

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT ESASLI KATI ROKET YAKITLARININ YAŞLANMAYA BAĞLI
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Cihad Bahadır BABABURUN

ŞUBAT 2020

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Cihad Bahadır BABABURUN tarafından hazırlanan KOMPOZİT ESASLI KATI ROKET YAKITLARININ YAŞLANMAYA BAĞLI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ayşegül Ülkü METİN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Hayri YAMAN
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mustafa BOZDEMİR _____
Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Hayri YAMAN _____
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat Kadir YEŞİLYURT _____

.../.../

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu yüksek lisans tezim,

*her zaman desteğini esirgemeyen eşim Eda ve varlığı ile bana güç veren oğlum
Mete Alp'e*



ÖZET

KOMPOZİT ESASLI KATI ROKET YAKITLARININ YAŞLANMAYA BAĞLI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

BABABURUN, Cihad Bahadır

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Hayri YAMAN

Şubat 2020, 99 sayfa

Çevresel koşulların etkisiyle katı yakıtlı roket motorları yapısında ve performansında önemli değişiklikler olabilmektedir. Esnek yapıda olan yakıt çekirdeği ısı etkisi ile genişip sıkılaşabilmekte, yerçekimi etkisi ile yakıt sarkabilmekte, kimyasal madde göçleri ile yakıt yapısı bozulabilmekte, bu etkilere bağlı olarak yakıt mekanik özellikleri değişmekte ve buna bağlı olarak katı yakıtta deformasyonlar olabilmektedir. Bunun sonucunda roket performansı düşmekte, uçuş esnasında infilaka varan durumlar yaşanabilmektedir.

Zamana bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla, gerçek zamanlı ve Arrhenius Denklemi esaslarında elde edilen AOP-46 yayını tablo verileri ile yapay olarak 3 yıl yaşlandırılmış roket motorundan özel ekipmanlar ile mekanik testlerde kullanılmak üzere test numuneleri hazırlanmış, çekme testleri sonucu gerilme-gerinim grafikleri ile yakıt mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Test verilerinin karşılaştırması ile yaşlanmaya bağlı olarak mekanik özelliklerde gerileme gözlemlenmiş, teorik olarak bilinen yaşlanmaya bağlı mekanik özellik değişimleri deneysel olarak da gözlemlenerek süreç yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Roket, Kompozit Yakıtlı Roketler, Yaşlanma, Mekanik Özellikler, Gerinim Gevşeme.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE BASED SOLID ROCKET PROPELLANT DEPENDENT ON AGING

BABABURUN, Cihad Bahadır

Kırıkkale University

Institute Of Science And Technology

Department Of Defance Tecnology ,Post Garduate Thesis

Supervisor: Dr.Lecture Hayri YAMAN

February 2020, 99 pages

Some significant changes in structure and performance of solid propellant rocket engines may occur with the effects of environmental conditions, flexible structured fuel nucleus could expand because of heat effect and tighten again, deformations in the fuel nucleus could occur due to gravity substance transposition might appear depending on the density of chemical substances within, demaging the fuel structure and therefore capillary fractures may be formed within the fuel nucleus. Based on these changes, decline in rocket performance could be experienced and explosions during rockets operating may be encountered.

In order to observe changes in mechanical properties according to the time, test samples were prepared to be used for mechanical tests with the special equipments from 3 years artificially aged rocket engine with real timed and occuired from AOP-46 broadcasting table of Arrhenius Equation basis, as a result of the pulling tests stress-strain graphics and fuel mechanical properties were made firm, with the comparision of the test data, a recession in the mechanical features due to ageing is observed and the process have been interpreted by experimentally observing the changes in mechanical features based on aging which is known theoretically.

Key Words: Rocket, Composite Propellant Rocket, Aging, Mechanical Features, Stress, Strain.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Ögt. Üyesi Hayri YAMAN'a, yüksek lisans başvurumdan itibaren her safhada büyük desteğini gördüğüm Sayın Prof. Dr. Recep ÇALIN'a, yüksek lisans çalışmamda katkı sağlayan tüm Kırıkkale Üniversitesi personeline, Yüksek lisans eğitimin boyunca ihtiyaç duyduğum anlarda destek sağlayan ve fikirleri ile beni yönlendiren MIGYEM Md.lüğü personeline, çalışmalarım esnasında desteklerini her zaman gördüğüm Özgür BİRDAL ve Ahmet DEMİR'e, tezimin gözden geçirilmesi safhasında emeklerini esirgemeyen Zeren SARIKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. ROKET KAVRAMI VE TEMEL BİLGİLER	4
2.1.Roket.....	4
2.2.Roketlerin Tarihçesi.....	5
2.3.Roket Parçaları.....	6
2.3.1.Gövde	7
2.3.2.Nozul	7
2.3.3.Yakıt Çekirdeği	7
2.3.3.1.Patlayıcılar	8
2.3.3.1.1.Zayıf Patlayıcılar	8
2.3.3.1.2.Kuvvetli Patlayıcılar	8
2.3.4.Yük	10
2.3.5.Ateşleyici.....	10
2.3.6.Yönlendirme Sistemleri (Kanat Grubu)	10
2.4.Roket Motorlarının Sınıflandırılması.....	12
2.4.1.Yakıt Cinsine Göre Roketler	12
2.4.1.1.Katı Yakıtlı Roketler	12
2.4.1.1.1.Kompozit Yakıtlı Roketler.....	13
2.4.1.1.2.Çiftbazlı Yakıtlı Roketler	16
2.4.1.1.3.CMDB Yakıtlı Roketler.....	17
2.4.1.2.Sıvı Yakıtlı Roketler	17
2.4.1.3.Hibrit Roketler	18

2.4.2.Kullanım Maksadına Göre Roketler.....	19
2.4.2.1.Savunma Roketleri.....	19
2.4.2.2.Uzay/Havacılık Roketleri.....	19
2.5.Roket Performans Parametreleri.....	20
2.5.1.İtme.....	20
2.5.2.Özgül İtme.....	22
2.5.3.Mekanik Özellikler.....	23
2.5.4.Yaşlanma.....	32
2.5.4.1.Yakıt Yaşlanmasına Etki Eden Faktörler.....	34
3. KOMPOZİT ESASLI KATI ROKET YAKITININ MEKANİK	
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	36
3.1.Numunelerin Hazırlanması.....	36
3.2. Roket Yakıtına Yapılacak Mekanik Testler Ve Test Koşullarının	
Belirlenmesi.....	39
3.2.1.Tek Eksenli Çekme Testi.....	39
3.2.2.Gerilme Gevşeme Testi.....	40
3.3. Test Ekipmanları.....	40
3.3.1.Extensometreli Instron Cihazı.....	41
3.4. Kontrollü Yaşlandırma.....	41
3.5. Test Verileri ve Sonuçların Değerlendirilmesi.....	44
3.5.1. T_0+10 Yaşındaki Roket Yakıtının Çekme Test Sonuçları.....	44
3.5.2. T_0+13 Yaşındaki Roket Yakıtının Çekme Test Sonuçları.....	60
3.5.3. T_0+10 Yaşındaki Roket Yakıtının Gerinim/Gevşeme Test Sonuçları.....	76
3.5.4. T_0+13 Yaşındaki Roket Yakıtının Gerinim Gevşeme Test Sonuçları.....	83
3.5.5. Çekme Test Sonuçlarının Yorumlanması.....	89
3.5.6. Gerinim Gevşeme Test Sonuçlarının Yorumlanması.....	92
3.5.7.Yanma Hızı Testi ve Değerlendirmesi.....	92
3.5.8.Tutuşma Sıcaklığı Testi ve Değerlendirmesi.....	92
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR.....	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Farklı yakıtlarla çalışan roketlerin oluşturduğu özgül itki ve itki değer aralıkları.....	4
2.2. Katı yakıtlı roketlerin genel görünüşü.....	6
2.3. Aerodinamik roket yönlendirme sistemlerinin her üçü bir roket üzerinde gösterilmiştir.....	11
2.4. Roket yönlendirme yöntemleri.....	11
2.5. Genel kimyasal roket yakıtları	12
2.6. Kompozit yakıt matris içeriği SEM görüntüsü	14
2.7. Sıvı yakıtlı roketlerin genel görünüşü	17
2.8. Hibrit yakıtla çalışan roket motoru	18
2.9. Nozuldan akan gazın basınç, hız ve sıcaklık değişimi.....	22
2.10. Gerilme.....	24
2.11. Sünme (Gerinim).....	24
2.12. Örnek bir gerinim sünme diyagramı	26
2.13. Makaslama kuvveti	27
2.14. Kesme gerinimi	27
2.15. Kompozit yakıtlı roket motorunda motor borusu katmanları	29
2.16. Astar, yakıt birleşimindeki istenmeyen durum	30
2.17. Astar, yakıt birleşimindeki istenmeyen durum	30
2.18. Yakıt çekirdeği içerisinde oluşmuş bir çatlak	31
2.19. Yakıt çekirdeği içerisinde oluşan çatlağın detaylı görünümü	31
2.20. Yakıtta oluşmuş bir çatlak.....	34
3.1. Kompozit yakıtlı roket motoru parçası	37
3.2. Dilimlenmiş kompozit yakıtlı roket motoru.....	37
3.3. Yakıt dilimlerinin kesit görünüşü	37
3.4. Numune bölgeleri işaretlenmiş roket motor dilimleri.....	38
3.5. Numune çıkartma çalışmaları safhaları.....	38
3.6. Test numunesi ebatları	39

3.7. Extensometreli Instron Cihazı.....	41
3.8. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	44
3.9. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	45
3.10. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	46
3.11. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	47
3.12. T_0+10 , -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	48
3.13. T_0+10 , -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	49
3.14. T_0+10 , -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	50
3.15. T_0+10 , -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	51
3.16. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	52
3.17. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	53
3.18. T_0+10 , 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	54
3.19. T_0+10 , -20 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	55
3.20. T_0+10 , -40 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	56
3.21. T_0+10 , -55 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	57
3.22. T_0+10 , -65 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	58
3.23. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	60
3.24. T_0+13 , 0 C° Sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	61
3.25. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	62
3.26. T_0+13 , -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	63
3.27. T_0+13 , -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	64
3.28. T_0+13 , -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	65
3.29. T_0+13 , -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	66
3.30. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	67
3.31. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	68
3.32. T_0+13 , 35 C° Sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	69
3.33. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği.....	70
3.34. T_0+13 , -20 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	71
3.35. T_0+13 , -40 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	72
3.36. T_0+13 , -55 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	73
3.37. T_0+13 , -65 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği	74
3.38. $T+10$, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	76
3.39. $T+10$, 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	77

3.40. T+10, 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	78
3.41. T+10, -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	79
3.42. T+10, -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	80
3.43. T+10, -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	81
3.44. T+10, -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	82
3.45. T _o +13, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	83
3.46. T _o +13, 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	84
3.47. T _o +13, 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği.....	85
3.48. T _o +13, -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	86
3.49. T _o +13, -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	87
3.50. T _o +13, -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	88
3.51. T _o +13, -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Bazı önemli patlayıcıların özellikleri ve kullanım yerleri.....	9
2.2. Yaşlanma sırasında yakıtın bozunmasını etkileyen faktörler	33
3.1. Tek eksenli çekme testi numune dağılımı.....	39
3.2. Gerilim gevşeme testi numune dağılımı	40
3.3. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	44
3.4. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	45
3.5. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	46
3.6. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	47
3.7. T_0+10 , -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	48
3.8. T_0+10 , -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	49
3.9. T_0+10 , -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	50
3.10. T_0+10 , -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	51
3.11. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	52
3.12. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	53
3.13. T_0+10 , 35C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	54
3.14. T_0+10 , -20C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	55
3.15. T_0+10 , -40C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	56
3.16. T_0+10 , -55C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	57
3.17. T_0+10 , -65C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	58
3.18. T_0+10 , 5 mm/d çekme hızı test sonuçları.....	59
3.19. T_0+10 , 50 mm/d çekme hızı test sonuçları.....	59
3.20. T_0+10 , 500 mm/d çekme hızı test sonuçları.....	59
3.21. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	60
3.22. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	61
3.23. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	62
3.24. T_0+13 , -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	63
3.25. T_0+13 , -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	64
3.26. T_0+13 , -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	65
3.27. T_0+13 , -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	66
3.28. T_0+13 , 0 C°Sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	67

3.29. T ₀ +13, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	68
3.30. T ₀ +13, 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	69
3.31. T ₀ +13, 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	70
3.32. T ₀ +13, -20 C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	71
3.33. T ₀ +13, -40 C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	72
3.34. T ₀ +13, -55 C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	73
3.35. T ₀ +13, -65 C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri	74
3.36. T ₀ +13, 5 mm/d çekme hızı test sonuçları	75
3.37. T ₀ +13, 50 mm/d çekme hızı test sonuçları	75
3.38. T ₀ +13, 500 mm/d çekme hızı test sonuçları	75
3.39. 71C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	76
3.40. 35C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	77
3.41. 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	78
3.42. -20C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	79
3.43. -40C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	80
3.44. -55C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	81
3.45. -65C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	82
3.46. 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	83
3.47. 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	84
3.48. 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	85
3.49. -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	86
3.50. -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	87
3.51. -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	88
3.52. -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları	89
3.53. Yanma hızı test sonuçları	92
3.54. Tutuşma sıcaklığı test sonuçları	93

SİMGELER DİZİNİ

F	Roket itki kuvveti (N)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
v_e	Nozul gaz çıkış hızı (m/s)
P_e	Egzoz çıkış basıncı (MPa)
P_a	Ortam basıncı (MPa)
A_b	Yakıt çekirdeği yanma yüzey alanı (m ²)
A_e	Nozul çıkış kesiti (m ²)
A_t	Nozul boğaz kesiti (m ²)
P_c	Yanma oda basıncı (MPa)
K	Özgöl ısı oranı (Birimsiz)
I_t	Toplam itki (N.s)
I_{sp}	Özgöl itki (s)
g_0	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
$\dot{w}$	Anlık gaz akış ağırlığı (kg.m/s ³)
R	Gaz sabiti (kJ/kg.K)
T_g	Maksimum gaz sıcaklığı (K)
M_g	Yakıtın moleküler ağırlığı (kg/kmol)
D	Katı yakıt çapı (m)
E	Elastisite modülü (N/m ²)
ε	Elastik yüzde uzama miktarı (Birimsiz)
σ_m	Maksimum gerilme (MPa)
σ_r	Kopma gerilmesi (MPa)
τ	Kayma gerilmesi (MPa)
L_0	Yakıt numunesi ilk boyu(m)

KISALTMALAR

DB	Çift Bazlı Roket Yakıtı
SB	Tek Bazlı Roket Yakıtı
CMDB	Kompozite Modifiye Edilmiş Çift Bazlı RoketYakıtı
NC	Nitroselüloz
NG	Nitrogliserin
SCUD	Sıvı yakıtlı balistik füze (Sovyetler Birliği yapımı)
SEM	Taramalı Elecron Mikroskobu



1.GİRİŞ

Günümüz savunma ve uzay sanayinde oldukça önemli yer tutan roket motoru geliştirme ve üretim çalışmaları, yüzyıla yaklaşan modern kullanım ömürlerine rağmen özellikle son dönem teknolojik gelişmeleri ile birlikte, ülkelerin birbirlerine üstünlük kurmak için çaba sarf ettikleri, her geçen gün gelişim gösteren bir alandır.

Özellikle İkinci Dünya Savaşı zamanında birbirlerine karşı kesin bir zafer kazanmak isteyen devletler, azalan nüfuslarını korumaya yönelik etkili bir silah arayışı sonucunda roket teknolojisini hızla geliştirmişlerdir. Bu hedeflerle özellikle Alman bilim adamları roket çalışmalarında sınırları geliştirerek, çok uzak mesafelere üzerlerindeki ağır yükleri taşıyabilen roketler tasarlamış ve savaşın gidişatını şekillendirmek istemişlerdir.

Alman bilim adamlarının hayal gücünü zorlayan tasarımları savaş esnasında vücut bulamamıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrası Soğuk Savaş Döneminde, ABD ve Sovyetler Birliği tarafından Alman bilim adamlarının devşirilmesi, yeryüzündeki gerilimi uzaya taşıyarak, roket teknolojisinin aya ulaşması ile sonuçlanmıştır.

Uzaya çıkmak için yapılan bayrak yarışlarının ağır ekonomik yükü ve modern silah sistemleri ile herhangi bir savaşa girmeden hasım devletleri caydırabilecek nitelikte silahların geliştirilmesiyle, roket teknolojisindeki çalışmalar yavaşlamaya başlamıştır. Ancak, üretim metodolojisindeki iyileştirmeler ve teknolojik gelişmelerin sadece süper güçlerin değil, dünyada söz sahibi olmak isteyen ve hasımlarına uzaktan göz dağı vermek isteyen diğer ülkelerinde yatırımları ile özellikle son 20 senede tekrar atılım yapmıştır.

Bu yaşanan süreçte izleyici ve süper güçlerin müsaadesi dahilinde eski teknoloji roketlerin kullanıcısı olarak uzun süre geri planda kalan ülkemizde ise son dönemde savunma sanayimizde yapılan atılımlarla, TÜBİTAK, üniversiteler, ROKETSAN gibi devlet destekli firmalar ve sivil işbirliklerin ARGE yatırımları ile hareketlenmeler

yaşanmaya başlamış, dünyada mevcut teknolojilerin benzerlerini ve üzerine eğildiğimiz bazı modellerde de en önde gelen teknolojileri üretilmeye başlanmıştır.

Roketlerde karşılaşılan başlıca problemlerden birisi, roketin emniyetli olarak depolanmasında karşılaşılan güçlüklerdir. Çeşitli yöntemlerle katı roket yakıtının ömür devri boyunca ortaya koyacağı davranışlar kestirilmeye çalışılmaktadır.

Özüpek (1997), yapmış olduğu doktora çalışması ile kompozit esaslı katı roket yakıtı teorik üç boyutlu geliştirmiş olduğu modelleme ile deneysel çalışma sonuçlarını araştırmıştır. Deneysel çalışmalar, deney numunesi için farklı sabit sıcaklıklarda ve çekme hızlarında gerçekleştirilerek yakıt numunelerinin mekanik davranışları belirlenmiş ve teorik modelleme sonuçları ile karşılaştırmalar yapmıştır [1].

Shekhar (2012), kompozit esaslı katı amonyum perklorat (AP), hydroxylterminatedpolybutadiene (HTPB) ve alüminyum (Al) ilaveli yakıt numunesinin raf ömrünü belirlemek amaçlı farklı yüklerde ve günlerce çekme yükü uygulaması ile yakıtın mekanik davranışını belirleme araştırmasını yapmıştır [2].

Bose ve Pandey, (2012), yapmış oldukları çalışmada beş adet kompozit esaslı yakıt numunesinin viskoelastik davranışlarını 5 mm/d, 50 mm/d ve 500 mm/d sabit hızlarda incelemişlerdir. İncelemiş oldukları kompozit esaslı yakıt numunelerinin omuzdan atılan roketlerde ve platformdan fırlatılan roketlere de kullanılabilirliğini mekanik davranış testleri ile belirlemişlerdir [3].

Zalewski ve Wolszakiewicz (2011), homojen çift bazlı (DB) katı roket yakıtının farklı sıcaklık ve çekme hızlarında mekanik davranışlarını araştırmışlardır [4].

Ülkece mevcudiyetimizi hasım devletlerle yüz yüze gelmeden sürdürmeye çalışmak, caydırıcılığımızı artırmak ve topraklarımıza karşı yapılabilecek saldırıları en uzakta bertaraf etmek için gerek duyduğumuz, yatırım yapılması gereken teknolojilerin başında gelmekte olan roket teknolojileri içerisindeki parametrelerden en kontrol edilmesi zor unsurlardan biri olan, kompozit esaslı katı roket yakıtı mekanik özelliklerinin araştırılması ve değerlendirilmesi maksatlı yapılan bu çalışma ile teorik

olarak bilinen yaşlanmaya bağlı mekanik özelliklerdeki gerilemelerin gözlemlenmesi ve yorumlanması hedeflenmiştir.

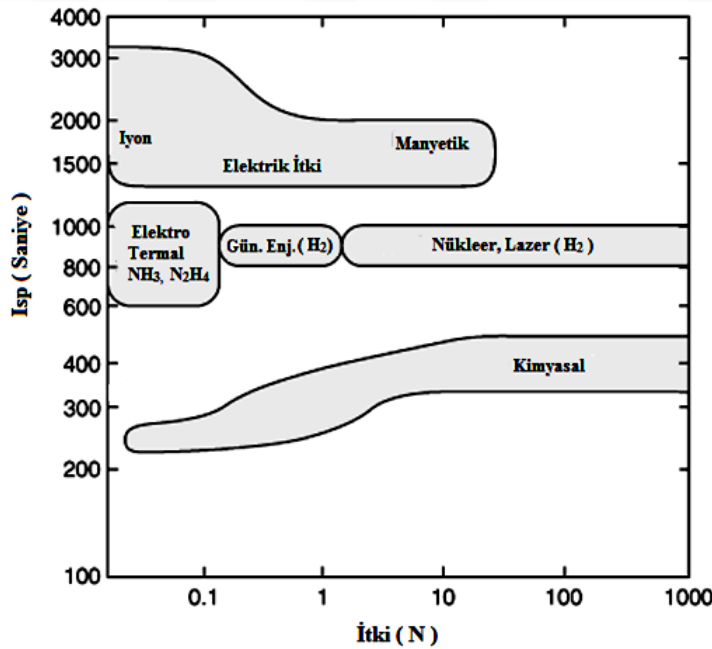


2.ROKET KAVRAMI VE TEMEL BİLGİLER

2.1.Roket

Roket,yüksek enerjili yakıt kullanım etkisinde itki oluşturabilen bir motora verilen genel isimdir. Roket motoru yanma odasında meydana gelen reaksiyon sonucunda açığa çıkan yüksek basınçlı gazların,tasarlanarak daraltılmış bir çıkıştan kontrollü olarak salınması ile istenilen itki meydana getirilir.Enerji dönüştürme aletlerinin ilke olarak en basitini roketler oluşturmaktadır. İtme, motorda kullanılan yakıtın termokimyasal enerjisini kinetik enerjiye çevirme ile sağlanır. Yakıtın tepkimeye sokulması ile oluşan gazlar nozuldan hızlandırılarak atılır ve itme elde edilir[5].

Yapılan çalışmada, günümüzde oldukça sık kullanılan kompozit esaslı kimyasal enerjili katı roket yakıtı kullanılmıştır. Kimyasal enerjili roketler dışında nükleer ve elektrik enerjisini kullanabilen roketlerde mevcuttur. Çeşitli yakıt tiplerinin özgül itki değerleri Şekil 2.1’de yer almaktadır.



Şekil 2.1. Farklı yakıtlarla çalışan roketlerin oluşturduğu özgül itki ve itki değer aralıkları [6]

Roketlerin en önemli özelliği, uzay teknolojilerinde rahatlıkla kullanılmalarına da olanak sağlayan, yanma için gerekli yakıtı ve yakıcıyı üzerlerinde taşıyabilmeleridir. Bu sayede özellikle oksijensiz ortamlarda tepkimenin başlatılması ve sürdürülmesi için ihtiyaç duyulan oksitleyici ihtiyacı ortadan kaldırılmış olmaktadır.

2.2.Roketlerin Tarihçesi

12. yüzyılda barutun bir dış kap içinde sarılarak kullanılması ile birlikte, basit roket mantığı ile çalışan sistemler, özellikle deniz savaşlarında yangın çıkarma maksatlı kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan roket tasarımlarının temelleri ise 19. yüzyıl sonlarında ortaya atılmış ve 20. yüzyıl ilk yarısında özellikle İkinci Dünya Savaşı yıllarında, Alman bilim adamlarının çalışmaları ile üst seviyelere çıkmıştır.

Roketlerde en önemli özellik olan nozul tasarımları ile roketin ivmelendirilmesi ve uçuşuna kararlılık kazandırılmasına yönelik çalışmalar 1845-1855 yılları arasında William HOLE tarafından denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. 20. yüzyıl başlarında Amerikalı fizikçi Robert Hutehings Goddard “Çok Uzak Mesafelere Ulaşma Metodu” adlı makalesi ile çalışmaların bilimsel temelini oluşturmuştur[7].

Birinci Dünya Savaşı zamanında roketler, savunma maksatlı olarak, düşman gözetleme vasıtaları olarak kullanılan balonları düşürmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yıllarda Almanlar, farklı patlayıcıları hedefe sevk ederek uzak mesafeden üstünlük kurma amacı ile tahrip dolgulu roketleri tasarlamaya başlamış ve seri üretime geçilmiştir.

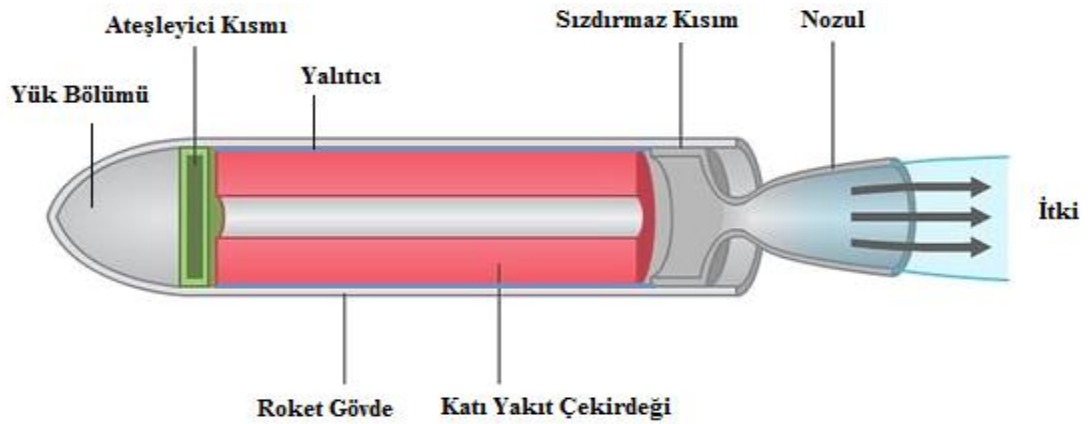
İkinci Dünya Savaşı yıllarında özellikle zırh koruması altında ilerleyen araçları tahrip etmek ve koruganlara karşı etkili olmak amacıyla küçük çaplı roketler hemen hemen savaşan tüm devletler tarafından kullanılmıştır. Bu yıllarda Almanlar tarafından, çok uzak mesafelerde baskın tarzı saldırılar yapmak amacıyla,sıvı yakıt kullanılarak farklı modelde roketler geliştirilmeye çalışılmıştır. İkinci Dünya Savaşında Almanların yenilmesi ve teknolojilerinin galip devletlerce ele geçirilmesi

sonucunda, Alman roketleri üzerinde yapılan tersine mühendislik çalışmaları ile SSCB ve ABD, özellikle uzay çalışmalarında girdikleri rekabet sonucunda çok güçlü roketler ortaya çıkartmışlardır. Bu dönemde Almanya A-1, A-2, A-3, A-5, A-4, V-2 ve U-2 isimli roketleri, ABD, Alman üretimi A-4 roketlerinden yola çıkarak A-4, Viking, Bumber, Jüpiter C, X-17, Farside roketleri ve uzay çalışmaları kapsamında Scout, Eksplorer, Son Marco (Ther-Agena-D), Agene-D, Alouette, DeHA, TAD, Atlas D, Centour, Titan II, Titan III-C, Satürn I, Pegasus I, Apollo serisi, Satürn IB, Satürn II, Satürn IV B roketleri, SSCB ele geçirdiği V-2 roketlerinden yola çıkarak V-2, Sputnik-1, T-2, Vostok, Vostok T-3 roketlerini geliştirmişlerdir[8].

Günümüzde ise roket teknolojisi ile ilgili çalışmalar tamamen maliyeti düşürmeye yönelik olarak şekillenmekte ve özellikle Space X firması tekrar tekrar kullanılabilir roket denemeleri yapmaktadır.

2.3.Roket Parçaları

Bir roketi oluşturan başlıca ana parçalar Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Katı yakıtlı roketlerin genel görünüşü[9]

2.3.1.Gövde

Roketi oluşturan sistemlerin dış ortamdan izole edilerek taşındıkları ve uçuş için gerekli balistik yörüngede dış etkilere karşı sistemi koruyan, en önemli görev olarak roket ana parçalarını bir kompozisyonda birbirlerine bağlı olarak tutan kısmı oluşturmaktadır.

Katı yakıtlı roketlerde şekillendirilmiş yakıtın sabitlendiği, yalıtım ve astar katmanları ile yakıta bağlı olan ve yanma odasının sınırlarını belirleyen kısımdır.

Özellikle savunma sanayinde harp zamanı kullanılmak üzere hazırlanan roketlerin depolama şartlarını ve depolama ömürlerini belirleyen parçadır.

2.3.2.Nozul

Roket yakıtının yanması ile elde edilen yüksek basınçlı tepkime ürünü gazların tasarımsal olarak istenen itkiyi elde etmesi maksadıyla daralan ve genişleyen bir yapıya sahip olan aşındırıcı etkilere karşı oldukça dayanıklı olarak tasarlanmak zorunda olan, enerji dönüşümünden maksimum verimi elde etmek üzere tasarlanmış roketin en kritik parçalarından biridir. Lüle olarak da adlandırılmaktadır.

2.3.3.Yakıt Çekirdeği

Roket sisteminden istenen işi yapmak üzere sistem içerisinde depolanan, kullanmak istenildiği ana kadar özelliğini kaybetmeyecek şekilde tasarlanmış, yüksek verimli bir şekilde yanma sağlayabilecek ve yanıcı ile yakıcının bir arada bulunduğu enerjetik karışımdır. İyi bir yakıt elde etmek için patlayıcı kimyası ve patlayıcıların özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

2.3.3.1.Patlayıcılar

Uygun bir şekilde reaksiyon başlatıldığında çok hızlı bir şekilde enerji ve yoğun miktarda gaz üreten kimyasal birleşimlerdir. Patlayıcılar birkaç istisna dışında oksijen balansları yüksek organik bileşenlerdir[10]. Bu kimyasal maddelerin bulunduğu çeperin daraltılması ile ürettikleri basınç, dolayısıyla ortaya çıkan mekanik etki daha da fazlalaştırılabilir.

Patlayıcılar harmanlanarak roket yakıtı için gerekli enerji seviyesi yükseltilebilmektedir. İyi bir yüksek enerjili roket yakıtı elde etmek için, bu grupta yer alan patlayıcı maddelerinin kullanımı ile yakıtın enerji seviyesinin artırılması mümkün olabilmektedir.

Kimyasal patlayıcılar, zayıf ve kuvvetli patlayıcılar olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.3.3.1.1.Zayıf Patlayıcılar

Reaksiyon oldukça yavaş ve kontrol edilebilir seviyede karışımın yüzeyinde gerçekleşir. Hacim ve basınç parametreleri ile ayarlanarak elde edilmek istenene etki kontrollü bir şekilde sağlanabilmektedir.

2.3.3.1.2.Kuvvetli Patlayıcılar

Zayıf patlayıcılarla arasındaki fark, kuvvetli patlayıcılarda birim kütle çok daha kısa sürede yanmaktadır[10]. Kendi içerisinde birincil ve ikincil patlayıcılar olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Birincil Patlayıcılar; küçük bir etki ile reaksiyonu kendiliğinden başlatabilecek derecede hassas olan kimyasal patlayıcılardır. Genellikle ısı, ışık ve şok etkisi ile tetikleyici olarak reaksiyonu başlatmak üzere çok az miktarda kullanılırlar. Kurşun azotür, civa fülminat, diazo dinitro fenol, kurşun stefenat en sık kullanılan örnekleridir.

