

**SİLİKON ELASTOMERLERİN ÖMÜR SÜRESİNE ETKİ EDEN
PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ**

**IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS EFFECTING THE LIFETIME OF
SILICONE ELASTOMERS**

MUKADDES MELİKE ONAY

PROF. DR. MURAT ŞEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

Sevgili Aileme,

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20 / 11 / 2020

Mukaddes Melike Onay

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

20 / 11 /2020

MUKADDES MELİKE ONAY

ÖZET

SİLİKON ELASTOMERLERİN ÖMÜR SÜRESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Mukaddes Melike ONAY

Yüksek Lisans, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Şen

Kasım 2020, 104 sayfa

Silikon kauçuklar sentetik kauçuk grubuna aittir. Hava şartlarına karşı yüksek direnç, iyi elektriksel özellikler, geniş sıcaklık aralığında çalışma ve kolay işlenebilirliği gibi birçok kullanım avantajı mevcuttur [1]. Bu özelliklerinden dolayı, dış mekan yalıtım uygulamaları ve elektrik iletim ve dağıtım sistemleri gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Mükemmel özellik ve dayanıklılıklarına rağmen silikon kauçuklar çeşitli çevresel ve kimyasal etkenlere ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında zamanla bozunmaya maruz kalırlar [2]. Bu bozunma ‘yaşlanma’ olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma bir malzemenin istenilen özelliklerinin bozunması sonucunda oluşmaktadır [2]. Yaşlanmanın malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak için ömür tahmini yapılmaktadır. Ömür tahmini malzemeyi iyileştirme açısından önem kazanmaktadır [2].

Silikon kauçuk izolatörleri birçok ülkede 30 yıldan fazla süredir kullanılmaktadır. Silikon izolatörler iyi derecede elektrik yalıtımı, hidrofobiklik, alev almamazlık nedeniyle porselen izolatörlerin yerini alarak sürekli büyümektedir [2]. Bununla birlikte, izolatörlerin gösterdiği bu özellikler UV ışınları, korona deşarjları, sıcaklık, nem, tuz ve aside maruz kalma (kıyı kesimlerde gözlenen) gibi çevresel ve elektriksel faktörlerin neden olduğu bozunmaya eğilimlidir [2]. Ürün performansının değerlendirilmesi

amacıyla zaman içerisinde malzemelerde meydana gelen değişiklerin incelenmesi önemli hale gelmiştir [2].

Bu çalışmada, silikon izolatör olarak endüstride kullanılan ticari silikonların çevresel faktörlerin laboratuvar ölçekli simüle edilmesi kapsamında termal ve UV ile yaşlandırma çalışmaları yapılmıştır. Yaşlandırma ile orantılı olarak malzeme özelliklerindeki bozunma mekanik test ve çapraz bağ yoğunluğundaki değişimin incelenmesi ile doğrulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ömür süresinin hesaplanması için kullanılmıştır. Ömür süresi tez çalışması kapsamında belirlenen iki yöntem ile hesaplanmış ve sonuçlar birbiri içerisinde kıyaslanarak verilmiştir. Kullanılan iki yöntem de ömür süresi ve mutlak sıcaklık arasındaki ilişki kapsamında karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemde de ömür süresinin belirlenmesi için kullanılan eşik değeri %25, %50 ve %70 olarak alınmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda silikon izolatörün hazırlanmasında kullanılan Vinil metil silikonun (VMQ) silikonun kaynağına bağlı olarak ömür süresinin değişim gösterdiği görülmüştür. Silikon izolatörün özelliklerinin % 25 oranında kaybedilmesi durumunda izolatörün 0,4- 1,9 yıl aralığında , % 50 oranında bir kayıp ile 5,3 -30 yıl aralığında ve % 75 oranında kayıp olması durumunda 11 -2000 yıl kadar kullanılabilceği bulunmuştur. Bu sürelerin ömür süresinin tayin edilmesinde kullanılan yöntemle bağlı olarak da değişim gösterdiği de görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kauçuk, Silikon Elastomer, Ömür Süresi, İzolatör

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS EFFECTING THE LIFETIME OF SILICONE ELASTOMERS

Mukaddes Melike ONAY

Master of Science, Department of Polymer Science and Technology

Supervisor: Prof. Dr. Murat Şen

November 2020, 104 pages

Silicone rubbers are belongs to the synthetic rubber group. It has many advantages such as high weather resistance, good electrical properties, wide temperature range operation and easy workability [1]. Because of these properties, it is frequently used in outdoor insulation applications such as electrical transmission and distribution systems [1]. Despite their excellent properties and durability, silicone rubbers are subject to degradation over time when exposed to various environmental and chemical agents and high temperatures [2]. This deterioration is called 'aging. Aging occurs as a result of the degradation of the desired properties of a materials [2]. In order to understand the effects

of aging on material properties, life expectancy is estimated. Life expectancy gains importance in terms of material improvement [2].

Silicone rubber insulators have been used in many countries for more than 30 years. Silicone insulators are constantly growing by replacing porcelain insulators due to good electrical insulation, hydrophobicity and non-flammability [2]. However, these characteristics of insulators tend to deteriorate due to environmental and electrical factors such as UV rays, corona discharges, temperature, humidity, salt and acid exposure (observed in coastal areas) [2]. In order to evaluate the product performance, it has become important to examine the changes in the materials over time [2]. In this study, thermal and UV aging studies have been carried out within the scope of laboratory scale simulation of environmental factors of commercial silicones used in industry as silicone insulators. The deterioration in material properties proportional to aging was confirmed by mechanical testing and examination of the change in cross-link density. Experimental studies were used to calculate the lifetime. Life time was calculated by two methods determined within the scope of the thesis study and the results were compared by comparing with each other.

As a result of the studies and with the literature it has been observed that the life time of the vinyl methyl silicones (VMQ) used in the preparation of the silicone insulator varies depending on the source. In case of 25% loss of silicon insulator properties, the insulator will be used between 0.4 and 1.9 years, with a loss of 50 % between 5.3 and 30 years, and in case of 75% loss, it will be used between 11-2000 years. It has also been observed that these periods vary depending on the method used in determining the lifetime.

Keywords: Rubber, Silicone Elastomers, Lifetime prediction, Isolators.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen, bana kazandırdığı bilgi ve tecrübeler ile mesleki gelişimime katkı sağlayan saygı değer tez danışmanım Prof. Dr.Murat ŞEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında arkadaşlıkları ve yardımları ile destek olan ekip arkadaşlarım Zühra ÇINAR ve Yasemin DURMUŐ ve CEREN KAYMAZ'a da teşekkürlerimi sunarım.

Beni eğitim hayatım boyunca yalnız bırakmayan, başarabileceğime yürekten inanan ve sonuna kadar destekleyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Elastomerler	3
2.1.1. Doğal Kauçuk	3
2.1.2. Sentetik Kauçuklar.....	3
2.2. Silikon Elastomerler	4
2.2.1. Silikon Elastomerlerde Takviye Malzemeler	6
2.2.1.1. Çapraz bağlayıcı ajanlar.....	7
2.2.1.2. Yardımcı katkı malzemeleri.....	7
2.2.1.3. Dolgu malzemeleri.....	7
2.2.1.4. Bağlayıcı katkıları (Coupling agent).....	7
2.2.1.5. Plastikleştirici katkı malzemeleri.....	7
2.2.2. Silikon Elastomerlerin Çapraz Bağlanması	8
2.2.2.1. Peroksitlerin Sınıflandırılması	9
2.3. Silikon kauçukların sınıflandırılması.....	11
2.3.1. Oda sıcaklığında vulkanize silikon kauçuk (RTV).....	11
2.3.2. Yüksek sıcaklık vulkanize silikon kauçuk (HTV).....	11
2.4. Silikon Kompozit İzolatörler	12
2.4.1. Silikon Kompozit İzolatör Yapısı	12
2.5. İzolatör Ömür Süresinin Belirlenmesi	13
2.5.1. Arrhenius Modeli	14

2.5.2. Silikon Elastomerlerin Isıl Kararlılığının Bulunması ve Sıcaklık İndisi Değerinin Tayini Yöntemi.....	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	18
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	18
3.2. Deneysel Yöntemler.....	18
3.2.1. Silikon Kauçuk Karışımlarının Karakterizasyonu	18
3.2.1.1. ATR-FTIR.....	18
3.2.1.2. Termogravimetrik (TGA) Analizi.....	19
3.2.2. Silikon Kauçukların Kür Özelliklerinin İncelenmesi.....	20
3.2.3. Kauçuk Hamurlarının Vulkanizasyonu.....	21
3.2.4. Mekanik Testler.....	22
3.2.5. Çapraz Bağ Yoğunluğu Analizi	23
3.2.6. Isıl Yaşlandırma Testi	25
3.2.6.2. UV Yaşlandırma.....	26
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	28
4.1. İzolatör Silikon Karışımlarının ATR-FTIR ile karakterizasyonu	28
4.2. İzolatör Silikon Karışımlarının Termogravimetrik (TGA) Analizi.....	31
4.1. İzolatör Silikon Elastomerlerin Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi	34
4.2. Hızlandırılmış Yaşlandırma Testi ile İzolatör Silikon Kauçukların Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	38
4.2.1. Isıl Yaşlandırma ile Mekanik Özelliklerin İncelenmesi.....	38
4.2.2. UV yaşlandırmanın mekanik özellikler üzerindeki etkisi	50
4.3. Silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunluklarının hesaplanması	54
4.4. İzolatör Silikon Kauçukların Ömür Süresinin Hesaplanması	60
4.4.1. Arrhenius Modeli.....	60
4.4.2. Silikon Elastomerlerin Isıl Kararlılığının Bulunması ve Sıcaklık İndisi Değerinin Tayini.....	62
5. TOPLU SONUÇLAR	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. cis 1-4 izopren yapısı.....	2
Şekil 2.2. Silikon kauçuğun kimyasal yapısı.....	4
Şekil 2.3. Silikonda tipik bir çapraz bağın şematik gösterimi	7
Şekil 2. 4 Silikon elastomerlerin peroksit ile çapraz bağlanma mekanizması.....	8
Şekil 2. 5 Kullanılan bazı peroksit tipleri	8
Şekil 2.6. Silikon kauçuk kanatlı oyuk kompozit izolatör gövdesinden kesit örnek	11
Şekil 2.8. Malzeme özelliği-zaman grafiği.....	13
Şekil 2.9. Williams-Lander-Ferry modeli.....	15
Şekil 3.1. Perkin-Elmer FTIR cihazı	18
Şekil 3.2. Perkin-Elmer Pyris TGA cihazı.....	18
Şekil 3.7. Tipik bir reometre eğrisi.....	19
Şekil 3.8. Alpha marka Hareketli Kalıp Reometresi	20
Şekil 3.9. Brabender marka hidrolik pres	20
Şekil 3.10. Silikon hamurundan hazırlanan test plakası ve test numunesi örneği.....	21
Şekil 3.11. Papyon şeklinde kesilmiş silikon numuneleri	21
Şekil 3.12. Zwick marka Evrensel Test Cihazı.....	22
Şekil 3.13. Bruker marka Puls-NMR cihazı	22
Şekil 3.14. Tipik Puls-NMR sönüm eğrisi.....	23
Şekil 3.15. Memmert marka etüv.....	24
Şekil 3.16. İklimlendirme test cihazı	25
Şekil 4.1. EEL60 silikonuna ait FTIR spekturumu.....	25
Şekil 4.2. MG8476G70 silikonuna ait FTIR spekturumu.....	26
Şekil 4.3. ATH'a ait FTIR spekturumu.....	26
Şekil 4.4. FTIR kalibrasyon eğrisi.....	27
Şekil 4.5. MG8476G70 silikonuna ait termogram.....	27
Şekil 4.6. MG8476 silikonuna ait termogramın türev eğrisi.....	28
Şekil 4.7.EEL60 silikonuna ait termogram.....	28
Şekil 4.8. EEL 60 silikonuna ait termogramın türev eğrisi.....	29

Şekil 4.9. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait farklı sıcaklıklarda kür eğrileri.....	29
Şekil 4.10. EEL60 silikon kauçuğuna ait farklı sıcaklıklarda kür eğrileri.....	33
Şekil 4.11. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 180 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	33
Şekil 4.12. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 200 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	34
Şekil 4.13. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 220 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	34
Şekil 4.14. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 250 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	35
Şekil 4.15. EEL60silikon kauçuğuna ait 180 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	35
Şekil 4.16. EEL60 silikon kauçuğuna ait 200 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	37
Şekil 4.17. EEL60 silikon kauçuğuna ait 220 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	37
Şekil 4.18. EEL60 silikon kauçuğuna ait 250 °C gerinim-gerilim eğrisi.....	38
Şekil 4.19. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 180 °C kopmadaki uzama değerleri.....	39
Şekil 4.20. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 180 °C kopmadaki kuvvedeğerleri.....	39
Şekil 4.21. EEL60 silikon kauçuğuna ait 180 °C kopmadaki uzama değerleri.....	40
Şekil 4.22. EEL60 silikon kauçuğuna ait 180 °C kopmadaki kuvvet değerleri	40
Şekil 4.23. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 200 °C kopmadaki uzama değerleri....	41
Şekil 4.24. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 200 °C kopmadaki kuvvet değerleri ...	41
Şekil 4.25. EEL60 silikon kauçuğuna ait 200 °C kopmadaki uzama değerleri.....	42
Şekil 4.26. EEL60 silikon kauçuğuna ait 200 °C kopmadaki kuvvet değerleri	42
Şekil 4.27. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 220 °C kopmadaki uzama değerleri....	43
Şekil 4.28. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 220 °C kopmadaki kuvvet değerleri ...	43
Şekil 4.29. EEL60 silikon kauçuğuna ait 220 °C kopmadaki uzama değerleri.....	44
Şekil 4.30. EEL60 silikon kauçuğuna ait 220 °C kopmadaki kuvvet değerleri	44
Şekil 4.31. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 250 °C kopmadaki uzama değerleri....	45
Şekil 4.32. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait 250 °C kopmadaki kuvvet değerleri ...	45
Şekil 4.33. EEL60 silikon kauçuğuna ait 250 °C kopmadaki uzama değerleri.....	46
Şekil 4.34. EEL60 silikon kauçuğuna ait 250 °C kopmadaki kuvvet değerleri	46
Şekil 4.35. EEL60 silikon kauçuğuna ait UV yaşılandırma sonrası gerinim-gerilim eğrisi	47
Şekil 4.36. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait UV yaşılandırma sonrası gerinim-gerilim eğrisi.....	48
Şekil 4.37. EEL60 silikon kauçuğuna ait UV yaşılandırma sonrası kopmadaki uzama değerleri	48

Şekil 4.38. EEL60 silikon kauçuğuna ait UV yaşlandırma sonrası kopmadaki kuvvet değerleri.....	49
Şekil 4.39. EEL60 silikon kauçuğuna ait UV yaşlandırma sonrası kopmadaki uzama değerleri.....	49
Şekil 4.40. MG8476G70 silikon kauçuğuna ait UV yaşlandırma sonrası kopmadaki kuvvet değerleri.....	50
Şekil 4.41. EEL60silikonun 180°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	51
Şekil 4.42. EEL60 silikonun 200°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	51
Şekil 4.43. EEL60 silikonun 250°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	52
Şekil 4.44. EEL60 silikonun UV yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	52
Şekil 4.45. MG8476G70 silikonun 180 °C yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	53
Şekil 4.46. MG8476G70 silikonun 200 °C yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	53
Şekil 4.47. MG8476G70 silikonun 250 °C yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	54
Şekil 4.48. EEL60 silikonun UV yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası moleköl ağırlığı değişimi	54
Şekil 4.49. 180°C yaşlandırılmış MG8476G70 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	56
Şekil 4.50. 200°C yaşlandırılmış MG8476G70 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	57
Şekil 4.51. 220°C yaşlandırılmış MG8476G70 elastomerinin komadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	57
Şekil 4.52. 250°C yaşlandırılmış MG8476G70 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	58
Şekil 4.53. 180°C yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	58

Şekil 4.54. 200°C yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.....	58
Şekil 4.55. 220°C yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi	59
Şekil 4.56. 250°C yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi	60
Şekil 4.57. MG 8476G70 silikonu için kopmadaki uzamanın %25,%50 ve %70 oranında azalması için gerekli sürelerin 1/T karşı çizilen Arrhenius eğrileri.....	60
Şekil 4.58. EEL60 silikonu için kopmadaki uzamanın %25,%50 ve %70 oranında azalması için gerekli sürelerin 1/T karşı çizilen Arrhenius eğrileri.....	61
Şekil 4.59. MG8476 silikonu için kopmadaki uzamanın %25, %50 ve %70 oranında azalması için gerekli sürelerin 1/T karşı çizilen Arrhenius eğrileri.....	65
Şekil 4.60 .MG8476G70 elastomeri için 1/T ile uzamanın %50 değerine düşmesi için geçen sürenin değişimi.	69
Şekil 4.61. EEL60 elastomeri için 1/T ile uzamanın %50 değerine düşmesi için geçen sürenin değişimi	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. İzolatör silikon kauçukların özellikleri	18
Çizelge 4.1. MG8476 silikonuna ait termogramlardan elde edilen parametreler	33
Çizelge 4.2. EEL60 silikonuna ait termogram değerleri.....	34
Çizelge 4.1 EEL60 silikon kauçuğuna ait reolojik analizler sonucunda elde edilen parametreler.....	36
Çizelge 4.2 MG8476 silikon kauçuğuna ait reolojik analizler sonucunda elde edilen parametreler.....	37
Çizelge 4.3. Silikon Elastomerlerin Arrhenius yaklaşımı kullanılarak hesaplanan ömür değerleri.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Si	Silisyum
O	Oksijen
C	Karbon
H	Hidrojen
°C	derece Santigrat
G'	Elastik modülüs
G''	Viskoz modülüs
R	Universal gaz sabiti
T	Sıcaklık
E _a	Aktivasyon enerjisi
a _T	Kaydırma faktörü
C _∞	Karakteristik oran
Mc	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı
MH	Maksimum tork değeri
MHz	Megahertz
ML	Minimum tork değeri
MPa	Mega Paskal
MRU	Bir monomer biriminin molar kütlesi
Mt	Herhangi bir t anındaki tork değeri
N	Her bir monomerik birim başına omurga bağı
ts ₂	Ön vulkanizasyon (Scorch) süresi
t ₉₀	Maksimum tork değerinin %90 'ına ulaşmak için geçen süre

Kısaltmalar

m	metre
dk	dakika

g	gram
kg	kilogram
dNm	desi Newton metre
MPa	mega Pascal
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPMG	Carr-Purcell-Meiboom-Gill
CRI	Cure Rate Index
PDMS	Polidimetil Siloksan
phr	per hundred rubber
rpm	revolutions per minute
VMQ	Metil-Vinil Silikon

1. GİRİŞ

Son yıllarda elektrik enerjisinde tüketilen güçlerin hızla artması kullanım talebinin artmasına neden olmuştur [1]. Yıllardır kullanılan yalıtım malzemeleri isteklere ve gelişen çevre koşullarına cevap vermemeye başlamıştır. Elektrik şebekesinde kullanılan porselen izolatörlerin yüksek basınç sonucunda patlaması birçok zarara yol açmıştır [1]. Silikon elastomer esaslı izolatörler, tedarik, ekonomik, sağlık ve çevre koruması gibi özellikleri ile porselen izolatöre rakip olacak niteliktedir.

Son yıllarda endüstride kullanılan silikon esaslı elastomerler olumlu sonuçlar vermiştir. Bu izolatörler için geliştirilen standartlar (IEC 61109, IEC 0660) yürürlüğe girmiştir [1]. Bu standartlar sahip olunması gereken mekanik özellikler, elektriksel özellikler ve ömür test yöntemlerini içermektedir.

Silikon elastomerlerin çok iyi elektrik değerlerine sahip olmasına rağmen temelinde karbon olduğu için çok zayıf iz direnci (tracking resistance) sahiptir. İz direnci hava şartlarına maruz kalan izolatörlerde izolatör yüzeyinin dielektrik dayanımını ve sızıntı akımını kapsamaktadır.

İz direncinin (tracking resistance) artırılması amacıyla alüminyumtrihidratın (ATH) elastomerlerle birlikte kullanılmaya başlanması olumlu sonuçlar vermiştir [1]. Bu gelişme yalıtım malzeme tarihinde önemli bir adım olmuştur. ATH kullanımında ilk çalışma sonuçları epoksiler, poliester ve silikon elastomerler için umut verici olmuştur. Ancak bu gelişim bütün polimerlerde aynı derece olumlu sonuçlar vermemiştir.

