise testin başlatıldığı gerilme seviyesini işaret eder. (ii) $\delta\sigma$ fark edilir derecede büyük ise (σ_{\max} ’un 0.3 ila 0.7 katı arasında.) gerilme seviyesi önce maksimum bir değere kadar zamanla artar, sonra azalır. (iii) $\delta\sigma$ karşılaştırılabilir seviyede ise (σ_{\max} ’un 0.8 katını aşıyor ise.) gerilme değeri zaman ile monotonik olarak artar. Şekil 1’de boşaltma eğrisi üzerindeki gevşeme testleri: (i) $\delta\sigma = 3$ MPa’da, standart gevşeme gerçekleşti, (ii) $\delta\sigma = 8$ MPa’da standarttan karışık gevşemeye geçiş gözlemlendi ve bu geçişin yoğunluğu $\delta\sigma = 23$ MPa’da monoton olarak arttı.

Şekil 2, 4, 5, 6 ve 7’de gevşeme test sonuçları verilmiştir. Yeniden yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme testlerinde geleneksel yükleme eğrisi üzerinde başlatılan gevşeme testi sonuçlarından farklı olarak $\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa gerilme seviyesinde başlatılan gevşeme testlerinde ($\delta\sigma = 23$ ve 18 MPa) gerilme değeri önce artıp daha sonra azalarak karışık gevşeme şeklinde vuku buldu. Şekil 2, 4, 5, 6 ve 7’nin karşılaştırılmasından:

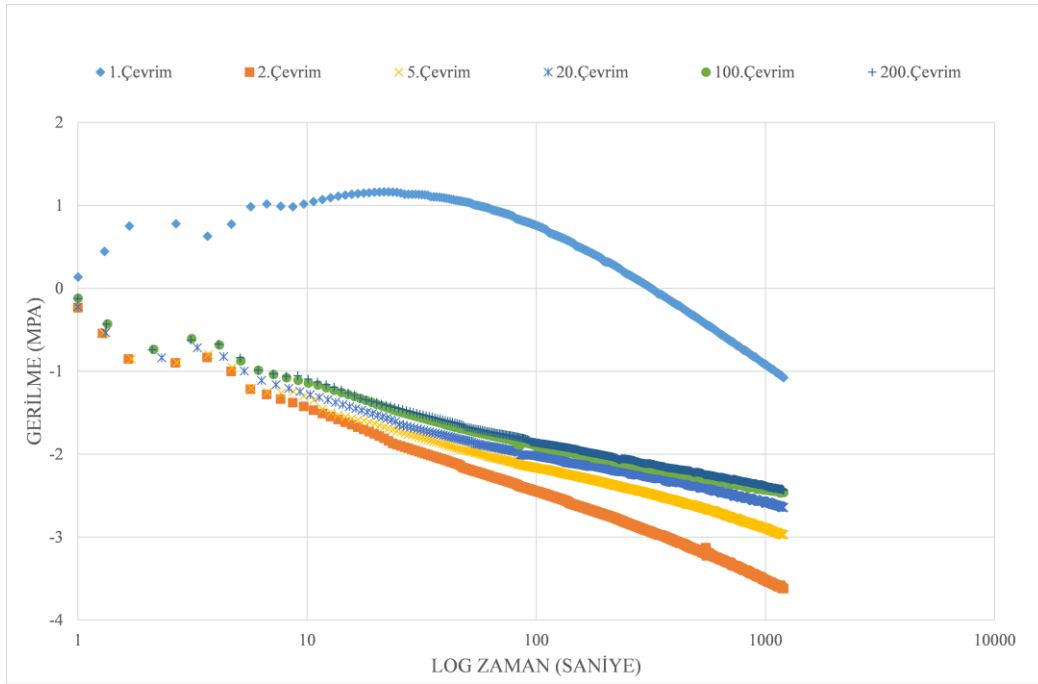
- Karışık gevşeme rejiminde, gevşeme diyagramlarındaki tepe noktasının yoğunluğu çevrim sayısı ile azalırken, daha sonraki aşamasında tepe noktası çevrim sayısından etkilenmez ($\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa’da gözlemlendi.).
- Çevrim sayısındaki (hasar birikimi) artış, tepe noktasının konumunun daha büyük sürelerle belirgin bir şekilde kaymasına neden olur.
- Nispeten küçük σ_0 ’da çevrim sayısının büyümesi karışık gevşemeden ters gevşemeye geçişi tetikler. Şekil 10 ve 11’de görüleceği gibi $\sigma_0 = 5$ ve 10 MPa’da, gevşeme eğrilerindeki tepe noktaları $N = 20$ çevrimde kaybolmuştur.
- Çevrim sayısındaki artış, gevşeme eğrilerinin belirgin lineerleşmesine neden olmuştur. Doğrusal olmayan özellik gösteren pik noktasının varlığı $N > 20$ ’de kaybolmuştur.
- Gevşeme eğrilerinin eğiminden belirlenen görünür gevşeme oranı çevrim oranı ile azalır.