İkincil Patlayıcılar; dış etkilere nispeten duyarsızdırlar. Ancak birincil patlayıcı kullanılarak tetiklendiklerinde oldukça şiddetli şekilde reaksiyona girerek patlama meydana getirirler. Yüksek enerji barındırmalarına rağmen uygun hacim ve tetiklemeye maruz bırakılmazlarsa şiddetsiz bir reaksiyonla yanarlar. Bu gruba giren patlayıcılardan yaygın olanları Çizelge 2.1.de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı önemli patlayıcıların özellikleri ve kullanım yerleri [10]

Patlayıcı İsmi	Darbe Hassasiyeti *	Sürtünme Sarkacı **	Patlama Hızı (m/sn)	Kullanım Yeri
Kurşun Azotür	13 cm	100	5100	Kapsül eczası, Detanatör
Civa fulminat	5 cm	100	5400	
Diazo dinitro fenol	1 cm	100	6900	
Kurşun stefenat	8 cm	100	5200	Aleve hassas Detanatör
PETN	17 cm	5	8300	Buster, İnfilaklı fitil
RDX	33 cm	20	8300	Buster, Detanötör, Ana dolgu patlayıcı
HMX	31 cm	20	8320	
Tetrit	26 cm	0	7800	
COMP A (%99 RDX)	26 cm	0	8000	Buster
TNT	100 cm	0	5200-6900	Tahrip kalıbı, Ana dolgu patlayıcı
COMP B (%60 RDX, %39 TNT)	75 cm	0	7800	Ana dolgu patlayıcı, Mayın, El bombası
COMP C 3 (%77 RDX, %23 plastifian)	100 cm	0	7625	Tahrip malzemeleri
Amonyum pikrat	100 cm	0	7110	Ana dolgu

* Picatinny Arsenal Test cihazında 2 kg ağırlık ile patlama yüksekliği,

** Sürtünme Sarkacında 100 adet testte ateşlenen miktar.

2.3.4.Yük

Roket sistemlerinin tasarlanma maksadını belirleyen, sistemin varoluş amacıdır. Uzay çalışmalarında bazen uydu, bazen uzay istasyonuna götürülen malzemeler veya uzay mekiğinin kendisi olabileceği gibi, savunma sanayinde ise hedefe ulaştırılacak harp maddeleri (patlayıcı, kimyasal ajanlar, nükleer başlık, propaganda malzemesi vb.) olabilir. Bir yerden bir yere ulaştırılmak istenen yükün hassasiyeti ve maruz kalabileceği etkilere dayanımı, roket sisteminin diğer tüm alt bileşenlerinin tasarımlarını etkileyebilmektedir.

2.3.5.Ateşleyici

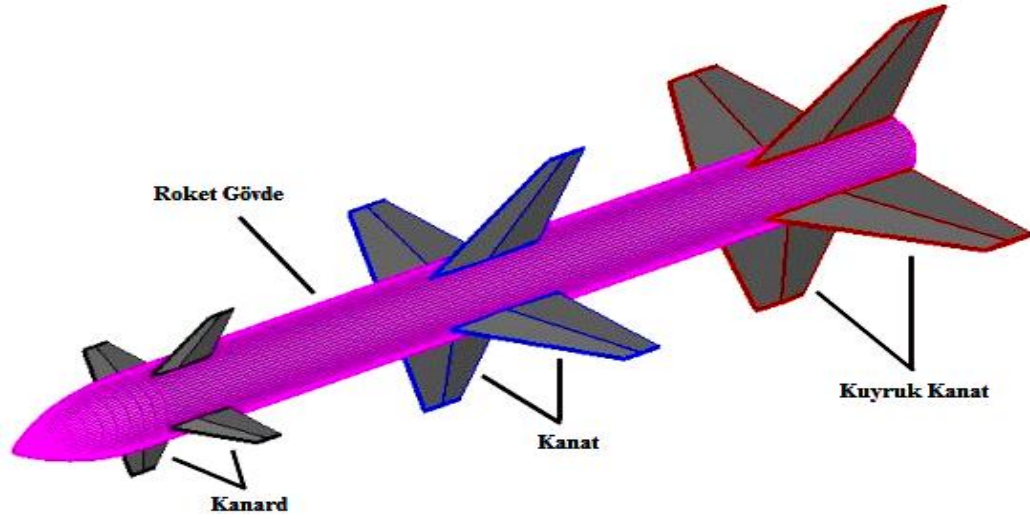
Yakıt çekirdeğinin istenen yer ve zamanda herhangi bir yöntemle ateşlenmesini sağlamak üzere tasarlanmış parçalardır. Katı yakıtlı roketlerin ateşlemesinde Pyrotechnic, Pyrogen, Hipergolik yakıt olmak üzere üç farklı ateşleyici tipi kullanılmaktadır [11].

Her üç ateşleyici çeşidinde de ateşleyici içerisinden geçen bir elektrik devresinin tetiklenmesi ile ateşleyici aktive edilmekte ve ateşleyicinin enerjilenmesi ile ortaya çıkan reaksiyon sonucu esas roket yakıtı tepkimeye sokulmaktadır.

2.3.6.Yönlendirme Sistemleri (Kanat Grubu)

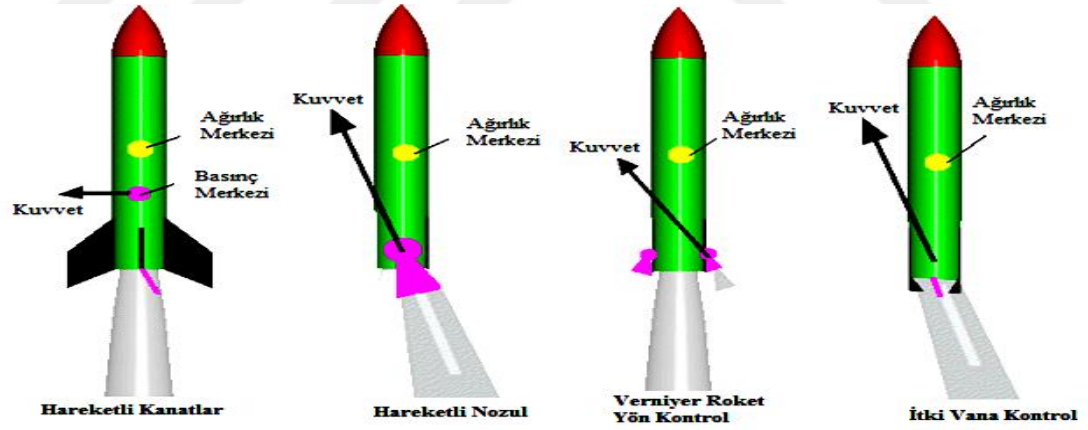
Özellikle uzak mesafelere gidebilen, güdümlü olarak hareket eden sistemlerde uçuşun kararlı olmasını ve istenen yönlendirmelerin yapılabilmesini sağlamak için kullanılan denge elemanlarıdır. Roket üzerinde konumlandırıldıkları bölgeye göre isimlendirilirler.

Roket üzerinde sabit konumlandırılabilirler gibi farklı kontrol şekilleri ile anlık olarak hareketlendirilebilen çeşitleri de kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Aerodinamik roket yönlendirme sistemlerinin her üçü bir roket üzerinde gösterilmiştir [12]

Kanatlara ilave olarak, itki vektör kontrol sistemleri yardımı ile de roketin yörüngesi çeşitli yöntemlerle düzenlenebilmektedir.



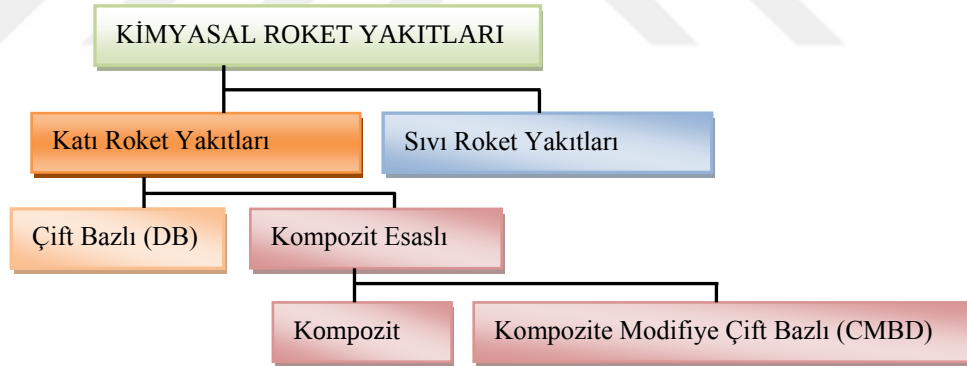
Şekil 2.4. Roket yönlendirme yöntemleri[13]

2.4.Roket Motorlarının Sınıflandırılması

Literatürde yer alan roket motorları, kullanım amacı, yakıt nevi ve yönlendirme sistemlerine göre farklı gruplandırmalara tabi tutulabilmektedir. Bu sınıflandırma daha çok tasarımdan beklenen fayda veya üretim metotlarının benzerliklerine göre oluşturulmaktadır. Askeri maksatlar için genellikle katı yakıtlı roketler tercih edilirken, uzay çalışmalarında uzak mesafelere daha verimli ulaşma sağlayabilen sıvı yakıtlı roketler tercih sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. Roketler hedeflerine, yakıtının fiziksel haline ve kontrol sistemlerine göre sınıflandırılabilirler[14].

2.4.1.Yakıt Cinsine Göre Roketler

Roketler kullanılan yakıtın fiziksel haline göre, katı ve sıvı yakıtlı roketler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Katı ve sıvı yakıtlı roketlere ilave olarak bu iki yakıt türünün birlikte kullanıldığı hibrit (katı-sıvı) yakıtlı roketlerde mevcuttur. Cinslerine göre yakıtlar Şekil 2.5'te yer almaktadır.



Şekil 2.5. Genel kimyasal roket yakıtları

2.4.1.1.Katı Yakıtlı Roketler

Roket sistemini bir yerden başka bir yere sevk etmek için gerekli enerjiyi üretecek yakıcı ve yanıcı maddelerin yanma düzenleyici katkı maddeleri ile birlikte katı bir halde motor gövdesinde bulunduğu roketlerdir. Katı yakıtlı roketler, nispeten ucuz olmaları, uzun süre emniyetli bir şekilde depolanabilmeleri ve çevresel etkilere karşı

dayanıklı olmaları avantajlarıyla, özellikle savunma amaçlı oldukça yoğun kullanılmaktadır.

Katı yakıtlı roket motorları, metal yakıt ve oksitleyici karışımlarından ya da ekzotermik bir bozunma sağlayacak bir yakıttan oluşur. Kompleks motor parçalarına sahip olmadıkları için basit yapıdadırlar. Dizaynları gelişmiş bir kimyaya ve güçlü bir kaplama yapısına dayanır. Diğer yakıt çeşitlerine göre daha hızlı ateşlenir ve hızlıca ivme kazanırlar[15].

Tüm bu avantajların yanında katı yakıtların bazı dezavantajları da vardır. Neredeyse tüm roket borusunun bir yanma odası olması ve yüksek yanma basıncı oluşması nedeniyle, yüksek kütle oranında bir yakıt üretmek zordur. Roket ateşlendikten sonra kontrollü bir durdurma yapılamaz, bunun yanı sıra yakıtta oluşan bir hataya bağlı olarak yakıtın tamamı tükenmeden önce kesintiye uğrayıp hedefe varmadan durabilirler. Ayrıca tek parça halinde roket motoru yakıtı dökmek zor bir işlemdir. Döküm esnasında çekirdekte meydana gelebilecek herhangi bir hata, yakıt yanma yüzeyinde artış ile kaçak basınç artışlarına sebep olabilir [16].

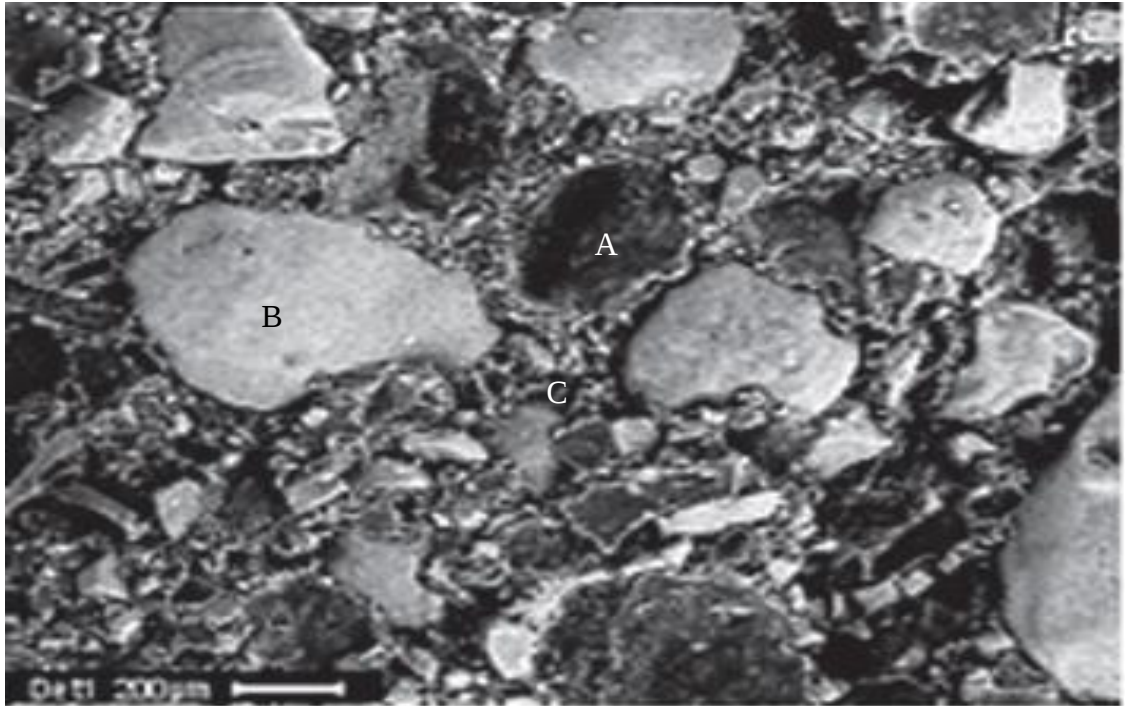
Roket Motorları için iyi balistik ve mekanik özelliklere sahip yakıt geliştirmek roket teknolojilerinin önemli konularındandır. Yakıtın motor içerisinde 20 yıl civarında hizmet verebilecek şekilde bozunmadan kalabilmesi beklenir [17].

Katı yakıtlı roketlerde heterojen yapıda olan kompozit yakıtlı roketler ve homojen yapıda olan çift bazlı roketler olarak ayrılırlar.

2.4.1.1.1. Kompozit Yakıtlı Roketler

Bu yakıt kompozisyonu içerisinde yanıcı, oksitleyici ve bağlayıcı matris ile birlikte yanma hızını düzenleyen maddeler (plastikleştirici, katalizör) farklı boyutlarda heterojen bir dağılımla yer almaktadır.

Yanıcı olarak genellikle metal tozları kullanılmaktadır. Metal yakıt olarak sıklıkla Alüminyum, Boron ve Magnezyum kullanılır. Metal yakıtlar yanma süresince oksitlerini oluşturarak büyük miktarda enerji yayarlar [18]. Yakıt bloğunda meydana gelen yanmayı şiddetlendirirken, düzenli bir yanma sağlanır. Yakıt karışımının mekanik özelliklerine olumlu yönde katkı sağlarlar. Mümkün olduğunca homojen bir yapıya sahip olmak için küçültülmüş tanecik yapıları yer almalıdır, bu aynı zamanda yanma hızını da artırmaktadır. Yanıcı metallerin kompozit yakıt matrisi içerisinde görünümü Şekil 2.6’da “A” harfi ile belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Kompozit yakıt matris içeriği SEM görüntüsü

Oksitleyici olarak ise Şekil 2.6’da “B” harfi ile belirtilmiş, amonyum perklorat, amonyum nitrat ya da potasyum perklorat gibi tuzlar kullanılır. Oksitleyici, yanma boyunca yüksek enerjili metal yakıtı ve bağlayıcıyı yakmak için ortama gereken oksijeni sağlar. Katı yakıt sisteminin balistik özelliklerini etkileyen en önemli özellik olan yakıtın yanma hızı, büyük ölçüde oksitleyicinin parçacık şekli ve büyüklüğü gibi karakteristik özelliklerine bağlıdır [19]. Küçük parçacıkların daha büyük boyuttaki partiküllere göre yanma hızı üzerinde daha olumlu etkisi vardır [20].

Şekil 2.6’da “C” harfi ile belirtilmiş bağlayıcının ana görevi, yanıcı ve yakıcı esaslı katı maddeleri taşımaktır. Bunun yanı sıra yanma esnasında ortama karbon ve hidrojen sağlayarak enerji artırımında bulunur ve önemli ölçüde yakıtın mekanik özelliklerine etkir. Çapraz bağlı polimerik yapıdaki bir bağlayıcı tüm bileşenleri bir arada tutar. Polimerik bağlayıcı, polyester, epoksi, sentetik kauçuk, polivinil, polietilen, poliüretan, polisitiren ve polibütadien olabilir. Kompozit yakıtlarda bağlayıcı olarak genellikle hidroksil uç gruplu polibütadien (HTPB) kullanılır. Yakıtın şekillendirilmesinde ve mekanik özelliklerinin belirginleşmesinde önemlidir. Polibütadien diğer bağlayıcılara nazaran daha yüksek enerjili olmasının yanı sıra daha iyi mekanik özellikler vermektedir[14]. Polybütadien polimerinin ve kopolimer türevlerinin en büyük özelliği yüksek sıcaklık aralıklarında çalışılabilmesidir. Sıfırın altında 70 °C’ye yakın ya da daha düşük camsı geçiş sıcaklıklarına sahiptirler. Bu yakıtın gerilme periyodu boyunca mekanik davranışlarının farklı sıcaklıklara bağlı olması nedeniyle önemlidir[19]. Böylece düzenli yapıya istenilen mekanik özellikleri kazandırmak daha kolaylaşmış olur.

Katalizörler yanma hızını kontrol edebilmek için kullanılır. Yanma hızı katalizörü oksitleyicinin tepkimeye girmesini hızlandırarak yanmayı şiddetlendirir. Katalizör olarak kullanılan maddeler, yakıtın homojenliğine en çok zarar veren bileşenlerdir. Yakıt hamuru içinde çevresel koşullara bağlı olarak yer değiştirme eğilimindedirler. Bu duruma bağlı olarak yakıtın kararsızlaşmasına sebep olabilmekte ve yakıt performansını olumsuz etkilemektedir.

Bağlayıcı ajan, bağlayıcı ve oksitleyici arasında bir etkileşim yüzeyi oluşturarak oksitleyicinin yakıt matrisine yapışmasını sağlar. Bu tarz yakıtların içerisindeki safsızlıklar bile yakıtın son halindeki özelliklerini etkileyebilir [21]. Yakıtların gerinim davranışları oksitleyici ve bağlayıcı arasındaki etkileşimlere bağlıdır. Eğer bağlayıcı oksitleyiciye tam olarak tutunamazsa ara yüzeylerde oluşan boşluklar mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilir. Bu nedenle bağlayıcı ajan mekanik özelliklerin geliştirilmesini sağlar [18].

HTPB’nin Katı Yakıtlarda Kullanılması; HTPB polimerlerinde polimer zincirlerinin ucuna hidroksil grupları bağlanmıştır. Hidroksil grupları yüksek reaktivite

özelliklerinden dolayı çok hızlı kürleşebilirler. Hidroksil uçlarının izosiyanatlarla bağlanması sonucunda üretan elastomer yapı elde edilir. Bu nedenle poliüretan elastomerlerin sahip olduğu yüksek sıcaklıklarda çekme ve yırtılma dayanıklılığı, aşınma direnci ve yağ direnci gibi mekanik özelliklere sahiptirler. Ayrıca düşük nem geçirgenliği, elektrik yalıtkanlığı ve düşük camsı geçiş sıcaklığı gibi özelliklerinden dolayı da roket yakıtları için öncelikle tercih edilen polimerlerdir. HTPB, Alüminyum ve AP ile çok iyi yapışarak, iyi mekanik özellikler göstermektedir. Bu bileşenler üstün bir matris oluştururlar. Bu nedenle Al/AP/HTPB içeren kompozit malzemeler, yanma hızı kontrolü, sabit yanma, güvenli depolama, üstün fiziksel özelliklerinden dolayı katı yakıtlarda tercih edilir sistemler olmuştur [22].

2.4.1.1.2.Çiftbazlı Yakıtlı Roketler

Nitrolanmış ürünlerinin bir arada homojen karışım oluşturularak elde edilen yakıt türünün kullanıldığı roketlerdir. Yakıtı bir arada tutmak için kendisinde yanıcı olarak katkı sağlayan nitroselüloz ile birlikte esas enerjiyi ortaya çıkaran nitrogliserin veya nitroguanidin ihtiva eden yakıttır. Kompozit yakıtı göre daha sert, kırılğan ve hassas bir yapıda olmakla birlikte, ortaya çıkan yanma ürünlerinin kompozit yakıtı göre görünmez/dumansız oluşu, yüksek enerji ve yanma hızları, özellikle yakın mesafede bulunan düşmana yerimizin belli edilmek istenmediği durumlarda kullanılan silah sistemleri için idealdir.

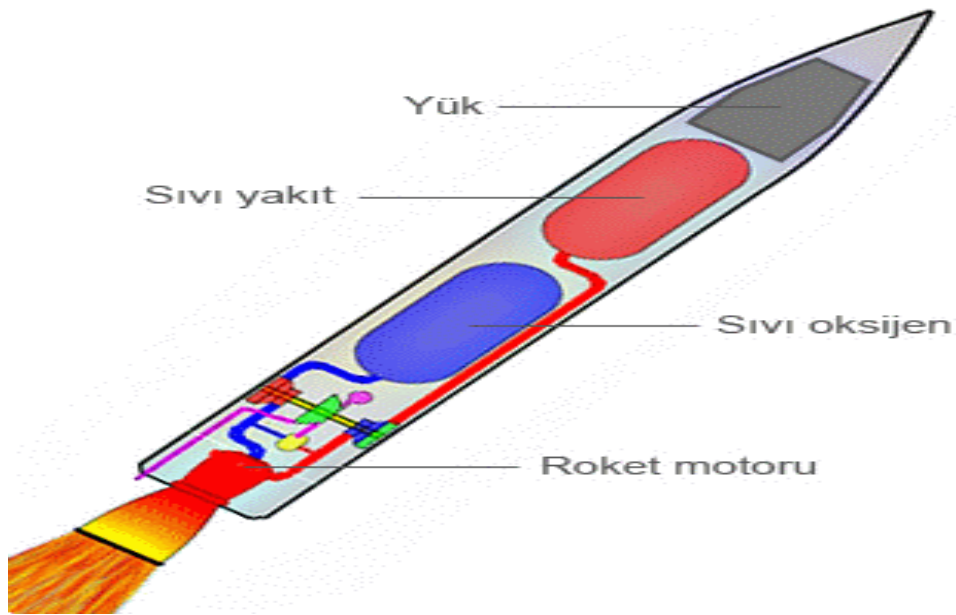
Çift Bazlı (DB) yakıtların homojen yapıda olmaları diğer yakıt türleri içerisinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Daha kararlı bir yakıt çekirdeği mekanik özelliklerin kontrol edilebilir halde sabit tutulması noktasında öne çıkmaktadır. Günümüz katı yakıt teknolojilerinde kompozit yakıt daha tercih edilebilir olmakla beraber, çiftbazlı yakıtın karakteristik bazı özellikleri de bu yakıtın göz ardı edilmeyeceğini ortaya koymaktadır.

2.4.1.1.3. CMDB Yakıtlı Roketler

Kompozite modifiye doublebase (CMDB) yakıtlı roketler, kompozit roket yakıtlarına yüksek performans sağlayan maddelerin homojen bir matriste konumlandırılması ile performansı ve mekanik özellikleri daha iyi, daha kararlı ve uzun ömürlü bir yakıt türü geliştirme çalışmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Son dönemde katı yakıt teknolojisinin üzerinde durulan konularının başında gelmektedir.

2.4.1.2.Sıvı Yakıtlı Roketler

Yakıt sistemlerinin temelini ve en verimli halini sıvı yakıtlar teşkil etmektedir. Yüksek itki oluşturabilmeleri, tasarlanan roket istenilen zamanda istenilen miktarda ikmal edilebilmeleri önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Yine roket içerisine eklenebilecek ilave parçalarla yanma odasına verilen yakıt miktarının kontrol edilebilir olması, uçuş parametrelerine göre yakıt tasarrufu yapma imkanı sağlayabilmektedir. Ancak bu yakıtların en özenli dezavantajı karmaşık yapı ve hesaplamaların kullanılması zorunluluğudur. Oldukça maliyetli çalışmalarla tasarlanan roket sistemleri genelde tek motor için ve tek göreve yönelik olarak uzay çalışmalarında kullanılmaktadır.

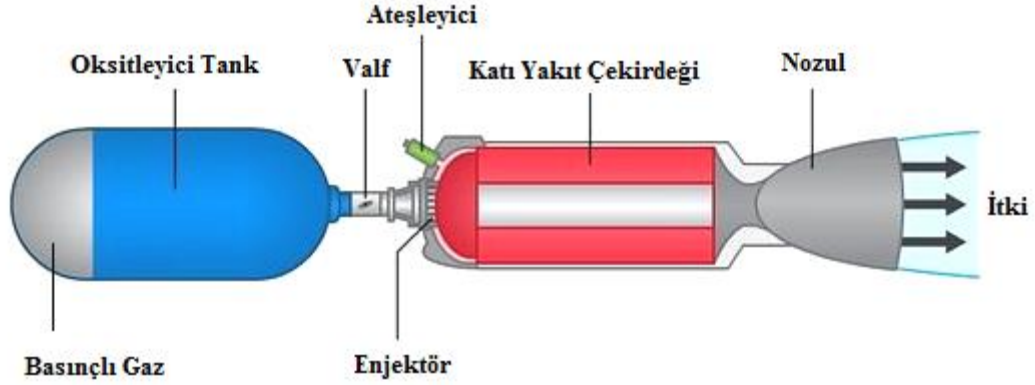


Şekil 2.7. Sıvı yakıtlı roketlerin genel görünüşü

Şekil 2.7’de genel görünüşü verilen sıvı yakıtlı bir roket motorunda yanıcı ve yakıcı sıvının gövde içerisinde farklı tanklarda bulunması, ateşleme ve uçuş esnasında ortaya çıkabilecek ısısal değişimlerin yakıt tanklarına tasarlanandan fazla yük yükleyerek sistemin başarısızlığa uğramasına sebep olabilmektedir. Bu durum geçmiş dönem uzay çalışmalarında birden fazla kez yaşanmış ve önemli maliyetler ortaya çıkardığı gibi yetişmiş insan gücü kayıplarına da sebep olmuştur.

2.4.1.3.Hibrit Roketler

Hibrit roket motorları genellikle, yanıcı katı yakıt çekirdeği yüzeyine sıvı oksitleyicinin tanktan kontrollü olarak verilmesi ile yanma esnasında yüksek basınçlı gaz üretim prensibine göre çalışan sistemlerdir. Bu motorlar istenildiğinde durdurulabilir ve tekrar çalıştırılabilir özelliğe sahiptirler. Hibrit yakıtlı motorlar, sıvı yakıtlı roket motorlarına yakın özgül itki ile çalışmaktadırlar ve sıvı yakıtlı roketlere göre daha güvenlidirler.



Şekil 2.8. Hibrit yakıtlı çalışan roket motoru[23]

Hibrit roketlerde Şekil 2.8’de görüldüğü gibi yakıcı ve yanıcının ayrı ayrı depolanması ve püskürtülen oksitleyicinin valf ve enjektör ile yanma odasına gönderilmesi, roketin kontrollü olarak çalışmasını sağlamaktadır.

2.4.2.Kullanım Maksadına Göre Roketler

Motor ilk hızlanmayı sağlıyorsa ilk hareket motoru, kazanılmış hızda roketi hedefe sevk ediyorsa sevk motoru denir. Tek motor her iki göreve yönelik olarak da tasarlanabileceği gibi, çok kademeli olarak da tasarlanabilir. Bu tasarımları genellikle büyük roketlerde yada uzay araçlarında görebiliriz. Her kademe motoru ayrı bir sistemdir, kendi yakıtını ve sevk sistemlerini taşırlar [18].

2.4.2.1. Savunma Roketleri

Roket sistemleri ilk olarak savunma ve saldırı maksatlı olarak harbe yönelik tasarlanmışlardır. Günümüzde de roket teknolojilerinin önemli bir bölümü halen savunma sanayi kapsamında kullanılmaktadır. Özellikle katı yakıt kullanımının uzun depolama ömürleri ve çevresel etkilere karşı dayanımları savunma sanayi için cazip olmaktadır.

Savunma sanayi kapsamında tasarlanan roketleri teknik özelliklerine göre yerden yere, yerden havaya, havadan yere, havadan havaya, tanksavar, gemi savar füzeleri olarak ayırabiliriz [24].

2.4.2.2.Uzay/Havacılık Roketleri

Roketlerin çok kritik bir rol üstlendiği alan ise kuşkusuz ki uzay çalışmalarıdır. Atmosferin aşılması, haberleşme uydularının dünya yörüngesine yerleştirilen uzay üstlerine ulaşımın sağlanması roket sistemlerinin aktif kullanımı ile olmaktadır. Uzayda belli bir mesafeye gidip geri dönebilen standart sistemler ile bahsettiğimiz ulaşım sağlanmaktadır.

Diğer taraftan uzayın bilinmez taraflarını keşif için tasarlanan sistemlerin sevkini sağlamak için roket sistemleri geliştirme çalışmaları aralıksız devam etmektedir. Bu aşamada alışık olduğumuz sistemler dışında neredeyse sonsuza yakın yakıt ihtiyacı

nedeniyle, nükleer ve güneş enerjisi kullanabilecek roket sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

2.5.Roket Performans Parametreleri

Roket motoru verimliliğini belirleyen hususlar aşağıda açıklanmıştır.