Yapılan çalışmalar ilk olarak epoksi reçineler ile olmuştur. Cam elyaf takviyeli epoksi reçineler ile yapılan izolatör malzemeler dahi kullanımda başarılı olsa da rutubetli ortamda elektromekanik sorunlara yol açmıştır [1].

1960'lı yıllarda silikon elastomer esaslı sistemler geliştirilmiştir. Bu izolatörlerin kullanılmaya başlanmasıyla epoksi reçine sistemlerinde yaşanan elektromekanik sorunlar giderilmiştir. Poliester ve bisfenol- A epoksi reçinelerde başarılı ARGE sonuçları alınmıştır. Bununla ilk kez, cam elyafı güçlendirilmiş epoksi (GRP) çubuk üzerine epoksi reçine kaplanarak askı izolatörleri imal edilmiştir. Dâhili kullanımda bisfenol- A epoksi başarılı olsa da epoksi reçine ile kompozit çubuğun termal genişleme katsayılarının

farklı olması olumsuzluk yaratmıştır. Bu olumsuzlukları gidermek üzere 1960 lı yıllarda, SR (Silikon Kauçuk-Silicone Rubber) bileşenlerinden oluşan elastomerler geliştirilmiştir. EPR ve SR, cam elyaf takviyeli epoksi çubuk veya boru ile kullanımı sonunda termal genleşme katsayısı sorunu yok edilmiştir. Bu zamana kadar silikon kauçuklar üzerindeki yaşlandırma çalışmalar büyük ölçüde elektriksel parçalarda özellikle dış yalıtım ve nükleer enerji santralleri uygulamalarında kullanılmıştır. Özellikle dış yalıtım ve elektriksel sistemlerde kullanılan silikon kauçukların ömür süresinin belirlenmesi malzeme üreticisi ve son kullanıcı açısından büyük öneme sahiptir. Belirlenen ömür süresine göre kullanım yerlerindeki amaca hizmet etme ve gerekli iş gücünün belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir.

2. GENEL BİLGİLER

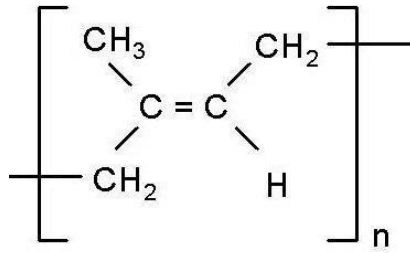
2.1 Elastomerler

Elastomerler viskoelastik özelliğe sahip malzemelerdir. Elastomerler diğer malzemelerle karşılaştırıldığında düşük kopma kuvveti yüksek uzama değerlerine sahiptir. Elastomerlerde bulunan çapraz bağlar uygulanan belirli deformasyonun ardından elastomerin orijinal haline geri dönmesini sağlamaktadır.

Kauçuk ise, elastomer sınıfında yer alan ve çapraz bağlanma özelliği gösterebilen polimerlerdir. Doğal ve sentetik kauçuk olmak üzere ikiye ayrılır.

2.1.1. Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk bazı bitkilerin %30-40 oranında kauçuk içeren akıcı, süt beyazı öz suyundan elde edilir. Doğal kauçuğun kimyasal yapısı cis 1-4 poli izopren olup Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 cis 1-4 izopren yapısı.

Doğal kauçuk sahip olduğu geometri sayesinde büyük oranda kristallenir ve kolay bir şekilde sertleşir. Kullanma sıcaklığı aralığı -60°C ile 90°C 'dir. Yüksek esneklik ve mekanik özellikler gerektiren yerlerde kullanılır. Doğal kauçuğun camsı geçiş sıcaklığının (T_g) -75°C civarında olması, düşük sıcaklık özelliklerin çok iyi olmasını sağlamaktadır.

2.1.2. Sentetik Kauçuklar

Sentetik kauçuklar petrol ürünlerinden üretilmektedir. Endüstride hem doğal hem sentetik kauçuk kullanılırken, sentetik kauçuğun kullanımı çok daha yaygındır. Sentetik kauçuk ilk olarak Fritz Hofmann tarafından üretilmiştir. Sentetik kauçuklar normal

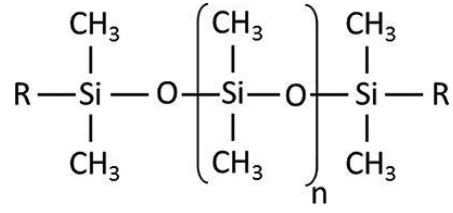
boylarının iki katına kadar esneyebilen ve tekrar eski haline dönebilen yüksek elastikiyete sahiptir, sentetik kauçukların diğeri adı da “elastomer” dir.

Günümüzde birçok uygulama için farklı sentetik polimerler üretilmektedir. Bu sentetik polimerlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Stiren-Bütadien Kauçuk (SBR)
- Polibütadien Kauçuk (BR)
- Nitril Kauçuk (NR)
- Etilen Propilen Dien Kauçuk (EPDM)
- Poliizopren Kauçuk (IR)

2.2. Silikon Elastomerler

Silikon terimi inorganik bir siloksan omurgasından (Si-O) oluşan polimere karşılık gelmektedir. En yaygın silikon, silika ve oksijenin bir omurgasına sahip olan poli(dimetilsiloksan)'dır [2]. Silikon elastomere ait şematik bir gösterim Şekil 1'de verilmiştir. Polisiloksanların sentezi metilklorosilanların metil klorür ve silikondan üretildiği bir öncü reaksiyondan kaynaklanır [3]. Silikon elastomerlerin inorganik/organik hibrid yapısı onlara her iki tarafın özelliklerine sahip bir malzeme formuna sokarak benzersiz özellik kombinasyonu sunmaktadır [3]. Si-O bağının (~433 kJ/mol-1) C-C (~355 kJ/mol-1) bağlarına kıyasla daha yüksek bağlanma enerjisine sahiptir. Bu durum polimer sınıfı için daha yüksek ısı direnci ve termal kararlılık sağlar [2]. Ayrıca daha yüksek bağ uzunluğu (Si-O: 1,64, C-C:1,53) ve Si-O-Si bağının çevresinde sterik engel bulunmaması yapısal özellikler yüksek zincir esnekliği ve Tg değeri ile sonuçlanmaktadır [2]. Silikon elastomerler yüksek bağlanma enerjisine sahiptir (444 kJ/mol). Ayrıca her bir silikon için iki metil grubu içerir. Metil ve etil gruplarının arasındaki oran 0,1-0,2 arasındadır.



Şekil 2.2. Silikon kauçuğun kimyasal yapısı.

Şekil 2.2’de verilen birim sayısı ‘n’ bir zincir oluşturmak üzere benzer birimlerle bağlanır. Yapıda bulunan R olarak adlandırılan yan gruplar;

- -CH₃
- -CH=CH₂
- - Ph
- -CH₂-CH₂-CF₃

Şeklinde olabilir. Bağlı bulunan R grubunun yapısına göre silikon kauçuklar adlandırılmaktadır. Sırayla;

- MQ (metil -polisiloksan)
- VMQ (vinil-metil polisiloksan)
- PVMQ (fenil-vinil-metil polisiloksan)
- FVMQ (floro-vinil-metil polisiloksan)

Olarak adlandırılırlar. Polisiloksan zinciri boyunca yaygın olarak görülen metil dışındaki yan grupları fenil ve vinil gruplarıdır. Kimyasal bileşenler ve bunların siloksan zinciri boyunca yerleşmesi malzeme özelliklerini belirlemektedir. [3]. Silikon kauçukların üstün özellikleri diğerlerine kıyasla bu malzemelerin (farklı dolgu malzemeleri) elektrik mühendisliği, orta-yüksek gerilim hatları, iletken kablo yalıtımı için kullanılabilir kılmaktadır.

Silikonun düşük yüzey enerjisi çok iyi bir hidrofobiklik özellik sergilemesine olanak sağlar. Silikon elastomerlerin bu özelliği, dış mekan yalıtım uygulamalarında kullanılması konusunda literatürde çok fazla örnek vardır [3].

Silikon elastomerler EPDM gibi diğer elastomerler ile kıyaslandığında mekanik mukavemeti daha düşüktür. Fakat mekanik özelliklerinin geniş bir sıcaklık aralığında fazla değişmemesi ve kullanışlı çalışma aralığının -55°C - 230°C arasında değişmesidir. Bu aralık formülasyonda (reçete) kullanılan dolgu maddesi miktarına bağlı olarak değişir [3].

Mükemmel özellikleri ve dayanıklılıklarına rağmen silikon kauçuklar çeşitli çevresel ve kimyasal etkenlere ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında zamanla bozulmaya maruz kalır.

2.2.1. Silikon Elastomerlerde Takviye Malzemeler

Silikon elastomerlerde yapıyı güçlendirmek için genellikle takviye edici silika (cam ya da kuvars) içerir. Çünkü mekanik özellikleri diğer polimerler kıyasla daha zayıftır. Silika silikon yapısına bağlanarak sertliğini, tokluğunu ve diğer mekanik özellikleri etkileyen reaktif gruplara sahiptir. Silikanın yanı sıra, erozyon direnci, hava koşullarına dayanıklılık gibi diğer özellikler için farklı dolgu malzemeleri eklenmiştir [3]. UV ışınları polimer ağında hasara yol açmaktadır. Bazı dolgu malzemeleri Si-O bağını kırmak için gereken enerjiyi azaltarak katalizör görevi görmektedir. Seçilen dolgu türleri iki kurala uymalıdır;

1) Beklenen koşullar altında uzun vadeli stabilite gösterme
2) Silikon işlevselliğini koruyacak şekilde reçetede diğer bileşenlere karşı inert olması gibi özellikler beklenmektedir. Silikon kauçuğa eklenen katkı maddeleri aşağıda verilmiştir.

- Hızlandırıcılar
- Plastikleştiriciler
- Yaşlanma önleyici malzemeler (Antidegradanlar)
- Kalıp ayırıcılar
- Aktivatörler
- Dolgu malzemeleri

2.2.1.1. Çapraz Bağlayıcı Ajanlar

Kimyasal reaksiyona sebep olarak çapraz bağlı elastomerik yapıların oluşmasını sağlar. Kimyasal apraz bağlanma ile elastomerik yapı, yapışkan yumuşak malzemeden sert, sıcaklığa karşı kararlı malzemeye dönüşür. Silikon kauçukta çapraz bağlanma yan zincirlerdeki karbon atomları arasında olur. Tüm apraz bağlar karbon-karbon (C-C) bağlarından oluşmaktadır. Organik peroksitler yüksek gerilim yalıtımında kullanılan en yaygın vulkanizatlardır.

2.2.1.2. Yardımcı Katkı Malzemeleri

Polimer ve vulkanizat arasında oluşan çapraz bağların parçalanmasını önler. Bu bağların kırılıp yeni bağlar oluşturmasını engeller. İki çeşit yardımcı katkı vardır; Tip I yardımcı katkılar (agents), kürleşme hızını ve kür sertliğini hızlandırır. Tip II yardımcı katkılar (agents) kürleşme hızını etkilemezken sertliği artırır.

2.2.1.3. Dolgu Malzemeleri

Elastomerin fiziksel özelliklerini güçlendirici niteliktedir. İki çeşit dolgu malzemesi vardır; Güçlendirici tip veya Uzaticı-genişletici tip olarak ayrılır. Quartz, titanyum dioksit, kil, çinko oksit, tebeşir tozu uzaticı veya genişletici olarak kullanılan dolgu maddeleridir. Alumina trihidrat (ATH) tüm izolatör bileşiklerinde elektriksel iz oluşumu ve yanmaya karşı yüksek direnç sağlar. Yüksek dolgu içeren elastomerler iyi ark direncine sahiptir. Ancak geleneksel iz testlerinde ya da diğer standartlarda gerilim olayları arasında iyileşme sürecine izin vermemesinden dolayı (ATH) Al(OH)₃ dolgusu fazla eklenememektedir [5].

2.2.1.4. Bağlayıcı Katkılar (Coupling Agent)

Bağlayıcı katkılar (agents) dolgu ile elastomer arasında kimyasal bağın oluşmasını sağlarlar. Elektrik izolatörlerinde ATH ve polimer arasında köprü durumundadır ve elektriksel özellikleri, modülüs ve gerilme dayanımını artırır [6].

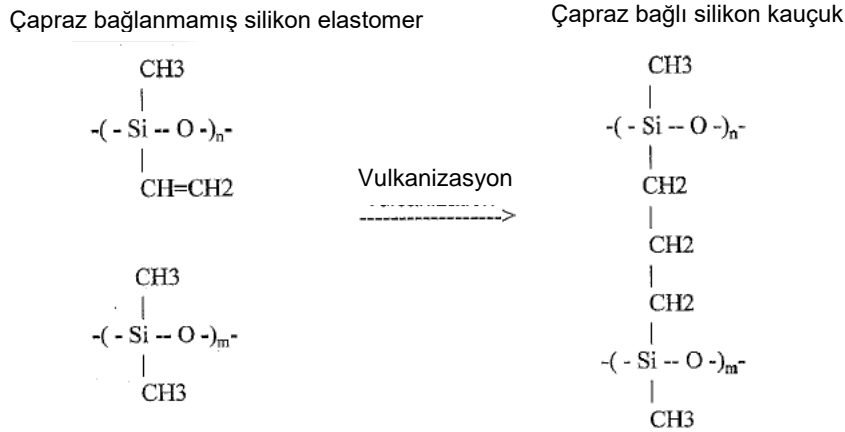
2.2.1.5. Plastikleştirici Katkı Malzemeleri

Karıştırmaya yardımcı, viskoziteyi ayarlayıcı ya da düşük sıcaklıklarda esneklik sağlayıcı olarak kullanılırlar. Yukarıda anlatılan katkı malzemeleri ile çapraz bağlanan silikon kauçuk karışımının dış ortamda ve yüksek gerilim izolatörleri için en önemli özelliği

hidrofobik olmasıdır. Eğer polimerik yüzeyde su tutulmazsa kaçak akım azaltılmış olur. Ayrıca hidrofobik olan yüzey su damlaları kaydıka temizlenmiş olur. Kontaminasyon veya kirliliğin uzaklaştırılması yine kaçak akımı azaltır. Hidrofobiklik konusunda yapılan araştırmalar, silikon kauçuk alaşımının, üzerine silikon kaplanmış porselen ve EPDM'e kıyasla çok daha iyi olduğu sonucunu vermiştir.[7]

2.2.2. Silikon Elastomerlerin Çapraz Bağlanması

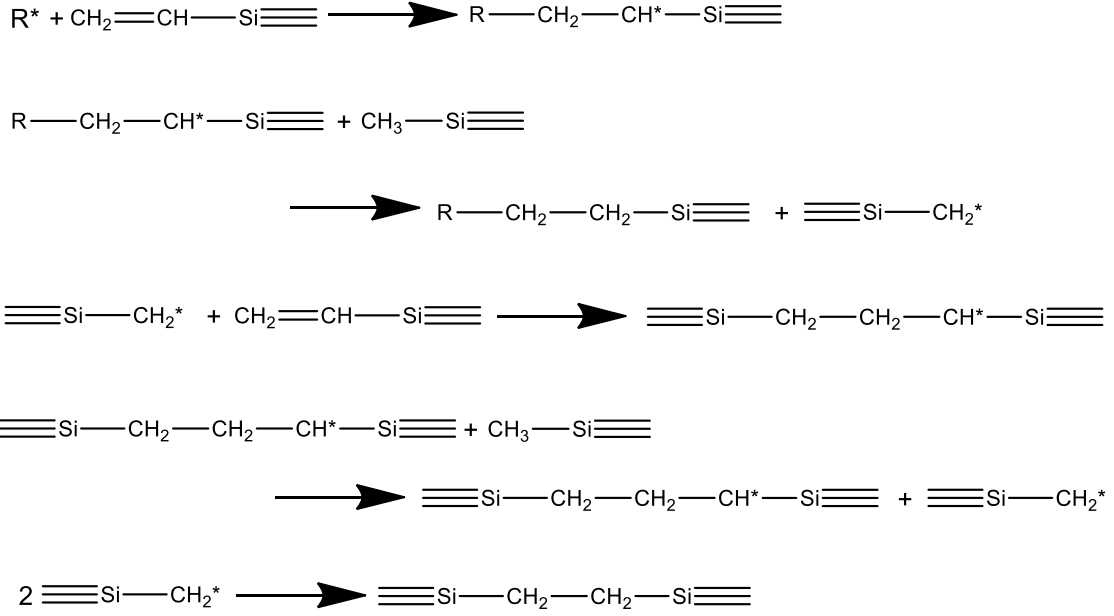
Polimer zincirinde bulunan vinil ve diğer reaktif gruplar genellikle yan gruplar ve son gruplar olarak bulunur. Bu gruplar kimyasal reaksiyon sırasında çapraz bağların oluşmasına imkan sağlar. Çapraz bağın türü ve tipi reaktif gruplara çapraz bağlanma ajanları, inhibitör ve katalizörlere bağlıdır. Çapraz bağ oluşumu Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Silikonda tipik bir çapraz bağın Şematik gösterimi.

Vinil ve diğer reaktif gruplar genellikle yan gruplar ve son gruplar halinde bulunur. Bu gruplar kimyasal reaksiyon sırasında çapraz bağların oluşumuna olanak sağlar. Çapraz bağın türü ve tipi polimer zincirindeki reaktif gruplara, çapraz bağlanma ajanları, inhibitör ve katalizörlere bağlıdır [3]. Elastomerlerde kükürt ve peroksit olmak üzere iki temel çapraz bağlayıcı sistem bulunmaktadır. Silikon elastomerlerin çapraz bağlanmasında organik peroksitler ve platin kullanılmaktadır. Platin, kokusuz ve renksiz oluşu yanı sıra peroksit çapraz bağlanmasına göre daha iyi fiziksel özellikler sağlamaktadır. Ancak peroksitlere göre maliyetlerinin yüksek olması ve yüksek vulkanizasyon (pişirme) sıcaklığı gerektirmesi nedeni ile peroksitlere göre daha az tercih edilmektedirler.

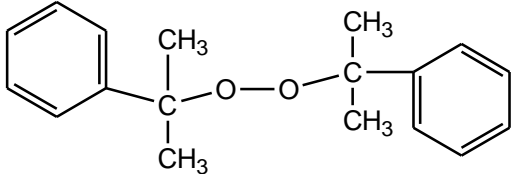
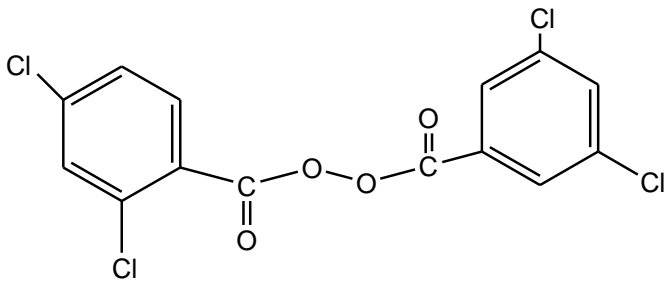
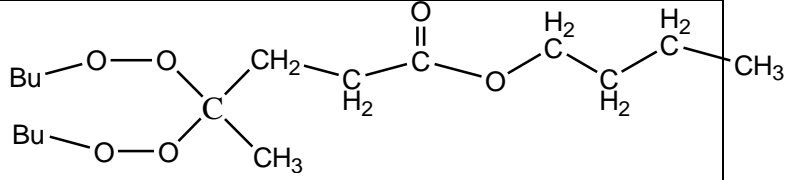
Organik peroksitler organik bir gruba bağlı en az iki oksijen atomunun birbirine bağlanması ile oluşan yapılardır. Isıyla birlikte peroksit ayrışarak polimer zinciri üzerinde aktif grup oluşturan serbest radikaller oluşturur. Polimer zincirleri üzerinde oluşan aktif kısımların etkileşimi ile zincirler birbirlerine bağlanarak çapraz bağlanma gerçekleşir. Silikon elastomerin peroksit ile çapraz bağlanma mekanizması şekil 2. 4' da gösterilmiştir [4].



Şekil 2. 1 Silikon elastomerlerin peroksit ile çapraz bağlanma mekanizması.

2.2.2.1. Peroksitlerin Sınıflandırılması

Peroksitlerde oksijenlere bağlı organik grubun kimyasal yapısı peroksidi dialkil, diaçil, peroksiketal ve peroksiester olarak sınıflandırılmasını sağlar. Bu peroksit sınıflarında bulunan ve silikon elastomerler ile sıklıkla kullanılan bazı peroksitlerin avantaj ve dezavantajları Şekil 2. 5' de verilmiştir.