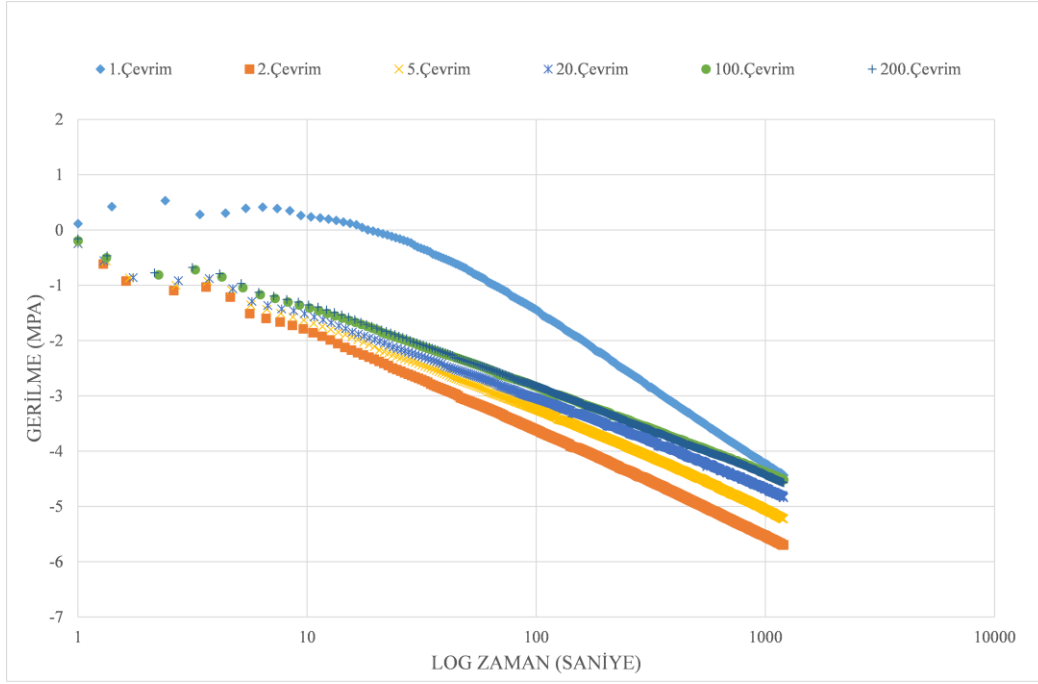
Şekil 10. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ ’a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa’ya boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100, \text{ ve } 200$ $\sigma_0 = 5$ MPa’ya kadar tekrar yüklendi.



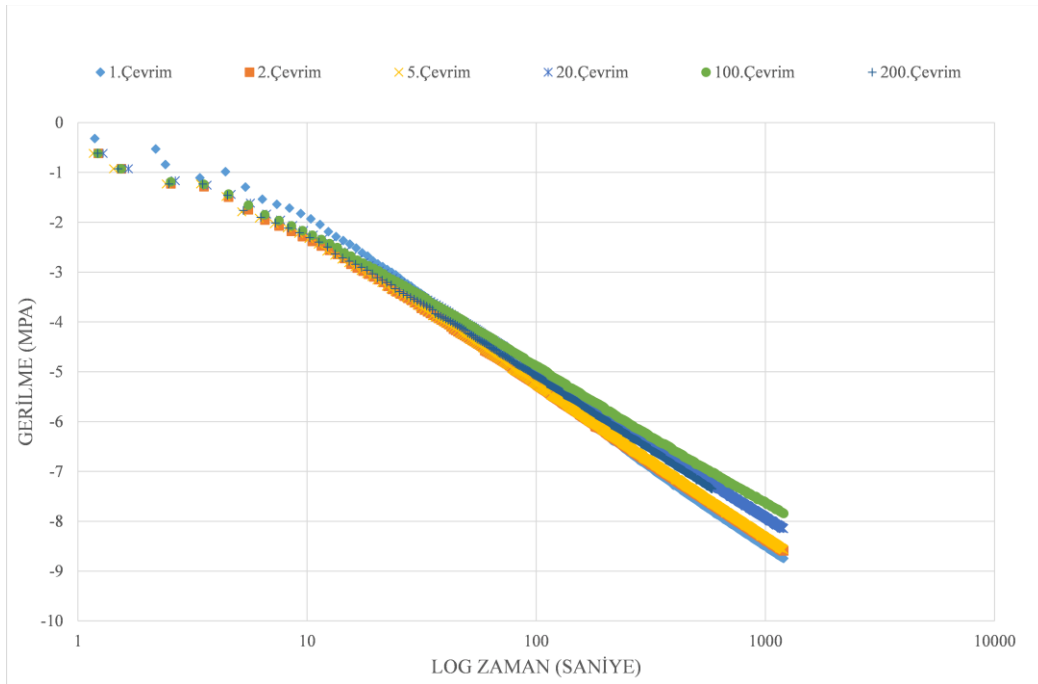
Şekil 11. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 10$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 12. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 15$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 13. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 20$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.