2.5.1.İtki

Bir roket için hareketin kaynağı nozuldan serbest bırakılan gazlarla sağlanan itmedir.

$$(P_e - P_a)A_e - D - M_R \cdot g - M_R \frac{d v_R}{dt} = -\dot{m}_f V_e \dots\dots\dots (2.1)$$

Denklem (2.1)'de;

D : havanın aerodinamik direncini

M_R : roketin kütlesini

$\dot{m}_f$: çıkan gazların kütle akış hızını

v_R : roketin hızını

V_e : çıkan gazların hızını

P_e : nozul çıkışı basıncını

P_a : çevre basıncını

A_e : nozul çıkışı alanını

g : yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

Eşitliği sadeleştirmek için (D) ve (g) ihmal edildiğinde Denklem (2.2) elde edilir.

$$(P_e - P_a)A_e + \dot{m}_f V_e = M_R \frac{d v_R}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

Denklem (2.2)'nin sol tarafı roket motorunun itkikuvveti olarak ifade edilir ve F sembolü ile gösterilerek denklem (2.3)'e ulaşılır [19].

$$F = \dot{m}_f V_e + (P_e - P_a)A_e \text{ itki denklemi} \dots\dots\dots (2.3)$$

Denklem (2.3)'de V_e nozuldan çıkan gaz hızını ifade etmektedir.

$$\dot{m}_f = \frac{d m_f}{dt} ; m \text{ kütlesinin kütleli akış hızını} \dots\dots\dots (2.4)$$

Denklem (2.3)'de yer alan $F = \underbrace{\dot{m}_f V_e}_{Fm} + \underbrace{(P_e - P_a) A_e}_{Fp}$ eşitliğinde;

$$Fm = \dot{m}_f V_e \dots\dots\dots (2.5)$$

Denklem (2.5) momentum itkisini,

$$Fp = (P_e - P_a) A_e \dots\dots\dots (2.6)$$

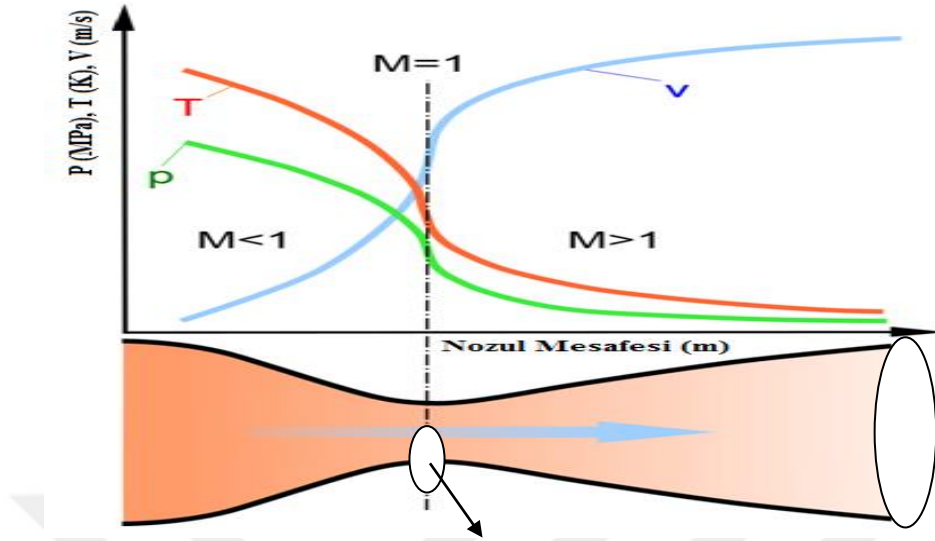
Denklem (2.6) ,ise basınç farkı itkisini ifade etmektedir.

Momentum itkisi çıkan gazların momentumundan meydana gelir. Momentum itkisinin büyük olabilmesi için çıkış hızının da büyük olması gerektiği Denklem (2.5) 'de görülmektedir.

Denklem (2.6) basınç farkı itkisi, nozul çıkışındaki basınç kuvvetinden meydana gelmektedir. Basınç itkisi negatif veya pozitif olarak değişebilmekle birlikte (P_e) , (P_a) 'ya yaklaştıkça (Fp) küçülür. $(P_e = P_a)$ olursa basınç farkı itkisi sıfıra eşitlenerek maksimum itki oluşur. Roketin itkisi Denklem 2.3'de görüldüğü gibi egzoz hızı ve kütle akış hızına bağlıdır. Kütle akış hızı arttıkça itki artar. İrtifa yükseldikçe (P_a) azalır ve buna bağlı olarak hız ve itkide artar.

Nozul çıkış alanı değiştikçe tasarımsal olarak (P_e) 'de değişecek ve bu da itkiyi belirleyecektir. Roketler genellikle büyük nozul alanı oranına sahiptir. Bu oran nozulun çıkış alanının (A_e) nozul boğaz alanı (A_t) oranına eşittir.

Yanma sonucu açığa çıkan gazların basınç, hız, sıcaklık değişimleri ile ilgili bir grafik Şekil 2.9’da sunulmuştur.



Şekil 2.9. Nozuldan akan gazın basınç, hız ve sıcaklık değişimi [26]

2.5.2.Özgül İtki

Bir roketin performansını ölçmede itki, tasarımsal ve çevresel etmenlere bağlı olarak değişebildiği için sağlıklı sonuç sağlamaz. Bu, bir roketin performansını ölçmede itki iyi bir nispi ölçü değildir, çünkü itki yakıtın kütle akış hızına bağımlı bir parametredir, diye açıklanmıştır[27].

Denklem (2.3) kütle akış hızına bölündüğünde Denklem (2.7) elde edilir;

$$\frac{F}{\dot{m}_f} = V_e + \frac{(P_e - P_a)A_e}{\dot{m}_f} \dots\dots\dots (2.7)$$

Denklem (2.7)’de nozul optimize olduğunda, yani iç basınç ile atmosfer basıncı eşit olduğunda Denklem (2.8), yani efektif gaz akış hızı elde edilir.

$$V_{ef} = \frac{F}{\dot{m}_f} \dots\dots\dots (2.8)$$

Yerçekimi sabiti kullanılarak kütle akış hızı ağırlıklı akış hızına çevrildiğinde;

$\frac{V_{ef}}{g} = \frac{F}{g \cdot \dot{m}_f} = \frac{F}{\dot{W}}$ şeklini alır ve bu da bize roketin özgül itmesini verir. Özgül itme (Isp) şeklinde gösterilmektedir.

$$Isp = \frac{F}{\dot{W}} = \frac{V_{ef}}{g} \dots\dots\dots (2.9)$$

Denklem (2.9)'da yer alan ($\dot{W}$) yakıtın ağırlığını ifade etmektedir.

Özgül itme roketin efektif hızı ile doğru orantılı olduğundan, (Isp)'nin büyük değerleri için büyük hız değerleri elde edebiliriz, yani (Isp) arttıkça hızda artar [24]. Bu da özgül itmenin roket motoru tasarımında önemli bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Roket tasarımlarında (Isp)'nin büyük değerleri istenir. Roketin balistik ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan yakıt ağırlığını belirlemede en önemli parametredir. Çıkan gazların molekül ağırlığı azaldıkça özgül itme artar.

2.5.3.Mekanik Özellikler

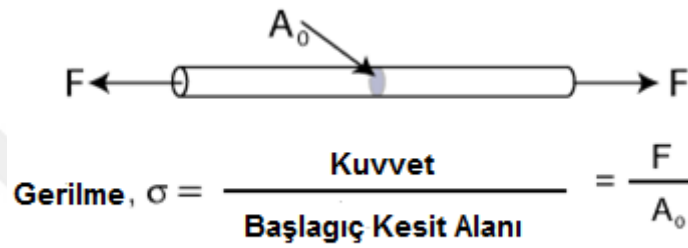
Roket motorundan istenen operasyon karakteristiklerini elde etmek için yakıt çekirdeğinin boyutsal stabiliteyi ve yapısal bütünlüğü muhafaza etmesi gereklidir [27]. Bunu sağlamak ve roket motorunun faydalı kullanım süresi boyunca üzerine etkiyecek durumları tahmin etmek oldukça önemlidir. Yakıtın hazırlanması esnasında ki ortam şartları ve motor ateşlenmesi ile ortaya çıkan mekanik etkilere (titreşim, ivme, dönü etkisi, vb.) bağlı olarak malzeme içerisinde gerilmeler oluşur. Bu faktörlere bağlı olarak yakıtta meydana gelebilecek etkiler tasarım sürecinde gerilme-gerinim karakteristiklerinin belirlenmesi ile önceden tahmin edilebilir. Kompozit yakıtlar genel olarak viskoelastik kauçuk benzeri malzemeler olduklarından, bunların gerilme-gerinim karakteristikleri mekanik ve termal hikayelerine bağlıdır [28]. Yakıtın mekanik özelliklerini tahmin etmek için yakıtın yönden bağımsız lineer viskoelastik bir madde olduğu kabul edilir [29].

Kompozit yakıtların mekanik özellikleri;

* Bağlayıcı yapısına,

- * Katkı maddelerinin konsantrasyonuna, boyut ve şekline,
- * Bağlayıcı ile bağlanan maddeler arasındaki bağ kuvvetine bağlıdır.

Kompozit yakıtın başlıca mekanik özelliği üst düzey gerilme kuvveti barındırmasıdır. Bu kuvvet sayesinde yakıtı etkileyen etkenler sonucunda bile yakıt bütünlüğünü koruyabilir, yakıtta kırılma ve çatlama yaşanmaz. Kompozit yakıtların mekanik özellikleri, yakıtın maruz kaldığı etkilere bağlı olarak yakıtta ortaya çıkan bozulmalara göre değişebilir.



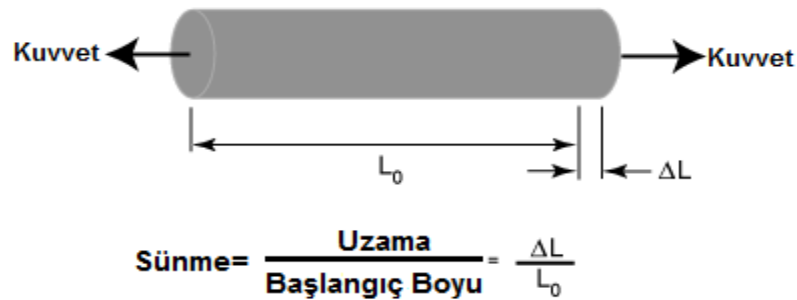
$$\text{Gerilme, } \sigma = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Başlangıç Kesit Alanı}} = \frac{F}{A_0}$$

Şekil 2.10. Gerilme [30]

Şekil 2.10’da görülen birim yüzeye uygulanan kuvvete gerilme denir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

Denklem 2.10 gerilme kuvveti formülünde, (σ) gerilme kuvvetinin birimi (kg/cm²), (F) kuvvet birimi (kg), (A_0) başlangıç kesit alanı birimi (cm²)’dir.



$$\text{Sünme} = \frac{\text{Uzama}}{\text{Başlangıç Boyu}} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Şekil 2.11. Sünme (Gerinim) [30]

Şekil 2.11’de görülen malzemede meydana gelen uzamanın normal boyuna oranına sünme (gerinim) denir.

Sünme;

$$\epsilon x = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \dots\dots\dots (2.11)$$

İdeal elastik ve yönden bağımsız maddeler için gerilme ile sünme arasındaki ilişki Hooke Kanuna uymaktadır. Yani aralarında lineer bir ilişki vardır. Eğim ise Young’s modülüs (E) diye adlandırılır.

$$\sigma = \epsilon x \cdot E \dots\dots\dots (2.12)$$

σ : gerilme (Pa)

ϵx : sünme

E : Young’s Modulus (Pa)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon x} \dots\dots\dots (2.13)$$

Denklem (2.12) ve Denklem (2.13)’de gerilme, sünme ve Young’s modülüs arasındaki ilişki ifade edilmiştir.

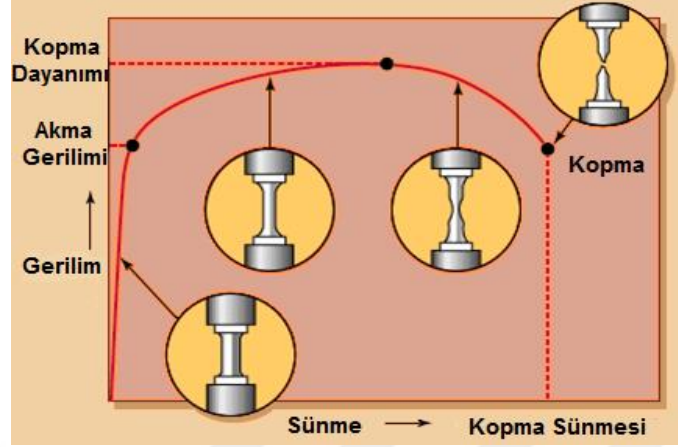
Malzemeyi (x) yönünde gerdirirsek çapraz yönde (y)’de bir deformasyon oluşur. Numunenin boyu uzarken ($l_0 - l$) genişliğide azalacaktır. Yani (b_0) uzunluğu (b)’ye inecektir. Bu durumda karşıt gerinim Denklem (2.14)’de belirtildiği gibi olur. [29]

$$\epsilon y = \frac{b - b_0}{b_0} \dots\dots\dots (2.14)$$

Denklem (2.11 ve 2.14)’de ifade edilen (ϵx) ve (ϵy) kullanılarak Denklem (2.15) Poisson’s Oranı elde edilebilir.

$$\text{Poisson’s Oranı } \gamma = - \frac{\epsilon y}{\epsilon x} \dots\dots\dots (2.15)$$

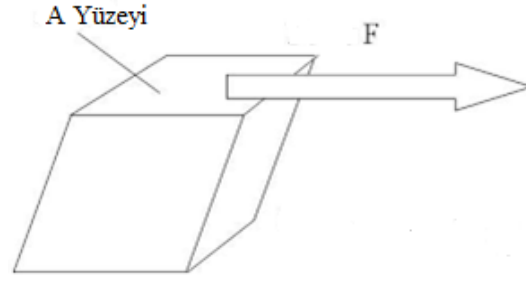
Malzemenin mekanik davranışını analiz etmenin en genel ve faydalı yolu bir gerinim sünme diyagramı oluşturmaktır.



Şekil 2.12. Örnek bir gerinim sünme diyagramı [31]

Grafiğe baktığımızda ilk başlarda eğrinin lineer olduğunu görürüz. Burada elastik bölge görünmektedir. Bu bölgedeki eğri eğimi bize (E) 'yi verir. Elastik deformasyon tersinirdir. Yani uygulanan gerilim kaldırılırsa elastik deformasyon yok olur. Elastik bölge eğrinin dönüm noktasına kadar devam eder. Akma gerilimi noktası; bu noktadan sonra malzeme artık Hooke Kanuna uymamaktadır. Bu noktadan sonra plastik bölge başlar. Bağlayıcı ile katı katkılar arasındaki ara yüzey bağları kırılmaya başlamıştır. Plastik deformasyon tersinir değildir, gerilim kaldırılrsa bile deformasyon kalıcıdır. Plastik deformasyon uygulanan gerilim ile artar ve dayanım noktasına ulaştığında kopma meydana gelir. Kopma dayanımı noktası kırılma noktasındaki gerinimdir.

Bir malzemenin mekanik özelliklerini tanımlayan diğer bir yükleme de makaslama kuvvetidir [27].



Şekil 2.13. Makaslama kuvveti[32]

Şekil 2.13’de bir A yüzeyine uygulanan Makaslama Kuvveti görülmektedir.

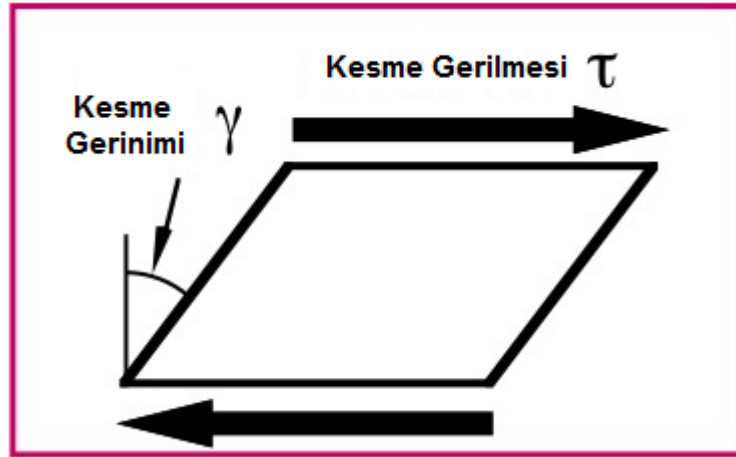
$$\tau = \frac{F}{A_o} \dots\dots\dots (2.16)$$

Denklem (2.16) da; τ : kesme gerilmesi (Pa)

F : Kesme kuvveti (N)

A_o : Alan (m²)’dir.

Kesme gerinimi ise makaslanan yüzeyler arasında meydana gelen defarmasyondur.



Şekil 2.14. Kesme gerinimi [33]

$$\gamma = \frac{\Delta}{l_o} \dots\dots\dots (2.17)$$

Denklem (2.17)'de;

γ kesme gerinimi

Δ : deformasyon uzunluğu (m²)

I_0 : orijinal uzunluk (m²)'dur.

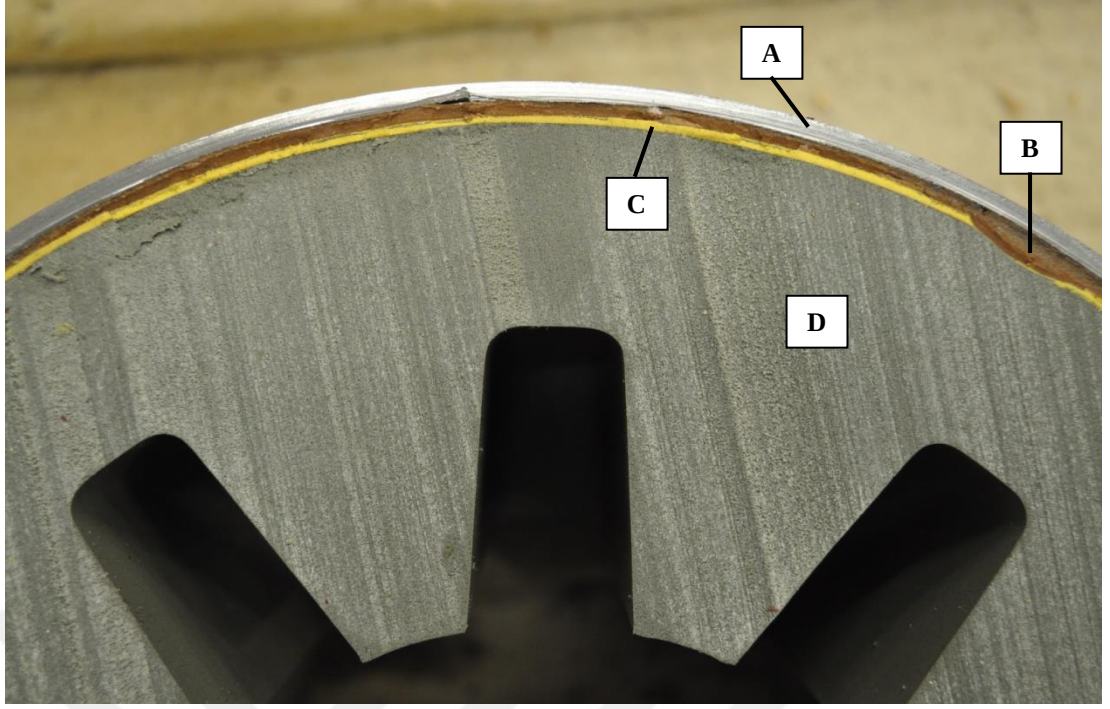
Hooke kanununa benzer bir ilişki kesme içinde vardır. Çok küçük gerilimler için kesme gerilimi kesme gerinimi ile orantılıdır.

$$\tau = \gamma \cdot G \rightarrow G = \frac{\tau}{\gamma} \dots \dots \dots (2.18)$$

Rijitlik Modulusu/Kayma Modulusu; bir yakıt çekirdeği, basınç, termal şok veya titreşim gibi bir etkiye maruz kaldığında çok az bir deformasyona uğrayarak geri eski halini alır. Eğer bağlayıcının elastikiyeti yetersiz olursa kırılma ve kopmalar meydana gelecektir.

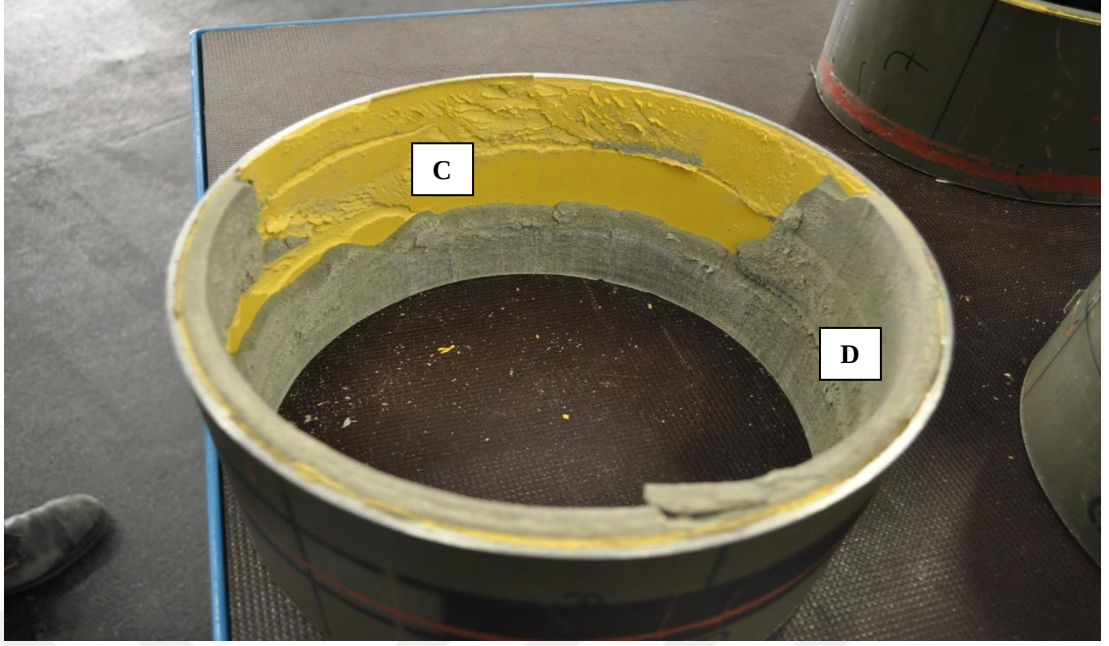
Dökülebilir yakıtlar yakıt çekirdeği ile motor borusu arasındaki bağ inhibisyonu sağladığından tüm şartlarda bozunmadan kalmalıdır. Bunu sağlayabilmek için yakıt çekirdeğinin yeterince elastik ve plastik bir yapıya sahip olması gerekir ki açığa çıkan kuvvet ve şoklardan etkilenmesin.

Dökülebilir yakıtlar eğer yüksek bir kopma dayanımına sahip olurlarsa kırılmadan, kalıcı bir deformasyona karşı koyabilirler. Yakıt çekirdeği tüm dış yüzeyini kaplayacak şekilde inert bir astar ile kaplanarak motor borusuna yapışması sağlanır. Şekil 2.15'de kompozit yakıtlı bir roket motorunun motor borusundan (A) yakıt çekirdeğine kadar olan katmanları görülmektedir. Gri renkli yakıt çekirdeği (D), sarı renkli inert astar (C) ile kaplanarak kahverengi yalıtıma (B) yapışması sağlanmıştır.

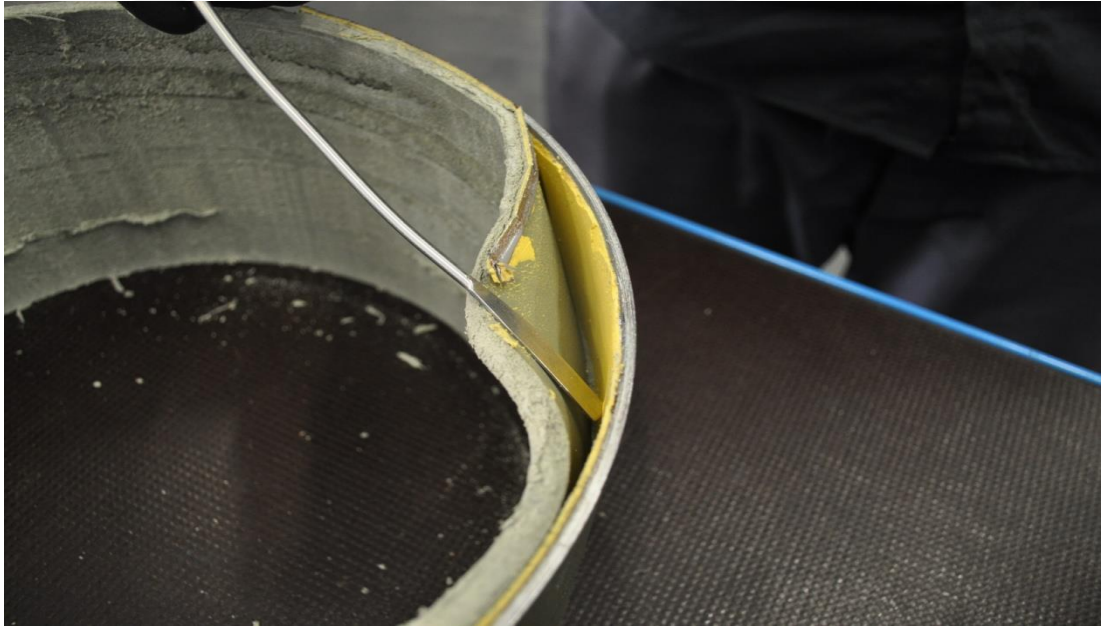


Şekil 2.15. Kompozit yakıtlı roket motorunda motor borusu (A), yalıtım (B), astar (C), yakıt (D) yerleşimi

Bir roket motorunun ateşlenme ve uçuş performansının başarısı, yakıt çekirdeğinin ateşleme ve uçuş süresindeki yapısal bütünlüğüne önemli ölçüde bağlıdır. Kontrol dışı basınç artması, herhangi bir patlama veya diğer normal olmayan balistik davranışları önleyebilmek için yakıt çekirdeğinde yanma yüzeyini artırıcı herhangi bir çatlak olmamalıdır. Motor içindeki basınç artışı kopma gerilimini % 50-90 civarında artırır ki, bu da motorda bir zayıflığa sebep olur. Diğer bir zayıflıkta yakıt ile astar arasında olabilir. Bu durumda ateşlenme sırasında iç yüzeysel bağlar kayma gerilimine neden olur ve bağ kopması olabilir. Tasarımsal olarak yakıt mekanik özellikleri en iyi biçimde üretim sağlanmalı ve depolama şartlarında da özelliklerini uzun süre korumalıdır. Çalışma şartlarına maruz kalmadan yakıt içerisinde deformasyon oluşumu üretim şartlarında kabul görmemektedir. Depolama ortamında belirli bir süre yaşlanmış yakıtta ise ortam şartları ve bu şartlar altında geçirdiği zamana bağlı olarak deformasyonlar gözlemlenebilir.



Şekil 2.16. Astar (C), yakıt (D) birleşimindeki istenmeyen durum



Şekil 2.17. Astar, yakıt birleşimindeki istenmeyen durum

Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de astar-yakıt bağlantısındaki başarısızlıklar gözlemlenmektedir. Maruz kalınan etkiler neticesinde yakıt çekirdeği ve astarın mekanik özelliklerinde gerilemeler meydana gelmiş ve bağlanma yüzeylerindeki zayıflamalara bağlı olarak kopmalar yaşanmaya başlanmıştır.



Şekil 2.18. Yakıt çekirdeği içerisinde oluşmuş bir çatlak



Şekil 2.19. Yakıt çekirdeği içerisinde oluşan çatlağın detaylı görünümü

Şekil 2.18 ve Şekil 2.19’da incelenen yakıt dilimleri içerisinde tespit edilen, yakıt içerisindeki mekanik gerilmelere bağlı olarak oluşan bir çatlak görülmektedir.

2.5.4.Yaşlanma

Katı yakıtlarda kullanılan yüksek enerjili aktif kimyasallar uzun süre depolamaya bağlı olarak bozunmaya uğrayabilirler. Bileşenler balistik ve mekanik özellikleri önemli derecede etkileyebilecek şekilde birbirleri ile veya atmosferik koşullarla etkileşebilirler [28].

Bazı bileşenler bozunarak özelliklerini yitirebildikleri gibi bazıları da sistemde yer alan diğer bileşenlere zarar verebilecek reaksiyonlara yol açarlar. Genel olarak reaksiyonlar kendiliğinden gelişir. Bazen de yakıt içerisine performans artırma amaçlı eklenen bir madde depolama sürecinde istenmeyen etkiler ortaya çıkartabilir. Yakıt içerisinde bulunan plastikleştiriciler yakıt içerisinde göç edip, buharlaşıp gaz çıkışı meydana getirebilirler. Bu göçler esnasında bağlarda kopmalar meydana gelerek yakıtta zayıflıklar oluşur. Çizelge 2.2.de bozunmaların etkileşimleri listelenmiştir.

Test şartlarında depolama koşullarını kurgulayarak ölçülen mekanik özellikler yaşlanma sürecini karakterize eder [34]. Bunun sonucunda yakıtın ömrü tanımlanır.

Yakıtın kimyasal ömrü boyunca yaşlanma ve sıcaklık arasında önemli bir ilişki vardır. Kompozit yakıtlar zamanla viskoelastik özelliklerini kaybederek sertleşirler, bu yakıtın dayanıklılığını artırmakla beraber yakıt çekirdeğini de kararsız bir hale sokar.

Çizelge 2.2. Yaşlanma sırasında yakıtın bozunmasını etkileyen faktörler [34]

FAKTÖR	BELİRTİ	ZAYIFLIK MODU
Kimyasal Halde Değişiklik *Yakıt bileşenlerinin tek tek veya kombinasyon halinde kimyasal reaktivliği	Sertleşme, Kırılma, Gazlaşma, Bozunan ürün birikimi, Viskoz akışın hızlanması, Yapışkanlığın değişmesi	Depolama koşulları, sıcaklık değişimi veya ateşleme esnasında kırılma eğiliminin artması, yanma hızının değişimi, itme kaybı, ateşleme problemi ve astar yakıt ayrılması
* Çevre ile kimyasal etkileşim - Atmosfer (Hava, nem, gaz ve katı bozunma ürünleri) - Motor malzemeleri		
* Değişim Hızını Etkileyebilecek Faktörler (Sıcaklık, Stres hali)	Bozunmanın zaman ölçeği	
Fiziksel Durum Değişikliği * Tersinir Fiziksel Değişiklikler - Faz değişimi - Madde Difüzyonu(Gaz, plastikleştirici, nem)	Sıcaklığa bağlı fiziksel özellik histerezisi	Depolama, ateşleme ve sıcaklık değişimine bağlı kırılma eğiliminin artması, çatlak oluşumu ve büyümesi
* Tersinmez Fiziksel Değişiklikler - Tersinir limit dışındaki sünme: + Çekim kuvvetinin + Taşıma sırasındaki ivmenin + Isı değişiminin + Çevre Sıcaklığının sebep olduğu	Kenarlarda çatlaklar, Astar ayrılması, viskoz deformasyon, renk solması	Yanma hızı ve yanma alanının artması

Yakıtın başlangıç özelliklerindeki zamana bağlı değişimini ve faydalı kullanım ömrünü bilmek, tasarım ve üretim maliyeti açısından oldukça önemlidir. Yakıtın yaşlanma eğilimi yakıt kimyasal karışımına, çekirdek şekline, parçacık boyutuna ve depolama koşullarına bağlıdır. Yaşlanma, ısıya ve kimyasal reaksiyona bağlı olarak gerçekleşir. Yaşlanmaya bağlı olarak yakıtta yumuşama, sertleşme, renk değişikliği, hacim artışı şeklinde değişiklikler olabilir. Bu durumların yakıtta etkisinin test edilmesi gerekir. Sünme kabiliyeti azalması ile birlikte sertleşme görülür.

Düşük sıcaklıklarda uzun süre depolama yakıt bağlarında kolay kırılmalara sebep olabilir. Yumuşama, bağlayıcı yapısındaki termal etkilere bağlı bozulmalar sonucu oluşur. Nemlenme bağlayıcı ile dolgu maddesi ara yüzeylerini ayırabilir [29].

Malzemenin mekanik davranışını yüzey şartları belirlediğinden, yüzey yaşlanmasına önemle dikkat edilmelidir. Mekanik özelliklerin kötüleşmesi sonucu yakıt içi gerilimlerine bağlı olarak çatlaklar meydana gelebilir, bu da yakıtta istenmeyen yanma yüzeyleri oluşmasına sebebiyet verir. Şekil 2.20’de yakıtta oluşan bir çatlak görülmektedir.