Sınıf	Örnek	Kimyasal Yapısı
Dialkil	DBPH	$\text{H}_3\text{C}-\underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{O}-\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{O}-\text{O}-\underset{\text{CH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}}-\text{CH}_3$
Dialkil	DCP	
Diaçil	DCBP	
Peroksiketal	PDR	

Şekil 2. 2 Kullanılan bazı peroksit tipleri.

Peroksiketaller düşük yarı ömre sahip olmaları nedeniyle daha hızlı reaksiyon verirler. Peroksiketaller dialkil peroksitlerle karşılaştırıldıklarında düşük sıcaklıklarda yüksek kürleşme reaksiyonu verirler. Ancak peroksiketaller hem zayıf hem de kuvvetli serbest radikaller içerdiklerinden dialkillere göre daha düşük verimli çapraz bağlanma gösterirler [8].

Diaçil peroksitler ise ayrıştıklarında yüksek etkinlikte serbest radikaller oluştururlar. Ancak yüksek kürleşme sıcaklıkları gerektirdiklerinden ve yarı ömürlerinin uzun olması nedeniyle az miktarda çapraz bağlanma gerektiren proseslerde tercih edilirler [8].

2.3. Silikon Kauçukların Sınıflandırılması

Silikon kauçuk esas olarak, sertleşme sıcaklığına göre, yüksek sıcaklık ısıtma vulkanizasyon (HTV) ve oda sıcaklığında ısıtma ile vulkanize (RTV) olarak ayrılır.

2.3.1. Oda Sıcaklığında Vulkanize Silikon Kauçuk (RTV)

Oda sıcaklığında vulkanize olan silikonlar yapısındaki çapraz bağın oluşumunun kondensasyon tipi reaksiyon ile gerçekleşir. Temel polimer, çapraz bağlama maddesi, katalizör ile bağlanabilmektedir. Yüksek yırtılma direnci öne çıkmaktadır ve değişen sertlik derecelerinde üretilebilmektedirler. Vulkanize kauçuk, (- 60 ~ + 200 °C) sıcaklık sınırlamasında, mükemmel elektriksel özellik, hidrofobiklik, ozon direnci, hava şartlarına karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. RTV silikonlarda işlenebilirlik HTV silikonlara göre daha kolaydır. Kimyasal özelliklerini yüksek ısı değişimlerinde koruyabilirler [9].

2.3.2 Yüksek Sıcaklık Vulkanize Silikon Kauçuk (HTV)

Yüksek Sıcak vulkanize silikon kauçuk (HTV), en önemli organik silikon ürünlerinden biridir. HTV silikonlar genellikle beyaz, opak materyaller olup macun kıvamında, viskozitesi yüksek malzemelerdir. %0.5 oranında vinil yan zincir yapısına sahip polidimetilvinil siloksan içeriklidir [9]. Vulkanizasyon ilave tipi reaksiyon sonucunda meydana gelmektedir. Platin tuzları ve peroksitler katalizör olarak işlev göstermektedir. Vulkanizasyonları 180-220 °C sıcaklıkta, basınç altında ve ortalama 30 dakika gibi bir sürede gerçekleşir. Yüksek yırtılma direnci gereken durumlarda tercih edilir. Yırtılma direnci üzerinde içeriğindeki katalizör, çapraz bağın yapısı ve tipi etkilidir, RTV ye göre

daha serttir. Takviye ajanlar ile ihtiyaç doğrultusunda renksiz, kokusuz, toksik olmayan son ürün haline gelir. Nihai ürün, mükemmel elektrik yalıtımı, ark direnci, korona, elektrik kıvılcımı güçlü, su geçirmez, nem geçirmez, anti-etkisi, anti-sismik özelliklere sahip olur [9].

2.4. Silikon Kompozit İzolatörler

Silikon Kauçuk ve kompozit malzemelerin bir araya getirilmesi ile elde edilebilen yeni nesil "Silikon Kompozit İzolatörler" (polimer izolatör), teknik, ekonomik, tedarik, sağlık ve çevre korunması yönünden porselene rakip olacak özelliklere sahiptir. Son 30 yıldır işletmede denenen polimer izolatörler çok olumlu sonuçlar vermiştir. Kompozit izolatörler, uzun yıllar boyunca göstermiş oldukları birçok avantaj sayesinde geleneksel cam veya porselen izolatörlere alternatif olarak piyasadaki yerini almış durumdadır. HTV silikon malzemesi kullanarak silikon kompozit izolatör üretilmektedir [6]. Silikon kauçuklar UV kararlılık ve hidrofobiklik özellikleri nedeniyle izolatörlerin dış tabakasında yaygın olarak kullanılır. Hidrofobiklik özelliğini zamanla yitirdiğinde izolatör üzerinde sürekli dolanan bir arkin muhtemel olduğu düşünülmektedir [10]. Hidrofobiklik kaybının çevresel faktörlerin etkisiyle yada izolatör çevresinde meydana gelen elektrik alanın korona deşarjına yol açması yüzeyde bozunma ürünlerinin oluşturduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak bozunma ürünleri ikiye ayrılır [10]. Bunlar silika benzeri ürünler ve düşük mol ağırlıklı uçucu ürünler meydana gelmektedir. Bu ürünlerin varlığı çeşitli karakterizasyon teknikleri ile belirlenmektedir.

Yüksek gerilim silikon kompozit izolatörler üç ana bölümden meydana gelir. Dış kısımda atmosfer ile karşı karşıya kalan gövde bölümü ve gövdeye güç veren çekirdek diye isimlendirilen kompozit malzeme bölümü ve silikon izolatörün alt ve üstünde kullanılan metal bağlantı parçalarından oluşur. Silikon gövdeye ait görüntü Şekil 2.6'da verilmiştir. Silikon gövde ve çekirdeğin dışında izolatörün istenilen yere bağlantısını ve mekanik kuvvetleri çekirdeğe ileten metal parçalar vardır. Armatür veya flanş olarak isimlendirilen metal parçalar alüminyum alaşım veya demir döküm olarak izolatörün alt ve üst kısma sıkma (crimping) veya ısıl işlem ile bağlanır. Metal bağlantı parçalarının tasarımı ve seçiminin elektrik alan dağılımında önemi dikkate alınmak zorundadır [6].



Şekil 2.6. Silikon kauçuk kanatlı oyuk kompozit izolatör gövdesinden kesit örnek.

2.5. İzolatör Ömür Süresinin Belirlenmesi

Silikon kauçuklar için kullanım ömrünün belirlenmesi endüstriyel nitelikte büyük öneme sahiptir. Hava koşulları, ozon, UV gibi çeşitli faktörler özellikle silikon izolatörlerin servis ömrünü kısaltmaktadır. Servis ömrünün belirlenmesi, dayanıklılığın artırılması, endüstriye uygun malzeme seçimi, mekanik özelliklerin artırılması gibi birçok faktörün belirlenmesini sağlar [11].

Mükemmel özellik ve dayanıklılıklarına rağmen silikon kauçuklar çeşitli çevresel ve kimyasal etkenlere maruz kaldığında zamanla bozulmaya maruz kalırlar. Bu durum genellikle malzemelerde yaşlanma olarak adlandırılır. Yaşlanma malzemenin istenilen özelliklerinin bozulması sonucunda görülür. Yaşlanmanın malzeme üzerindeki etkilerini anlamak ömür tayini ve ürün iyileştirme çalışmaları açısından önemlidir [3].

Bir malzemenin ömür süresi, fiziksel veya kimyasal bir özelliğin yaşam sonu kriteri olarak adlandırılan işleviyle tutarlı bir eşik değerine ulaşması için gereken süre olarak tanımlanır. [12]. Ömür süresinin deneysel olarak belirlenmesi en az üç farklı sıcaklık için yaşlandırma (ısı, UV) sırasındaki mekanik, kimyasal vb. özelliklerinin değişiminin incelenmesini içerir. Ömür süresinin belirlenmesi için genellikle iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

2.5.1. Arhenius Modeli

Kimyasal reaksiyon hızı sıcaklık artması ile birlikte artış gösterir. Bozunma mekanizmasının reaksiyon hızı ve sıcaklık arasındaki ilişkisi ortaya çıkartılmaktadır [13].

Bozunma derecesi ekstrapolasyon ile açıklanabilir. Ekstrapolasyon, verilen bir sıcaklıkta belirli bir zamandaki bozulma veya verilen bir bozulma derecesine ulaşmak için belirli sıcaklıktaki zaman olarak tanımlanır. Arhenius modeli ömür süresinin belirlenmesinde kullanılan en sık yöntemdir. Bu yöntemde belirlenen bir özelliğin (mekanik test vb.) önceden belirlenmiş sıcaklıklarda zamana göre değişimi incelenir. Bozunma hızı sıcaklığa bağlı olduğundan klasik Arhenius yaklaşımı uygulanabilir. Arhenius modeli zaman-sıcaklık denkliğine dayanmaktadır. Arhenius modelinde, ömür süresi ve mutlak sıcaklık arasındaki ilişki termal dayanıklılık profili olarak adlandırılan Arhenius modelini temsil etmektedir. Arhenius grafiği kullanım sıcaklığına ekstrapolasyon işlemi ile kullanım ömrü tahmin edilir. Arhenius modelinde hızlandırılmış yaşlandırma testi verilerine dayanarak bir eşik değeri belirlenir. Eşik değeri test edilen özellik ve son kullanım için kabul edilebilir en yüksek olan bozunma derecesi olarak seçilebilir. Genel olarak eşik değeri %50 olarak seçilir. Bu modelde numuneler en az üç farklı sıcaklıkta yaşlandırılmalıdır [13]. Bu yaklaşımda iki önemli nokta vardır;

- 1) Bozunma hızı sıcaklığa bağlı olarak değişir. Reaksiyon hızı sıcaklık artışı ile artar.
- 2) Yaşlanmaya neden olan kimyasal bozunma mekanizmaların sıcaklık ile birlikte değişmediği ve buna bağlı olarak aktivasyon enerjisinin ekstrapolasyon işlemi sonrasında değişmediği varsayılır.

Arhenius eşitliği eşitlik 2.1'de verilmiştir.

$$\ln k(T) = B - \frac{E}{RT} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte;

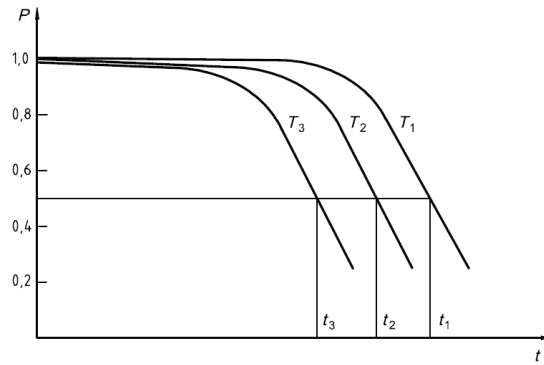
k(t): Reaksiyon derecesi (dak⁻¹)

B: Sabit

E: Aktivasyon enerjisi

R: Gaz sabiti (8.314 J/mol.K)

$K(T)$ farklı sıcaklıklarda farklı değerler alır. Her sıcaklık için özellikleri Şekil 2.8’de verilen grafiğe göre zamana karşı çizilir. Genellikle reaksiyon hızının uygun bir ölçümü belirlenen eşik değerine ulaşma süresidir. Reaksiyon hızının ideal ölçüsü malzeme özelliği -zaman grafiğinin eğimi olacaktır. Reaksiyon hızının logaritmasının mutlak sıcaklığın tersine karşı çizilen grafik en uygun değeri vermektedir [13].



Şekil 2.7. Malzeme özelliği-zaman grafiği

Maksimum kullanım sıcaklığı eşik değerine ulaşması için belirlenen bir reaksiyon hızına veya süresine ekstrapolasyon ile tahmin edilir. Aktivasyon enerjisi, grafiğin eğiminden hesaplanır. 2013 yılında Mitra Khiabani Moghadam, Jalil Morshedian yaptıkları çalışmalarda, yüksek gerilim hatlarında kullanılan PDMS’in termal yaşlandırma davranışı incelenmiştir. Yaşlanma etkilerinin incelenmesi için belirlenen sıcaklık aralıklarında Arrhenius modelinden yararlanarak aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır [14].

2.5.2. Silikon Elastomerlerin Isıl Kararlılığının Bulunması ve Sıcaklık İndisi Değerinin Tayini Yöntemi

Elastomer veya Termoplastik elastomer esaslı Alçak Gerilim – Yüksek Gerilim (AG-YG) İzolasyon malzemelerinin ısıl kararlılığının bulunması ve Sıcaklık İndisi değerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir başka yöntem de TS EN 60216-6 standartında tanımlanmış olan 20000 saat sonunda uzamasının %50 oranına düşmesi için en düşük sıcaklığın kaç derece olduğunun belirlenmesiyle ömür tayininin yapılması çalışmasıdır. Bu yöntem ülkemizde en büyük izolatör tedarikçisi olan TEİAŞ ve TEDAŞ tarafından da kabul edilmiş bir test prosedürüdür.

Hazırlanan silikon karışımlarının Bağlı Sıcaklık İndeksi (Relative Temperature Index, RTI) değerinin belirlenmesi amacıyla yaşlandırma çalışmaları sonucunda elde edilen kopmadaki uzama değerleri bu yöntemle değerlendirilmiş ve doğrusal olmayan eğri uydurumu yapılmış yaşlanma eğrilerinden uzama değerinin 20000 saat sonunda % 50 'ye düşmesi için gerekli zaman değeri tespit edilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında genellikle silikon izolatör yapımında kullanılan Mesgo firmasının MG8476 vinil metil silikonu (VMQ) ve Solpro firmasının EEL60 kodlu vinil metil silikonu (VMQ) kullanılmıştır. Silikon kauçukların özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında kullanılan silikon kauçukların bazı karakteristik özellikleri.

Özellik	MG8476	EEL60
Sertlik (Shore A)	72	60
Yoğunluk (g/cm ³)	1,57	1,46
Kopma Mukavemeti (N/mm ²)	4,9	≥ 4
Kopmadaki Uzama (%)	236	≥200

3.2. Deneysel Yöntemler

3.2.1. Silikon Kauçuk Karışımlarının Karakterizasyonu

Silikon kauçukların yapısının aydınlatılması ve mevcut katkı maddelerinin incelenmesi amacı ile TGA (termogravimetrik analiz) ve FTIR analizi yapılmıştır.

3.2.1.1. ATR-FTIR

Silikon kauçuklarının yapısal özelliklerinin aydınlatılması amacı ile Şekil 3.1'de verilen Perkin-Elmer marka Spectrum II model FTIR cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Perkin-Elmer, Spectrum II model FTIR cihazı

3.2.1.2. Termogravimetrik (TGA) Analizi

TGA sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak malzemede meydana gelen kütle değişimini göstermektedir. TGA analizi; ısıl kararlılık, oksidatif kararlılık, nem ve uçucu madde analizi, ayrışma kinetiği, reaktif atmosferlerin malzeme üzerinde etkisi gibi özellikler incelenebilmektedir. Deney kapsamında kullanılan Perkin-Elmer Pyris TGA cihazı Şekil 3.2’de verilmiştir.

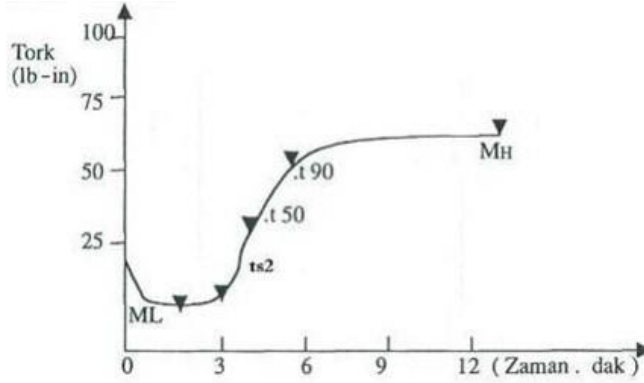


Şekil 3.2. Perkin-Elmer Pyris TGA cihazı.

3.2.2. Silikon Kauçukların Kür Özelliklerinin İncelenmesi

Kauçukların vulkanizasyon kinetiği genellikle reometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Reometre, elastomer ve kauçukların vulkanizasyon karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan bir cihazdır. Bir malzemeye devamlı bir şekilde artıp azalan gerinim belirli bir frekansta uygulanır ve en yüksek gerilim değeri ile gerinim ve gerilim arasındaki faz farklılığı ölçülür.

Reometre ile test edilecek parça, pozitif bir basınç, sürekli yüksek sıcaklık altında çift konik diski içeren test boşluğuna yerleştirilir. Boşluk kapanır ve disk salınım yapmaya başlar. Elastomer ve kauçuğun doyumluğuna bağlı olarak salınım için bir güce ihtiyaç duyar. Bu güç (tork) zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Kaydedilen tork bir denge ya da maksimum değere ulaştığında tamamlanmış bir eğri gözlenir. Vulkanizasyon eğrisi için gerekli olan zaman test sıcaklığı ve polimer özelliklerinin bir fonksiyonudur. Analiz sonucunda elde edilen genel bir kür eğrisi Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Tipik bir reometre eğrisi.

ML: Minimum tork değeri

MH: Maksimum tork değeri

ts: Ön vulkanizasyon (Scorch) süresi

t₉₀ : Maksimum tork değerinin %90 'ına ulaşmak için geçen süre

Bu çalışmada silikon kauçukların kür kinetiğinin incelenmesi amacıyla kullanılan Alpha Technologies MDR 2000B Hareketli Kalıp Reometresi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Alpha marka Hareketli Kalıp Reometresi.

Reometre cihazında analizler ASTM D5289 (ASTM, 2012) standardına göre yapılmıştır. Analizler 155-180°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.

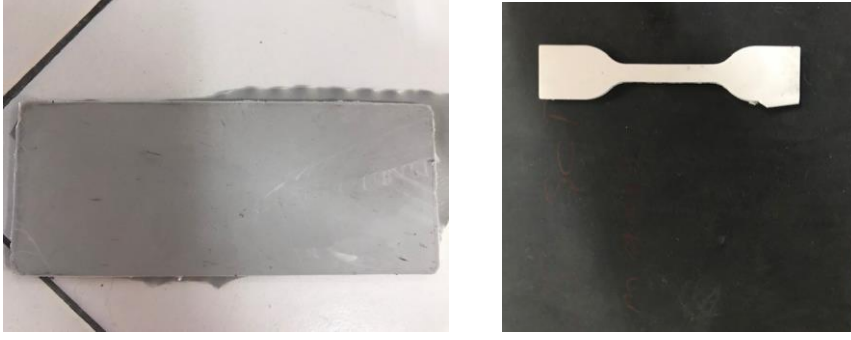
3.2.3. Kauçuk Hamurlarının Vulkanizasyonu

Hazırlanan silikon kauçuk karışımlarının vulkanizasyonunda (pişirilmesinde) Brabender Polystat200T hidrolik pres (Şekil 3.5) kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Brabender marka hidrolik pres.

Sonrasında yapılacak analizlerde kullanılmak üzere 2 mm kalınlığında ve 20 mm uzunluğunda Şekil 3.6’de verilen test plakaları hazırlanmıştır.



Şekil 3.6. Silikon hamurundan hazırlanan test plakası ve test numunesi örneği.

Kauçukların pişirme işlemleri 200 bar basınçta MG8476 silikonu için 170°C’de 10 dakika, EEL60 silikonu için 165°C 10 dakika olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.2.4. Mekanik Testler

Mekanik analiz polimerlerin Elastik modül, kopma dayanımı, kopmadaki uzama gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sıklıkla kullanılır. Mekanik test cihazında Zwick ZC020 kesme presi kullanılarak papyon şeklinde (Şekil 3.7) kesilmiş örnekler örnek tutmak için özel olarak tasarlanmış çenelere tutturulur ve örneğe belirli bir çekme kuvveti uygulanır.



Şekil 3.7. Papyon şeklinde kesilmiş silikon numuneleri

Bunun sonucunda örneğe ait germe-uzama (stress-strain) eğrisi elde edilir. Tez çalışmasında silikon elastomerlerin mekanik analizleri Zwick Z010 Universal Test Cihazı (Şekil 3.8) kullanılarak ASTM D412 (ASTM, 2006) standartına göre analiz edilmiştir.