Şekil 14. $\Delta\sigma$ -log(zaman) Gevşeme Eğrileri. Numune $\epsilon_{\max} = 0.09$ 'a kadar gerildi ve $\sigma_{\min} = 1$ MPa'a boşaltıldı, çeşitli çevrim sayılarında $N=1, 2, 5, 20, 100,$ ve 200 $\sigma_0 = 25$ MPa'a kadar tekrar yüklendi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada oda sıcaklığında izotaktik polipropilen üzerinde yükleme-boşaltma ve yeniden yükleme sonrası gerçekleştirilen gevşeme testlerine ait gözlemler rapor edilmiştir. Deneysel veriler, gevşeme sürecinin başlangıcında maksimum gerilme ve test başlangıç noktasındaki gerilme seviyesi arasındaki farkın artmasıyla basit gevşemeden karma gevşemeye geçişi olduğunu göstermiştir. Yükleme geçmişine bağlı deformasyon ve gevşeme davranışının hakkında kapsamlı bir araştırma yapılmıştır: (i) bir başlangıç gerilme seviyesinde σ_0 , karma gevşeme davranışının yoğunluğu maksimum gerilme σ_{\max} seviyesi ile farkın artması ile artmaktadır, (ii) çevrimsel ön yükleme programı yapıldığında, çevrim sayısının artmasıyla karışık gevşemenin yoğunluğu azalır.

KAYNAKLAR

- Ariyama, T. (1993). Stress relaxation behavior after cyclic preloading in polypropylene. *Polymer Engineering & Science*, 33(22), 1494–1501. <https://doi.org/10.1002/pen.760332209>
- ASTM D638 - 14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- Ayoub, G., Zaïri, F., Naït-Abdelaziz, M., & Gloaguen, J. M. (2010). Modelling large deformation behaviour under loading-unloading of semicrystalline polymers: Application to a high density polyethylene. *International Journal of Plasticity*, 26(3), 329–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.07.005>
- Baral, P., Guillonneau, G., Kermouche, G., Bergheau, J. M., Loubet, J. L., Bennin, T., Ricci, J., Ediger, M. D., Bouvard, J. L., Francis, D. K., Tschopp, M. A., Marin, E. B., Bammann, D. J., Horstemeyer, M. F., Chen, K., Schweizer, K. S., Cifuentes, S. C., Frutos, E., Benavente, R., ... Ullah, N. (2019). Effect of loading rate on the creep behaviour of epoxy resin insulators by nanoindentation. *Macromolecules*, 27(2), 11786–11797. <https://doi.org/10.1007/s11029-012-9266-6>
- Brusselle-Dupend, N., & Cangémi, L. (2008). A two-phase model for the mechanical behaviour of semicrystalline polymers. Part I: Large strains multiaxial validation on HDPE. *Mechanics of Materials*, 40(9), 743–760. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.03.011>
- Caelers, H. J. M., Govaert, L. E., & Peters, G. W. M. (2016). The prediction of mechanical performance of isotactic polypropylene on the basis of processing conditions. *Polymer*, 83, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.12.001>
- Detrez, F., Cantournet, S., & Seguela, R. (2011). Plasticity/damage coupling in semi-crystalline polymers prior to yielding: Micromechanisms and damage law identification. *Polymer*, 52(9). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.03.012>
- Dusunceli, N., Sanporean, C. G., Drozdov, A. D., de Claville Christiansen, J., & Comanici, F.-E. (2021). Mechanical and microstructural characterization of poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels and its nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. <https://doi.org/10.1177/1464420720988301>
- Dusunceli, Necmi. (2012). The unusual creep and relaxation behaviour of polypropylene. *Journal of Polymer Engineering*, 32(3), 167–176. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2011-0159>
- Dusunceli, Necmi, & Aydemir, B. (2011). The effects of loading history and manufacturing methods on the mechanical behavior of high-density polyethylene. *Journal of Elastomers and Plastics*, 43(5), 451–468. <https://doi.org/10.1177/0095244311404181>
- Dusunceli, Necmi, & Colak, O. U. (2006). High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. <https://doi.org/10.1007/s11043-007-9026-5>
- E328-02(08). (2013). Standard Test Methods for Stress Relaxation for Materials and Structures. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014*. <https://doi.org/10.1520/E328-02>.
- Ghoreishy, M. H. R., & Abbassi Sourki, F. (2018). Development of a new combined numerical/experimental approach for the modeling of the nonlinear hyper-viscoelastic behavior of highly carbon black filled rubber compound. *Polymer Testing*, 70(May), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.06.035>
- Gordeyev, S. A., & Ward, I. M. (1999). Time dependent recovery of oriented polyethylene. *Journal of Materials Science*, 34(19), 4767–4773. <https://doi.org/10.1023/A:1004691206113>
- Heymans, N., & Kitagawa, M. (2004). Modelling “unusual” behaviour after strain reversal with hierarchical fractional models. *Rheologica Acta*, 43(4), 383–389. <https://doi.org/10.1007/s00397-003-0354-3>
- Hiss, R., Hobeika, S., Lynn, C., & Strobl, G. (1999). Network stretching, slip processes, and fragmentation of crystallites during uniaxial drawing of polyethylene and related copolymers. A comparative study.