Şekil 2.20. Yakıtta oluşmuş bir çatlak

2.5.4.1.Yakıt Yaşlanmasına Etki Eden Faktörler

Sıcaklık; Yakıtın yaşlanma hızına direk olarak etki eder, kimyasal reaksiyonu kolaylaştırır, yakıt karışımındaki bileşenlere farklı etkilerde bulunarak yakıt kararlılığını olumsuz etkiler, sıcaklık artışına bağlı olarak yaşlanmayı hızlandırır. Yakıtın mekanik özelliklerini olumsuz etkiler, yakıtı gevrekleştirerek çatlak oluşumunu hızlandırır.

Titreşim; özellikle yakıtın kullanım öncesinde taşınması ve ilk ateşlemede meydana gelen titreşimler yakıt içerisinde bulunan hassas bölgelerde deformasyonlara neden olarak yakıt bütünlüğüne ve yakıt dinamiğine etki eden bir durum oluşturabilir.

Yer çekimi; depolama esnasında yüksek hacim ve ağırlığa sahip roket motorlarında yakıtın sabit duruşu, yer çekimi etkisiyle malzemenin tek taraflı olarak yüklenmesine sebep olmakta ve malzemenin zayıf noktasında deformasyonlar meydana getirmektedir. Özellikle kütlesi ağır motorların depolama esnasında periyodik olarak dairesel yörüngede hareket ettirilmesi yakıtın emniyeti bir şekilde uzun süre depolanmasını sağlayabilmektedir.

Yakıt içi reaksiyonlar; yanma odasında bulunan hava ve nem konsantrasyonuna bağlı olarak özellikle hassas maddeleri etkiler. Bağlayıcının özelliğini bozar, yakıt kararlılığını sekteye uğratır. Mekanik özellikleri ve ateşlenme sonrası roket davranışlarını etkiler.

Yakıt karışımı; roket yakıtını oluşturan malzemelerin farklı özellikleri, depolama esnasında ortaya çıkan reaksiyonlara ve bu maddelerin birbirleri ile olan etkileşimlerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilmektedir.

Üretim Yöntemi; yakıtın homojen olması ve yakıt içerisindeki malzemelerin biraya getirilme yöntemi ile yakıtın motor borusuna konumlandırılması çalışmalarında ortaya çıkabilecek olumsuzluklar, yakıt ömrünü belirlemede oldukça önemlidir.

3.KOMPOZİT YAKITLI BİR ROKET YAKITININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Roket kompozit yakıtının görev yapabilirliği açısından değerlendirmesinde en başta gelen konulardan biri mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi ve bu özelliklerinde meydana gelebilecek değişimlerin gözlemlenmesi ile yakıt ömrünün belirlenmesi çalışmalarıdır.

Bu çalışma esnasında ilk olarak gerçek zamanlı bir roket yakıtının mekanik özelliklerinin gözlemlenmesi, ardından roket yakıtının belirli koşullar altında yaşlandırılması sağlanarak yaşlanmış yakıt mekanik özellikleri ile karşılaştırılması ve yaşlanmaya bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimin ortaya konulması amaçlanmıştır.

3.1.Numunelerin Hazırlanması

Test çalışmalarında kullanılmak üzere kompozit yakıtlı bir roket motoru, harp başlığı, nozul, kanat kısımları sökülerek sadece gövde kısmı kalacak şekilde hazırlanmıştır.

Daha sonra gövde kısmı ön ve arka tarafında bulunan yakıt çekirdeği ile atmosferik koşulların birbirine etkileşmesini önleyecek sızdırmaz contalı kapaklar da sökülerek yakıt çekirdeğine ulaşılmıştır.

T_0+10 yaşındaki roket yakıtının mekanik özelliklerinin test edilmesi maksadıyla roket motoru dilimlenmiş ve hazırlanacak numunelerin çıkartılacağı yerler belirlenerek işaretlenmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit yakıtlı roket motoru parçası (50 cm)



Şekil 3.2. Dilimlenmiş kompozit yakıtlı roket motoru



Şekil 3.3. Yakıt dilimlerinin kesit görünüşü



Şekil 3.4.Numune bölgeleri işaretlenmiş roket motor dilimleri

Yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere belirlenen 50 cm uzunluğunda bir kompozit yakıtlı roket motoru parçası Şekil 3.1., Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi dilimlere ayrılarak yapılacak test çalışmaları için yeterli sayıda kaba numune elde edilmiştir. Motor borusuna yapılan radyografik muayeneler ve yakıt dilimleri üzerinde yapılan görsel kontroller neticesinde testlerde kullanılacak numune bölgeleri Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi işaretlenmiştir.

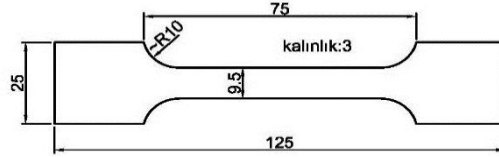


Şekil 3.5.Numune çıkartma çalışmaları safhaları

Raket motor dilimlerinden mekanik testlerde kullanılacak numuneleri hazırlanma çalışmaları Şekil 3.5'te görülmektedir.

3.2.Roket Yakıtına Yapılacak Mekanik Testler ve Test Koşullarının Belirlenmesi

Elde edilen numune yakıt parçalarından “ASTM D 638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” standartına göre Şekil 3.6’da görülen ölçülerde test numuneleri ince kesimler yapılarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.6. Test numunesi ebatları

3.2.1. Tek Eksenli Çekme Testi

Kompozit roket yakıtının gerilme özelliklerini görebilmek amacıyla yapılmaktadır. Yakıtın çeşitli şartlarda gerilme mukavemetini belirlemek için numunelere uygulanmıştır.

Çekme testi için hazırlanan numunelerden Çizelge 3.1’de verilen test koşulları kapsamında göre oluşturulan numune planına göre yeterli sayıda numune üzerinde gözle görülebilecek herhangi bir deformasyon olup olmadığı kontrol edilmiştir. Numune üzerinde hassas boyutsal ölçümler yapılarak numune boyutlarının standart olması sağlanmıştır.

Çizelge 3.1. Tek eksenli çekme testi numune dağılımı

Test Koşulları								
Sabit Hızda Çekme Testi		Test Sıcaklığı (°C)						
Numune Sayıları	Hız (mm/d)	71	35	0	-20	-40	-55	-65
	1	5	-	-	-	-	-	-
	5	5	-	5	-	-	-	-
	50	5	-	5	5	5	5	5
	500	-	5	5	5	5	5	5

Numune çalışma sıcaklıkları belirlenirken; sıfırın altında sıcaklıklar roket yörüngesi boyunca karşılaşılabileceği en üst değerler olarak, artı sıcaklıklar ise normal depolama koşulları ve aşırı sıcak depolama koşulları göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Çizelge 3.1.'de verilen test koşullarına göre Extensometreli Instron Cihazı kullanılarak sabit hızda çekme testleri yapılmıştır.

3.2.2.Gerilme Gevşeme Testi

Gerilim gevşeme testi kullanacağımız numune roket yakıtında oluşacak gerilmenin zamana göre değişimini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Çeşitli sıcaklıklardaki yakıtlara belli bir değerde kuvvet uygulayarak kuvvetin sabit tutulması ve zamana bağlı olarak cihazda okunan kuvvet değişiminin gözlemlenmesi sağlanmıştır. Yaptığımız çalışmada numune sayılarının sıcaklıklara göre dağılımı Şekil 3.2'de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Gerilim Gevşeme testi numune dağılımı

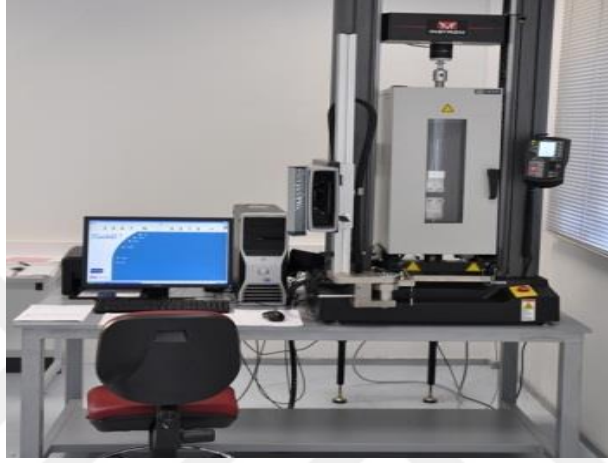
Test Koşulları								
Gerilim Gevşeme Testi		Sıcaklık °C						
Numune	Gerilim seviyesi / Hız % (mm/d)	71	35	0	-20	-40	-55	-65
Sayıları	50	5	5	5	5	5	5	5

3.3.Test Ekipmanları

Çalışma esnasında kullanılan başlıca cihaz aşağıda açıklanmıştır.

3.3.1.Extensometreli Instron Cihazı

Malzemede boy değişimini hassas olarak ölçebilen çekme test cihazıdır. En az 100 mm boy değişimini 1 mm hassasiyetle optik olarak ölçebilmektedir. Dik konumdaki yerinde deformasyonları ölçmek üzere, deformasyon olabileceğinden şüphelenen yerlere yerleştirilir ve meydana gelen deformasyonlar hassas şekilde ölçülür.



Şekil 3.7. Extensometreli Instron Cihazı

3.3.2. Yakıt Çubuęu Yanma Gerilemesi Yanma Hızı Ölçüm Yöntemi

Katı yakıt ile çalışan roket yanma çubuğu diye adlandırılan yakıt numuneleri kullanılmaktadır. İnert özelliğiolan azot gazı ortamında, yakıt çubuğunda yanma ortamına ek olarak yanma gazı ortaya çıkarması nedeniyle basınç eğilimi göstermektedir. Katı yakıt ölçüm sırasında sabit bir basınç sağlamak amacıyla ortama nitrojen (N₂) gazı eklenmiş basınç valfi otomatik bir şekilde azot gazının girişini kontrol etmektedir. Bu şekilde istenilen basınç koşulları sağlanmaktadır.

3.4. Kontrollü Yaşlandırma

Roket yakıtı mekanik özelliklerinin zamana bağlı değişimini gözlemlemek maksadıyla yakıt çekirdeği kontrollü olarak yaşlandırılarak, yaşlanmış numuneye belirlenen testler ayrıca yapılmıştır.

Yaşlandırma yapılırken yakıt yaşlanması süresinin tayin edilmesi maksadıyla Arrhenius denkleminin faydalanılmıştır.

$$\text{Arrhenius denklemini; } k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Denklem (3.1)' de ;

k :Reaksiyon hız sabiti

A : Frekans Faktörü

E_a :Aktivasyon enerjisi (J/mol)

R : Gaz Sabiti (8,314 J/K.mol)

T :Test Sıcaklığı(K)

Arrhenius eşitliği reaksiyon hızının sıcaklığa bağlılığını gösteren bir formüldür, kimyasal reaksiyon hızının belirlenmesinde ve aktivasyon enerjisinin hesaplanmasında çok büyük ve önemli bir uygulamaya sahiptir.

Denklem (3.1)'in logaritmasını aldığımızda Denklem (3.2) elde edilmektedir;

$$\ln k = \frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \dots\dots\dots (3.2)$$

Farklı sıcaklıklarda, farklı hız sabitleri ile aradaki farkı bulmak istediğimizde Denklem (3.3) ve Denklem (3.4) kullanılarak Denklem (3.5) elde edilir;

$$\ln k_1 = \frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1}\right) + \ln A \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\ln k_2 = \frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2}\right) + \ln A \dots\dots\dots (3.4)$$

$$F = \frac{k_1}{k_2} = e^{\left(-\frac{E}{R} \left\{ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right\} \right)} \dots\dots\dots (3.5)$$

F :Yaşlanma Faktörü Hesabı

T_1 :Test Sıcaklığı (K)

T_2 :Referans Sıcaklık (K)

k_1, k_2 :Reaksiyon hız sabitleri (T_1 ve T_2 Sıcaklıkları için)

Denklem (3.5) kullanılarak normal ortam şartları olarak değerlendirilen 25 °C sıcaklıktaki yaşlanma süresi ile istenilen bir sıcaklıktaki yaşlanma süresi arasında Denklem (3.6) 'de görülen bağıntı ortaya konulabilir.

$$t_{25} = t_s * e^{\left(\frac{E_2}{R} \left\{ \frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T_s} \right\} \right)} \dots\dots\dots (3.6)$$

t_1 :Yakıtın T_1 °C sıcaklıktaki yaşlanma süresi veya ömrü, gün

t_{25} :Yakıtın 25°C sıcaklıktaki ömrü, gün veya yıl

Kimyasal reaksiyonların sıcaklığa bağlı değişimi aktivasyon enerjisi ile tanımlanır. Arrhenius hız eşitliğinin biraz değiştirilmiş hali Denklem (3.5) 'de verilmiştir. Bu eşitlikte aktivasyon enerjisi ve test sıcaklığı girildikten sonra F faktörü hesaplanır. T_1 test sıcaklığında yapılan 1 günlük yaşlandırma, T_2 referans sıcaklıktaki t güne denk gelir.

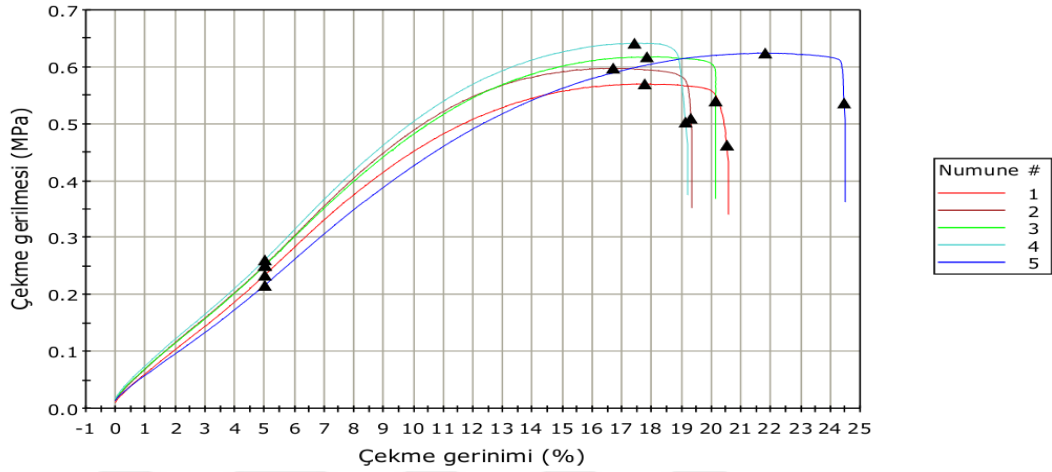
Formülün yaşlanma deneylerine bağlı olarak elde edilen hazır tablo verilerinden, gerçek depolama şartları yaklaşık olarak 25 °C ve 65 °C de 95 gün yaşlandırılarak yakıtın gerçekte 3 yıllık bir yaşlanmaya tekabül edeceği NATO AOP-46 (The Scientific Basis For The Whole Life Assessment Of Munitions) yayını EK-C, tablo 1 ve 2 verilerinin değerlendirmesi sonucu ortaya konulmuştur.

Yakıt çekirdeğinin 65 °C de 95 gün yaşlandırılması sonucu elde edilen numunelerin T_0+13 yaşında olduğu kabul edilmiştir.

3.5. Test Verileri ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan test sonuçları aşağıda sunulmuştur.

3.5.1. T_0+10 Yaşındaki Roket Yakıtının Çekme Test Sonuçları

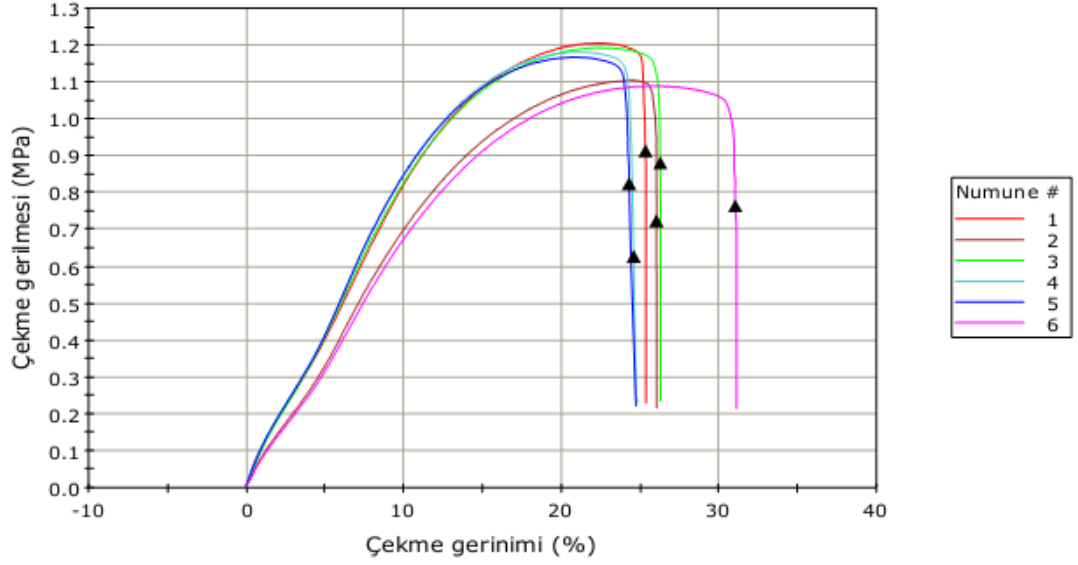


Şekil 3.8. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.8’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.3.’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 55,04 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,61 MPa olarak, çekme gerinimi ise %18,27 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.3. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,87	10,10	51,07	0,57	17,73	20,49	0,46
2	9,00	10,20	54,89	0,60	16,67	19,28	0,51
3	8,82	10,08	54,93	0,62	17,81	20,11	0,54
4	8,82	10,20	57,74	0,64	17,39	19,10	0,50
5	8,80	10,30	56,60	0,62	21,76	24,42	0,54
Ortalama	8,86	10,18	55,04	0,61	18,27	20,68	0,51
Standart Sapma	0,08	0,09	2,53	0,03	2,00	2,17	0,03
Maksimum	9,00	10,30	57,74	0,64	21,76	24,42	0,54
Minimum	8,80	10,08	51,07	0,57	16,67	19,10	0,46
Ortalama + 3 SD	9,11	10,44	62,62	0,69	24,28	27,18	0,60
Ortalama - 3 SD	8,62	9,91	47,46	0,53	12,26	14,18	0,42

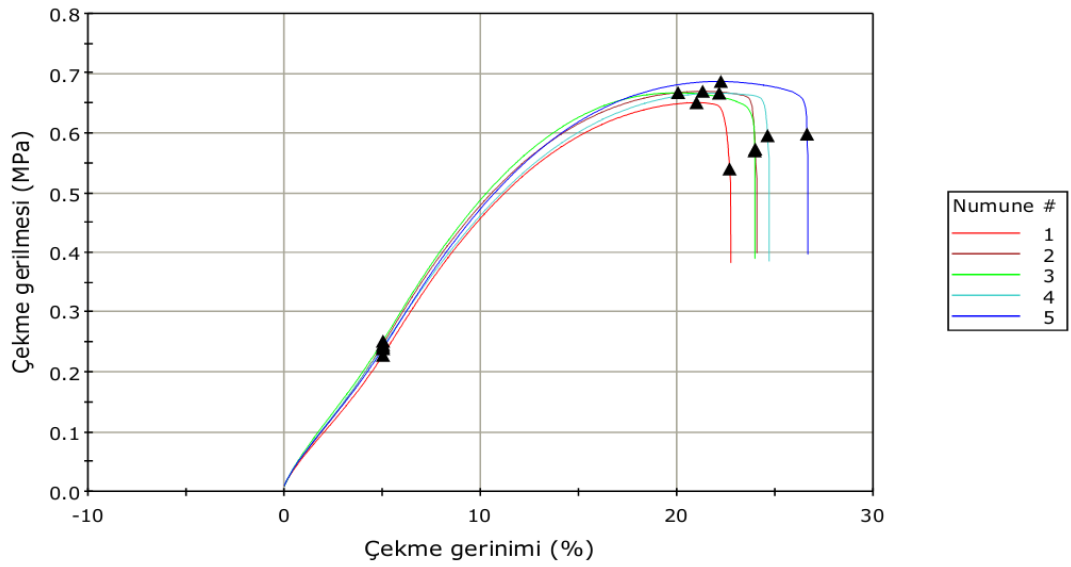


Şekil 3.9. T_0+10 , $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.9’da T_0+10 yaşındaki altı farklı yakıt numunesinin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.4’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan altı numuneye ortalama 105,82 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,17 MPa olarak, çekme gerinimi ise %22,1 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.4. T_0+10 , $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,900	10,380	111,40	1,21	22,45	0,91	25,27
2	8,800	10,030	97,46	1,10	24,26	0,72	25,97
3	8,870	10,470	110,81	1,19	22,14	0,88	26,21
4	8,890	9,990	104,92	1,18	20,74	0,63	24,52
5	8,880	10,080	104,53	1,17	20,91	0,83	24,24
X 6	8,830	10,060	96,75	1,09	25,99	0,77	30,97
Ortalama	8,868	10,190	105,82	1,17	22,10	0,79	25,24
Standart	0,04	0,22	5,67	0,04	1,42	0,12	0,86
Sigma	8,900	10,470	111,40	1,21	24,26	0,91	26,21
Minimum	8,800	9,990	97,46	1,10	20,74	0,63	24,24
Ortalama + 3 SD	8,987	10,848	122,82	1,29	26,35	1,15	27,84
Ortalama - 3 SD	8,749	9,532	88,83	1,05	17,85	0,44	22,65

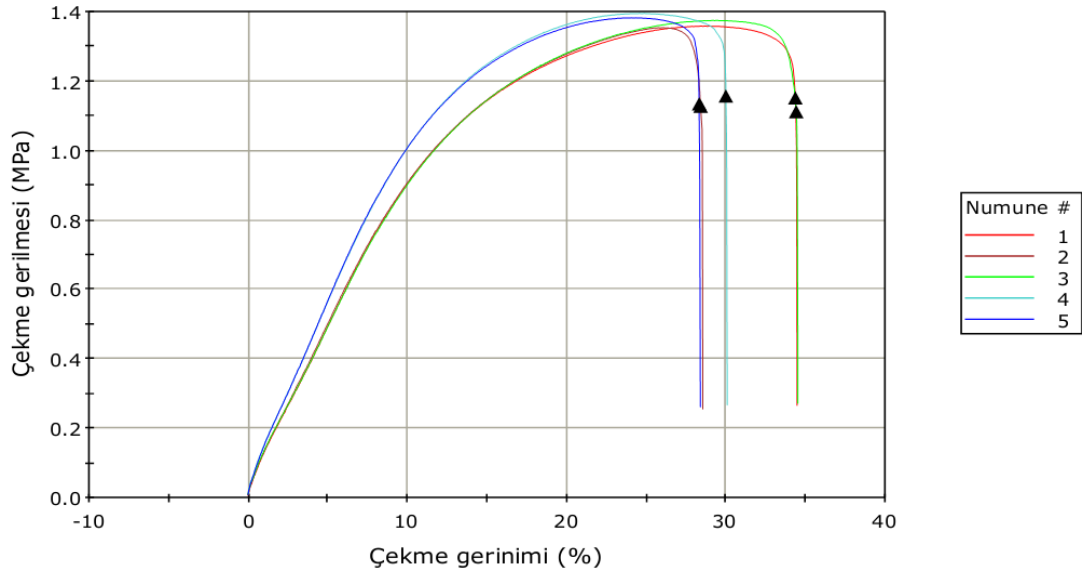


Şekil 3.10. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.10’da T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.5’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 60,48 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,67 MPa olarak, çekme gerinimi ise %21,31 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,82	10,18	58,44	0,65	20,96	22,63	0,54
2	8,80	10,25	60,44	0,67	21,26	23,92	0,57
3	8,90	10,20	60,61	0,67	20,01	23,91	0,57
4	8,80	10,10	59,27	0,67	22,11	24,56	0,60
5	8,83	10,50	63,65	0,69	22,20	26,57	0,60
Ortalama	8,83	10,25	60,48	0,67	21,31	24,32	0,58
Standart Sapma	0,04	0,15	1,98	0,01	0,90	1,44	0,02
Maksimum	8,90	10,50	63,65	0,69	22,20	26,57	0,60
Minimum	8,80	10,10	58,44	0,65	20,01	22,63	0,54
Ortalama + 3 SD	8,95	10,70	66,42	0,71	24,01	28,63	0,65
Ortalama - 3 SD	8,71	9,79	54,54	0,63	18,61	20,01	0,51

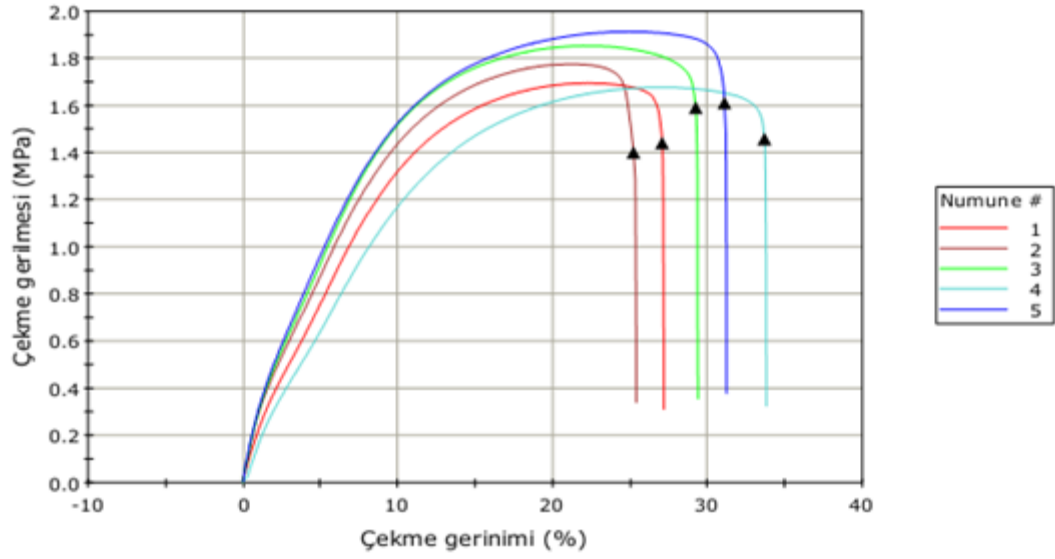


Şekil 3.11. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.11’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.6’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 127,5 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,37 MPa olarak, çekme gerinimi ise %26,52 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.6. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,90	11,10	134,19	1,36	28,65	1,15	34,28
2	8,87	10,08	121,04	1,35	25,99	1,13	28,35
3	8,90	10,25	125,40	1,37	29,12	1,11	34,34
4	8,88	10,18	126,06	1,39	24,83	1,16	29,94
5	8,93	10,60	130,81	1,38	24,00	1,13	28,26
Ortalama	8,90	10,44	127,50	1,37	26,52	1,14	31,03
Standart Sapma	0,02	0,42	5,10	0,02	2,28	0,02	3,06
Maksimum	8,93	11,10	134,19	1,39	29,12	1,16	34,34
Minimum	8,87	10,08	121,04	1,35	24,00	1,11	28,26
Ortalama + 3 SD	8,97	11,69	142,79	1,42	33,36	1,19	40,22
Ortalama - 3 SD	8,83	9,19	112,21	1,32	19,68	1,08	21,85

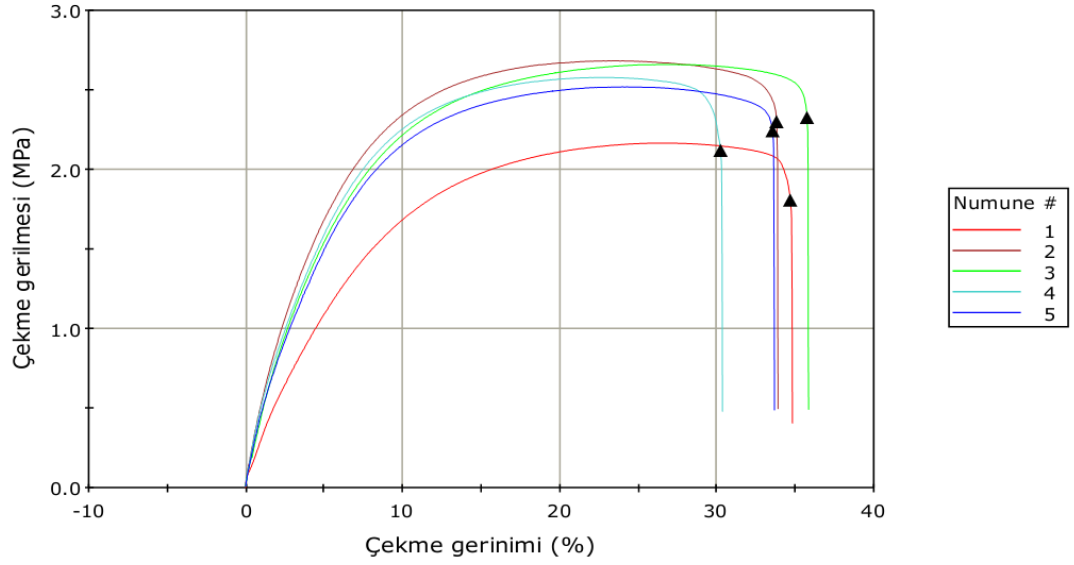


Şekil 3.12. T_0+10 , $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.12’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.7.’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 160,17 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,78 MPa olarak, çekme gerinimi ise %23,35 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.7. T_0+10 , $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,940	9,690	146,83	1,69	22,18	1,44	27,00
2	8,900	9,800	154,94	1,78	21,02	1,40	25,15
3	8,960	10,220	169,76	1,85	21,93	1,59	29,16
4	8,950	10,140	152,22	1,68	26,76	1,46	33,59
5	8,890	10,410	177,09	1,91	24,86	1,61	31,03
Ortalama	8,928	10,052	160,17	1,78	23,35	1,50	29,19
Standart Sapma	0,03	0,30	12,72	0,10	2,38	0,09	3,31
Maksimum	8,960	10,410	177,09	1,91	26,76	1,61	33,59
Minimum	8,890	9,690	146,83	1,68	21,02	1,40	25,15
Ortalama + 3 SD	9,021	10,950	198,32	2,09	30,50	1,78	39,12
Ortalama - 3 SD	8,835	9,154	122,01	1,48	16,20	1,22	19,25