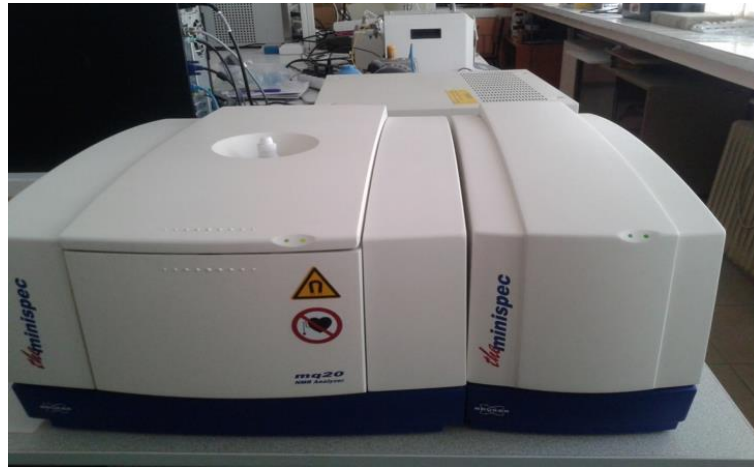


Şekil 3.8. Zwick marka Evrensel Test Cihazı

Silikon kauçuk test numuneleri, oda sıcaklığında 100 mm/dakika hız uygulanarak analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda silikon örneklerin kopmadaki kuvvet ve kopmadaki uzama değerleri elde edilmiştir.

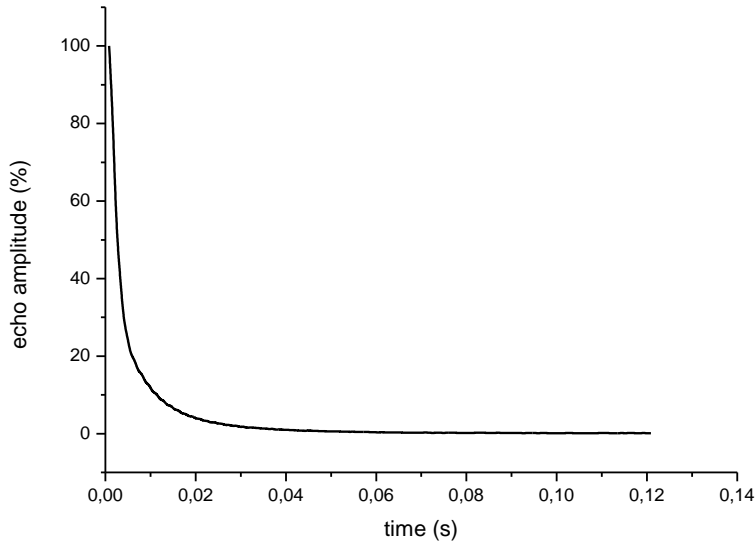
3.2.5. Çapraz Bağ Yoğunluğu Analizi

Bu çalışmada çapraz bağ yoğunluğunu hesaplamak için Bruker marka Minispec mq20 NMR Analyzer cihazı (Şekil 3.9) kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Bruker marka Puls-NMR cihazı

Cihaz 20 MHz manyetik alana sahip olup mıknatıs sıcaklığı 45°C dir. Silikon örneklerin çapraz bağ yoğunluğunun bulunması amacıyla pişmiş ve pişmemiş örnekler Carr-Purcell Meiboom-Gill (CPMG) yöntemine göre analiz edilmiştir [1, 8]. Puls-NMR cihazından elde edilen tipik sönüm eğrisi Şekil 3.10'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Tipik Puls-NMR sönüm eğrisi.

Analiz sonucunda elde edilen sönüm eğrileri OriginLab programı kullanılarak Eşitlik 3.1'e göre doğrusal uydurum (fitting) işlemi gerçekleştirilmiştir.

$$M(t) = A \cdot \exp(-t/T2 - q M_2 t) + B \cdot \exp(-t/T2) \quad (3.1)$$

Doğrusal uydurum işlemi sonucunda hızlı moleküler zincir durulması için düzeltme faktörü olan q değeri pişmiş ve pişmemiş örnekler için bulunmuştur. Pişmiş ve pişmemiş örneğin q değerinin farkından yararlanarak örneklerin çapraz bağlar arası molekül ağırlıkları (M_c) Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Örneğin yoğunluğunun hesaplanan M_c değerine oranı ise çapraz bağ yoğunluğunu vermektedir.

$$M_c = \frac{3}{5\sqrt{q}-q_0} C_\infty M_{RU}/N \quad (3.2)$$

C_∞ : Karakteristik oran

M_{RU} : Bir monomer biriminin molar ağırlığı

N : Her bir monomerik birim başına omurga bağı

Kullanılan silikon elastomer için N değeri 1,0, M_{RU} değeri ise 74g/mol olarak hesaplanmıştır. Kullanılan silikon kauçuk için karakteristik oran yapılan literatür araştırması sonucunda belirlenmiş olan 6,0 değeri kullanılmıştır [20].

3.2.6. Hızlandırılmış Yaşlandırma Testi

Hızlandırılmış yaşlandırma testleri, malzeme özelliklerinde değişikliklerin derecesini tahmin etmek için kullanılan yaygın bir uygulamadır [10]. Yaşlanmanın malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak, ömür süresi tahmini için önemlidir. Yüksek gerilim hatlarında kullanılan silikon elastomerlerin önemli bir parametresi olan hidrofobiklik kaybının çevresel bozunma (ısı, UV) ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda silikon kauçuklar üzerinde hızlandırılmış yaşlandırma testi uygulanır. Hızlandırılmış yaşlandırma testinin temel amacı:

- 1) Bozunma (Degredasyon) mekanizmasını anlamak
- 2) Belirlenen ortam ve maruz kalma koşullarında en uygun malzemeyi seçmek
- 3) Malzeme ömrü ve davranışını tahmin etmek

Elastomerlerin çok kararlı yapısı nedeni ile belirlenen bir sürede sonuç elde etmek için hızlandırılmış yaşlandırma testi uygulanır. Tez çalışması kapsamında iki yöntem ile hızlandırılmış yaşlandırma testi yapılmıştır.

3.2.6.1. Isıl Yaşlandırma

Silikon kauçukların ısı kararlılığının belirlenmesi ve belirli ısı işlem sonrasında malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimler buna bağlı olarak ömür süresinin belirlenmesi için silikon kauçuklar 180, 200, 220, 250 °C'de 36 gün boyunca ısı işleme tabi tutulmuştur. Isıl yaşlandırma işlemi için Şekil 3.11'de verilen etüv kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Memmert marka etüv.

3.2.6.2. UV Yaşlandırma

Dış mekan uygulamalarında kullanılan silikon kauçuk izolatörlerin ortam koşullarının etkisinin mekanik özelliklerinde performansının incelenmesi için 32 gün süre ile UV ışınları ile yaşlandırılmıştır. UV yaşlandırma testi ASTM G154'ına göre Şekil 3.12'da gösterilmiş olan hızlandırılmış iklimlendirme test cihazı ile gerçekleştirilecektir.



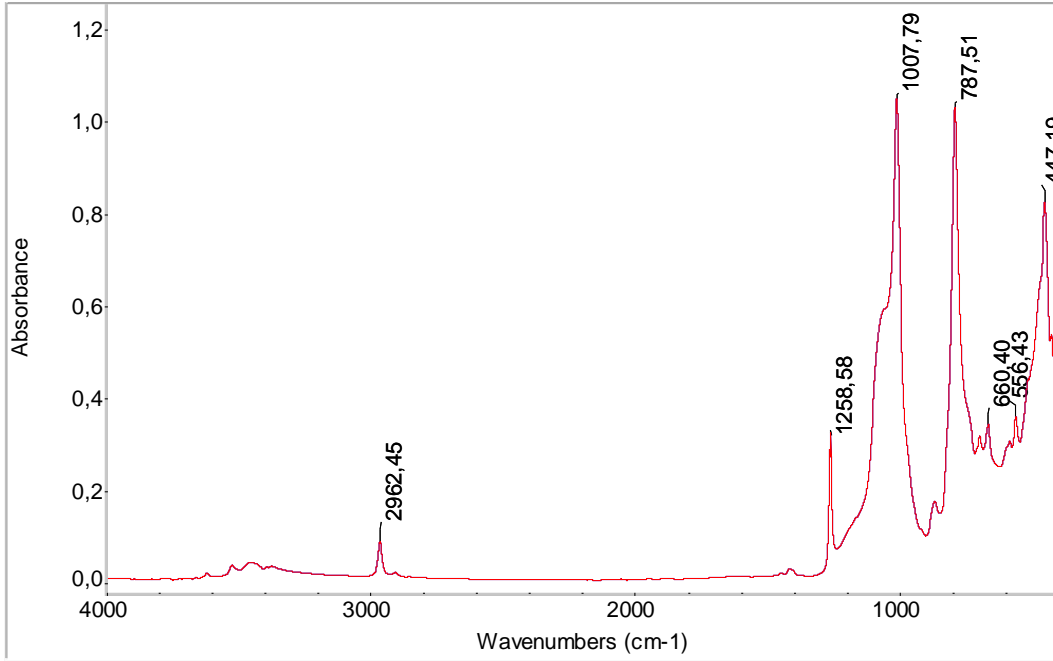
Şekil 3.12. İklimlendirme test cihazı.

ASTM G154 standartına göre test numuneleri 8 saat UV yaşlandırma, 3 saat yağmurlama ve 45 dakika nemlendirme döngüsü ile yaşlandırılmıştır. Bu koşullar altında silikon kauçuk numunelerinin çevresel koşullar altında dayanımı ve buna bağlı olarak ömür süresi hesaplaması yapılacaktır [21].

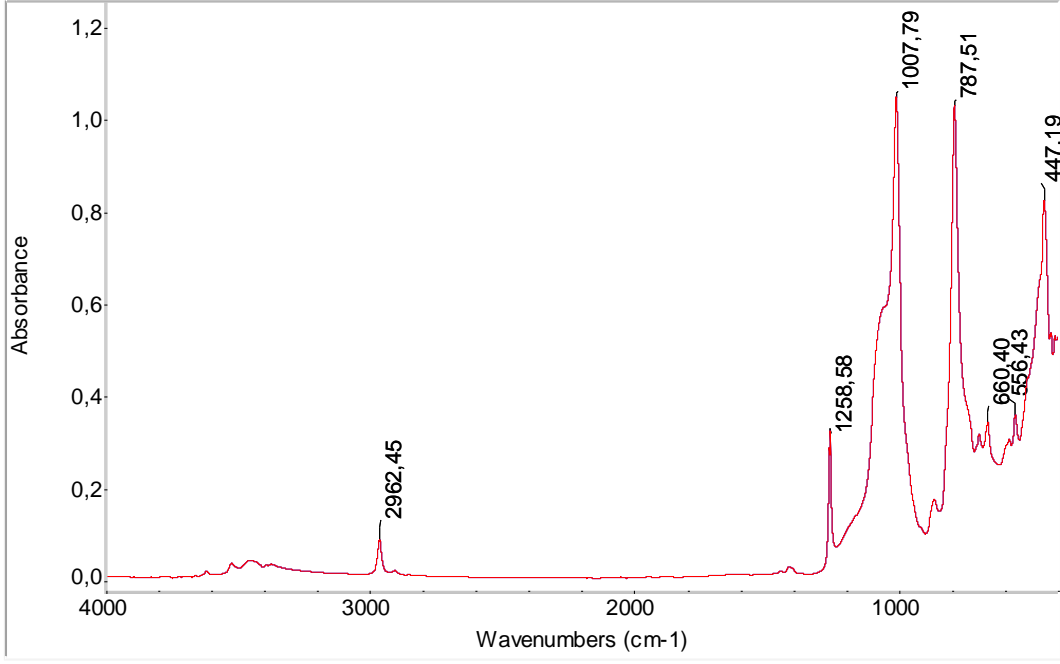
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. İzolatör Silikon Karışımlarının ATR-FTIR ile Karakterizasyonu

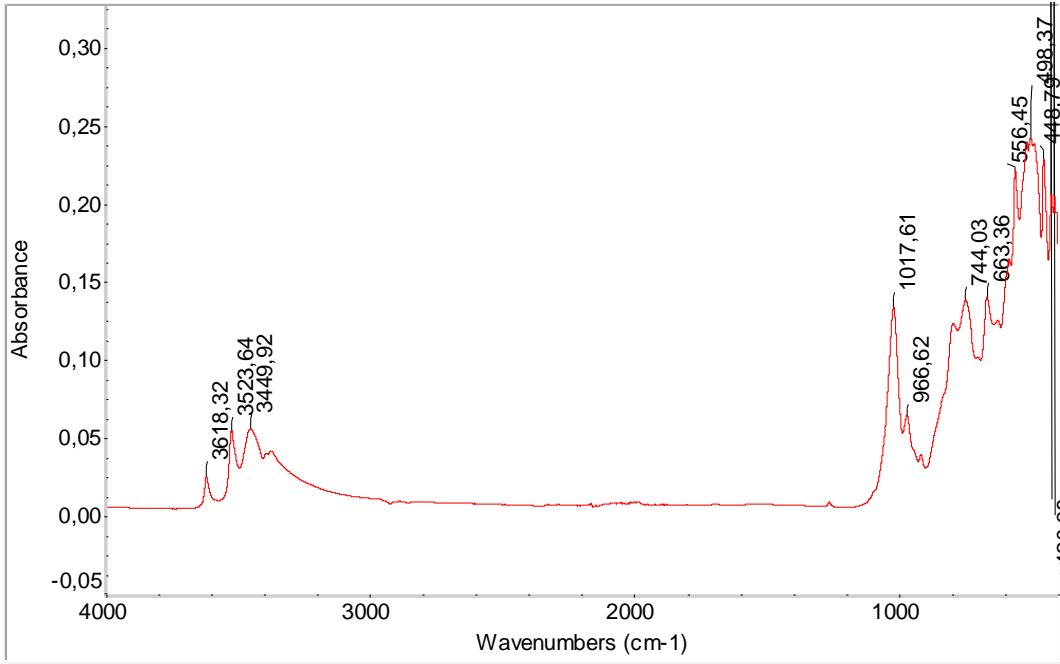
Yapılan literatür araştırması sonucunda, silikon elastomerin FTIR spektrumundaki Si-C bağı ve Si-O bağının silikon elastomer için önem arz eden pikler olduğu görülmüştür. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de EEL60’a ve MG8476’ya ait spektrumlar ve Şekil 4.3’de ATH’a ait spektrum verilmiştir. FTIR analizi 4 cm^{-1} ayırıcılık ve $4000\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ arasında tarama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. EEL60 silikonuna ait FTIR spektrumu.



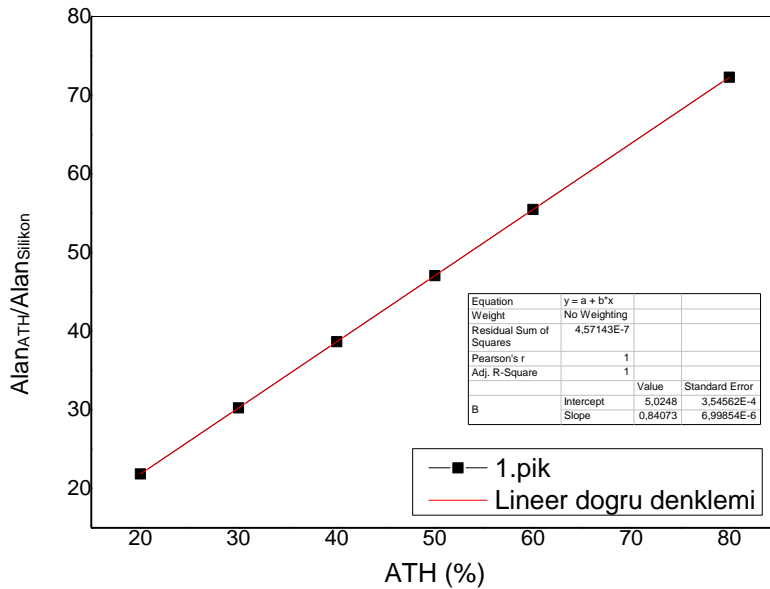
Şekil 4.2. MG8476 silikonuna ait FTIR spekturumu.



Şekil 4.3. ATH'a ait FTIR spekturumu.

Yukarıda verilen MG8476 ve EEL60 silikonuna ait spektrumların benzer spektrumlar olduğu görülmüştür. 3000-3500 cm⁻¹ bandında silikon elastomerlere eklenen ilave katkı maddesine (ATH) ait pikler gözlemlenmiştir. Silikon için karakteristik pikler, 2964 cm⁻¹ metil grubu (CH₃) için asimetrik gerilme titreşimi, 1015-1085 cm⁻¹ Si-O-Si bağ yapısı varlığı, 1256 cm⁻¹ Si-CH₃ simetrik gerilme ve 795 cm⁻¹ Si (CH₃)₂ gerilme titreşim pikine

karşılık gelmektedir. MG8476 ve EEL60 silikonun içerdiği ATH (Alüminyum trihidrat) miktarı FTIR spekturumu ile hesaplanmıştır. ATH'ın temel amacı, için alev geciktirici ve kendi kendine sönme özelliği sağlayan bir dolgu malzemesi olmasıdır. Sıcaklık ile birlikte $\text{Al}(\text{OH})_3$, % 66 Alumina ve % 34 suya bozunur. Bu geri dönüşümlü proses ATH'yi bir yangın geciktirici, yavaşlatıcı yapar. Alev yayılmasını ve duman oluşumunu azaltmak için, yüksek ısılarda bünyesindeki su moleküllerini ortaya çıkarmaktadır. ATH, CTP boru uygulamalarında, akrilik uygulamalarda ve diğer birçok kompozit uygulamalarında kullanılmaktadır. ATH'e ait olan pik $3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ aralığındadır. ATH dolgu malzemesinin dehidrasyonu $3200\text{-}3700\text{ cm}^{-1}$ 'de O-H gerilmesindeki azalmadan karakterize edilir. Saf ATH ve ATH içermeyen VMQ silikonunun FTIR spektrumları OMNIC programı kullanılarak silikona ait ve ATH'a ait pikler belirlendikten sonra program üzerinden matematiksel toplama işlemi yapılarak ATH 'ın oranının %10-%80 kadar arttığı buna karşın silikonun %90 dan %20 'e kadar azaldığı bir dizi teorik FTIR eğrisi oluşturulmuş, bu spektrumlar üzerinde belirlenen piklerin alan değerleri kullanılarak ATH için kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Kalibrasyon eğrisi ATH bandının alan değerinin ($3500\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$), Si-O bandının (2964 cm^{-1}) alan değerlerine oranı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu eğri Şekil 4.4'de verilmiştir.

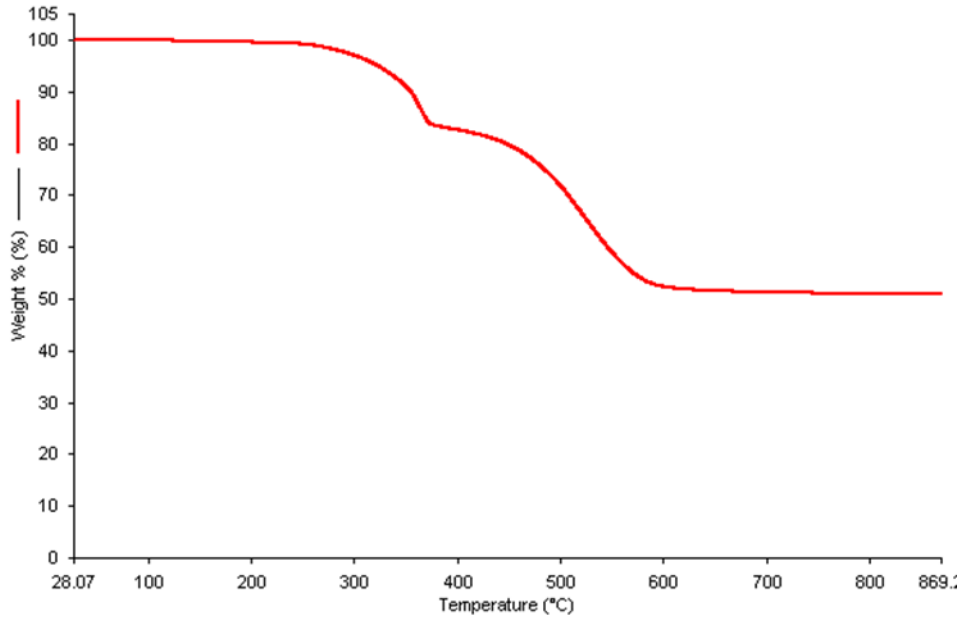


Şekil 4.4. ATH miktarının tayini için kullanılan kalibrasyon eğrisi.