Macromolecules, 32(13). <https://doi.org/10.1021/ma981776b>

Hong, K., Rastogi, A., & Strobl, G. (2004). A model treating tensile deformation of semicrystalline polymers: Quasi-static stress-strain relationship and viscous stress determined for a sample of polyethylene. *Macromolecules*, 37(26). <https://doi.org/10.1021/ma049174h>

Jourdan, C., Cavaille, J. Y., & Perez, J. (1989). Mechanical relaxations in polypropylene: A new experimental and theoretical approach. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 27(11), 2361–2384. <https://doi.org/10.1002/polb.1989.090271115>

Kästner, M., Obst, M., Brummund, J., Thielsch, K., & Ulbricht, V. (2012). Inelastic material behavior of polymers - Experimental characterization, formulation and implementation of a material model. *Mechanics of Materials*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.04.011>

Kitagawa, M., Zhou, D., & Qui, J. (1995). Stress-Strain curves for solid polymers. *Polymer Engineering & Science*, 35(22), 1725–1732. <https://doi.org/10.1002/pen.760352202>

Kitagawa, M., Zhou, D., Shimada, K., & Umeoka, H. (1999). Anomalous behavior associated with unloading in polyethylene. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 48(6), 592–597. <https://doi.org/10.2472/jsms.48.592>

Lipinski, B. M., Morris, L. S., Silberstein, M. N., & Coates, G. W. (2020). Isotactic Poly(propylene oxide): A Photodegradable Polymer with Strain Hardening Properties. *Journal of the American Chemical Society*, 142(14). <https://doi.org/10.1021/jacs.0c01768>

Mourad, A. H. I., Fouad, H., & Elleithy, R. (2009). Impact of some environmental conditions on the tensile, creep-recovery, relaxation, melting and crystallinity behaviour of UHMWPE-GUR 410-medical grade. *Materials and Design*, 30(10), 4112–4119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.001>

Okereke, M. I., Buckley, C. P., & Siviour, C. R. (2012). Compression of polypropylene across a wide range of strain rates. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4), 361–379. <https://doi.org/10.1007/s11043-012-9167-z>

Okereke, Michael I., & Akpoyomare, A. I. (2019). Two-process constitutive model for semicrystalline polymers across a wide range of strain rates. *Polymer*, 183, 121818. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121818>

Tauheed, F., & Sarangi, S. (2014). Damage-induced stress-softening and viscoelasticity of limited elastic materials. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 18(3), 493–525. <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9239-3>

Wang, F., & Weiss, R. A. (2018). Thermoresponsive Supramolecular Hydrogels with High Fracture Toughness. *Macromolecules*, 51(18), 7386–7395. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00490>

Zrida, M., Laurent, H., Rio, G., Pimbert, S., Grolleau, V., Masmoudi, N., & Bradai, C. (2009). Experimental and numerical study of polypropylene behavior using an hyper-visco-hysteresis constitutive law. *Computational Materials Science*, 45(2), 516–527. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.11.017>