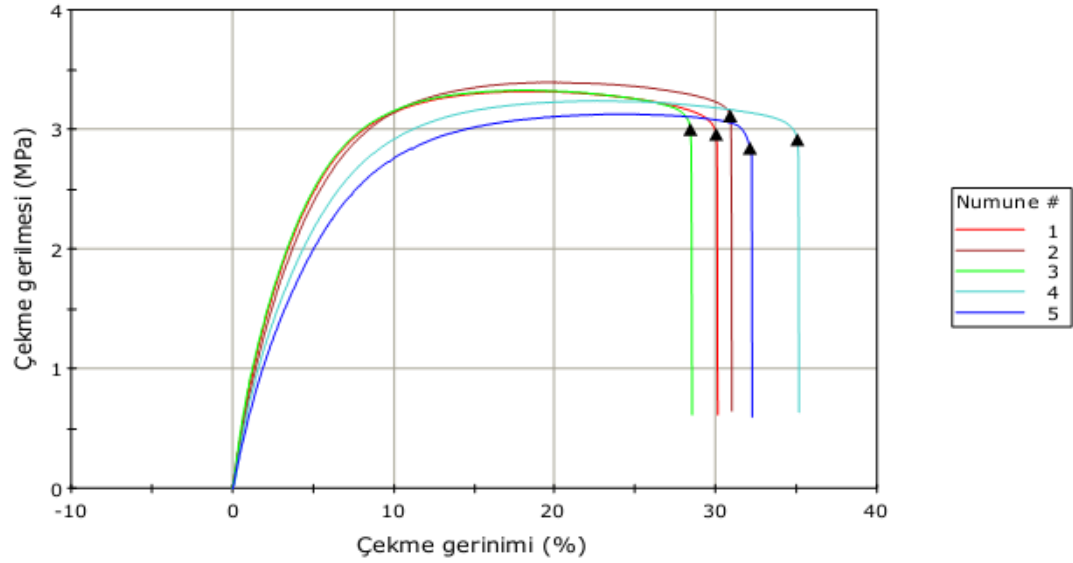


Şekil 3.13. T_0+10 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.13'te T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.8'de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 227,21 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 2,52 MPa olarak, çekme gerinimi ise %24,7 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.8. T_0+10 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,830	10,180	194,79	2,17	26,44	1,81	34,59
2	8,900	9,920	237,00	2,68	23,33	2,30	33,72
3	8,840	10,270	241,57	2,66	26,72	2,33	35,66
4	8,790	10,560	239,30	2,58	22,80	2,12	30,16
5	8,830	10,040	223,37	2,52	24,21	2,24	33,45
Ortalama	8,838	10,194	227,21	2,52	24,70	2,16	33,52
Standart Sapma	0,04	0,24	19,46	0,21	1,79	0,21	2,06
Maksimum	8,900	10,560	241,57	2,68	26,72	2,33	35,66
Minimum	8,790	9,920	194,79	2,17	22,80	1,81	30,16
Ortalama + 3 SD	8,957	10,927	285,57	3,15	30,08	2,80	39,71
Ortalama - 3 SD	8,719	9,461	168,84	1,89	19,33	1,53	27,33

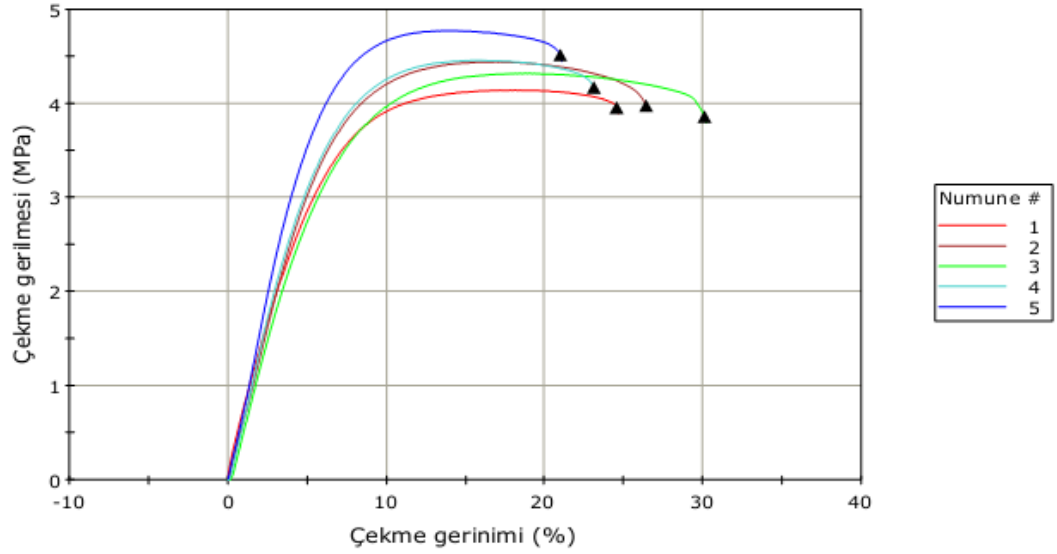


Şekil 3.14. T_0+10 , $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.14’de T_0+10 yaındaki beş farklı yakıt numunesinin $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.9’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 290,52 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 3,28 MPa olarak, çekme gerinimi ise %20,46 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.9. T_0+10 , $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max .Yük (N)	Max .Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max .Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,800	10,020	292,65	3,32	18,24	2,96	29,94
2	8,820	9,830	294,17	3,39	19,75	3,12	30,82
3	8,860	10,100	297,68	3,33	18,08	3,00	28,34
4	8,810	10,150	289,58	3,24	22,27	2,92	34,97
5	8,730	10,200	278,52	3,13	23,96	2,84	32,04
Ortalama	8,804	10,060	290,52	3,28	20,46	2,97	31,22
Standart Sapma	0,05	0,14	7,31	0,10	2,58	0,10	2,49
Maksimum	8,860	10,200	297,68	3,39	23,96	3,12	34,97
Minimum	8,730	9,830	278,52	3,13	18,08	2,84	28,34
Ortalama + 3 SD	8,946	10,494	312,46	3,59	28,20	3,27	38,69
Ortalama - 3 SD	8,662	9,626	268,58	2,98	12,72	2,66	23,75

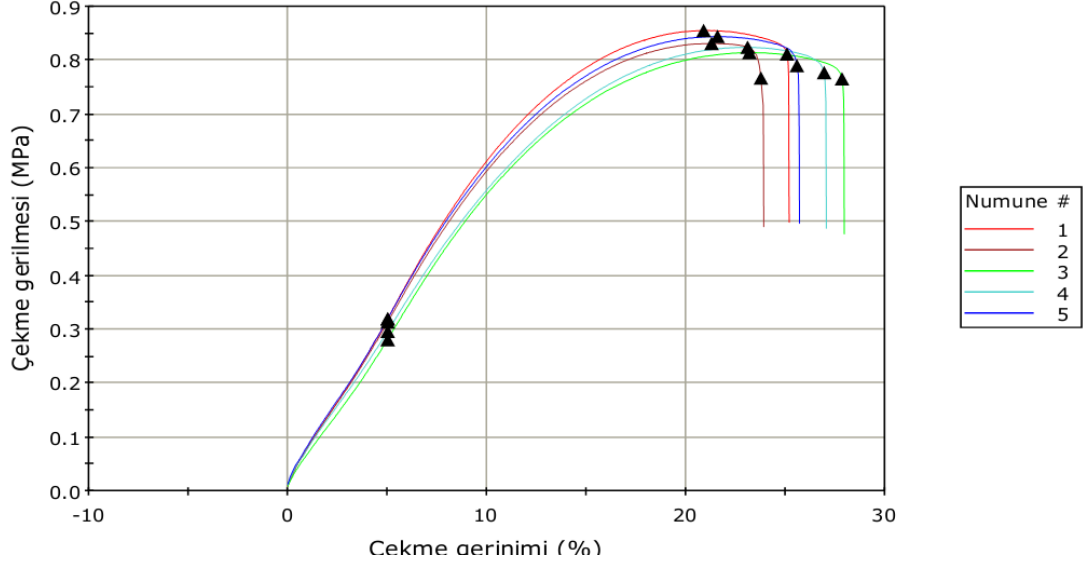


Şekil 3.15. T_0+10 , $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.15'te T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.10'da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 404,91 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 4,43 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 16,61 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.10. T_0+10 , $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max. Yük (N)	Max. Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,870	10,020	368,07	4,14	18,09	3,96	24,49
2	8,900	10,490	414,88	4,44	16,85	3,98	26,35
3	8,830	10,370	395,30	4,32	18,69	3,86	30,04
4	8,800	9,850	386,52	4,46	15,61	4,17	23,07
5	8,920	10,800	459,80	4,77	13,80	4,52	20,95
Ortalama	8,864	10,306	404,91	4,43	16,61	4,10	24,98
Standart Sapma	0,05	0,38	35,00	0,23	1,96	0,26	3,45
Maksimum	8,920	10,800	459,80	4,77	18,69	4,52	30,04
Minimum	8,800	9,850	368,07	4,14	13,80	3,86	20,95
Ortalama + 3 SD	9,012	11,440	509,91	5,12	22,50	4,88	35,34
Ortalama - 3 SD	8,716	9,172	299,91	3,73	10,72	3,32	14,62

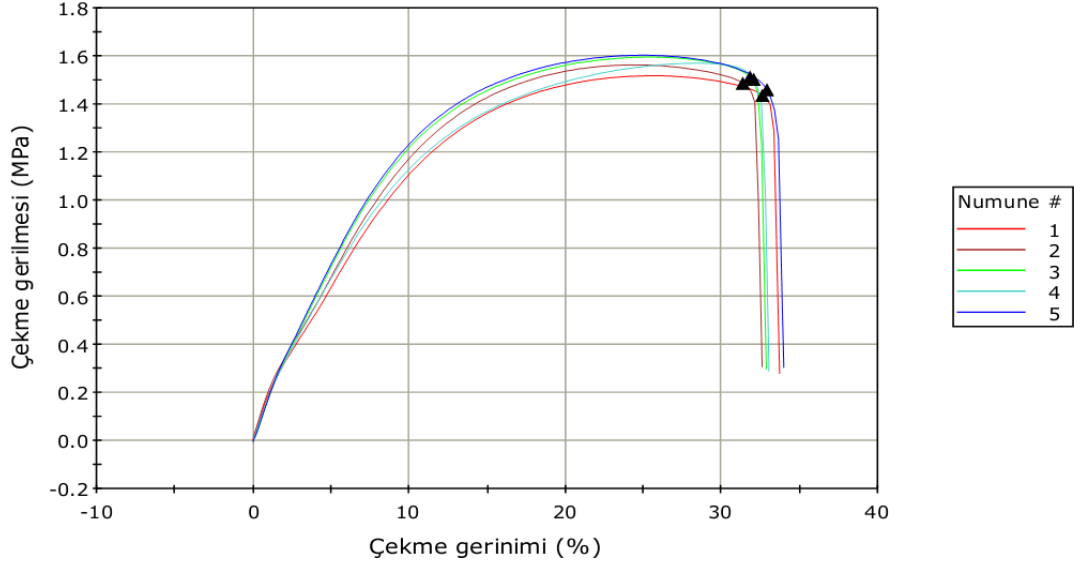


Şekil 3.16. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.16’da T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.11’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 73,54 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,83 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 21,97 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.11. T_0+10 , 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,85	9,90	74,90	0,85	20,84	25,03	0,81
2	8,88	9,98	73,64	0,83	21,24	23,71	0,77
3	8,85	10,02	72,18	0,81	23,15	27,79	0,77
4	8,90	9,90	72,58	0,82	23,06	26,89	0,78
5	8,86	9,95	74,39	0,84	21,55	25,53	0,79
Ortalama	8,87	9,95	73,54	0,83	21,97	25,79	0,78
Standart Sapma	0,02	0,05	1,16	0,02	1,07	1,59	0,02
Maksimum	8,90	10,02	74,90	0,85	23,15	27,79	0,81
Minimum	8,85	9,90	72,18	0,81	20,84	23,71	0,77
Ortalama + 3 SD	8,93	10,11	77,02	0,88	25,17	30,57	0,84
Ortalama - 3 SD	8,80	9,79	70,06	0,78	18,77	21,01	0,73

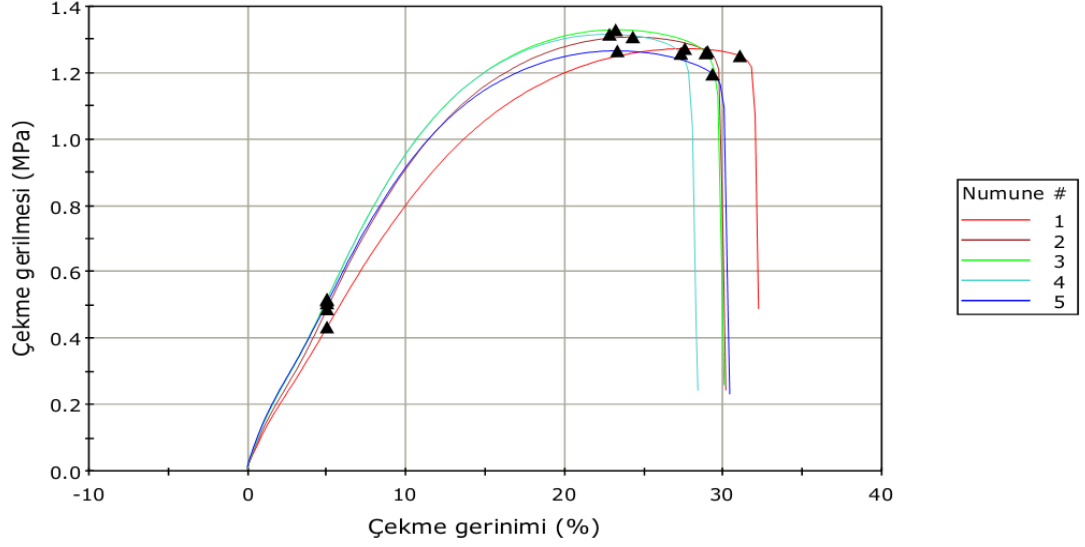


Şekil 3.17. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.17’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.12’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 138,58 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,57 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 25,72 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.12. T_0+10 , 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,900	9,430	127,35	1,52	25,49	1,44	32,55
2	9,750	8,870	135,12	1,56	24,56	1,49	31,30
3	8,850	10,180	143,76	1,60	25,39	1,51	31,76
4	8,850	10,240	142,20	1,57	28,31	1,50	31,98
5	8,800	10,240	144,46	1,60	24,84	1,46	32,82
Ortalama	9,030	9,792	138,58	1,57	25,72	1,48	32,08
Standart Sapma	0,40	0,62	7,29	0,03	1,50	0,03	0,61
Maksimum	9,750	10,240	144,46	1,60	28,31	1,51	32,82
Minimum	8,800	8,870	127,35	1,52	24,56	1,44	31,30
Ortalama + 3 SD	10,242	11,649	160,45	1,67	30,22	1,57	33,92
Ortalama - 3 SD	7,818	7,935	116,71	1,47	21,22	1,39	30,25

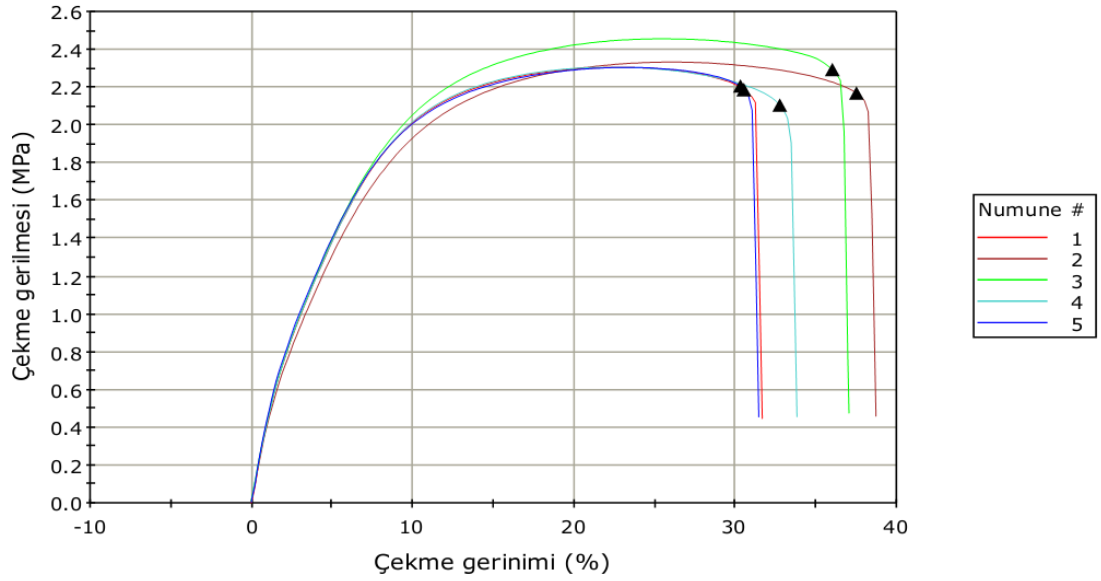


Şekil 3.18. T_0+10 , 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.18’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.13’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 118,64 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,30 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 24,19 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.13. $T_0+10,35C^\circ$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,80	10,08	112,88	1,27	27,51	30,99	1,25
2	8,70	10,45	118,87	1,31	24,24	28,93	1,26
3	8,70	10,51	121,54	1,33	23,16	28,84	1,26
4	8,85	10,40	121,13	1,32	22,78	27,26	1,26
5	9,02	10,40	118,77	1,27	23,27	29,26	1,20
Ortalama	8,81	10,37	118,64	1,30	24,19	29,06	1,25
Standart Sapma	0,13	0,17	3,46	0,03	1,93	1,33	0,03
Maksimum	9,02	10,51	121,54	1,33	27,51	30,99	1,26
Minimum	8,70	10,08	112,88	1,27	22,78	27,26	1,20
Ortalama + 3 SD	9,21	10,87	129,02	1,38	29,99	33,04	1,33
Ortalama - 3 SD	8,42	9,87	108,26	1,22	18,39	25,08	1,16

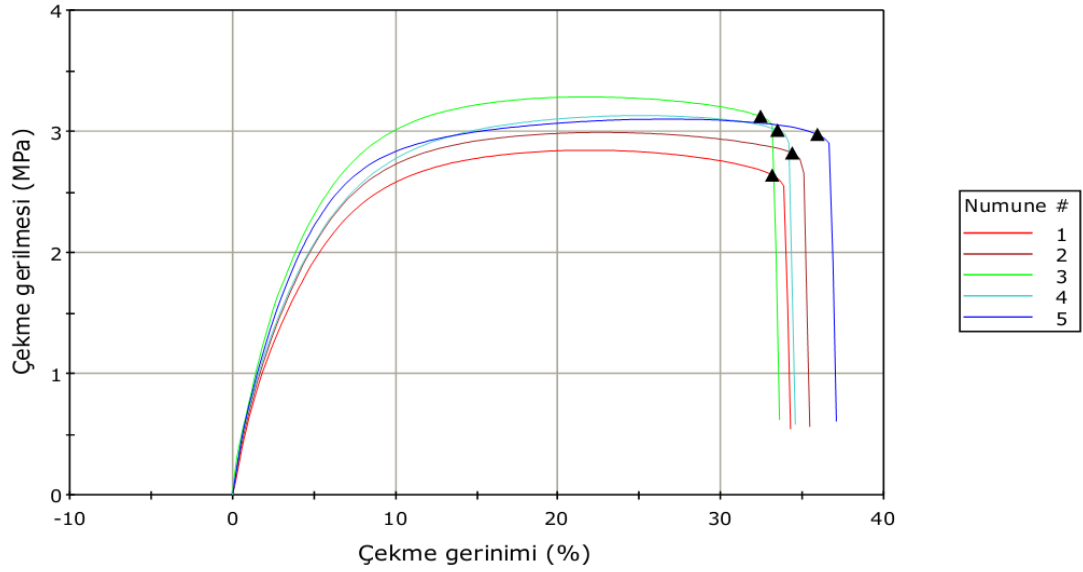


Şekil 3.19. T_0+10 , -20 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.19’da T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -20 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.14’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 213,74 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 2,34 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 23,94 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.14. T_0+10 , -20C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,950	10,250	211,35	2,30	22,72	2,19	30,47
2	8,960	10,220	213,65	2,33	25,87	2,17	37,44
3	8,870	10,160	221,34	2,46	25,60	2,29	35,93
4	8,950	10,140	209,19	2,31	22,29	2,11	32,67
5	8,890	10,410	213,19	2,30	23,25	2,21	30,26
Ortalama	8,924	10,236	213,74	2,34	23,94	2,19	33,35
Standart Sapma	0,04	0,11	4,60	0,07	1,67	0,07	3,23
Maksimum	8,960	10,410	221,34	2,46	25,87	2,29	37,44
Minimum	8,870	10,140	209,19	2,30	22,29	2,11	30,26
Ortalama + 3 SD	9,047	10,557	227,53	2,54	28,96	2,40	43,03
Ortalama - 3 SD	8,801	9,915	199,96	2,14	18,93	1,99	23,68

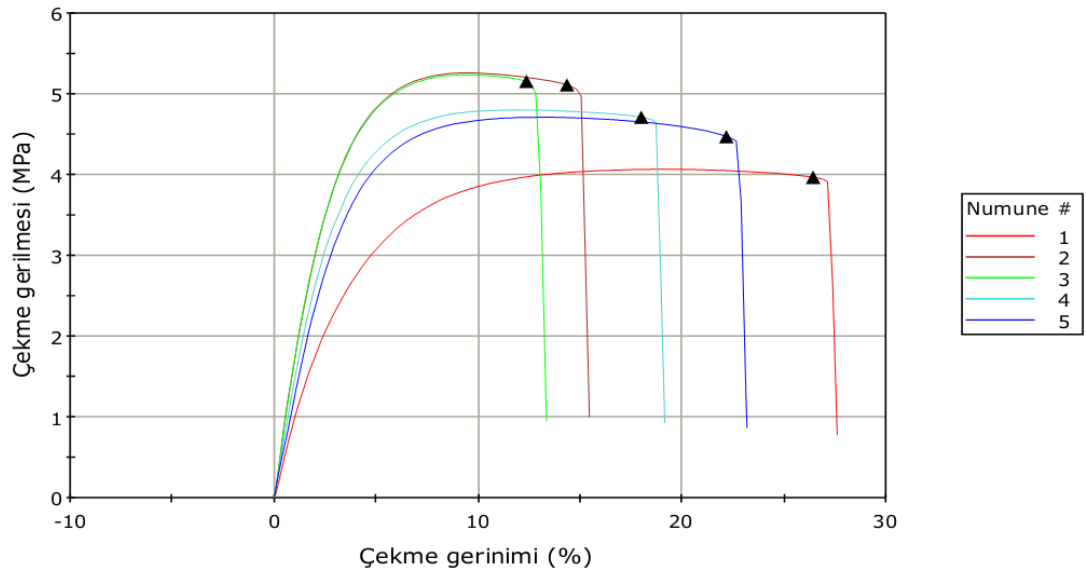


Şekil 3.20. T_0+10 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.20’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.15’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 277,57 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 3,07 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 23,52 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.15. T_0+10 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,900	10,450	264,71	2,85	21,86	2,64	33,06
2	8,890	10,150	269,98	2,99	22,36	2,82	34,29
3	8,890	10,130	295,79	3,28	21,77	3,13	32,34
4	8,870	9,900	274,98	3,13	25,02	3,01	33,39
5	8,870	10,260	282,38	3,10	26,57	2,98	35,84
Ortalama	8,884	10,178	277,57	3,07	23,52	2,92	33,78
Standart Sapma	0,01	0,20	12,09	0,16	2,16	0,19	1,35
Maksimum	8,900	10,450	295,79	3,28	26,57	3,13	35,84
Minimum	8,870	9,900	264,71	2,85	21,77	2,64	32,34
Ortalama + 3 SD	8,924	10,780	313,84	3,56	30,01	3,48	37,83
Ortalama - 3 SD	8,844	9,576	241,30	2,58	17,02	2,36	29,74

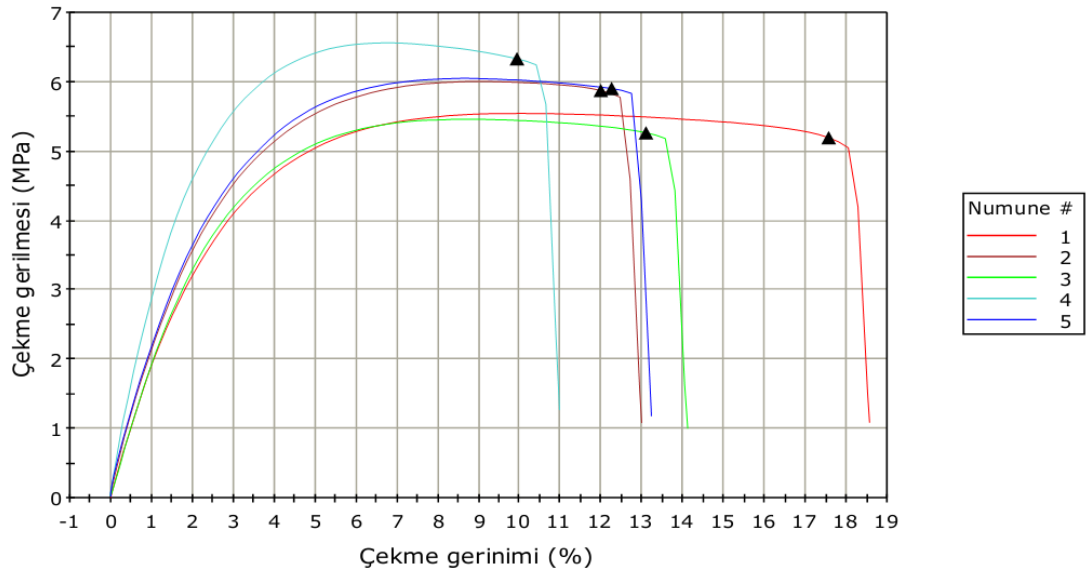


Şekil 3.21. T_0+10 , -55 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.21’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -55 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.16’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 443,57 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 4,82 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 12,60 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.16. T_0+10 , -55 C° sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,790	10,360	370,74	4,07	19,19	3,97	26,37
2	8,940	10,000	470,02	5,26	9,46	5,11	14,31
3	8,850	10,000	463,42	5,24	9,36	5,15	12,33
4	8,800	10,970	463,38	4,80	11,71	4,71	17,96
5	8,850	10,800	450,30	4,71	13,28	4,47	22,13
Ortalama	8,846	10,426	443,57	4,82	12,60	4,69	18,62
Standart Sapma	0,06	0,45	41,34	0,48	4,03	0,49	5,72
Maksimum	8,940	10,970	470,02	5,26	19,19	5,15	26,37
Minimum	8,790	10,000	370,74	4,07	9,36	3,97	12,33
Ortalama + 3 SD	9,024	11,770	567,59	6,27	24,70	6,15	35,78
Ortalama - 3 SD	8,668	9,082	319,56	3,36	0,50	3,22	1,46



Şekil 3.22. T_0+10 , $-65\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.22’de T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-65\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.17’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 526,98 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 5,92 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 8,7 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.17. T_0+10 , $-65\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,800	10,380	506,41	5,54	10,03	5,20	17,54
2	8,760	10,150	533,86	6,00	8,99	5,87	11,97
3	8,780	9,870	473,29	5,46	8,82	5,27	13,07
4	8,860	9,930	577,16	6,56	6,88	6,33	9,92
5	8,780	10,250	544,18	6,05	8,76	5,90	12,24
Ortalama	8,796	10,116	526,98	5,92	8,70	5,71	12,95
Standart Sapma	0,04	0,21	39,27	0,44	1,14	0,48	2,82
Maksimum	8,860	10,380	577,16	6,56	10,03	6,33	17,54
Minimum	8,760	9,870	473,29	5,46	6,88	5,20	9,92
Ortalama + 3 SD	8,911	10,759	644,78	7,25	12,11	7,15	21,39
Ortalama - 3 SD	8,681	9,473	409,18	4,59	5,28	4,28	4,50

Çizelge 3.18. T₀+10, 5 mm/d çekme hızı test sonuçları

	Test Sıcaklığı(°C)	
	0	71
Maksimum Stres(MPa)	1,17	0,67
Maksimum Strain(%)	22,1	21,31
Kopma Stres (MPa)	0,79	0,58
Kopma Strain (%)	25,24	24,32

Çizelge 3.19. T₀+10, 50 mm/d çekme hızı test sonuçları

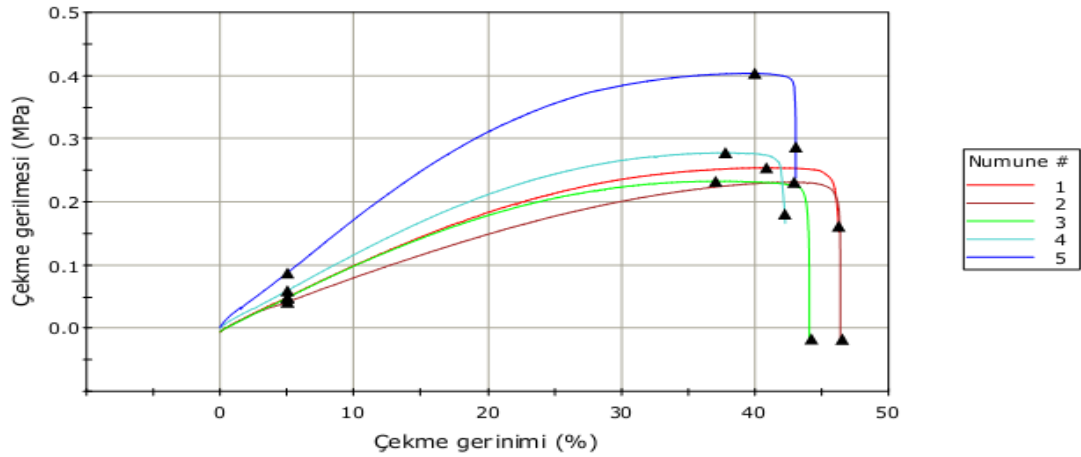
	Test Sıcaklığı (°C)					
	-65	-55	-40	-20	0	71
Maksimum Stres(MPa)	4,43	3,28	2,52	1,78	1,37	0,83
Maksimum Strain(%)	16,61	20,46	24,70	23,35	26,52	21,97
Kopma Stres (MPa)	4,10	2,97	2,16	1,50	1,14	0,78
Kopma Strain (%)	24,98	31,32	33,52	29,19	31,03	25,79

Çizelge 3.20. T₀+10, 500 mm/d çekme hızı test sonuçları

	Test Sıcaklığı (°C)					
	-65	-55	-40	-20	0	35
Maksimum Stres(MPa)	5,92	4,82	3,07	2,34	1,57	1,30
Maksimum Strain(%)	8,7	12,6	23,52	23,94	25,72	24,19
Kopma Stres (MPa)	5,71	4,69	2,92	2,19	1,48	1,25
Kopma Strain (%)	12,95	18,62	33,78	33,35	32,08	29,06

Çizelge 3.18, Çizelge 3.19, Çizelge 3.20’de T₀+10 yaşındaki roket motorundan elde edilen test numunelerine 5, 50 ve 500 mm/d çekme hızında yapılan çekme testleri sonuçları toplu olarak verilmiştir.