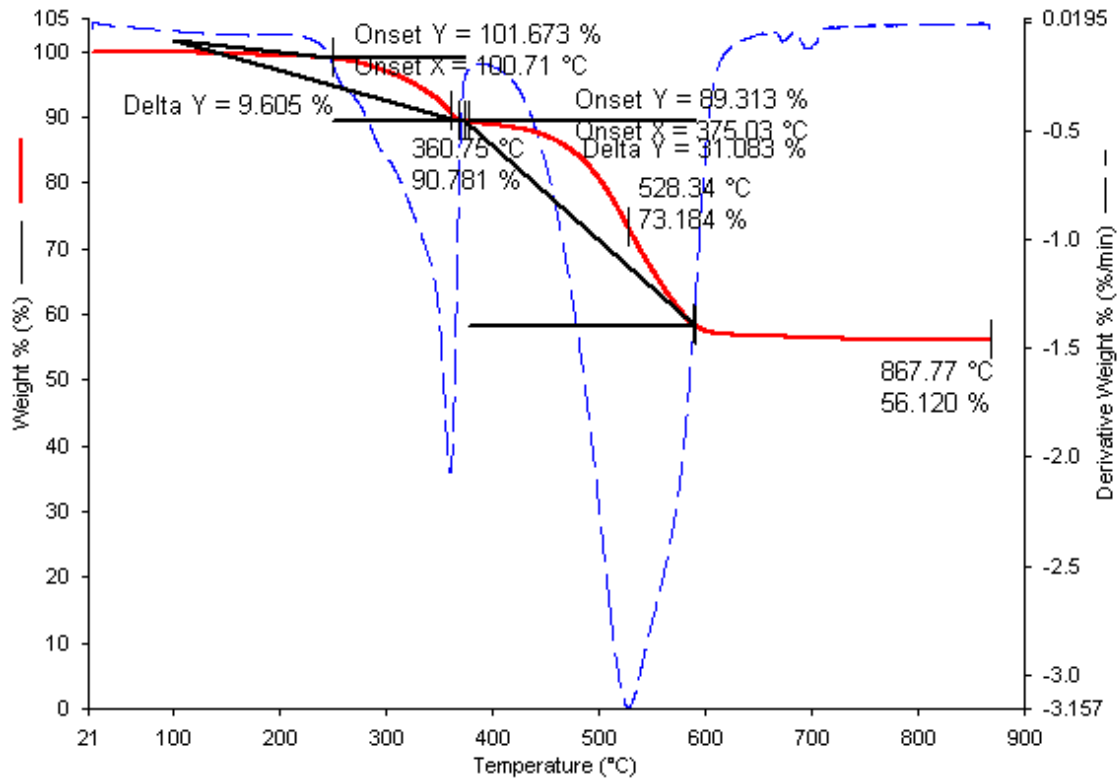
Eğrinin doğru denklemi ve kullanılan silikon elastomerlerdeki piklerin alan değeri oranından ATH miktarı hesaplanmıştır. MG8476 ve EEL60 için yapılan hesaplamalarda % ATH oranı % 54,6 olarak hesaplanmıştır.

4.2. İzolatör Silikon Karışımlarının Termogravimetrik (TGA) Analizi

TGA analizi malzemenin ısı kararlılığın belirlenmesi amacıyla önemli rol oynamaktadır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de EEL60 ve MG8476’ya ait termogramlar verilmiştir. Deney sırasında azot ortamında izotermal koşullarda ile 10 °C/dakika sıcaklık programı uygulanmıştır. Bu termogramlara ait türev eğrileri Şekil 4.6 ve 4.8’de verilmiştir. Termogramlara ait bozunma değerleri Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Çizelgelerde belirtilen T1 başlangıç ve T2 başlangıç değerleri termogramlarda bozunmanın başladığı sıcaklık değerlerini temsil etmektedir. Bu sıcaklıklardaki kütle kaybı ise ağırlık kaybı olarak çizelgede yer almaktadır. Termogramlardan görüleceği üzere termal bozunma iki basamakta gerçekleştirilmiştir. İlk ağırlık kaybı esas olarak ATH’ın dehidrasyonuna bağlıdır. Kütle kaybı 200 °C üzerinde su açığa çıkması ile başlamaktadır. Yapıdaki düşük molekül ağırlıklı silikon yapılarının ayrışması da ilk kütle kaybında gerçekleşir. İkinci kütle kaybı esas olarak silikon ana zincirinin bozunmasından kaynaklanmaktadır. Termogramlardan görüleceği üzere termal bozunma 370-650 °C’de silikon kauçuğun yan zincir gruplarının termal bozunması ile açıklanabilir. 650-800 °C aralığındaki bozunma silikon ana zincirindeki termal bozunması ile açıklanabilir Silikon elastomer için, belirli bir miktarda organik malzeme parçalanmış, hidrokarbon ve türevleri, CO₂ ve H₂O olarak kaybedilmiş, katı halde büyük miktarda inorganik dolgu maddesi kalmıştır ve ısıtmada geriye kalan madde bu inorganik dolgudur.



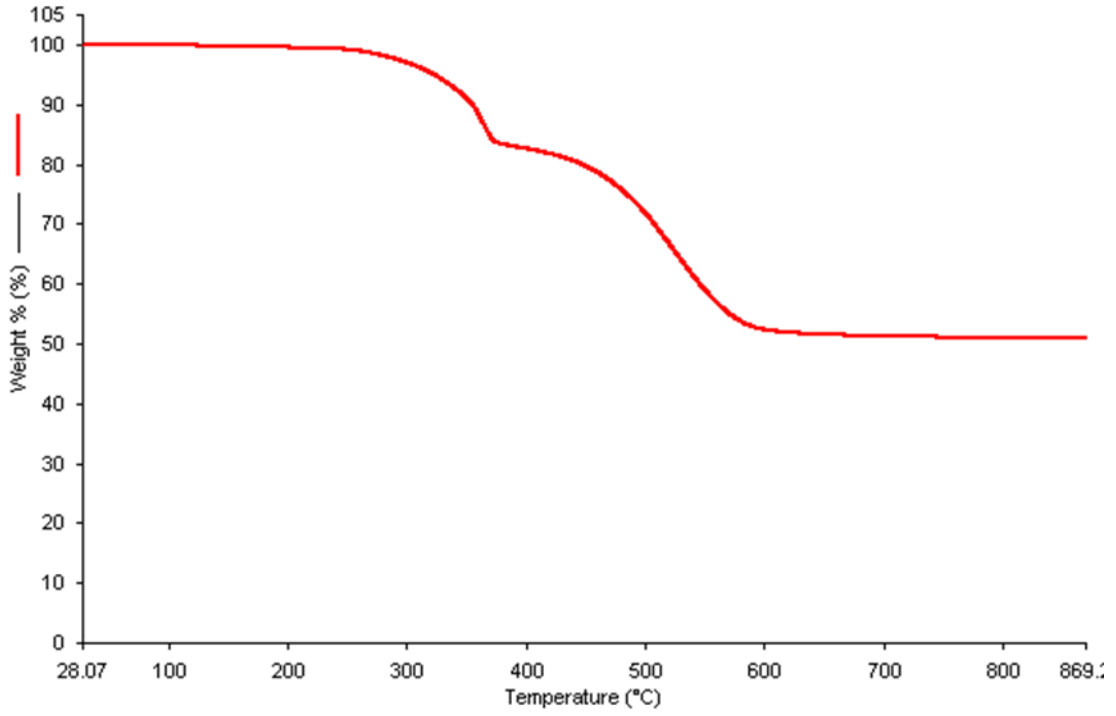
Şekil 4.5. MG8476 silikonuna ait termogram.



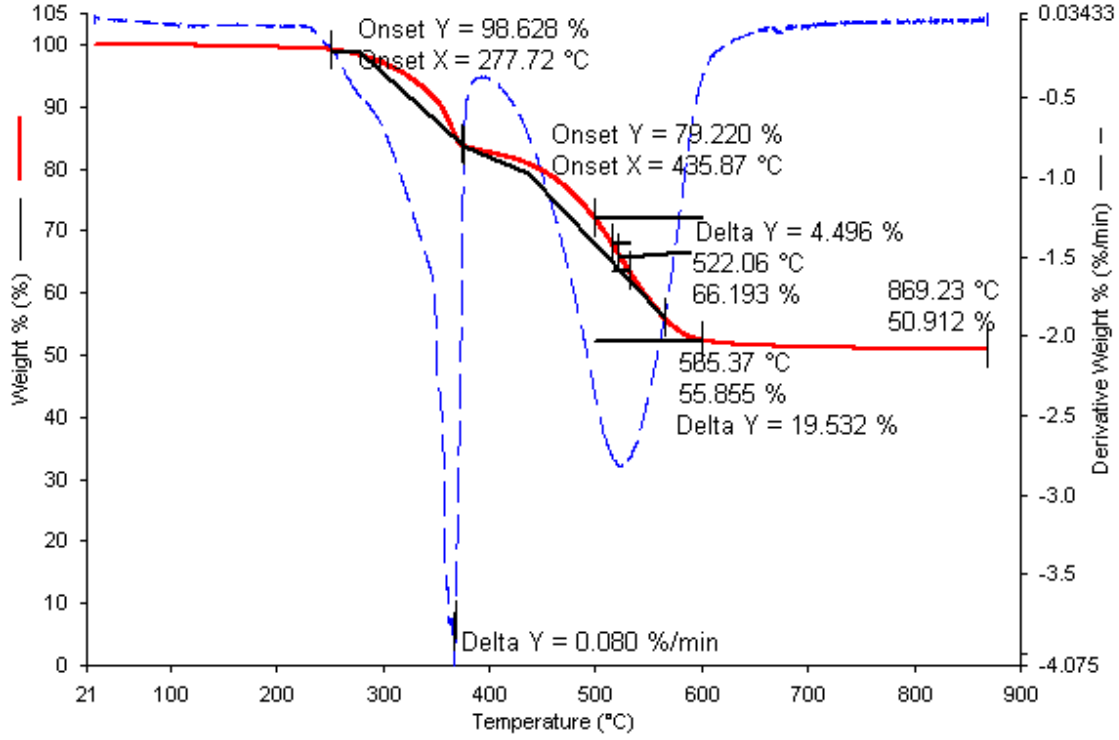
Şekil 4.6. MG8476 silikonuna ait termogramın türev eğrisi.

Çizelge 4.1. MG8476 silikonuna ait termogramlardan elde edilen parametreler.

Sıcaklık (°C)	°C	Kütle kaybı (%)
T1başlangıç	229,3	16,6
T2başlangıç	368,4	31,4



Şekil 4.7 .EEL60 silikonuna ait termogram.



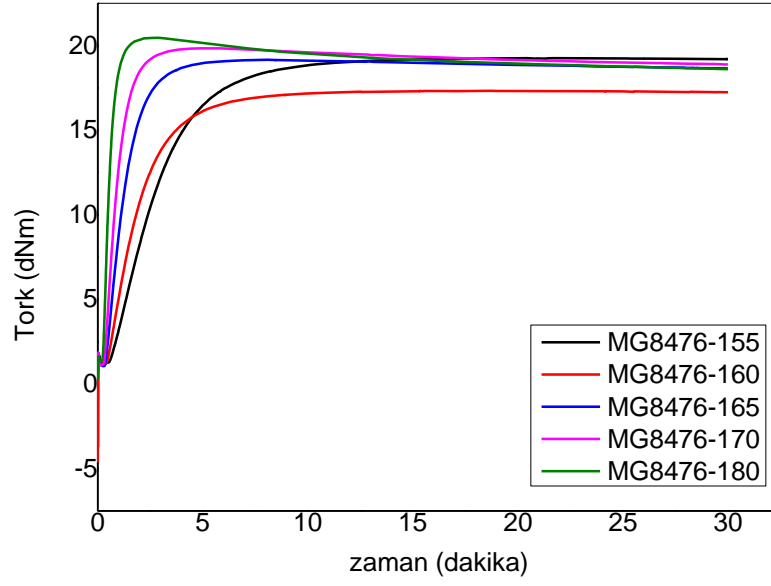
Şekil 4.8 EEL60 silikonuna ait termogramın türev eğrisi.

Çizelge 4.2. EEL60 silikonuna ait termogram değerleri.

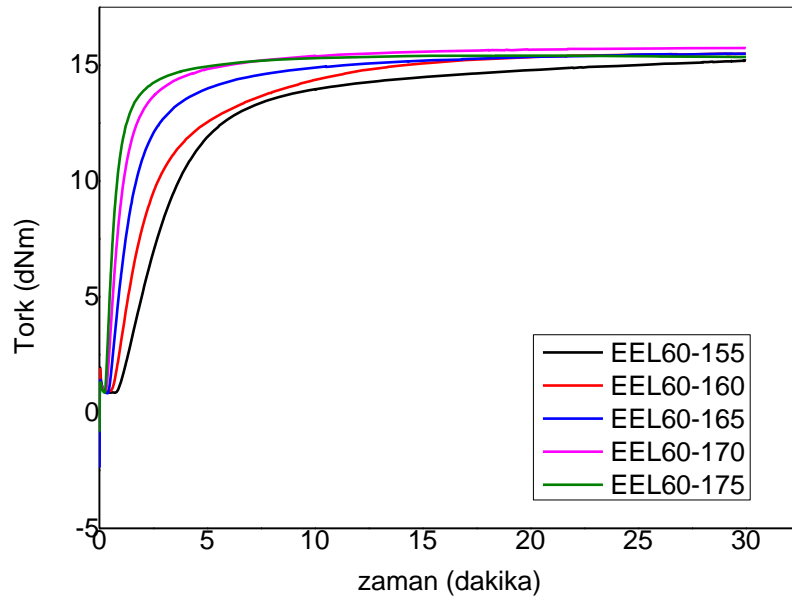
Sıcaklık (°C)	°C	Kütle kaybı (%)
T1başlangıç	215,7	10,2
T2başlangıç	360,9	32,4

4.1. İzolatör Silikon Elastomerlerin Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

MG8476 ve EEL60 silikon izolatör hamurlarının kür kinetiği MDR (hareketli kalıp reometresi) cihazı ile incelenmiş ve kür eğrileri elde edilmiştir. Karışımlara ait kür eğrileri Şekil 4.9-4.10'de verilmiştir.



Şekil 4.9. MG8476 silikon kauçuğuna ait farklı sıcaklıklarda kür eğrileri.



Şekil 4.10. EEL60 silikon kauçuğuna ait farklı sıcaklıklarda kür eğrileri.

Kür eğrilerinden görüldüğü gibi sıcaklığı arttıka kürleşme süresi hızla azalmaktadır. Eğriler göz önüne alındığında, MG8476 hamurunda geri dönüşüm (reversion) olduğufakat EEL60'da geri dönüşümün olmadı gözlemlenmiştir. MG8476 silikonunda

zamanla tork deęerinde dūşūş gözlemlenmiřtir. Bu durum, yapıda uzun kūrleřme süresinde bir bozunmanın olduęunu göstermektedir. EEL60 silikonunda ise böyle bir durum gözlenmemektedir. Geri dönüşüm göz önüne alarak kūrleřme sıcaklıęı için MG8476 170°C ve EEL60 için 165°C olarak belirlenmiřtir. fakat EEL60'da geri dönüşümün olmadı gözlemlenmiřtir. MG8476 silikonunda zamanla tork deęerinde dūşūş gözlemlenmiřtir. Bu durum, yapıda uzun kūrleřme süresinde bir bozunmanın olduęunu göstermektedir. EEL60 silikonunda ise böyle bir durum gözlenmemektedir. Geri dönüşüm göz önüne alarak kūrleřme sıcaklıęı için MG8476 170°C ve EEL60 için 165°C olarak belirlenmiřtir. Elde edilen kūr eęrilerinin deęerlendirilmesi sonucu elde edilen reolojik parametreler Çizelge 4.1 ve 4.2' de verilmiřtir.

Çizelge 4.1 EEL60 silikon hamuru için reolojik analizler sonucunda elde edilen parametreler.

Parametre	EEL60 155°C	EEL60 160°C	EEL60 165°C	EEL60 170°C	EEL60 175°C
ML (dNm)	0.81	0.9	0.94	1.13	0.86
MH (dNm)	14.93	14.9	15.75	15.78	15.51
ts2 (dk)	0.91	0.99	0.87	0.48	0.38
t5 (min)	1.2	0.99	0.56	0.39	0.32
t90 (dk)	8.87	8.11	7.58	3.69	2.41
t95 (dk)	13.69	11.59	9.82	6.66	4.09
Pişme Genliği, (Δtork)	14.12	14	14.63	14.65	14.65
CRI = 100 / (t90- ts2)	13.03	14.04	14.9	31.15	49.26

Çizelge 4.2 EEL 60 silikon hamuru için reolojik analizler sonucunda elde edilen parametreler.

Parametre	MG8476 155°C	MG8476 160°C	MG8476 165°C	MG8476 170°C	MG8476 175°C
ML (dNm)	2.29	1.20	1.06	1.11	1.27
MH (dNm)	19.02	18.98	19.12	19.84	17.39
ts2 (min)	0.95	0.73	0.53	0.42	0.33
t5 (min)	0.84	0.57	0.43	0.36	0.28
t90 (min)	6.69	5.05	2.59	1.79	1.53
t95 (min)	9.32	6.96	3.29	2.25	2.11
Pişme Genliği, (Δ_{tork})	16.73	17.78	18.06	18.73	16.12
CRI = 100 / (t90-ts2)	17.42	23.14	48.54	73	83.3

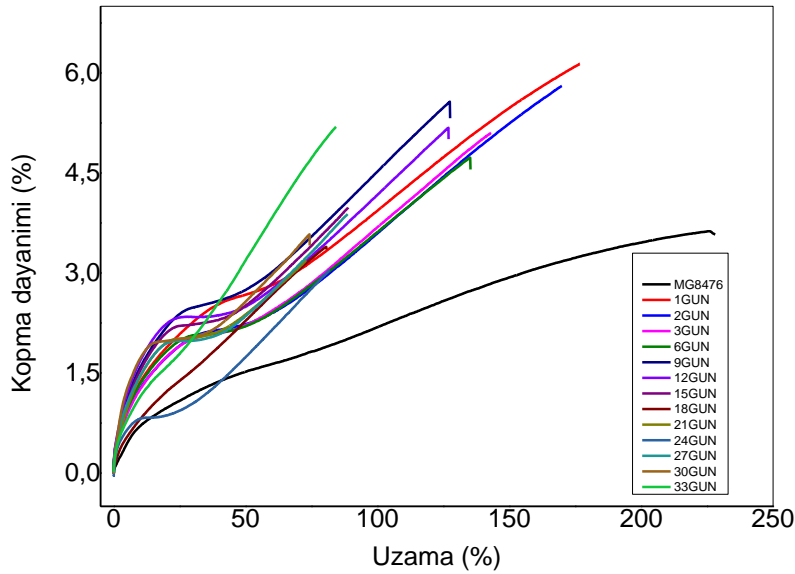
Çizelge 4.1 ve 4.2'ye bakıldığında MG8476 ve EEL60 için belirlenen pişme sıcaklıkları göz önüne alındığında, (MG8476 için 170°C ve EEL60 için 165°C) Δ_{tork} ve Kür hızı indeksi (Cure Rate Index, CRI) vulkanizasyonun hızının bir ölçütü olup ts2 ve t90 değerlerinin farkından yararlanılarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin diğer sıcaklıklarda elde edilen değerlerden daha büyük olduğu ve pişme süresi t90 değeri üzerinden karşılaştırıldığında bu sıcaklıkların uygun sıcaklıklar olduğu sonucuna varılmıştır. Pişme süresi arttıkça tork değeri, çapraz bağ oluşumu nedeniyle belirli bir değere kadar artış göstermektedir [24]. MG8476 için 170°C ve EEL60 için 165°C'de bulunan ön pişme süresinin (Scorch time, ts₂) diğer sıcaklıklara göre daha yavaş olması ve güvenli pişme aralığının sağlanması ile pişmeden sonra reometre eğrisinin sabit bir şekilde ilerlemesi de seçilen sıcaklıkların uygun sıcaklıklar olduğunu göstermektedir.

4.2. Hızlandırılmış Yaşlandırma Testi ile Silikon Kauçukların Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

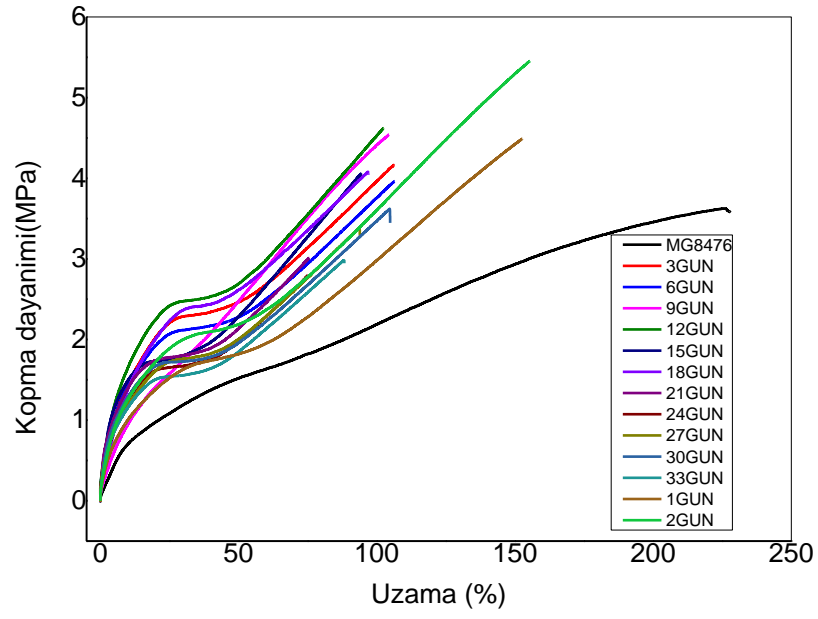
4.2.1. Isıl Yaşlandırmanın Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Diğer elastomerlerle kıyaslandığında, silikon elastomerlerin mekanik mukavemeti oda sıcaklığında daha düşüktür. Özellikle silikon kauçuklarda ATH (alüminyum trihidrat) gibi yüksek seviyelerde dolgu malzemesi ilavesi malzemeyi eşzamanlı mekanik özelliklerde bozulma ile sertleştirme eğilimindedir [23]. Fakat bu özelliklere karşın, silikon kauçukların mekanik özelliklerinin geniş bir sıcaklık aralığında fazla değişmemesi kullanışlı olmasına olanak sağlar.

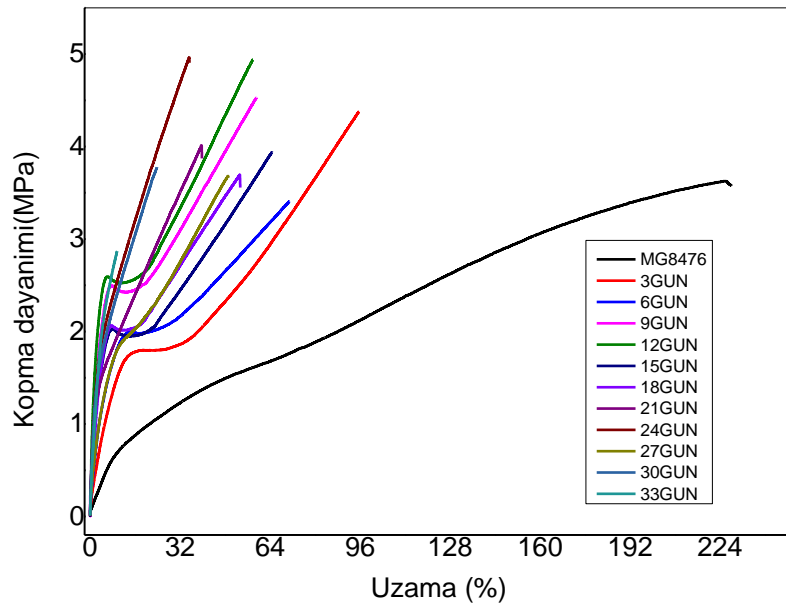
Hızlandırılmış yaşlandırma testinin silikon elastomerlerin mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla silikon elastomerler 180, 200, 220, 250 °C de ısıya maruz bırakılmıştır. Isıl yaşlandırma sonrası silikon kauçuk test numuneleri evrensel mekanik test cihazı (Şekil 3.11) ile analiz edilmiştir. Analizlerin sonucu elde edilen örneklere ait gerinim-gerilim eğrileri Şekil 4.11-4.18’de verilmiştir.



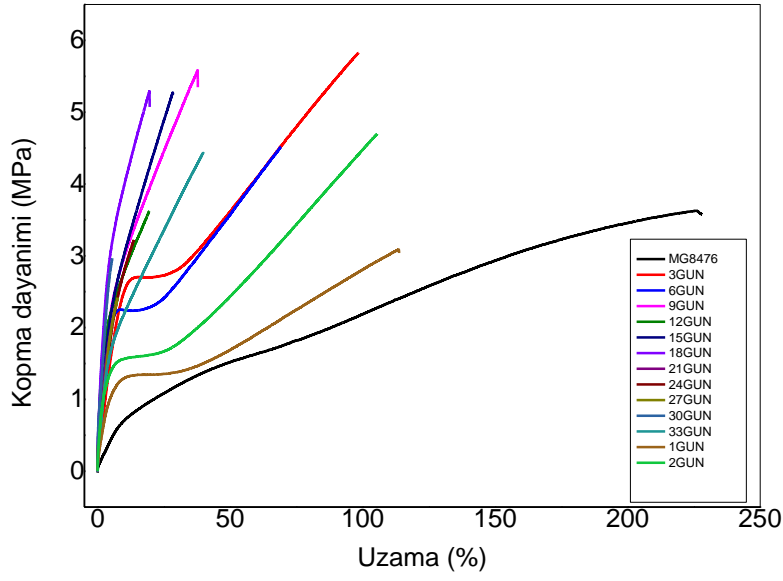
Şekil 4.11. 180 °C 'de yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.



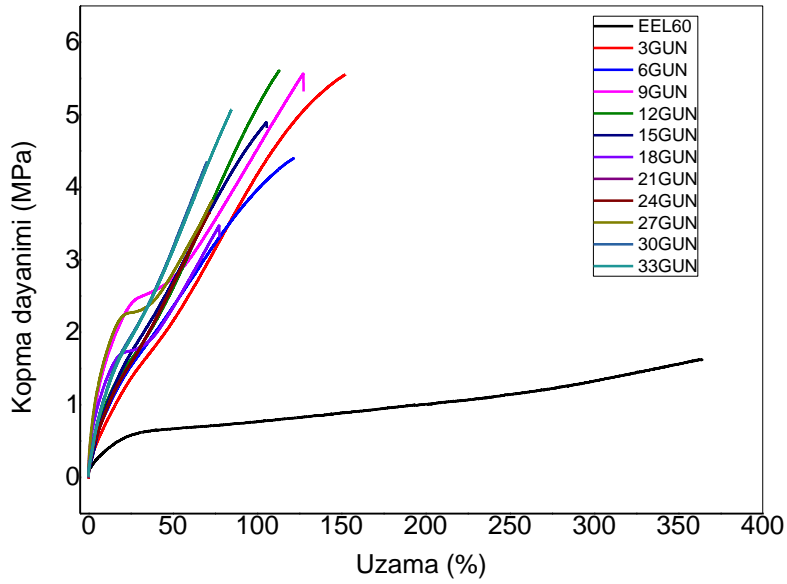
Şekil 4.12 200 °C ‘de yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.



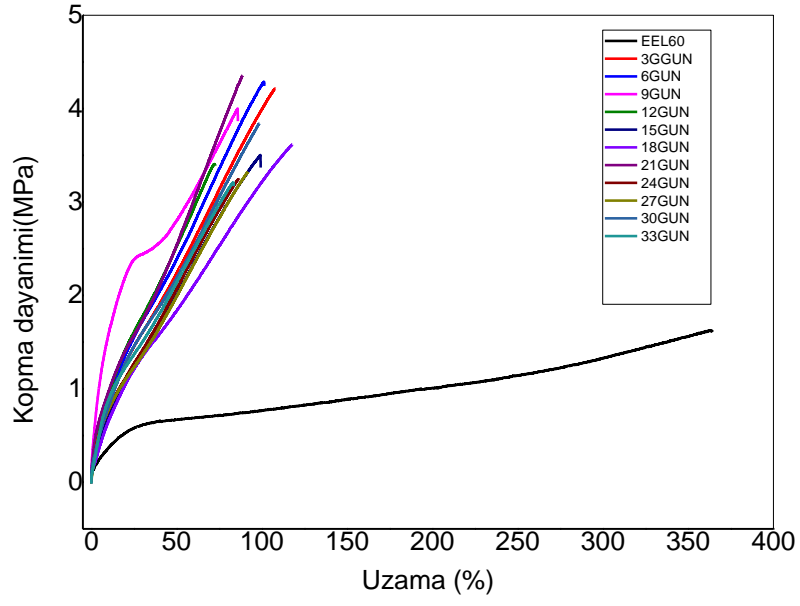
Şekil 4.13. 220 °C ‘de yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.



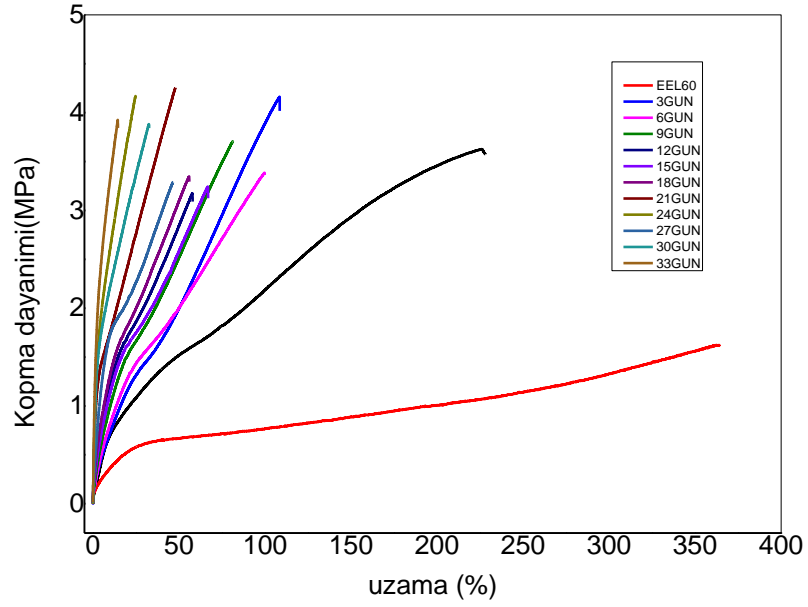
Şekil 4.14. 250 °C ‘de yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.



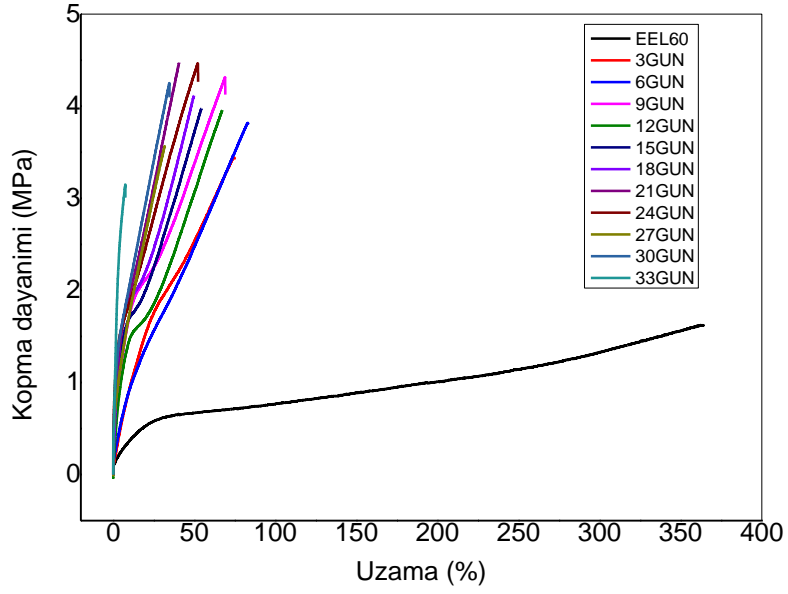
Şekil 4.15. 180 °C ‘de yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.



Şekil 4.16. 200 °C 'de yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.

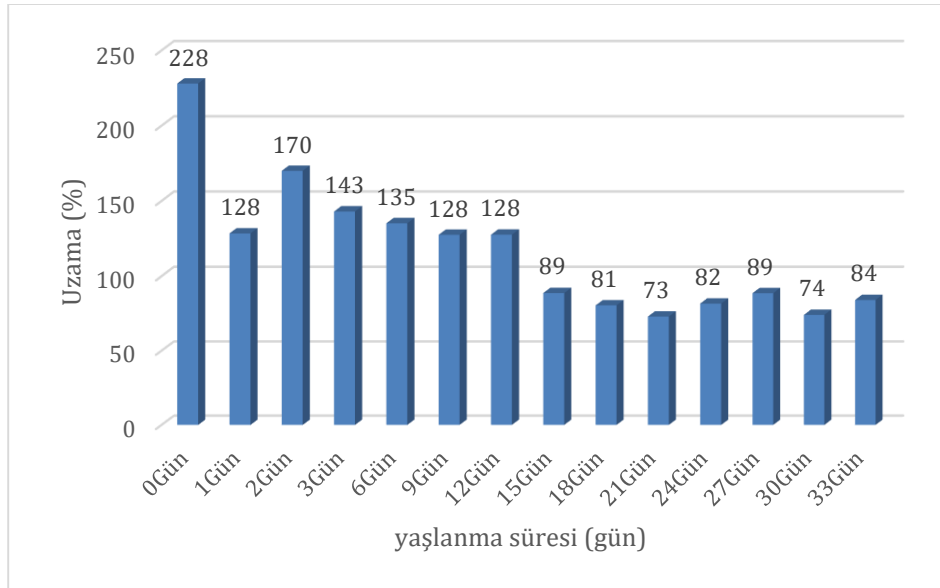


Şekil 4.17. 220 °C 'de yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.

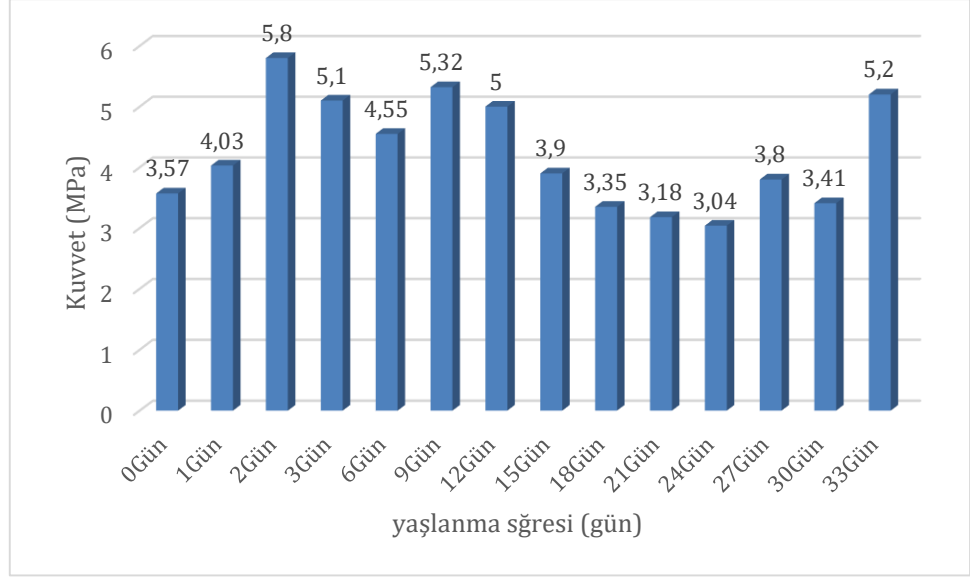


Şekil 4.18. 250 °C ‘de yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerin gerinim-gerilim eğrisi.

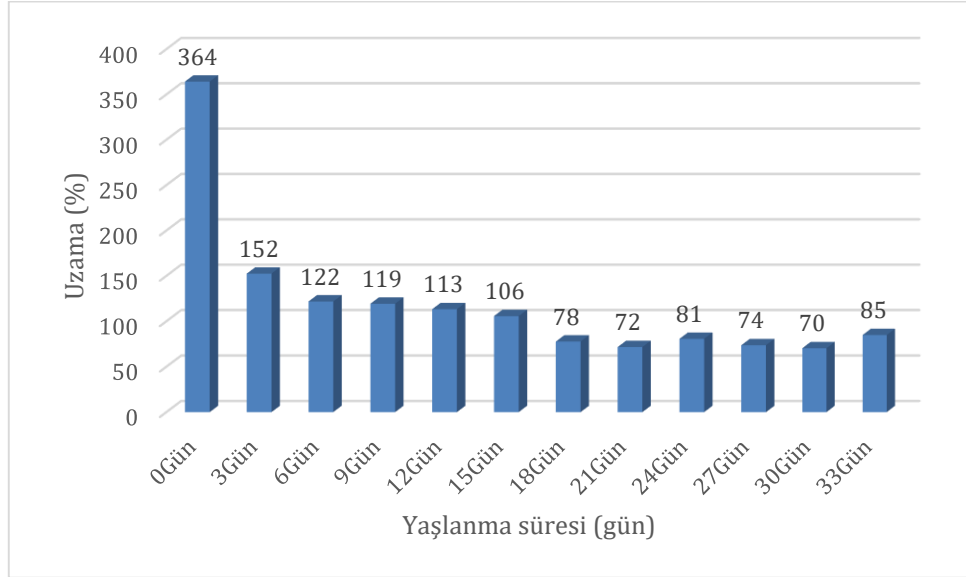
Mekanik analiz sonucu elde edilen gerinim-gerilim eğrilerinden hesaplanan kopmadaki uzama ve kopmadaki kuvvet değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19- 4.34’da verilmiştir.



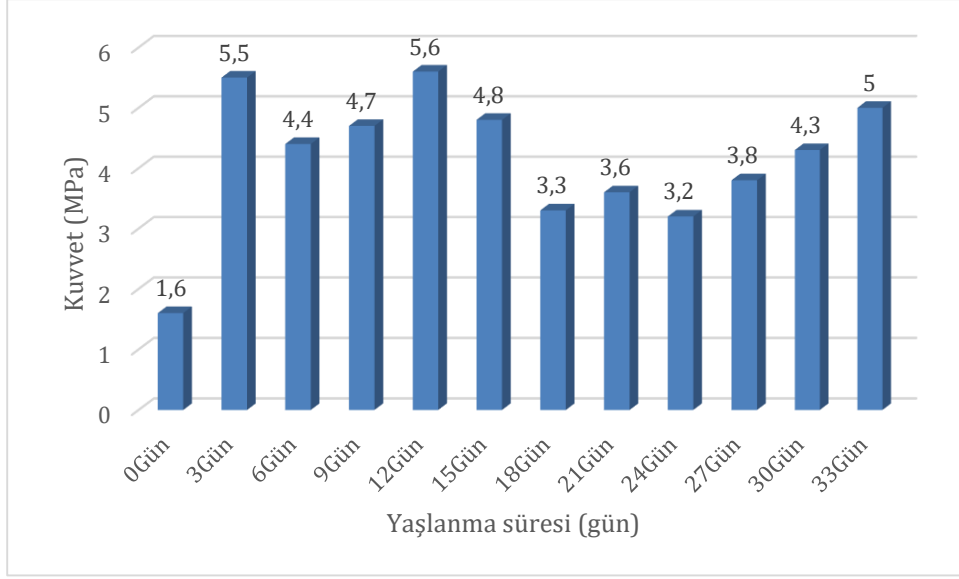
Şekil 4.19. 180 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



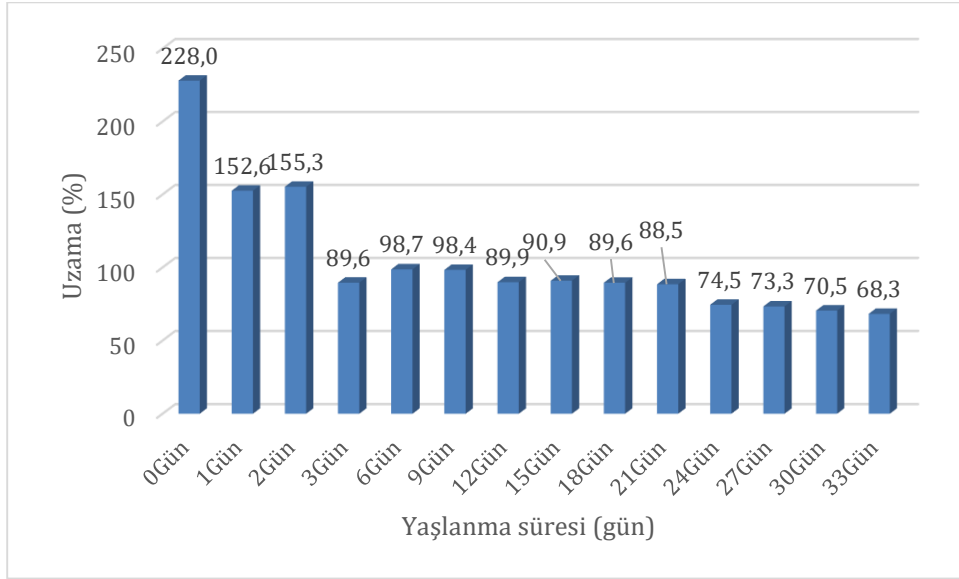
Şekil 4.20. 180 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