3.5.2.T₀+13 Yaşındaki Roket Yakıtının Çekme Test Sonuçları



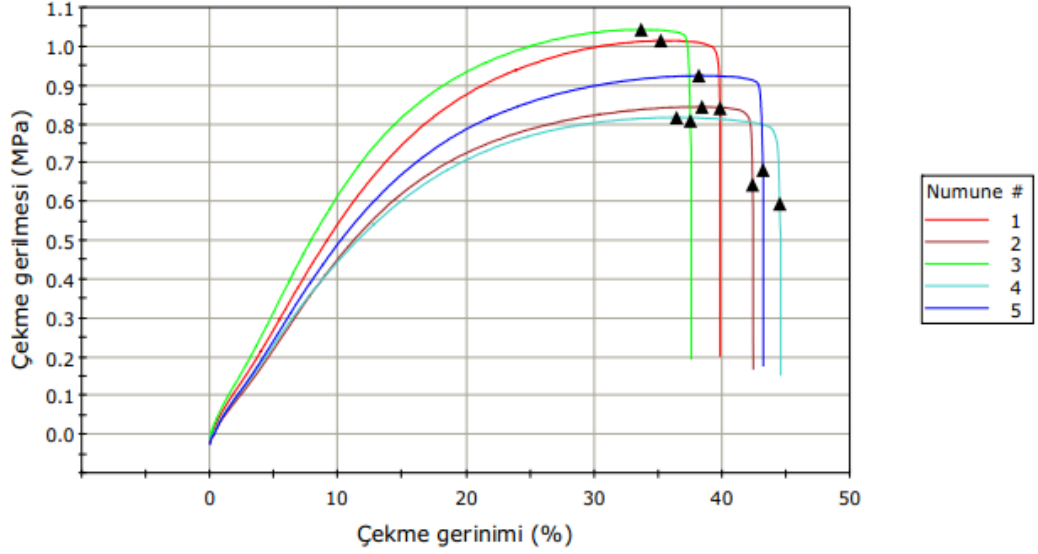
Şekil 3.23.T₀+13, 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.23’de T₀+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.21’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 22,8 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,28 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 39,65 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.21.T₀+13, 71 C° sıcaklıkta 1 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,48	9,40	20,28	0,25	40,79	46,17	0,16
2	8,52	9,68	19,13	0,23	42,85	46,44	-0,02
3	8,45	9,88	19,49	0,23	36,98	44,14	-0,02
4	8,50	9,37	22,16	0,28	37,71	42,14	0,18
5	8,55	9,55	32,96	0,40	39,90	42,97	0,29
Ortalama	8,50	9,58	22,80	0,28	39,65	44,37	0,12
Standart Sapma	0,04	0,21	5,80	0,07	2,37	1,90	0,13
Maksimum	8,55	9,88	32,96	0,40	42,85	46,44	0,29
Minimum	8,45	9,37	19,13	0,23	36,98	42,14	-0,02
Ortalama + 3 SD	8,61	10,21	40,20	0,49	46,76	50,08	0,52
Ortalama - 3 SD	8,39	8,94	5,41	0,07	32,54	38,66	-0,28

* T₀+13 yaşındaki roket yakıtından elde edilen 2 ve 3 numaralı numunelerin 71 C° de yapılan testlerinde cihaz kaynaklı olarak çekme gerilmesi sonuçları elde edilememiştir.

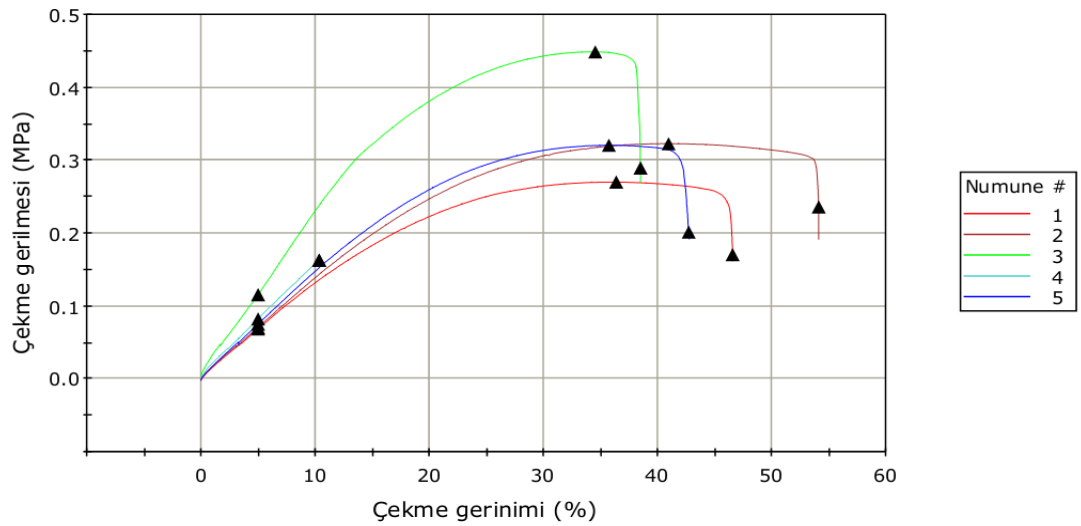


Şekil 3.24. T_0+13 , 0 C° Sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında Gerilme/Gerinim Grafiği

Şekil 3.24'te T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 35 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.22'de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 45,53 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,55 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 35,01 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.22. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,60	9,88	86,20	1,01	35,15	0,84	39,77
2	8,64	9,90	72,26	0,84	38,37	0,64	42,32
3	8,62	10,14	91,15	1,04	33,63	0,81	37,47
4	8,61	10,05	70,68	0,82	36,39	0,60	44,43
5	8,58	9,90	78,56	0,92	38,13	0,68	43,14
Ortalama	8,61	9,97	79,77	0,93	36,33	0,71	41,43
Standart Sapma	0,02	0,12	8,83	0,10	2,00	0,11	2,79
Maksimum	8,64	10,14	91,15	1,04	38,37	0,84	44,43
Minimum	8,58	9,88	70,68	0,82	33,63	0,60	37,47
Ortalama + 3 SD	8,68	10,32	106,25	1,23	42,34	1,03	49,81
Ortalama - 3 SD	8,54	9,63	53,29	0,63	30,33	0,40	33,05

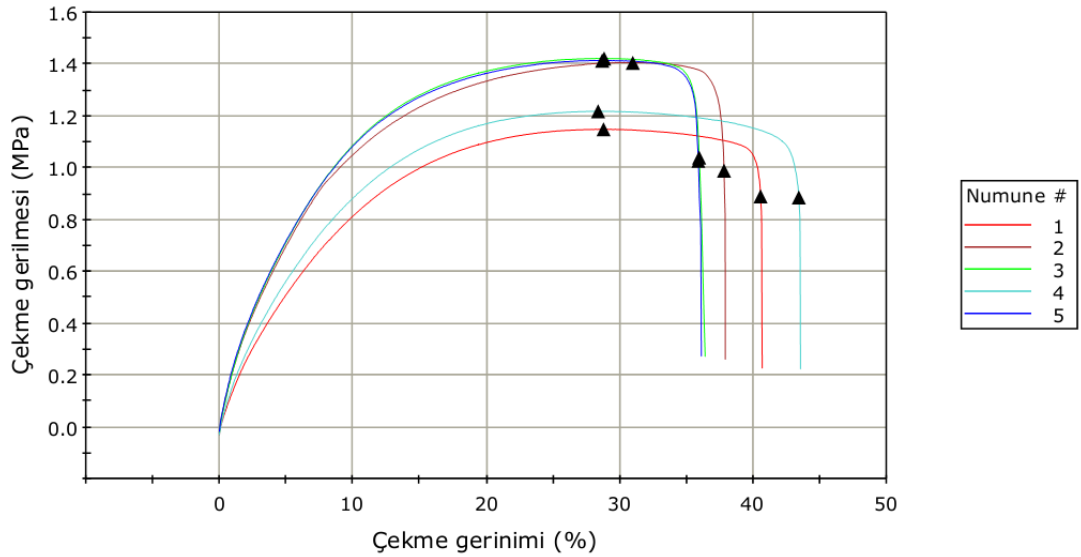


Şekil 3.25. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.25’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.23’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 27,86 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,34 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 36,84 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.23. T_0+13 , 71 C° sıcaklıkta 5 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,51	9,33	21,46	0,27	36,31	46,49	0,17
2	8,54	9,46	26,08	0,32	40,89	54,04	0,24
3	8,50	9,80	37,36	0,45	34,48	38,43	0,29
X 4	8,50	9,79	13,61	0,16	10,35	10,35	0,16
5	8,50	9,74	26,53	0,32	35,66	42,66	0,20
Ortalama	8,51	9,58	27,86	0,34	36,84	45,40	0,22
Standart Sapma	0,02	0,22	6,74	0,08	2,81	6,63	0,05
Maksimum	8,54	9,80	37,36	0,45	40,89	54,04	0,29
Minimum	8,50	9,33	21,46	0,27	34,48	38,43	0,17
Ortalama + 3 SD	8,57	10,26	48,07	0,57	45,27	65,29	0,38
Ortalama - 3 SD	8,46	8,91	7,64	0,11	28,41	25,52	0,07

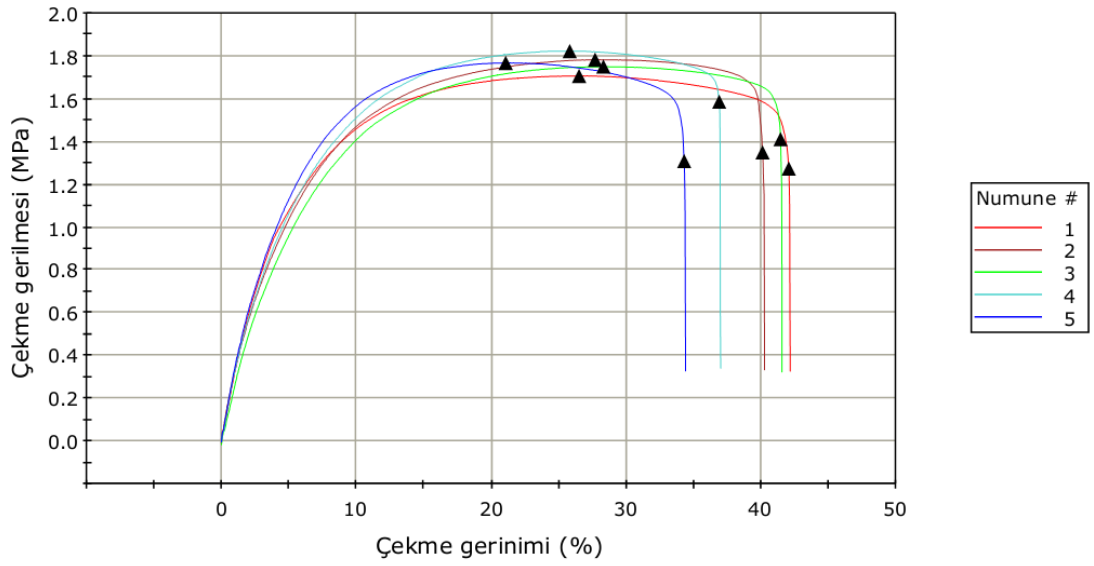


Şekil 3.26. T_0+13 , $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.26’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.24’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 104,46 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,32 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 29,09 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.24. T_0+13 , $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,43	9,54	92,38	1,15	28,75	0,89	40,50
2	8,47	9,15	108,95	1,41	30,92	0,99	37,76
3	8,40	9,30	111,07	1,42	28,79	1,04	35,90
4	8,46	9,41	97,07	1,22	28,34	0,89	43,36
5	8,40	9,50	112,84	1,41	28,64	1,03	35,82
Ortalama	8,43	9,38	104,46	1,32	29,09	0,97	38,67
Standart Sapma	0,03	0,16	9,15	0,13	1,04	0,07	3,24
Maksimum	8,47	9,54	112,84	1,42	30,92	1,04	43,36
Minimum	8,40	9,15	92,38	1,15	28,34	0,89	35,82
Ortalama + 3 SD	8,53	9,85	131,90	1,71	32,21	1,19	48,38
Ortalama - 3 SD	8,33	8,91	77,02	0,94	25,96	0,75	28,96

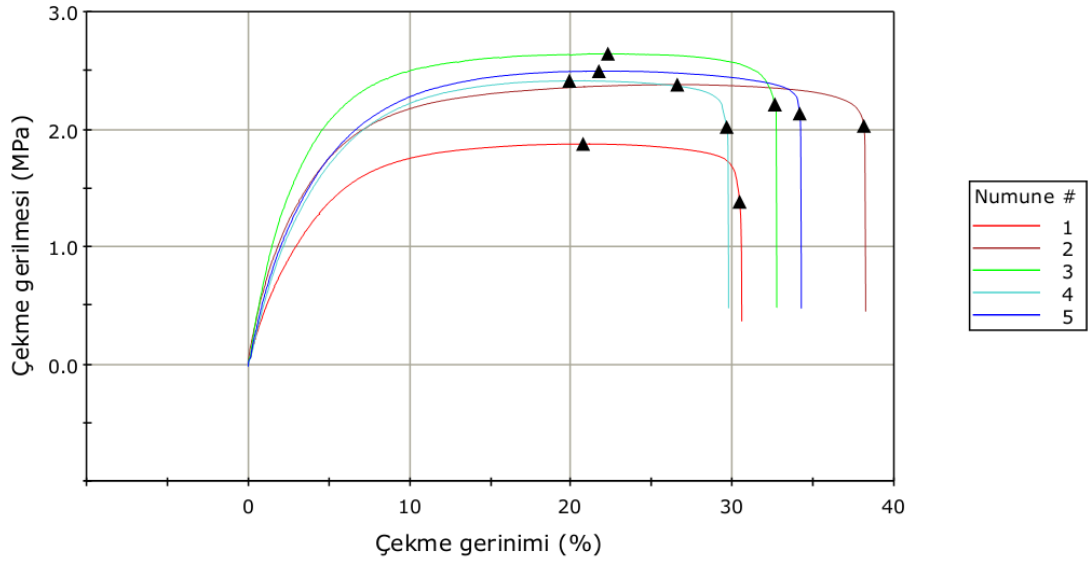


Şekil 3.27. T_0+13 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.27’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.25’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 142,19 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,77 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 25,84 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.25. T_0+13 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,46	9,38	135,45	1,71	26,48	1,27	42,00
2	8,49	9,55	144,48	1,78	27,66	1,35	40,07
3	8,52	9,70	144,62	1,75	28,28	1,41	41,39
4	8,43	9,31	143,02	1,82	25,78	1,59	36,85
5	8,48	9,57	143,40	1,77	21,03	1,31	34,25
Ortalama	8,48	9,50	142,19	1,77	25,84	1,39	38,91
Standart Sapma	0,03	0,16	3,83	0,04	2,86	0,12	3,28
Maksimum	8,52	9,70	144,62	1,82	28,28	1,59	42,00
Minimum	8,43	9,31	135,45	1,71	21,03	1,27	34,25
Ortalama + 3 SD	8,58	9,97	153,69	1,89	34,43	1,76	48,75
Ortalama - 3 SD	8,38	9,03	130,69	1,64	17,26	1,02	29,08

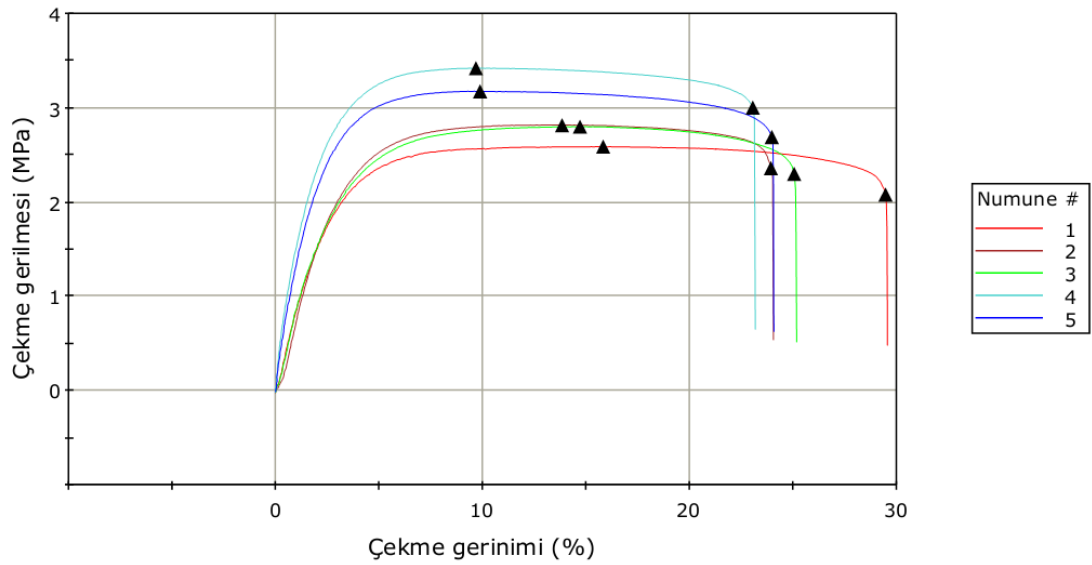


Şekil 3.28. T_0+13 , $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.28’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.26’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 22,8 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 2,36 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 22,2 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.26. T_0+13 , $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,48	10,08	160,27	1,87	20,70	1,39	30,37
2	8,54	9,63	195,87	2,38	26,53	2,03	38,05
3	8,52	9,40	211,68	2,64	22,23	2,21	32,56
4	8,47	9,42	192,55	2,41	19,84	2,02	29,58
5	8,43	9,21	193,77	2,50	21,67	2,13	34,09
Ortalama	8,49	9,55	190,83	2,36	22,20	1,96	32,93
Standart Sapma	0,04	0,33	18,75	0,29	2,59	0,33	3,37
Maksimum	8,54	10,08	211,68	2,64	26,53	2,21	38,05
Minimum	8,43	9,21	160,27	1,87	19,84	1,39	29,58
Ortalama + 3 SD	8,62	10,55	247,08	3,23	29,96	2,94	43,05
Ortalama - 3 SD	8,36	8,55	134,58	1,49	14,43	0,97	22,81

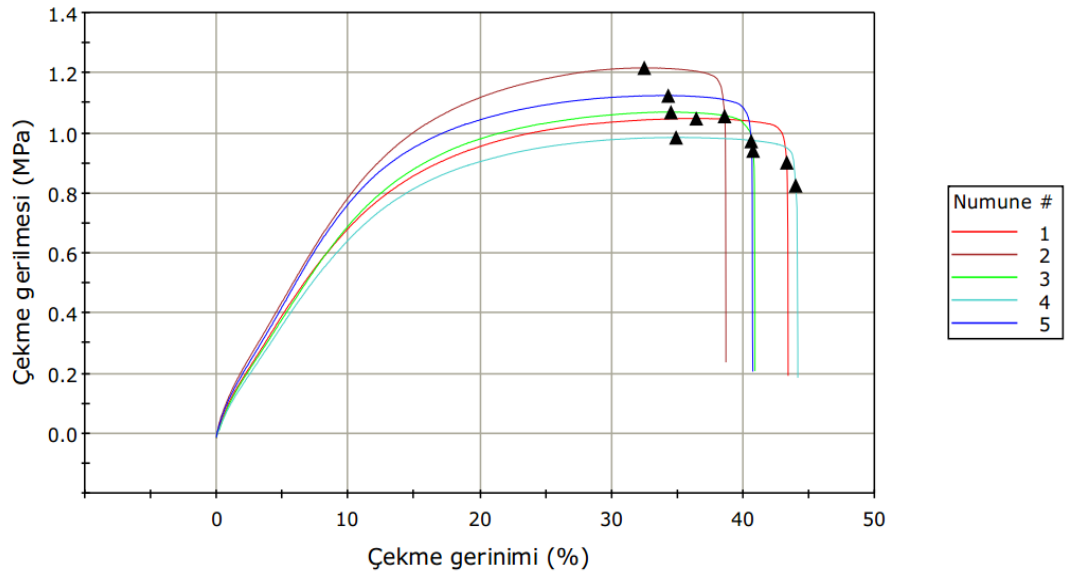


Şekil 3.29. T_0+13 , $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.29’da T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.27’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 244,11 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 2,96 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 12,76 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.27. T_0+13 , $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yuk (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,47	9,84	215,77	2,59	15,79	2,08	29,41
2	8,50	9,75	233,43	2,82	13,81	2,36	23,89
3	8,48	9,78	232,30	2,80	14,67	2,30	25,00
4	8,45	9,72	281,01	3,42	9,66	3,01	23,01
5	8,49	9,57	258,03	3,18	9,86	2,69	23,93
Ortalama	8,48	9,73	244,11	2,96	12,76	2,49	25,05
Standart Sapma	0,02	0,10	25,55	0,33	2,83	0,36	2,54
Maksimum	8,50	9,84	281,01	3,42	15,79	3,01	29,41
Minimum	8,45	9,57	215,77	2,59	9,66	2,08	23,01
Ortalama + 3 SD	8,54	10,03	320,77	3,96	21,24	3,57	32,66
Ortalama - 3 SD	8,42	9,43	167,44	1,96	4,27	1,40	17,44

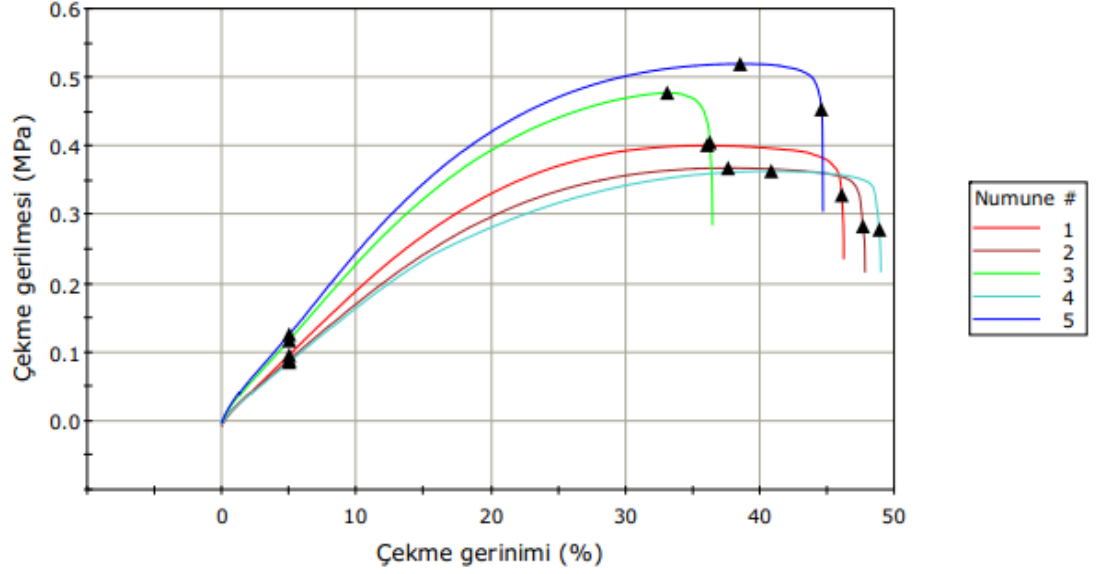


Şekil 3.30. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.30’da T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.28’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 92,53 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,09 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 34,48 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.28. T_0+13 , 0 C°Sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında Gerilme/Gerinim Değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,60	9,66	87,10	1,05	36,39	0,90	43,25
2	8,59	9,70	101,34	1,22	32,43	1,06	38,54
3	8,62	10,14	93,50	1,07	34,46	0,94	40,69
4	8,61	10,05	85,20	0,98	34,84	0,83	43,92
5	8,58	9,90	95,52	1,12	34,26	0,97	40,55
Ortalama	8,60	9,89	92,53	1,09	34,48	0,94	41,39
Standart Sapma	0,02	0,21	6,53	0,09	1,42	0,09	2,19
Maksimum	8,62	10,14	101,34	1,22	36,39	1,06	43,92
Minimum	8,58	9,66	85,20	0,98	32,43	0,83	38,54
Ortalama + 3 SD	8,65	10,52	112,13	1,35	38,73	1,20	47,96
Ortalama - 3 SD	8,55	9,26	72,93	0,83	30,22	0,68	34,83

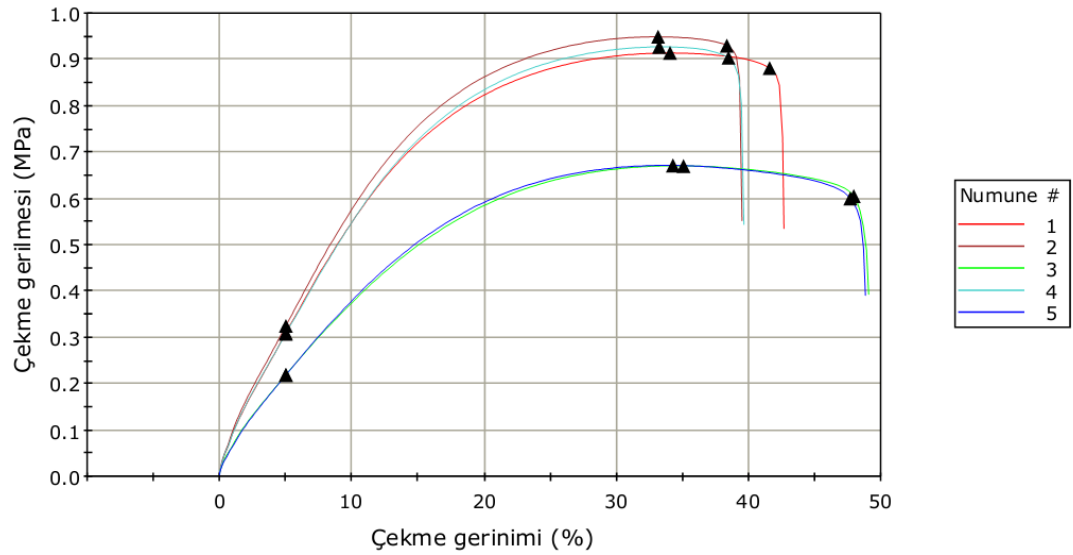


Şekil 3.31. T₀+13, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.31’de T₀+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.29’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 34,62 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,43 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 37,18 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.29. T₀+13, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,52	9,70	33,19	0,40	36,02	46,01	0,33
2	8,45	9,54	29,69	0,37	37,58	47,59	0,28
3	8,58	9,71	39,81	0,48	33,04	36,23	0,41
4	8,46	9,46	29,11	0,36	40,78	48,80	0,28
5	8,46	9,40	41,32	0,52	38,46	44,51	0,45
Ortalama	8,49	9,56	34,62	0,43	37,18	44,63	0,35
Standart Sapma	0,06	0,14	5,67	0,07	2,88	4,97	0,08
Maksimum	8,58	9,71	41,32	0,52	40,78	48,80	0,45
Minimum	8,45	9,40	29,11	0,36	33,04	36,23	0,28
Ortalama + 3 SD	8,66	9,98	51,62	0,63	45,82	59,53	0,58
Ortalama - 3 SD	8,33	9,14	17,62	0,22	28,53	29,73	0,12

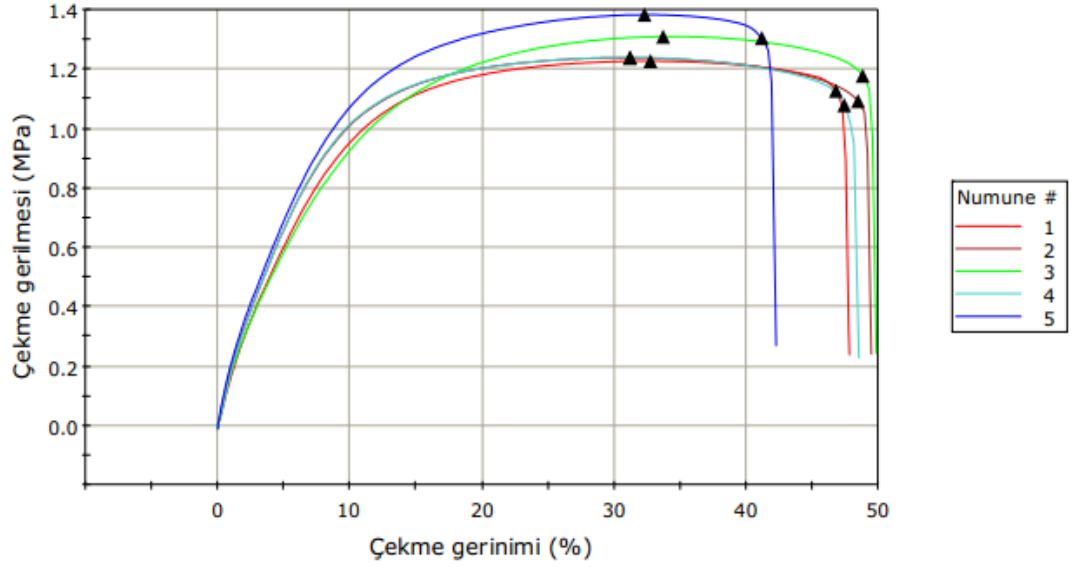


Şekil 3.32. T_0+13 , 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.32’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 35 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.30’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 67,30 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 0,83 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 33,90 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.30. $T_0+13,35$ C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalinlik (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (Standard) (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (Standard) (MPa)
1	8,66	9,53	75,41	0,91	33,98	41,51	0,88
2	8,55	9,47	76,81	0,95	33,09	38,29	0,93
3	8,58	9,45	54,36	0,67	35,02	47,87	0,61
4	8,62	9,45	75,49	0,93	33,17	38,42	0,90
5	8,55	9,48	54,42	0,67	34,21	47,60	0,60
Ortalama	8,59	9,48	67,30	0,83	33,90	42,74	0,78
Standart Sapma	0,05	0,03	11,80	0,14	0,80	4,74	0,17
Maksimum	8,66	9,53	76,81	0,95	35,02	47,87	0,93
Minimum	8,55	9,45	54,36	0,67	33,09	38,29	0,60
Ortalama + 3 SD	8,73	9,57	102,69	1,25	36,28	56,97	1,28
Ortalama - 3 SD	8,45	9,38	31,91	0,40	31,51	28,51	0,29

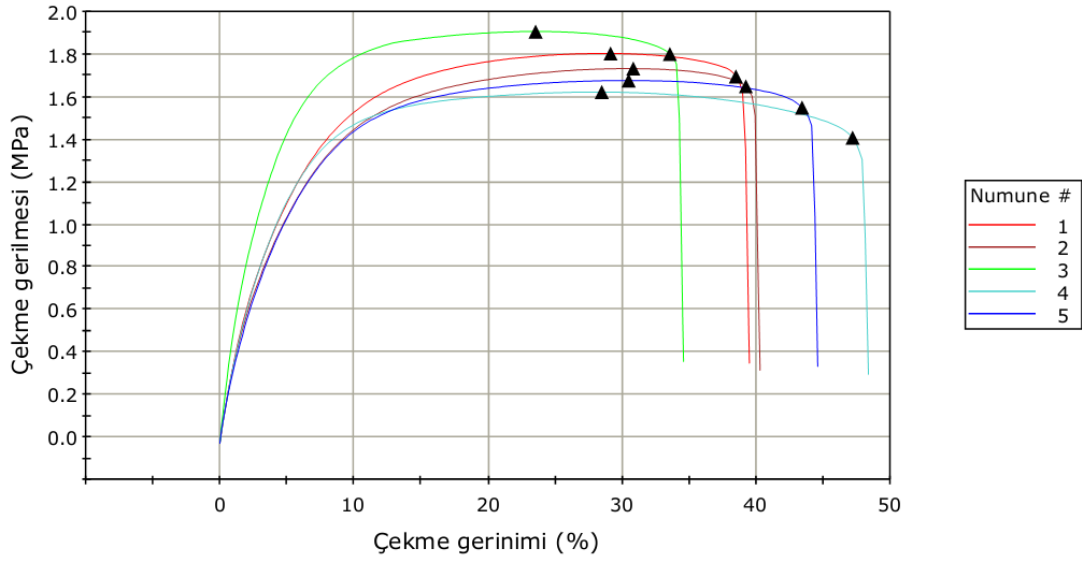


Şekil 3.33. T₀+13, 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.33’de T₀+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.31’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 109,28 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,28 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 32,19 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.31. T₀+13,0 C°sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,58	10,00	105,25	1,23	32,70	1,13	46,73
2	8,62	9,86	105,18	1,24	31,16	1,09	48,40
3	8,60	9,98	112,33	1,31	33,67	1,18	48,76
4	8,59	10,01	106,53	1,24	31,18	1,08	47,36
5	8,60	9,85	117,08	1,38	32,26	1,30	41,12
Ortalama	8,60	9,94	109,28	1,28	32,19	1,16	46,47
Standart							
Sapma	0,01	0,08	5,26	0,07	1,06	0,09	3,10
Maksimum	8,62	10,01	117,08	1,38	33,67	1,30	48,76
Minimum	8,58	9,85	105,18	1,23	31,16	1,08	41,12
Ortalama + 3 SD	8,64	10,18	125,06	1,48	35,38	1,43	55,78
Ortalama - 3 SD	8,55	9,70	93,49	1,08	29,00	0,88	37,17