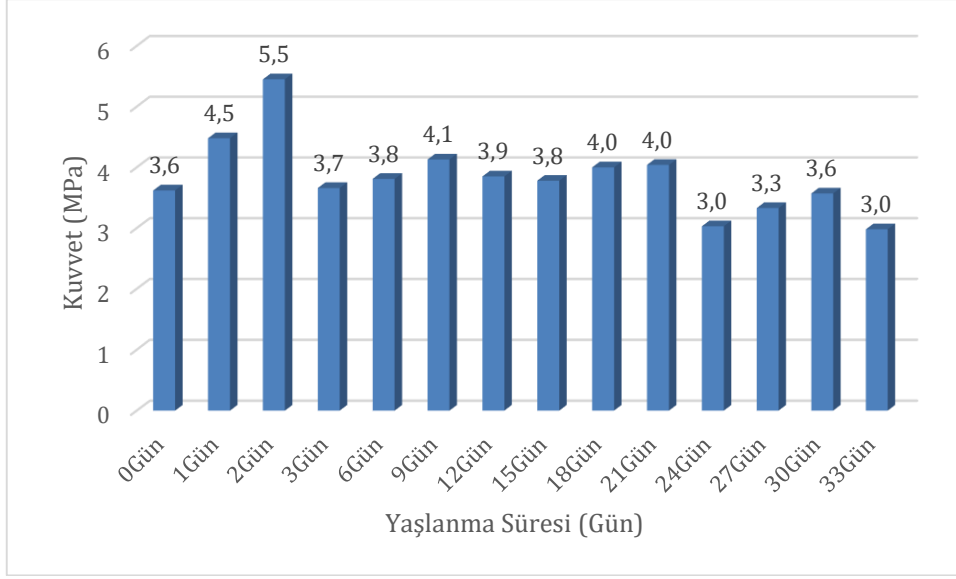
Şekil 4.21. 180 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



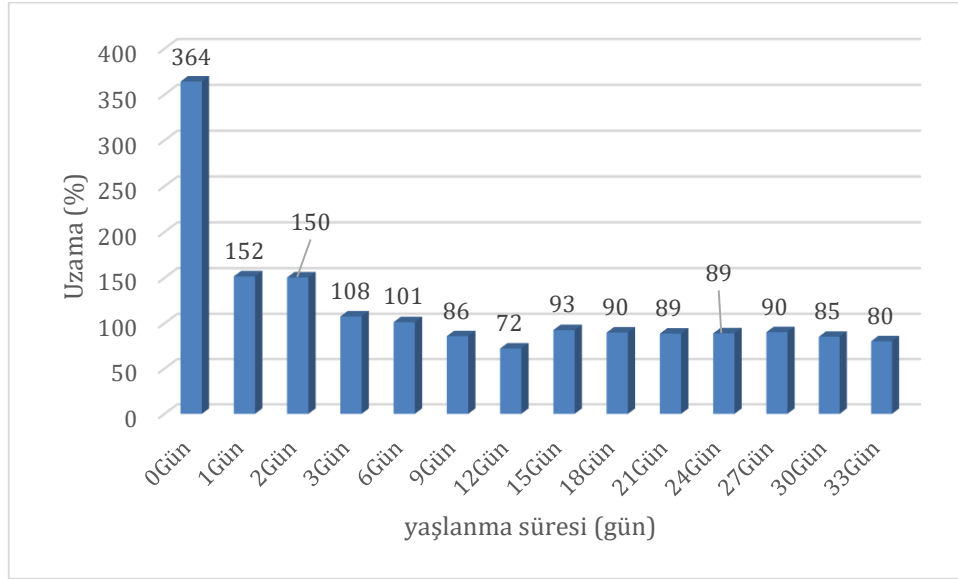
Şekil 4.22. 180 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



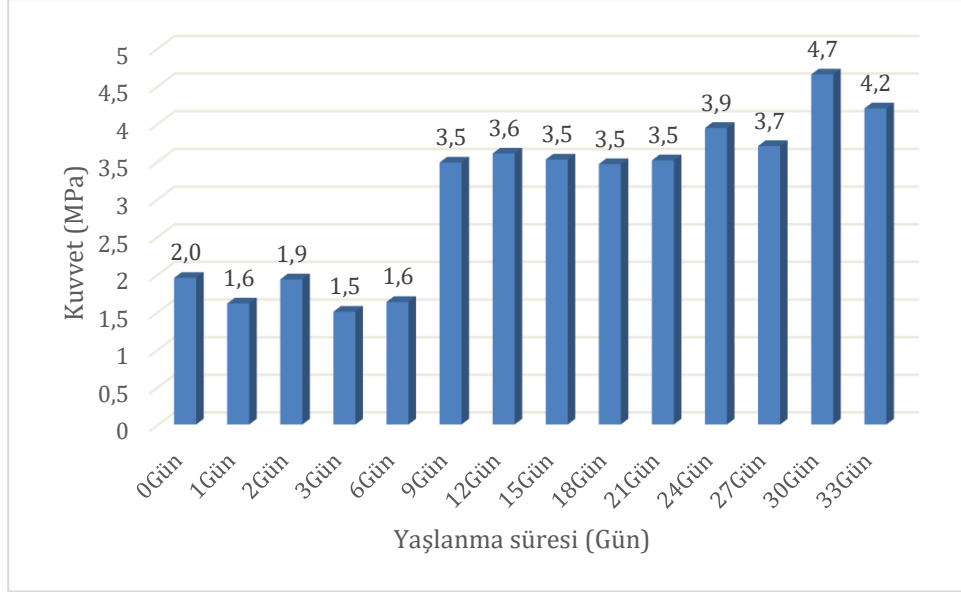
Şekil 4.23. 200 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



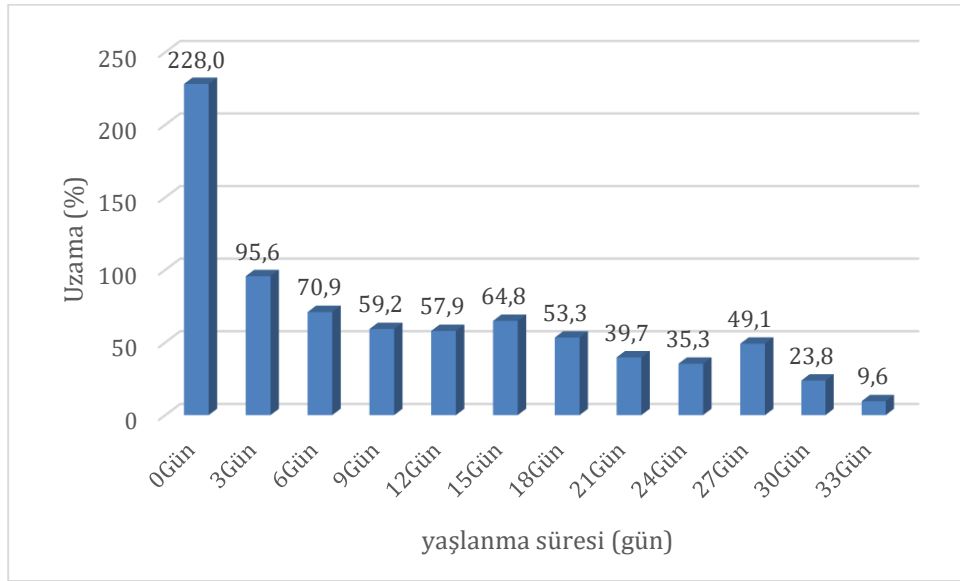
Şekil 4.24. 200 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



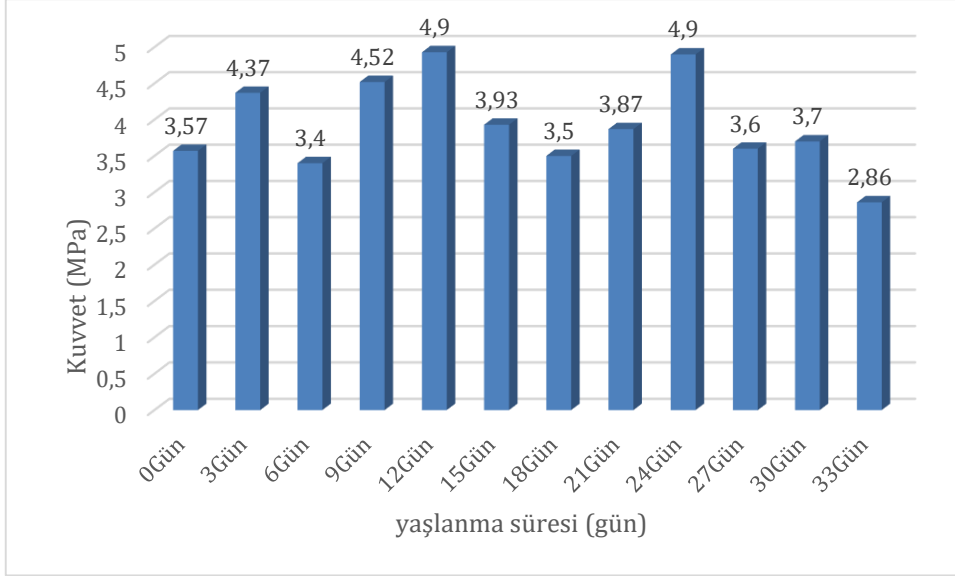
Şekil 4.25. 200 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



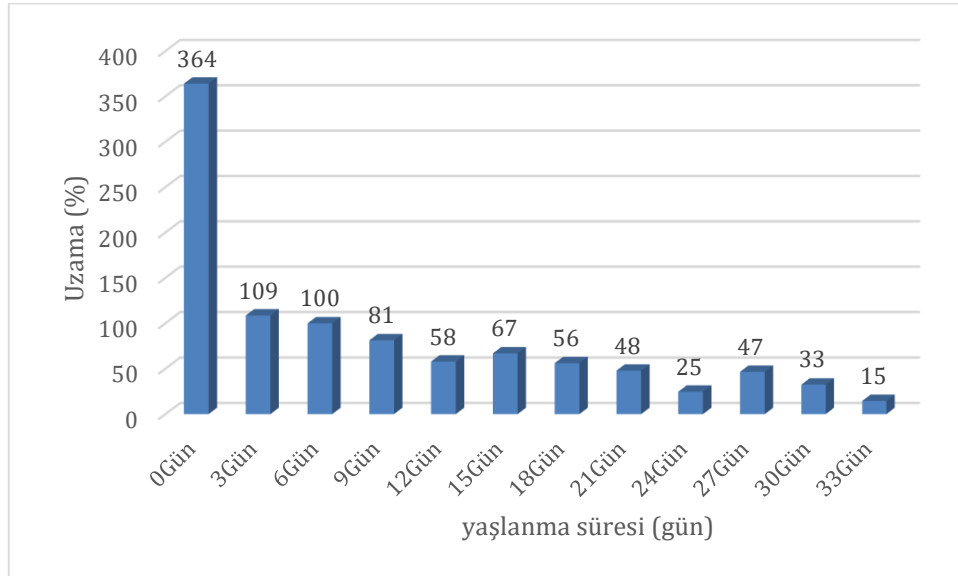
Şekil 4.26. 200 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



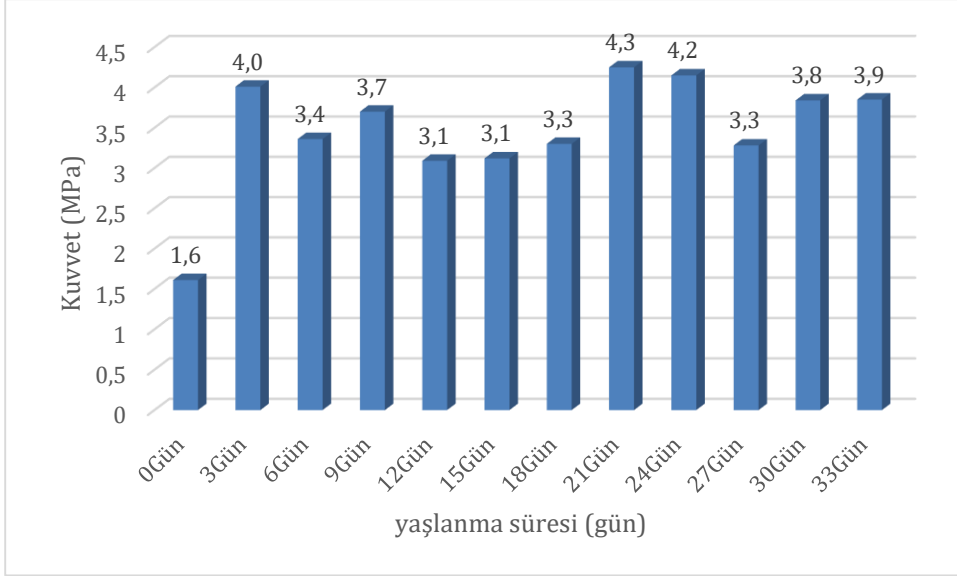
Şekil 4.27. 220 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



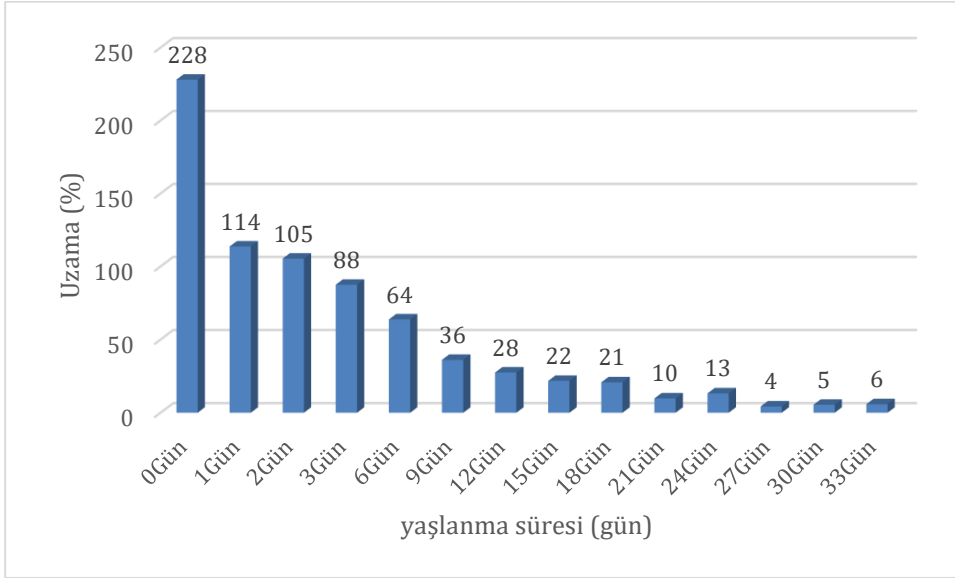
Şekil 4.28. 220 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



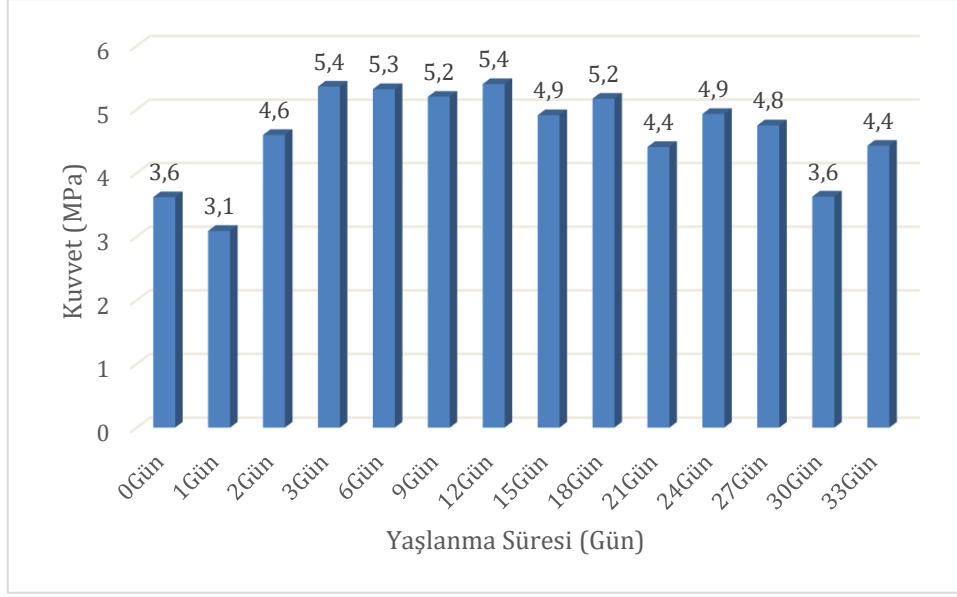
Şekil 4.29. 220 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



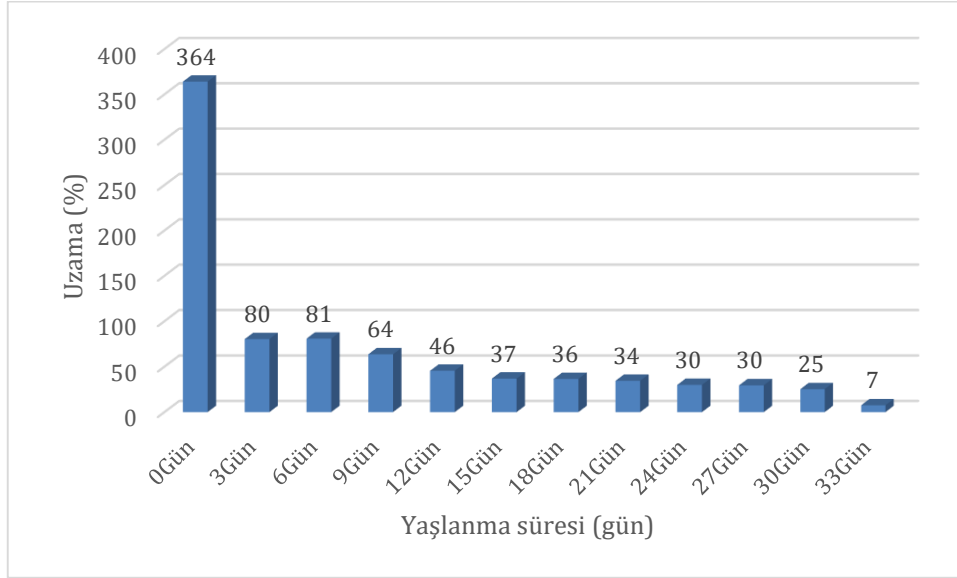
Şekil 4.30. 220 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



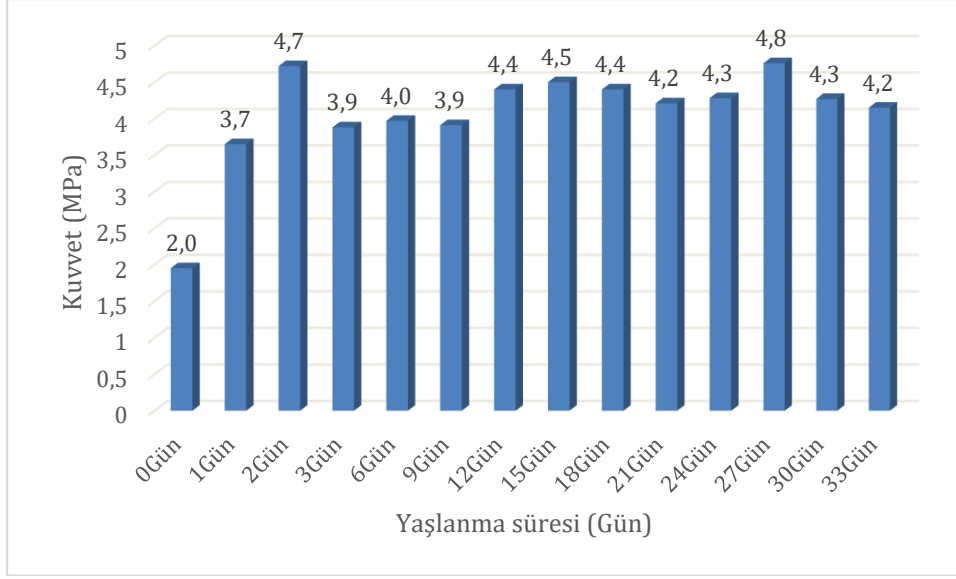
Şekil 4.31. 250 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



Şekil 4.32. 50 °C yaşlandırılmış MG8476G70 silikon elastomerinin kopmadaki kuvvet değerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



Şekil 4.33. 250 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin kopmadaki uzama değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.