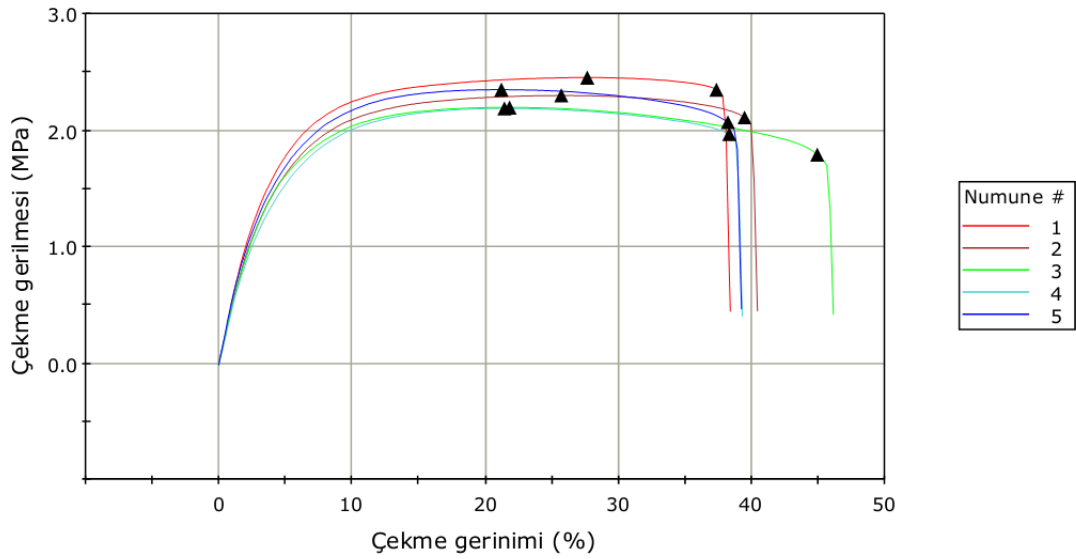


Şekil 3.34. $T_0+13, -20\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.34’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -20 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.32’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 137,28 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 1,75 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 28,45 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.32. $T_0+13, -20\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,46	9,05	138,04	1,80	29,09	1,70	38,44
2	8,55	9,17	135,82	1,73	30,78	1,65	39,16
3	8,56	9,00	146,81	1,91	23,51	1,80	33,51
4	8,55	9,90	137,28	1,62	28,43	1,41	47,13
5	8,58	8,93	128,47	1,68	30,45	1,55	43,35
Ortalama	8,54	9,21	137,28	1,75	28,45	1,62	40,32
Standart Sapma	0,05	0,40	6,54	0,11	2,93	0,15	5,17
Maksimum	8,58	9,90	146,81	1,91	30,78	1,80	47,13
Minimum	8,46	8,93	128,47	1,62	23,51	1,41	33,51
Ortalama + 3 SD	8,68	10,40	156,91	2,08	37,23	2,07	55,82
Ortalama - 3 SD	8,40	8,02	117,66	1,42	19,68	1,17	24,81

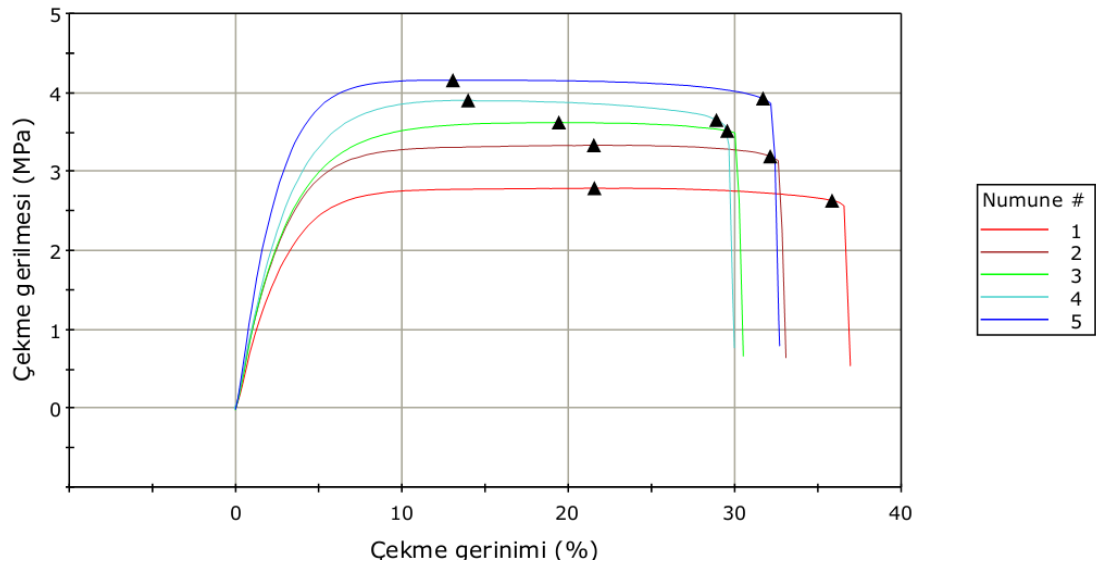


Şekil 3.35. $T_0+13,-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.35’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.33’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 187,45 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 2,30 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 23,53 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.33. $T_0+13,-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,51	9,63	200,87	2,45	27,62	2,35	37,31
2	8,52	9,48	185,67	2,30	25,67	2,11	39,42
3	8,45	10,19	189,07	2,20	21,78	1,79	44,88
4	8,42	9,48	174,58	2,19	21,40	1,97	38,27
5	8,44	9,44	187,06	2,35	21,17	2,07	38,16
Ortalama	8,47	9,64	187,45	2,30	23,53	2,06	39,61
Standart Sapma	0,04	0,31	9,38	0,11	2,94	0,20	3,04
Maksimum	8,52	10,19	200,87	2,45	27,62	2,35	44,88
Minimum	8,42	9,44	174,58	2,19	21,17	1,79	37,31
Ortalama + 3 SD	8,60	10,59	215,57	2,63	32,34	2,67	48,73
Ortalama - 3 SD	8,33	8,70	159,32	1,97	14,72	1,44	30,48

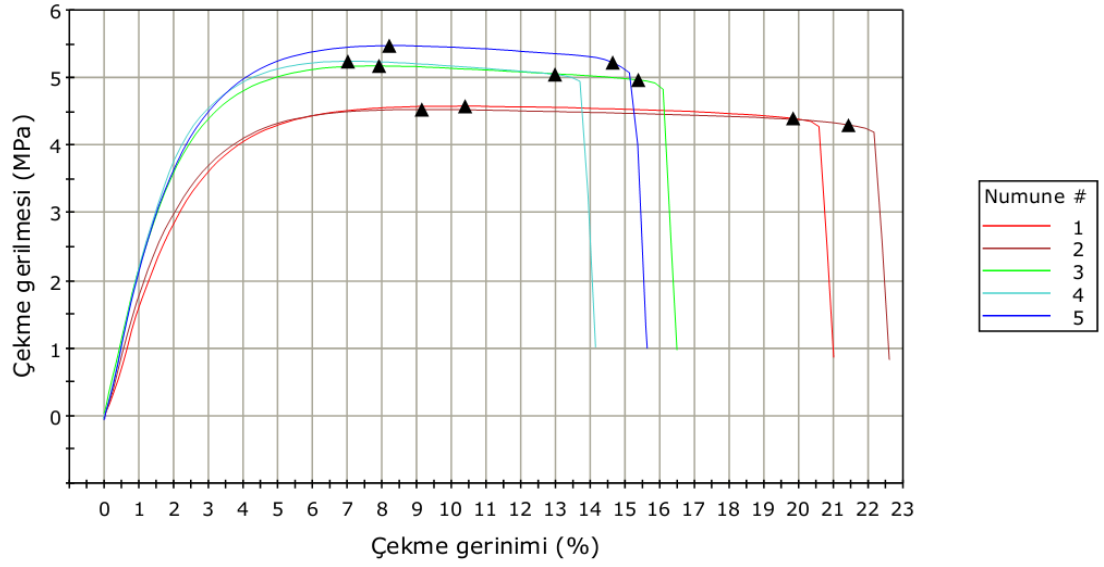


Şekil 3.36. $T_0+13,-55\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.36'da T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -55 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.34'de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 287,56 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 3,56 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 17,86 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.34. $T_0+13,-55\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilmesi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilmesi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,55	9,41	224,79	2,79	21,51	2,64	35,76
2	8,56	9,38	267,83	3,34	21,47	3,20	32,06
3	8,51	9,63	296,99	3,62	19,38	3,52	29,48
4	8,46	9,69	320,13	3,91	13,94	3,66	28,84
5	8,54	9,24	328,05	4,16	13,02	3,93	31,62
Ortalama	8,52	9,47	287,56	3,56	17,86	3,39	31,55
Standart Sapma	0,04	0,19	42,19	0,53	4,11	0,49	2,72
Maksimum	8,56	9,69	328,05	4,16	21,51	3,93	35,76
Minimum	8,46	9,24	224,79	2,79	13,02	2,64	28,84
Ortalama + 3 SD	8,65	10,03	414,12	5,15	30,19	4,87	39,72
Ortalama - 3 SD	8,40	8,91	161,00	1,98	5,54	1,90	23,38



Şekil 3.37. $T_0+13, -65\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında gerilme/gerinim grafiği

Şekil 3.37’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -65 C° sıcaklıkta 500 mm/d çekme hızında çekme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.35’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 401,03 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki ortalama çekme gerilmesi 5,0 MPa olarak, çekme gerinimi ise % 8,52 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.35. $T_0+13, -65\text{ C}^\circ$ sıcaklıkta 500mm/d çekme hızında gerilme/gerinim değerleri

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Max.Yükteki Çekme Gerilimi (MPa)	Max.Yükteki Çekme Gerinimi (%)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerilimi (MPa)	Kopma Noktasındaki Çekme Gerinimi (%)
1	8,49	9,53	370,77	4,58	10,38	4,40	19,80
2	8,50	9,65	372,03	4,54	9,13	4,30	21,39
3	8,41	9,00	391,78	5,18	7,90	4,97	15,35
4	8,47	9,95	441,98	5,24	7,01	5,05	12,96
5	8,54	9,17	428,62	5,47	8,19	5,23	14,62
Ortalama	8,48	9,46	401,03	5,00	8,52	4,79	16,83
Standart Sapma	0,05	0,38	32,71	0,42	1,29	0,41	3,60
Maksimum	8,54	9,95	441,98	5,47	10,38	5,23	21,39
Minimum	8,41	9,00	370,77	4,54	7,01	4,30	12,96
Ortalama + 3 SD	8,62	10,60	499,17	6,26	12,38	6,02	27,61
Ortalama - 3 SD	8,34	8,32	302,90	3,74	4,66	3,56	6,04

Çizelge 3.36. T₀+13, 5 mm/d çekme hızı test sonuçları

	Test Sıcaklığı(°C)	
	0	71
Maksimum Stres(MPa)	0.93	0,34
Maksimum Strain(%)	36.33	36,84
Kopma Stres (MPa)	0,71	0,22
Kopma Strain (%)	41.43	45,40

Çizelge 3.37. T₀+13, 50 mm/d çekme hızı test sonuçları

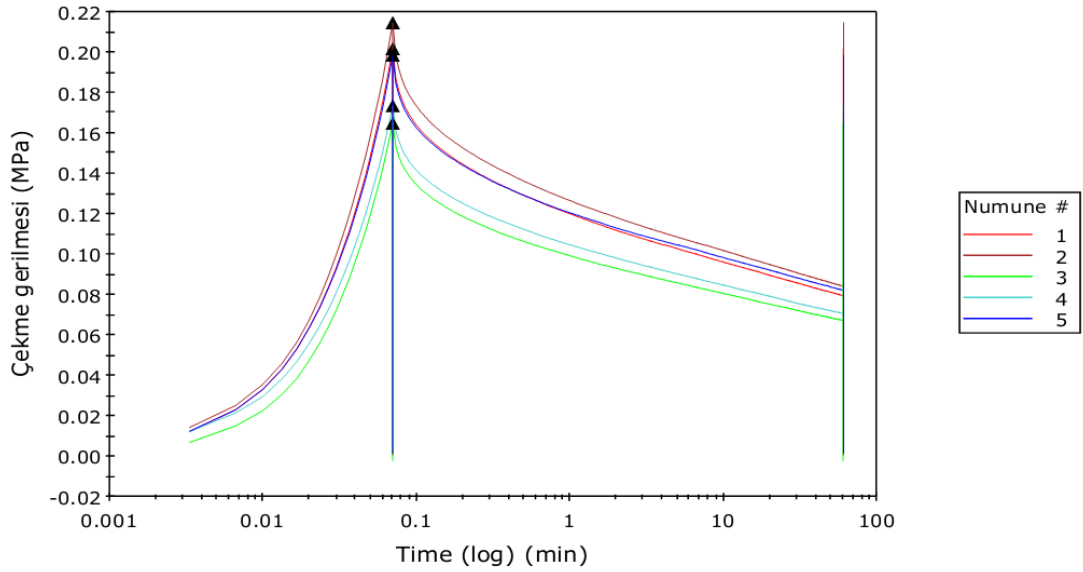
	Test Sıcaklığı (°C)					
	-65	-55	-40	-20	0	71
Maksimum Stres(MPa)	2.96	2.36	1.77	1.32	1.09	0.43
Maksimum Strain(%)	12.76	22.2	25.84	29.09	34.48	37.18
Kopma Stres (MPa)	2.49	1.96	1.39	0.97	0.94	0.35
Kopma Strain (%)	25.05	32.93	38.91	38.67	41.39	44.63

Çizelge 3.38. T₀+13, 500 mm/d çekme hızı test sonuçları

	Test Sıcaklığı (C°)					
	-65	-55	-40	-20	0	35
Maks. Stress (MPa)	5	3.56	2.30	1.75	1.28	0.83
Maks. Strain (%)	8.52	17.86	23.53	28.45	32.19	33.90
Kopma Stress (MPa)	4.79	3.39	2.06	1.62	1.16	0.78
Kopma Strain (%)	16.83	31.55	39.61	40.32	46.47	42.74

Çizelge 3.36, Çizelge 3.37, Çizelge 3.38’de T₀+13 yaşındaki roket motorundan elde edilen test numunelerine 5, 50 ve 500 mm/d çekme hızlarında yapılan çekme test sonuçları toplu olarak verilmiştir.

3.5.3. T₀+10 Yaşındaki Roket Yakıtının Gerinim/Gevşeme Test Sonuçları

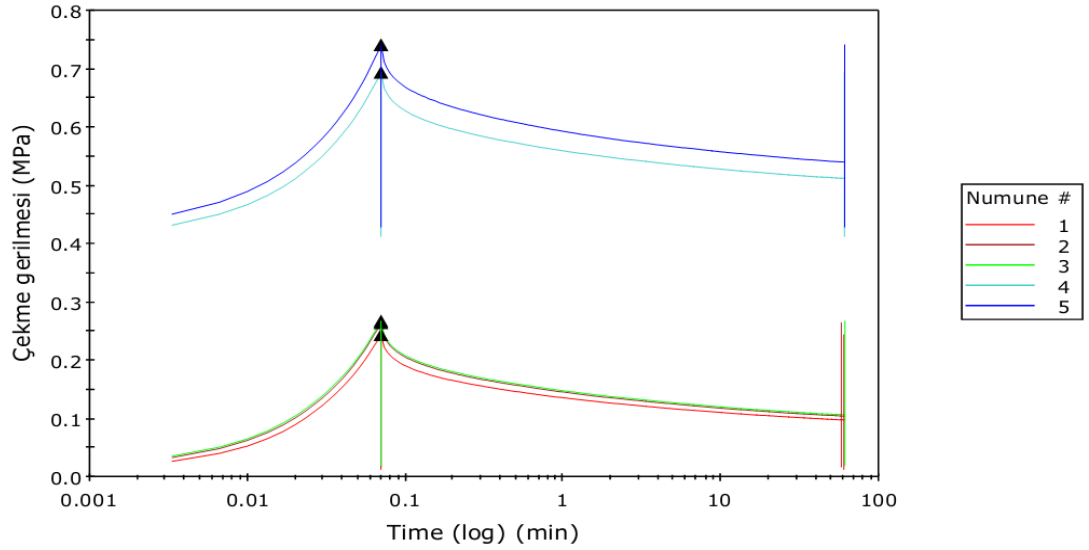


Şekil 3.38. T+10, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.38’de T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.39’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 17,08 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 10,2 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.39. 71C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalinlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,84	9,98	17,80	10,80	0,12
2	8,85	9,96	18,91	11,49	0,13
3	8,87	10,27	15,01	8,88	0,10
4	8,90	10,37	16,01	9,48	0,10
5	8,84	10,07	17,66	10,35	0,12
	8,86	10,13	17,08	10,20	0,11
Ortalama					
Standart	0,02550	0,18180	1,55208	1,03697	0,01362
Sapma					
Minimum	8,84	9,96	15,01	8,88	0,10
Maksimum	8,90	10,37	18,91	11,49	0,13

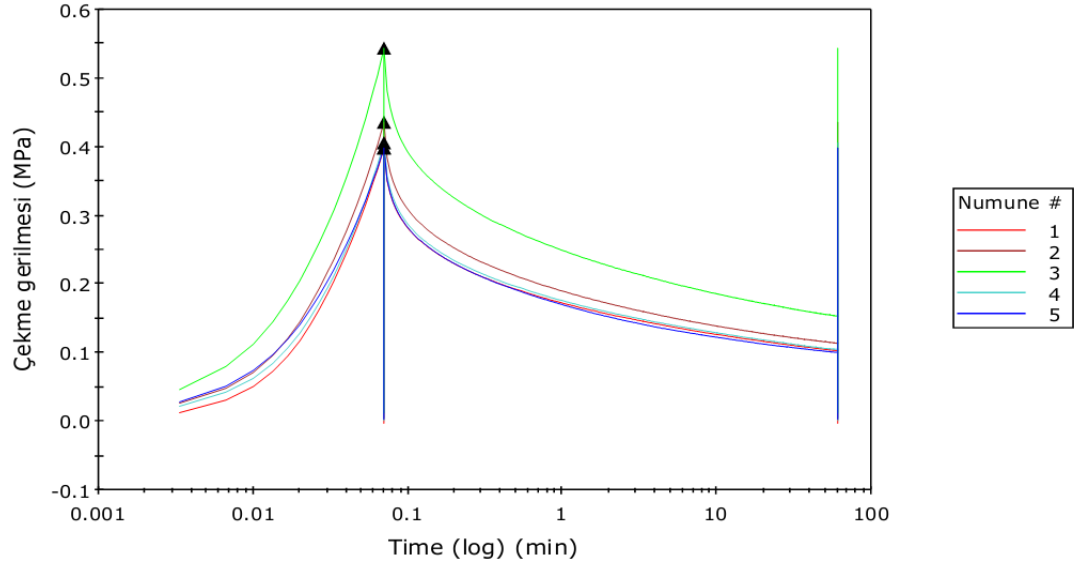


Şekil 3.39. T+10, 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.39’da T_0+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.40’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 40,13 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 15,48 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.40. 35C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	9,05	10,20	22,61	13,48	0,15
2	9,03	10,20	24,41	14,74	0,16
3	9,44	9,72	24,61	14,76	0,16
4	9,02	10,08	63,06	16,52	0,18
5	9,00	9,89	65,96	17,90	0,20
Ortalama	9,11	10,02	40,13	15,48	0,17
Standart Sapma	0,18647	0,20933	22,29362	1,73083	0,02156
Minimum	9,00	9,72	22,61	13,48	0,15
Maksimum	9,44	10,20	65,96	17,90	0,20

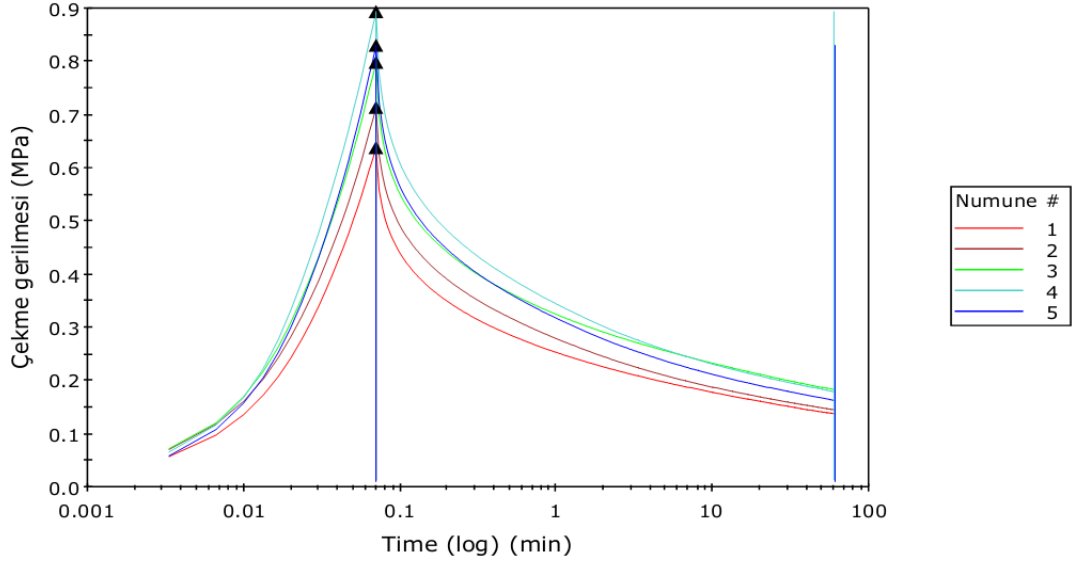


Şekil 3.40. T+10, 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.40'da T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.41'de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 38,87 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 28,59 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.41. 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalinlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,88	10,35	36,60	27,07	0,29
2	8,87	9,63	37,20	27,44	0,32
3	9,02	9,51	46,63	33,45	0,39
4	8,93	10,34	37,49	27,77	0,30
5	8,93	10,25	36,46	27,22	0,30
Ortalama	8,93	10,02	38,87	28,59	0,32
Standart Sapma	0,05941	0,41119	4,35442	2,72984	0,04008
Minimum	8,87	9,51	36,46	27,07	0,29
Maksimum	9,02	10,35	46,63	33,45	0,39

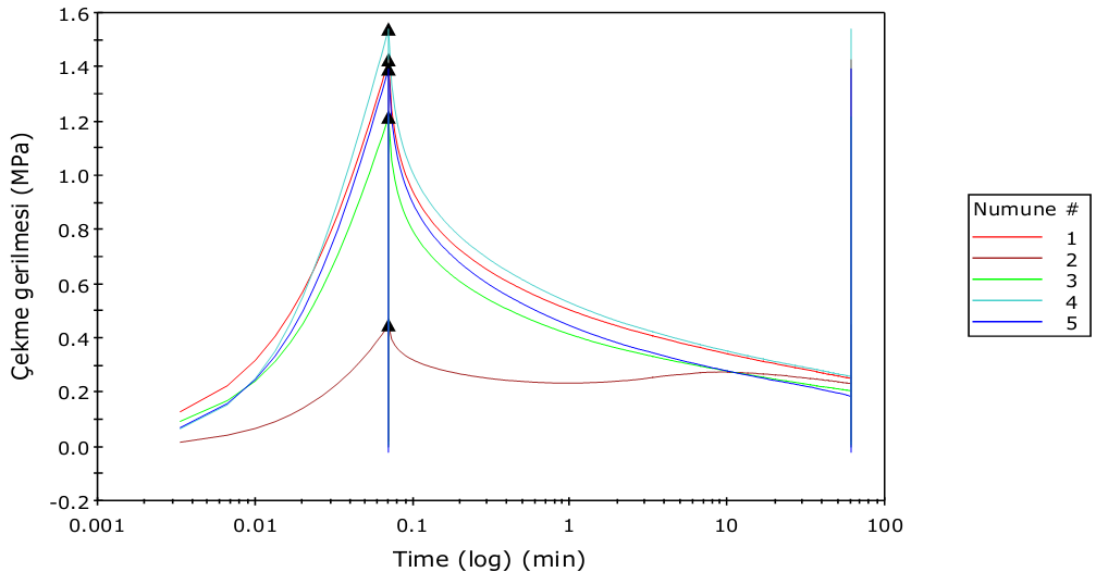


Şekil 3.41. T+10, -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.41’de T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -20 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.42’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 68,44 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 54,07 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.42. -20C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalinlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,87	9,92	56,18	43,97	0,50
2	8,85	10,32	65,17	51,82	0,57
3	8,93	10,23	72,94	56,14	0,61
4	8,90	9,73	77,36	61,78	0,71
5	8,94	9,50	70,52	56,64	0,67
Ortalama	8,90	9,94	68,44	54,07	0,61
Standart Sapma	0,03834	0,34154	8,14088	6,66034	0,08353
Minimum	8,85	9,50	56,18	43,97	0,50
Maksimum	8,94	10,32	77,36	61,78	0,71

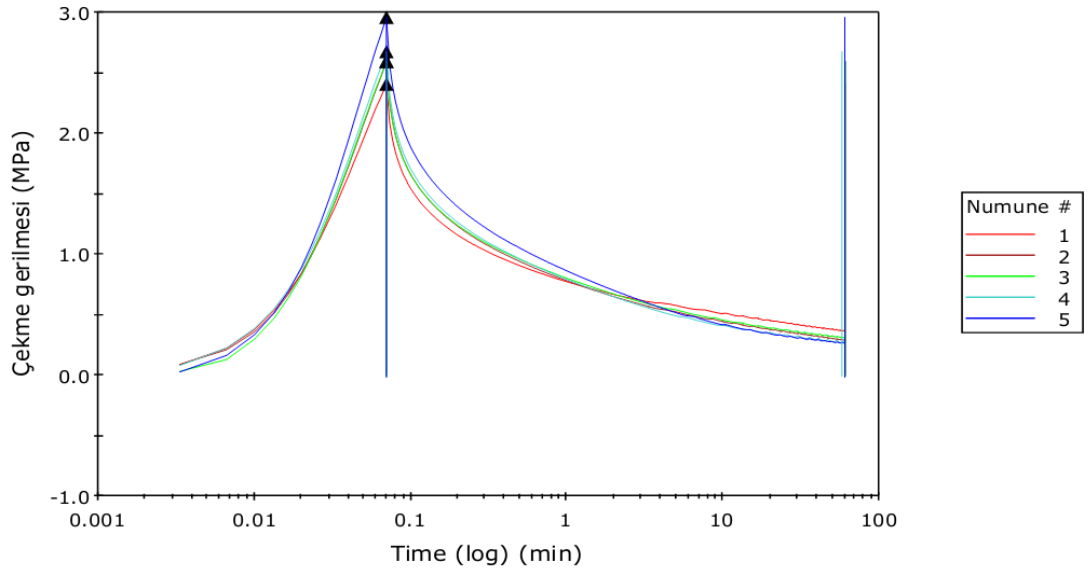


Şekil 3.42. T+10, -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.42’de T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -40 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.43’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 108,16 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 87,34 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.43. -40C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (MPa)
1	7,92	9,86	111,40	91,48	1,17
2	9,00	10,84	43,99	21,08	0,22
3	8,98	10,97	119,70	99,17	1,01
4	9,00	10,08	139,71	116,02	1,28
5	8,96	10,09	125,99	108,95	1,21
	8,77	10,37	108,16	87,34	0,98
Ortalama					
Standart Sapma	0,47657	0,50087	37,33119	38,20061	0,43614
Minimum	7,92	9,86	43,99	21,08	0,22
Maksimum	9,00	10,97	139,71	116,02	1,28

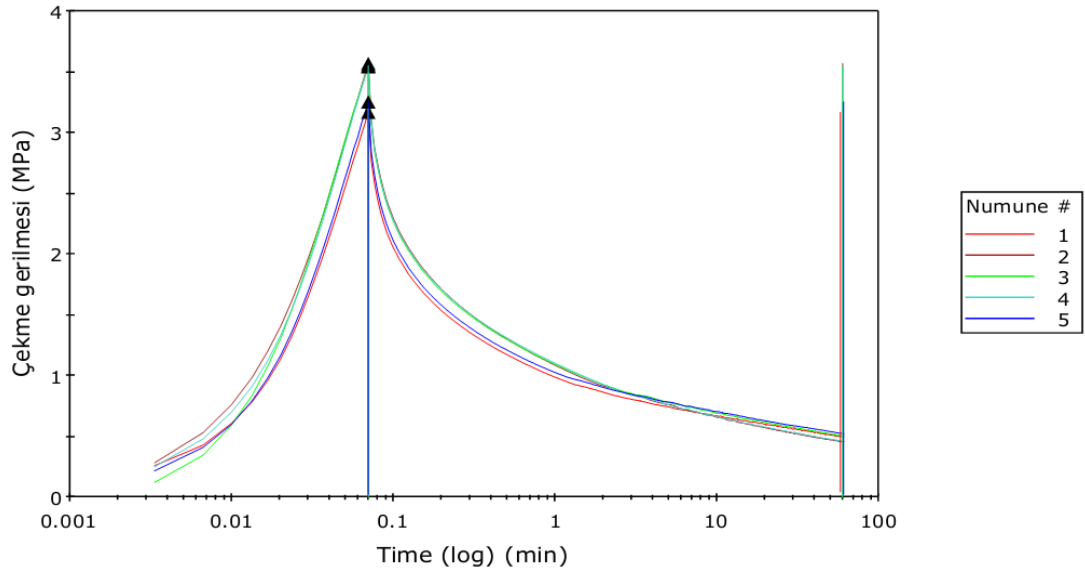


Şekil 3.43. T+10, -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.43’de T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -55 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.44’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 244,20 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 216,56 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.44. -55C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,94	10,27	220,73	187,28	2,04
2	8,95	10,39	240,98	213,87	2,30
3	8,99	9,96	232,24	204,69	2,29
4	9,02	10,16	245,03	220,32	2,40
5	9,01	10,59	282,03	256,63	2,69
Ortalama	8,98	10,27	244,20	216,56	2,34
Standart Sapma	0,03564	0,23713	23,10918	25,61725	0,23500
Minimum	8,94	9,96	220,73	187,28	2,04
Maksimum	9,02	10,59	282,03	256,63	2,69



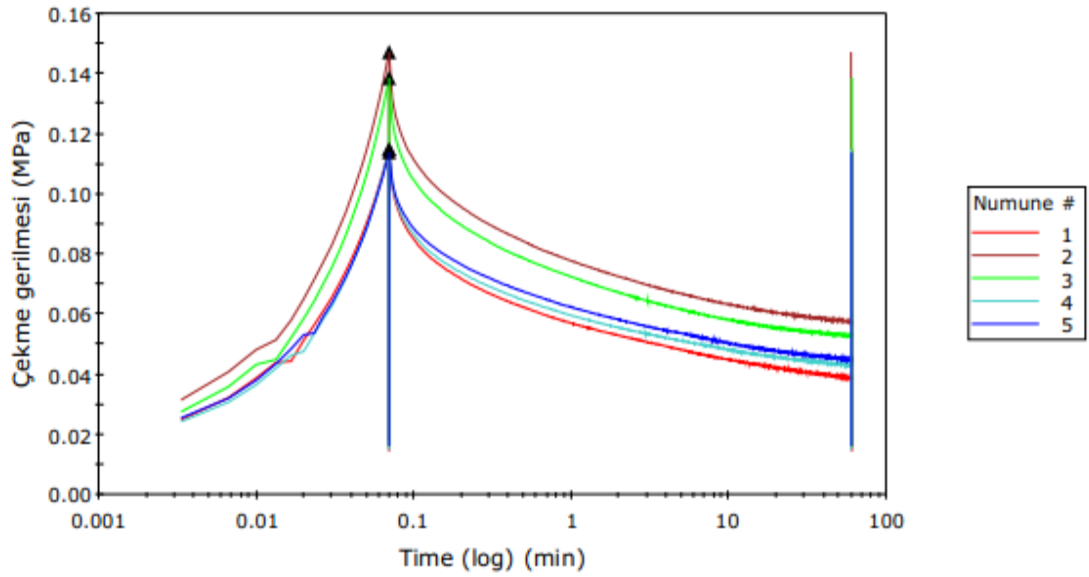
Şekil 3.44. T+10, -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.44’de T₀+10 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin -65 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.45’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 308,80 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 264,48 N olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.45. -65C° sıcaklıkta 50mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,89	10,56	297,09	250,30	2,67
2	8,95	9,60	306,39	267,07	3,11
3	9,06	10,29	330,09	283,06	3,04
4	9,02	10,12	323,97	281,75	3,09
5	8,93	9,87	286,45	240,24	2,73
Ortalama	8,97	10,09	308,80	264,48	2,92
Standart Sapma	0,06892	0,37090	18,20496	18,96605	0,21142
Minimum	8,89	9,60	286,45	240,24	2,67
Maksimum	9,06	10,56	330,09	283,06	3,11

3.5.4. T₀+13 Yaşındaki Roket Yakıtının Gerinim Gevşeme Test Sonuçları

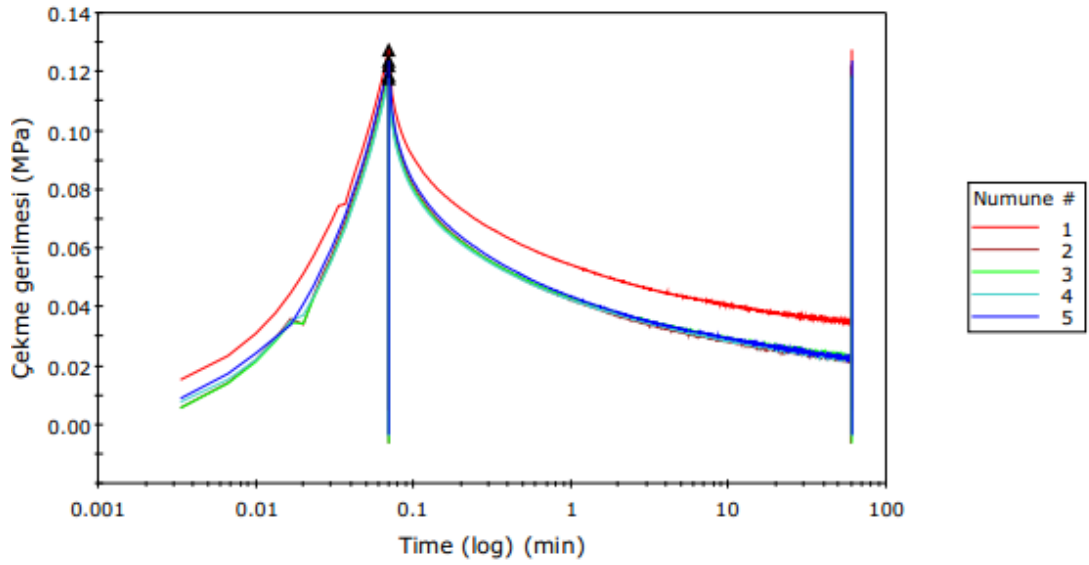


Şekil 3.45. T₀+13, 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.45’de T₀+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.46’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 10,75 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 6,7 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.46. 71 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (MPa)
1	8,59	10,04	9,91	6,57	0,08
2	8,62	10,11	12,81	7,80	0,09
3	8,62	10,03	11,98	7,41	0,09
4	8,65	9,88	9,81	6,15	0,07
5	8,64	9,38	9,23	5,59	0,07
Ortalama	8,62	9,89	10,75	6,70	0,08
Standart Sapma	0,02302	0,29609	1,55466	0,90297	0,00882
Minimum	8,59	9,38	9,23	5,59	0,07
Maksimum	8,65	10,11	12,81	7,80	0,09

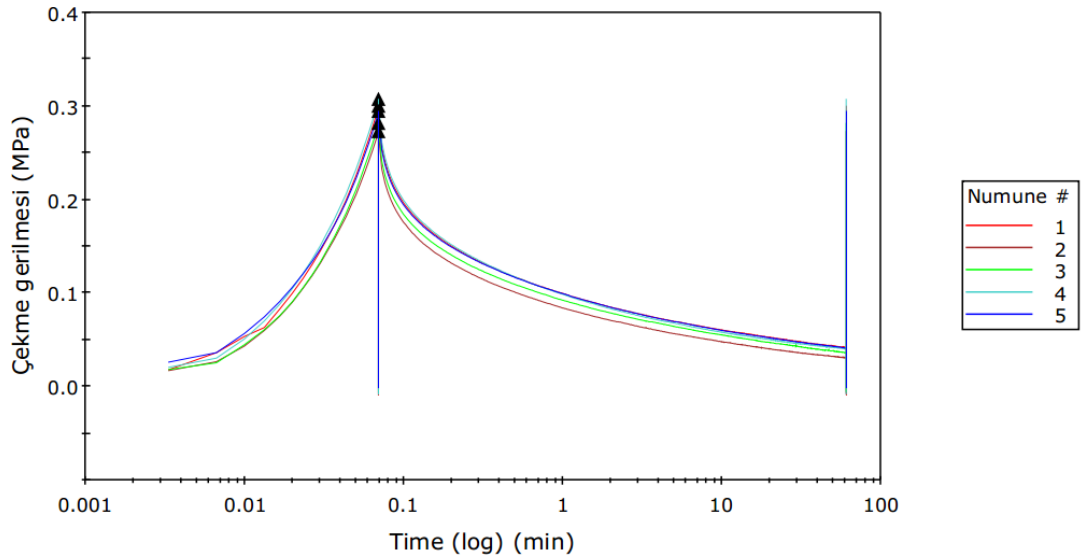


Şekil 3.46. T_0+13 , 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.46’da T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.47’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 10,43 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 8,29 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.47. 35 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,59	10,07	11,02	8,01	0,09
2	8,56	9,86	10,31	8,45	0,10
3	8,52	10,02	10,14	8,19	0,10
4	8,53	10,28	10,33	8,37	0,10
5	8,57	9,76	10,34	8,46	0,10
Ortalama	8,55	10,00	10,43	8,29	0,10
Standart Sapma	0,02881	0,20055	0,34232	0,19260	0,00352
Minimum	8,52	9,76	10,14	8,01	0,09
Maksimum	8,59	10,28	11,02	8,46	0,10

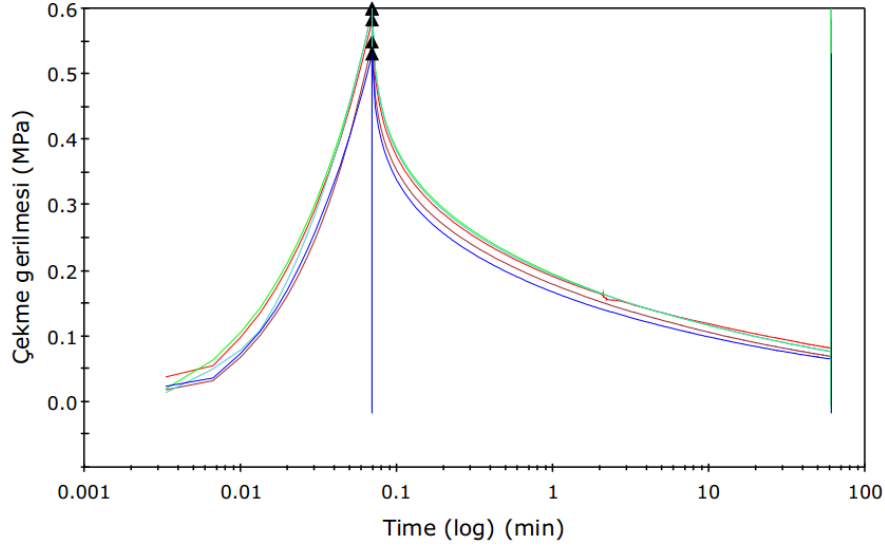


Şekil 3.47. T_0+13 , 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.47’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.48’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 10,43 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 8,29 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.48. 0 C° sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,57	9,98	25,68	22,11	0,26
2	8,56	10,00	23,40	20,74	0,24
3	8,61	10,00	24,27	21,14	0,25
4	8,62	10,00	26,51	23,01	0,27
5	8,59	9,99	25,29	21,74	0,25
Ortalama	8,59	9,99	25,03	21,75	0,25
Standart Sapma	0,02550	0,00894	1,21963	0,88242	0,00994
Minimum	8,56	9,98	23,40	20,74	0,24
Maksimum	8,62	10,00	26,51	23,01	0,27

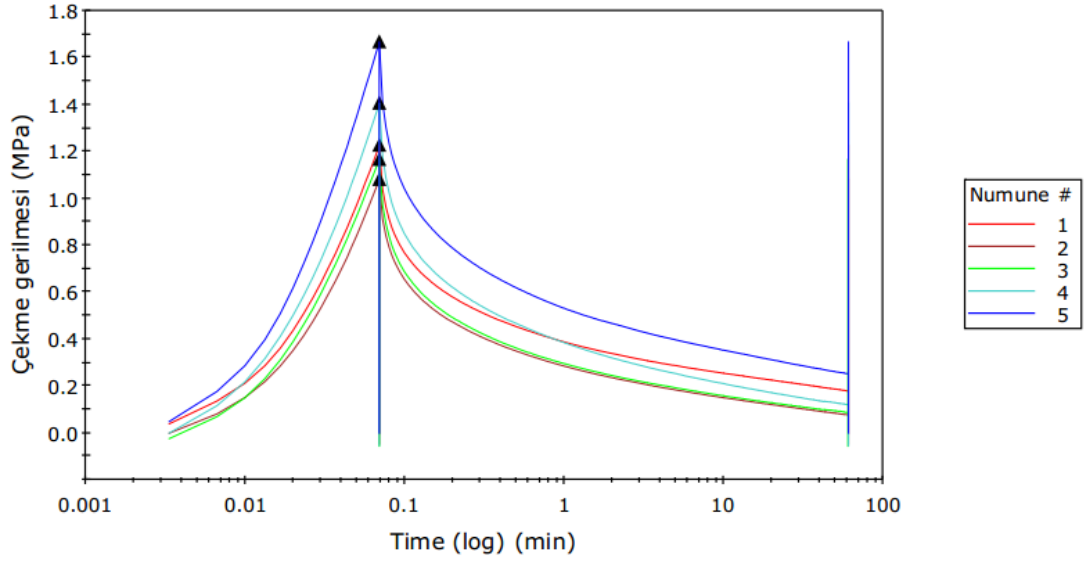


Şekil 3.48. T_0+13 , $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.48’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.49’da ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 49,35 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 42,91 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.49. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalinlik (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,65	10,04	50,59	43,43	0,50
2	8,67	10,01	47,67	41,60	0,48
3	8,60	10,00	51,49	44,83	0,52
4	8,56	9,97	51,17	44,60	0,52
5	8,58	10,06	45,83	40,11	0,46
Ortalama	8,61	10,02	49,35	42,91	0,50
Standart Sapma	0,04658	0,03507	2,48395	2,02465	0,02555
Minimum	8,56	9,97	45,83	40,11	0,46
Maksimum	8,67	10,06	51,49	44,83	0,52

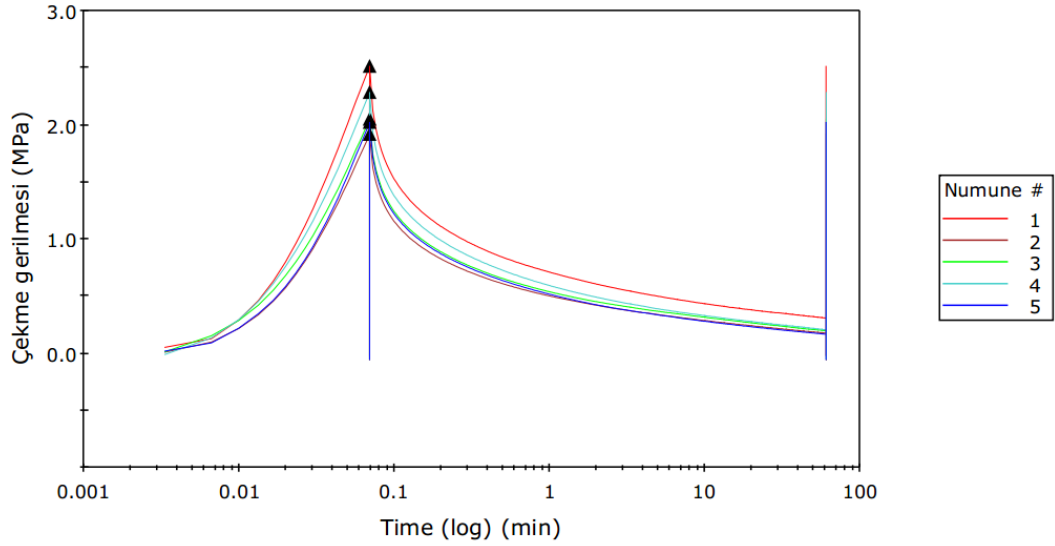


Şekil 3.49. T_0+13 , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.49’da T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.50’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 113,75 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 101,14 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.50. $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (MPa)
1	8,69	10,10	107,73	91,91	1,05
2	8,70	10,46	98,52	91,32	1,00
3	8,61	10,00	100,52	92,86	1,08
4	8,60	9,35	113,10	103,35	1,29
5	8,67	10,30	148,86	126,25	1,41
Ortalama	8,65	10,04	113,75	101,14	1,17
Standart Sapma	0,04615	0,42582	20,46859	14,87691	0,17590
Minimum	8,60	9,35	98,52	91,32	1,00
Maksimum	8,70	10,46	148,86	126,25	1,41

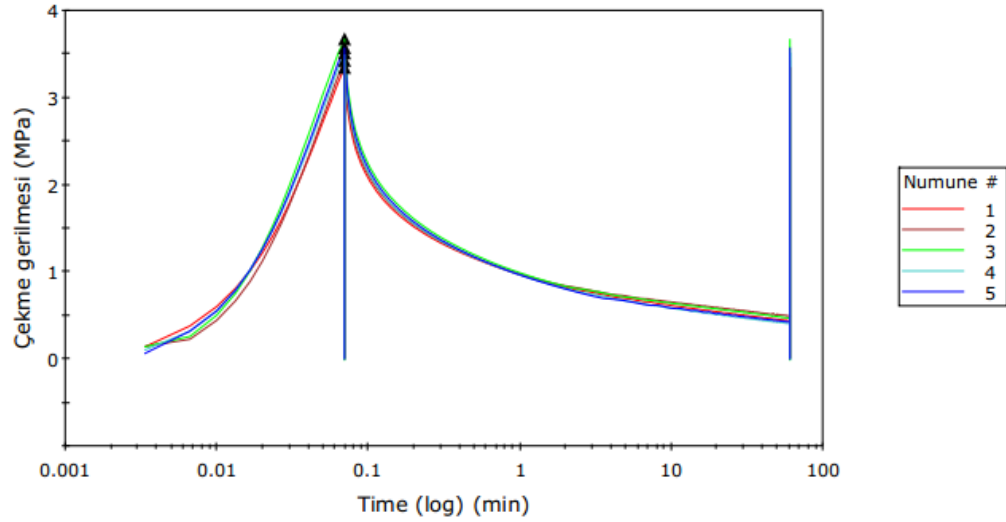


Şekil 3.50. T_0+13 , $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.50’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.51’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 186,30 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 167,99 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.51. $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalmasi (Total Relaxation) (MPa)
1	8,66	9,81	213,58	187,27	2,20
2	8,62	10,16	168,13	152,49	1,74
3	8,68	10,10	179,97	162,52	1,85
4	8,63	9,75	192,22	174,89	2,08
5	8,57	10,23	177,62	162,80	1,86
Ortalama	8,63	10,01	186,30	167,99	1,95
Standart Sapma	0,04207	0,21599	17,49819	13,38489	0,18889
Minimum	8,57	9,75	168,13	152,49	1,74
Maksimum	8,68	10,23	213,58	187,27	2,20



Şekil 3.51. T_0+13 , $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme grafiği

Şekil 3.51’de T_0+13 yaşındaki beş farklı yakıt numunesinin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme testi sonuç grafiği görülmektedir. Çizelge 3.52’de ise test esnasında uygulanan kuvvetler ve elde edilen veriler görülmektedir. Test uygulanan beş numuneye ortalama 304,32 N maksimum kuvvet uygulanmış ve maksimum yükteki toplam stres boşalması 265,32 N tespit edilmiştir.

Çizelge 3.52. $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 mm/d çekme hızında gerilme-gevşeme test sonuçları

	Genislik (mm)	Kalınlık (mm)	Max.Yük (N)	Yükteki Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (N)	Çekme Gerilmeside Toplam Stres Bosalması (Total Relaxation) (MPa)
1	8,64	9,93	287,03	249,13	2,90
2	8,68	9,95	295,94	253,13	2,93
3	8,65	9,87	313,45	273,25	3,20
4	8,59	9,97	300,60	265,42	3,10
5	8,57	10,60	324,58	285,67	3,14
Ortalama	8,63	10,06	304,32	265,32	3,06
Standart Sapma	0,04506	0,30196	14,80492	14,89658	0,13176
Minimum	8,57	9,87	287,03	249,13	2,90
Maksimum	8,68	10,60	324,58	285,67	3,20

3.5.5.Çekme Test Sonuçlarının Yorumlanması

Üst depolama şartlarının simule edildiği sıcaklık diliminde ($71\text{ }^{\circ}\text{C}$);

1 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin yaklaşık üçte biri oranında azaldığı ve geriniminin %100 arttığı (daha sünek bir hal aldığı),

5 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmış malzemenin mukavemetinin yaklaşık üçte biri oranında azaldığı %30 ve geriniminin %73 arttığı,

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmış malzemenin mukavemetinin yaklaşık üçte biri oranında azaldığı %30 ve geriniminin %74 arttığı,

Yaklaşık depolama sıcaklığı üst limitlerinde(35 °C);

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin %25 oranında azaldığı ve geriniminin yaklaşık % 40 oranında arttığı,

0 °C numunelere yapılan testlerde;

5 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin %10 ila %20 arasında azaldığı, geriniminin %64 arttığı,

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin yaklaşık beşte bir oranında azaldığı ve geriniminin %30 arttığı,

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin yaklaşık beşte bir oranında azaldığı ve geriniminin %25 ila % 40 arasında arttığı,

-20 °C de yapılan testlerde;

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin yaklaşık beşte bir oranında azaldığı ve geriniminin %25-35 arttığı,

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin yaklaşık beşte bir oranında azaldığı ve geriniminin %35-40 arttığı,

-40 °C de yapılan testlerde;

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak yakıt mukavemetinin %17 azaldığı ve geriniminin %10-20 arttığı,

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak farklı numunelerde artma ve azalmalar gözlemlendiği, kararsız bir durum olduğu,

-55 °C de yapılan testlerde;

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak mukavemetin %12 azaldığı, gerinimin %7-10 arttığı,

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde de yaşlanmaya bağlı olarak farklı numunelerin mukavemetinde hem artma hem azalma gözlemlendiği, geriniminin ise bu sıcaklıklar için beklenmeyen bir şekilde %65-97 arttığı,

-65 °C de yapılan testlerde;

50 mm/d çekme hızında yapılan testlerde yaşlanmaya bağlı olarak mukavemetin %12 azaldığı, gerinimde ise farklı numunelerde hem artma hem azalma gözlemlendiği, gerinimin ortalama olarak %7-10 arttığı,

500 mm/d çekme hızında yapılan testlerde ise yapılan tüm test trendinden ayrılarak yaşlanmaya bağlı olarak mukavemetin şaşırtıcı bir şekilde % 10 arttığı, gerinimin ise azaldığı, tespit edilmiştir.

3.5.6. Gerinim Gevşeme Test Sonuçlarının Yorumlanması

Çeşitli sıcaklık değerlerinde yapılan gerinim gevşeme test sonuçlarından elde edilen verilere göre yaşlanma sonucu beklenen mekanik özelliklerde gerilemenin test sonuçlarına yansımadağı görülmüştür.

T_0+10 yaşındaki roket motorundan elde edilen numunelere yapılan testlerde yükteki gerilim boşalması değerleri, sıcaklıklara göre değişmekle birlikte % 65-88 arasındayken (35 °C hariç, % 38), yaşlandırılmış roket motorundan elde edilen numunelere yapılan testlerde % 62-90 arasındaki değerler tespit edilmiştir.

3.5.7. Yanma Hızı Testi ve Değerlendirmesi

Doğal yaşlanmış ve hızlı yaşlandırılmış yakıttan elde edilen numuneler üzerinde, farklı basınç değerlerinde yapılan yanma hızı test sonuçları Çizelge 3.53'te yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde yaşlanmış yakıtların yanma hızında artış meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 3.53. Yanma hızı test sonuçları

<i>Basınç (MPa)</i>	<i>Doğal Yaşlanmış Yakıt</i>	<i>Yaşlandırılmış Yakıt</i>
4	15,3	15,4
6	17,1	17,4
6,86	17,9	18,2
9	20,7	20,9

3.5.8. Tutuşma Sıcaklığı Testi ve Değerlendirmesi

Doğal yaşlanmış ve hızlı yaşlandırılmış yakıttan elde edilen numuneler üzerinde yapılan tutuşma sıcaklığı testlerine göre, Çizelge 3.54'te de görüleceği yaşlanmaya

bağlı olarak tutuşma sıcaklığında artış meydana geldiği ve yakıtın sağırlandığı görülmüştür.

Çizelge 3.54.Tutuşma Sıcaklığı Test Sonuçları

<i>Test Koşulları</i>	<i>Isıtma Hızı (°C/d)</i>	<i>Ateşlenme sıcaklığı</i>
Doğal Yaşlanmış Yakıt	5	305
Hızlı Yaşlandırılmış Yakıt	5	312

4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kompozit yakıtlı roket motorlarından elde edilen numuneler üzerinde yapılan testlerle gerçek zamanlı ve yapay olarak yaşlandırılmış numuneler arasındaki mekanik özelliklerin farkı ortaya konulmaya çalışılmış ve test sonuçları karşılaştırılarak farklılıklar tespit edilmiştir.

Elde edilen test sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde literatür taramalarında elde edilen sonuçlardan farklı durumla karşılaşılmıştır. Literatür verilerine göre yaşlanma sonucunda yakıtın sertleşmesi ve geriniminin azalması ile karşılaşılmaması beklenirken, elde edilen test verilerinin büyük bir çoğunluğunda tam tersine yakıt mukavemetlerinde azalma ve gerinimlerde artma ile karşılaşılmıştır.

$T_0 +10$ mekanik davranış testlerinde sıcaklık değerleri düştükçe çekme gerilmesinin ve kopma gerilmesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca $T_0 +10$ mekanik davranış testlerinde gerginimin azaldığı görülmüştür. $T_0 +10$ mekanik davranış testlerinde maksimum gerilmenin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 500 mm/dk çekme testinde 5,92 MPa değerinde ölçülmüştür. En düşük gerinimin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 500 mm/d çekme testinde %8,7 ölçülmüştür. Standartlar dahilinde çekme hızı arttıkça ve şartlandırma sıcaklığı azaldıkça gerilme ve gerinimin arttığı görülmüştür.

Yine üç yıl yaşlandırılmış olan ikinci grup testlerde; $T_0 +13$ mekanik davranış testlerinde sıcaklık değerleri düştükçe çekme gerilmesinin ve kopma gerilmesinin arttığı görülmüştür. $T_0 +13$ mekanik davranış testlerinde de gerinimin azaldığı görülmüştür. $T_0 +13$ mekanik davranış testlerinde maksimum gerilmenin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 500 mm/d çekme testinde 6,54 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük gerinme değeri $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 500 mm/d çekme testinde %6,8 olarak ölçülmüştür. Standartlar dahilinde çekme hızı arttıkça ve şartlandırma sıcaklığı azaldıkça gerilme ve gerinimin arttığı, şartlandırma sıcaklığı arttığında gerilmenin azaldığı ve gerinim değerlerin artma olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan $T_0 + 10$ mekanik testleri ile $T_0 + 13$ mekanik testlerinin karşılaştırılmasında, $T_0 + 13$ yakıt gerilme ve gerinim testlerinde mekanik davranış değerlerinde gerileme olduğu görülmüştür.

Sonuçların bu şekilde olmasının ana nedeni; gerçek zamanlı test numuneleri ile yaşlandırılmış test numunelerinin iki farklı roket motorundan elde edilmelerine bağlı olarak, her roketin kendi içerisinde farklı karakteristik özellikleri olduğu kanısına varılmıştır.

Kompozit esaslı katı yakıtlı roketlerin iklimlendirmeli depolarda muhafaza edilmeleri, roketlerin raf ömürlerini önemli ölçüde uzatabilir.

Depolama bekleme süresi boyunca roketlerin kendi ekseninde dairesel olarak döndürülmesi, yakıt geometrik yapısının korunması açısından önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Özellikle katı yakıtlı roket motorlarının depolama koşullarında, yakıtın atmosfer ile temasını kesebilecek şekilde vakum ortamı benzeri şartlarda bekletilmesi roketlerin kullanım ömürlerinin uzamasında önemli ölçüde etki sağlayabilir.

Katı roket yakıt içeriğine, mekanik özellikleri iyileştirecek ve raf ömrünü artıracak kimyasal maddeler ilave edilmesi ile sistem ömrü artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Özüpek, Ş., Constituti ve Equation For Solid Propellant. Doctoral Thesis, The University Of Texas At Austin, USA, 1997.
- [2] Shekhar, H., Studies on Stress-Strain Curves of Aged Composite Solid Rocket Propellants. Defence Science Journal, Vol. 62, No. 2, March 2012, pp. 90-94, 2012.
- [3] Bose, P., Pandey, K. M., Analysis of Anisotropy and Viscoelastic Properties of Composite Solid Propellant and its Suitability for Use in Solid Rocket Under Field Deployment, International Review of Aerospace Engineering (I.RE.AS.E), Vol. 5, N. 5 ISSN 1973-7459 October 2012.
- [4] Zalewski, R., Wolszakiewicz, T., Analysis of Uniaxial Tensile Tests for Homogeneous Solid Propellants under Various Loading Conditions, Central European Journal of Energetic Materials, 8(4), 223-231 ISSN 1733-7178, 2011.
- [5] Büyükmihçı, K., Roketlerde Kullanılan Katı Yakıtlar, GATÖM, TN-08-07, Ankara, 1977.
- [6] Anonim, Farklı yakıtlarla çalışan roketlerin itki sistemlerinin oluşturduğu özgül itki ve itki değer aralıkları, NASA, http://dawn.jpl.nasa.gov/mission/ion_prop.asp (Erişim tarihi: 10.03.2018)
- [7] “International Ballistics” HMSO, London, 1-180 (1951)
- [8] Ward, T.A., Eorospace Propulsion Systems, W345 John Wiley & Sons Asia) Pte Ltd, Singapore, 2010.

- [9] Anonim, Katı yakıtla çalışan roket motoru, çalışma prensibinin şematik görünüşü <http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Rockets/Sci-Media/Images/Solid-rocket-engine> (Erişim tarihi: 21.04.2018)
- [10] Yaşar,H., Mühimmatın Esasları, MKE Matbaası, 1979
- [11] Yaman, H., Yüksek Enerjili Maddelerin Çift Bazlı (DB) Roket Yakıtlarında Kullanımı Ve Performans Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2013.
- [12] Anonim, Aerospace Web Organisation, Missile and Rocket Control Systems <http://www.aerospaceweb.org/question/weapons/q0158.shtml> (Erişim tarihi: 26.08.2018)
- [13] Anonim, NASA Natinoal Aeronoutics and Space Administration Example Of Controls <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktcock.html> (Erişim tarihi: 04.09.2018)
- [14] Ürtiş,H. Kompozit Roket Yakıtlarında Polimerizasyon Kinetiğine Katkı Maddelerinin Etkisi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [15] Venkatachalam,S., Santhosh, G., Ninan, K.N., “High Energy Oxidisers for Advanced Solid Propellants and Explosives”, Advances in Solid Propellant Technology, P1 International HEMS Workshop, 87-106 (2002).
- [16] Nauman, K. W., “New Trends and Developments in Rocket Motor Propulsion Technology”, 41.International Annual Conferance of ICT, Germany, V1 (2010).
- [17] Smith, P.K. 1993.AGARD-Lecture Series,188;2.1-2.22
- [18] Sutton, G.P. Rocket Propulsion Elements s17-38

- [19] Sezigen Bayram,G. “Aliminyum ve Hidroksil Uçlu Polibütadien(HTPB) Bazlı Kompozit Malzemelerin Yaşlanmasında Aşındırıcı Ortam Etkilerinin İncelenmesi.” Yüksek lisans Tezi,Gazi Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013
- [20] Kubata,N., “Propellants and Explosives,Thermochemical Aspects of Combustion”, Wiley-VCH,Japan,86-87(2002)
- [21] Yee,R.Y.Polymerization Kinetics in Propellants of the Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Isopphorone Diisocyanate System.Journal of Applied Polymer Science. 20;1117-1124, 1976
- [22] Zhang, K.L.,Chou,S.K., “Performance Prediction of a Novel Solid-Propellant Microthruster”, Journal of Propulsion and Power, 22(1):56-63 (2006)
- [23] Anonim, Hibrit yakıtle çalışan roket motoru, çalışma prensibinin şematik görünüşü2http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Rockets/Sci-Media/Images/Hybrid-rocket-engine (Erişim tarihi: 18.07.2018)
- [24] Besser, H.I. “Solid Propelant Ramrockets”, AGART-LS -50,1987
- [25] Brooks, W.T., “Solid Propellant Grain Design and Internal Ballistics” NASA SP-8076, Lewis Reserch Center,1972
- [26] Anonim,nozul https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nozzle_de_Laval_diagram.svg(Erişim tarihi: 18.04.2018)
- [27] Sarner, S., “Propellant Chemistry”, Reinhold Publishing Co.,1966
- [28] Shorr, M. and Zaehring, A.J. “SOLID ROCKET TECHNOLOGY” John Wiley and Sons Inc., 1967

- [29] İnci, N. “HTPB Esaslı Dökülebilir Kompozit Yakıt Özellikleri ve Üretim Teknolojisi.” Uzmanlık Tezi, M.S.B. Savunma Sanayi Müsteşarlığı, 1992
- [30] Anonim, Gerilme Görsel Anlatım <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/StressStrain.htm> (Erişim tarihi: 04.09.2018)
- [31] Anonim, gerilme-Sünme Diyagramı Görsel Anlatım <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=285> (Erişim tarihi: 04.09.2018)
- [32] Anonim, Makslama Kuvveti, <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-shear-force-and-shear-stress-Is-the-direction-of-shear-force-the-same-as-shear-stress> (Erişim Tarihi: 07.04.2018)
- [33] Anonim, Kesme Gerinimi, <http://weldguru.com/mechanical-properties-of-metals/> (Erişim tarihi: 04.09.2018)
- [34] Boyar, C. And Klager, K. “Propellants Manufacture, Hazards and Testing”, American Chemical Society, 1969