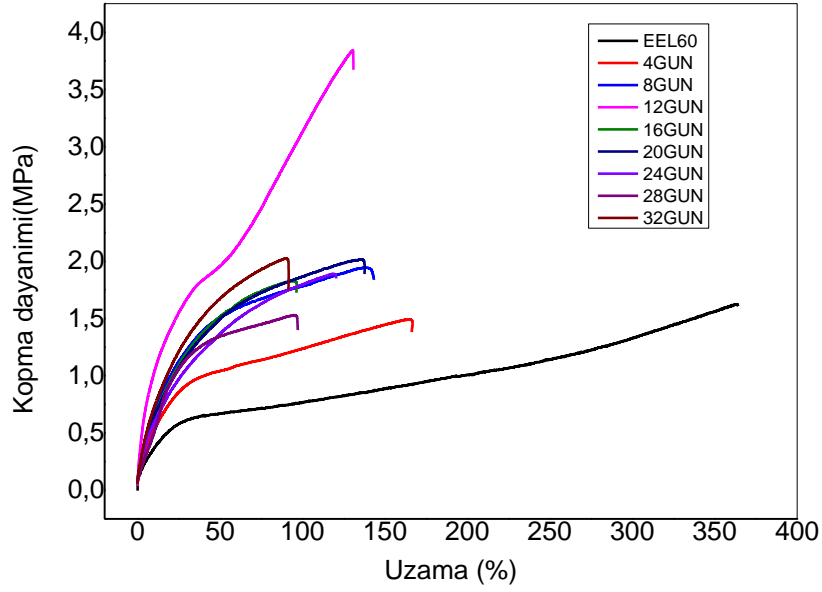
Şekil 4.34. 250 °C yaşlandırılmış EEL60 silikon elastomerinin ait 250 °C kopmadaki kuvvet değerlerinin yaşlanma süresi ile değişimi.

MG8476G70 ve EEL60 silikonlarının 180, 200, 220, 250 °C ‘de hızlandırılmış termal yaşlandırma sıcaklıklarındaki mekanik özellikleri incelendiğinde yaşlanma süresi ile birlikte kopmadaki uzama değeri sürekli olarak azalan bir eğilim göstermiş olup buna bağlı olarak kopmadaki kuvvet değeri artmıştır. Özellikle 250 °C ‘de mekanik özelliklerin diğer sıcaklıklara göre hızla azaldığı gözlemlenmiştir. Yaşlanma ile birlikte Silikon kauçukların yapısında bulunan dolgu malzemesinin sıcaklık artışı ile birlikte yapıda bulunması ve yaşlanma etkisi ile birlikte daha kırılğan hale gelmesini sağlamıştır. [16]. Aynı zamanda, silikon yapısında zincir kesilme ya da çapraz bağ reaksiyonu ile ilişkilendirilebilir. MG8476 ve EEL60 silikonları için termal yaşlandırma koşulları altında kopmadaki kuvvet değerinin artması ve uzama değerinin azalmasından ötürü yaşlandırmanın ana etkisinin çapraz bağlanma yönünde olduğu sonucuna varılmıştır.

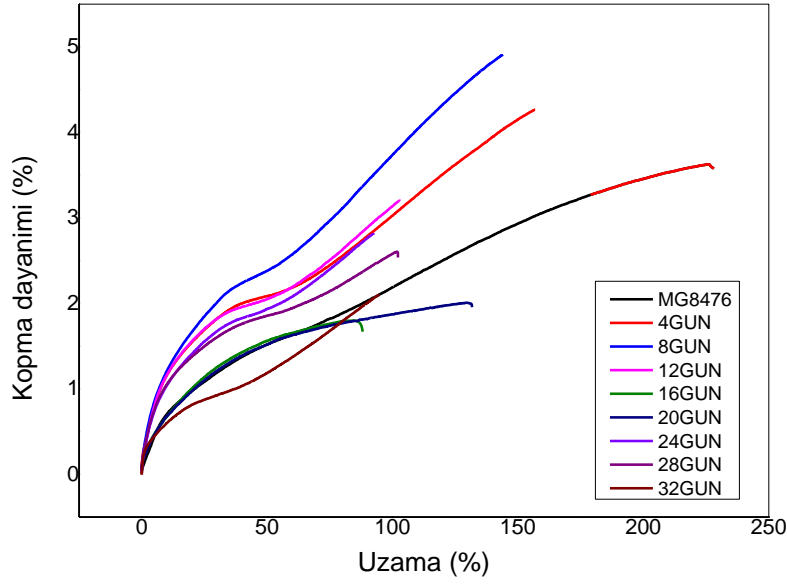
4.2.2. UV Yaşlandırmanın Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi

Dış mekan yalıtım uygulamalarında kullanılan silikon kauçukların UV ışınlarına karşı oldukça duyarlıdır. Fakat UV ışınları polimerin ağ yapısında birtakım hasarlara yol açtığı bilinmektedir. [2]. Kullanılan bazı dolgu malzemeleri Si-O bağını kırmak için gereken enerjiyi azaltarak katalizör görevi görür ve polimerlerin UV direncini arttırmaktadır.

İzolatör yapımında kullanılan silikon elastomerlerin açık hava şartlarına karşı gösterdiği direnci incelemek amacıyla ASTM G154 standartına göre Şekil 3.15’de verilen iklimlendirme test cihazı ile 32 gün süre ile yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. UV yaşlandırma sonrası silikon kauçuk test numuneleri evrensel mekanik test cihazı (Şekil 3.11) ile analiz edilmiştir. Analizlerin sonucu elde edilen örneklere ait gerinim-gerilim eğrileri Şekil 4.35-4.36’de verilmiştir.

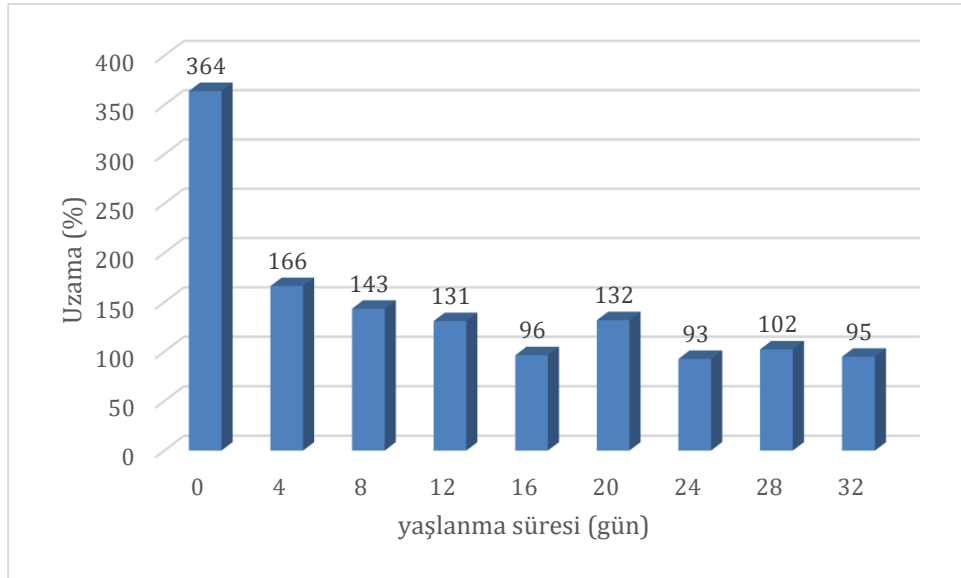


Şekil 4.35. EEL60 silikon kauçuğunun gerinim-gerilim eğrisinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi.

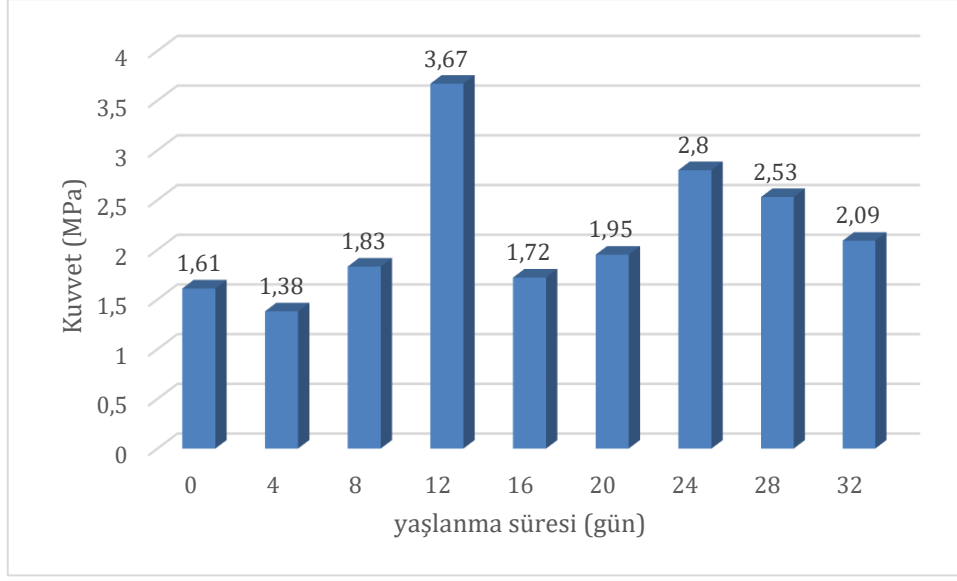


Şekil 4.36. MG8476G70 silikon kauçuğunun gerinim-gerilim eğrisinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi.

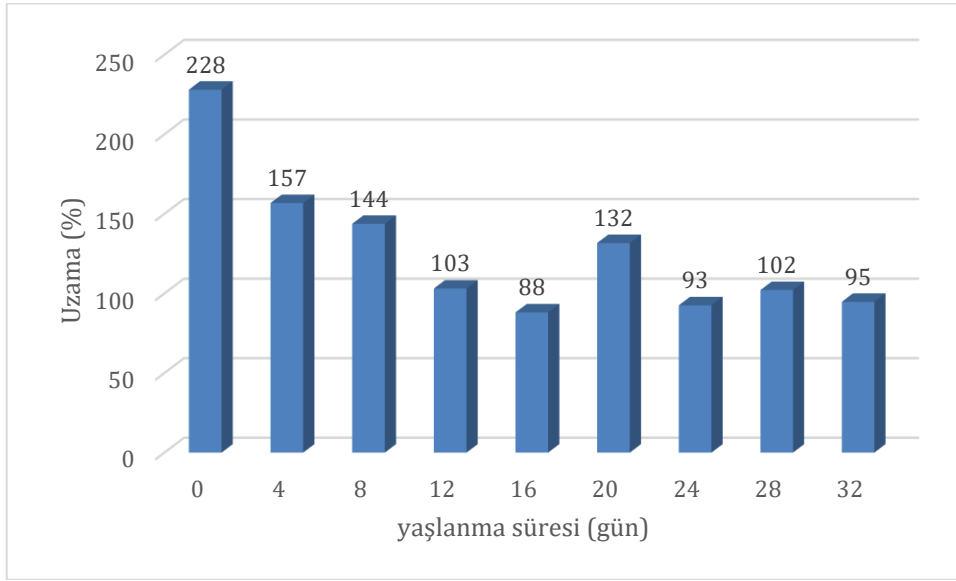
UV yaşlandırma sonrası elde edilen gerinim-gerilim eğrilerinin değerlendirilmesi ile kopmadaki uzama ve kopmadaki kuvvet değerleri karşılaştırılmaları olarak Şekil 4.37-4.40'de verilmiştir.



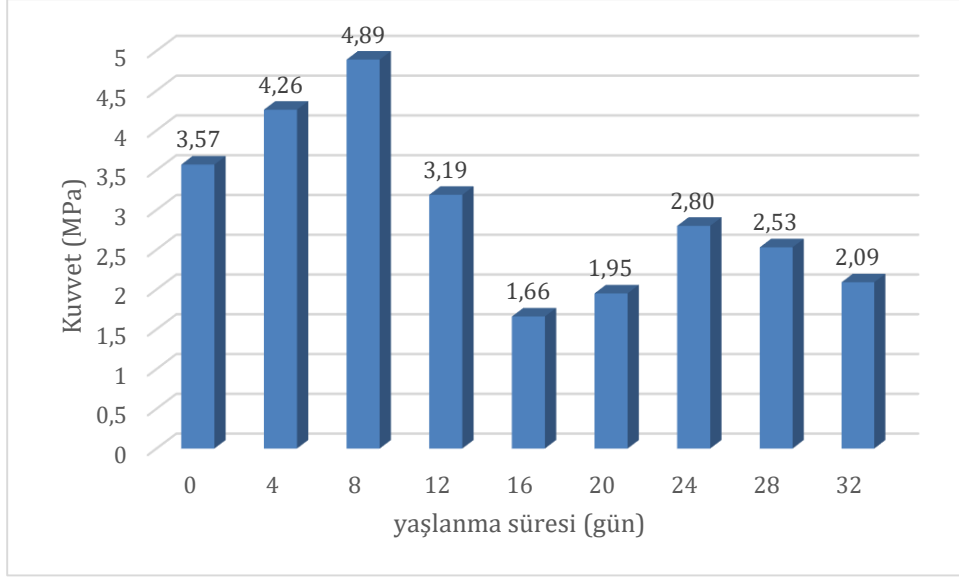
Şekil 4.37. EEL60 silikon kauçuğunun kopmadaki uzama değerinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi



Şekil 4.38. EEL60 silikon kauçuğunun kopmadaki kuvvet değerinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi.



Şekil 4.39. MG8476G70 silikon kauçuğunun kopmadaki uzama değerlerinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi.



Şekil 4.40. MG8476G70 silikon kauçuğunun kopmadaki kuvvet değerlerinin UV yaşlandırma süresi ile değişimi

UV ile yaşlanmış örneklerin mekanik özellikleri incelendiğinde, yaşlanma süresine bağlı olarak kopmadaki kuvvet değerlerinde EEL60 silikonunda 12. güne kadar artış daha sonra azalma gözlenmiştir. Aynı şekilde MG8476 silikonunda 8.güne kadar artış sonra azalma gözlenmiştir. Bu durum yaşlanma ile birlikte çapraz bağlanmanın gerçekleştiğini buna bağlı olarak zamanla malzemede meydana gelen bozunma reaksiyonu ile açıklanabilir. Uzama değerlerinde ise yaşlanma süresine bağlı olarak 32. gün sonunda MG8476 silikonunda kopmadaki uzama %58 oranında azalırken EEL60 silikonunda yaklaşık olarak %72 azalma gözlemlenmiştir. MG8476 ve EEL60 silikon elastomeri kendi içlerinde kıyaslama yapılacak olursa, EEL60 silikonunun ısı yaşlanma ve UV yaşlandırma koşullarından MG8476'ya kıyasla daha fazla etkilendiği görülmektedir. Kopma kuvvetindeki artış ve uzamadaki azalma termal yaşlandırma ve UV yaşlandırma sırasında çapraz bağlanma reaksiyonu ile açıklanabilir [14]. Yaşlanma süresine bağlı olarak mekanik özelliklerdeki azalma ise Arrhenius metodolojisinin varsayımına bağlı olarak sıcaklığa bağlı bir bozunma mekanizmasının kanıtı olarak yorumlanır.

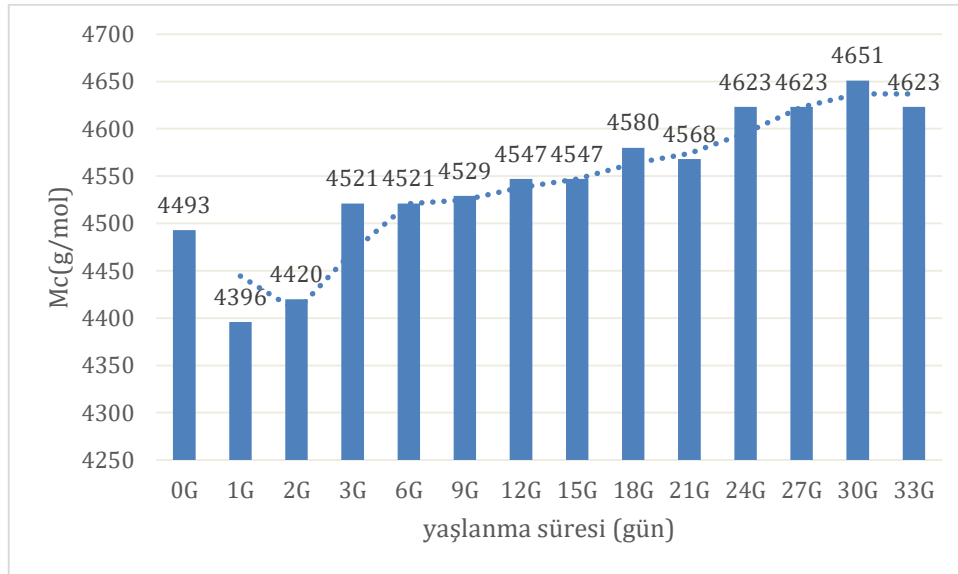
4.3. Silikon Elastomerlerin çapraz bağ yoğunluklarının hesaplanması

Çapraz bağ yoğunluğu polimerlerin karakteristik özelliklerini etkileyen oldukça önemli bir parametredir. Çapraz bağ yoğunluğunun bulunmasında şişme deneyleri, H^1 -NMR (Nuclear Magnetic Resonance), mekanik testler gibi birçok yöntem kullanılmaktadır [18].

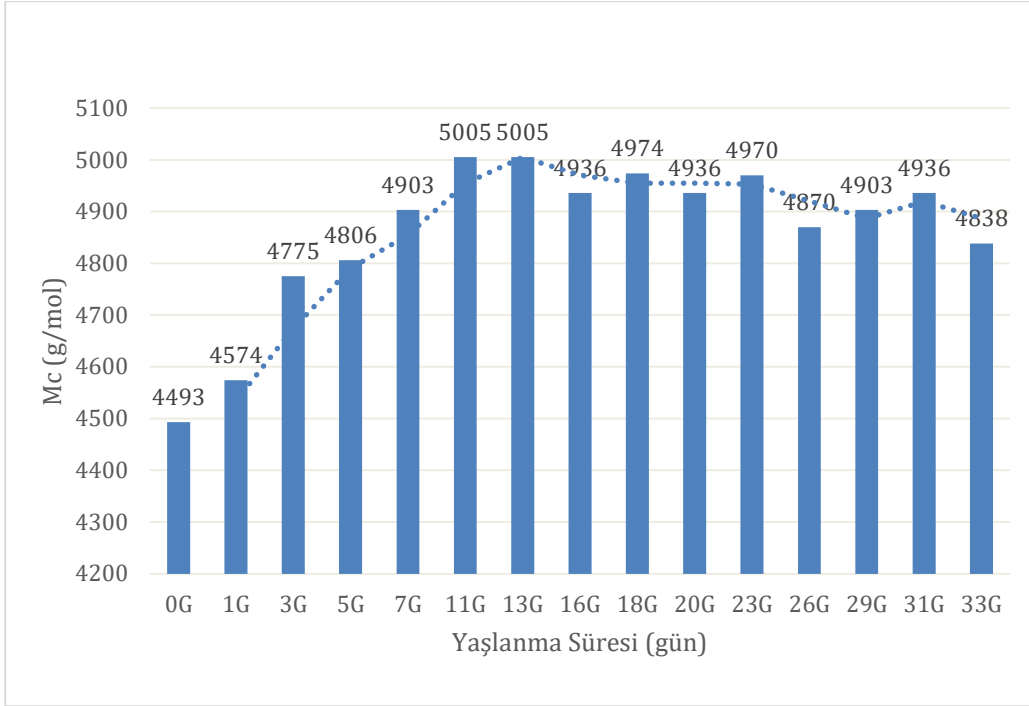
Kauçuk malzemelerin çapraz bağ yoğunluğunun bulunmasında ayrıca yaygın olarak şişme testi de kullanılmaktadır. Bu testin dezavantajı, analiz süresinin çok uzun olması, hataya açık ve polimer-çözücü etkileşim parametresinin bilinmesi gerektiği için zor bir tekniktir. Puls-NMR cihazı kauçuk malzemelerin çapraz bağ yoğunluğunun hesaplanmasında son yıllarda sık kullanılmaya başlanmış bir tekniktir [18]. Çapraz bağlı ve çapraz bağlanmamış kauçuktaki hidrojen atomlarının durulma süreleri farkından yararlanılarak çapraz bağ yoğunluğu hesaplanabilmektedir.

MG8476G70 ve EEL60 silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunluklarının hesaplanması amacı ile Puls-NMR cihazı kullanılmıştır. Termal ve UV yaşlandırma sonrası elde edilen numunelerin çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) ve çapraz bağ yoğunlukları (μ) Ek-1 'de verilmiştir.

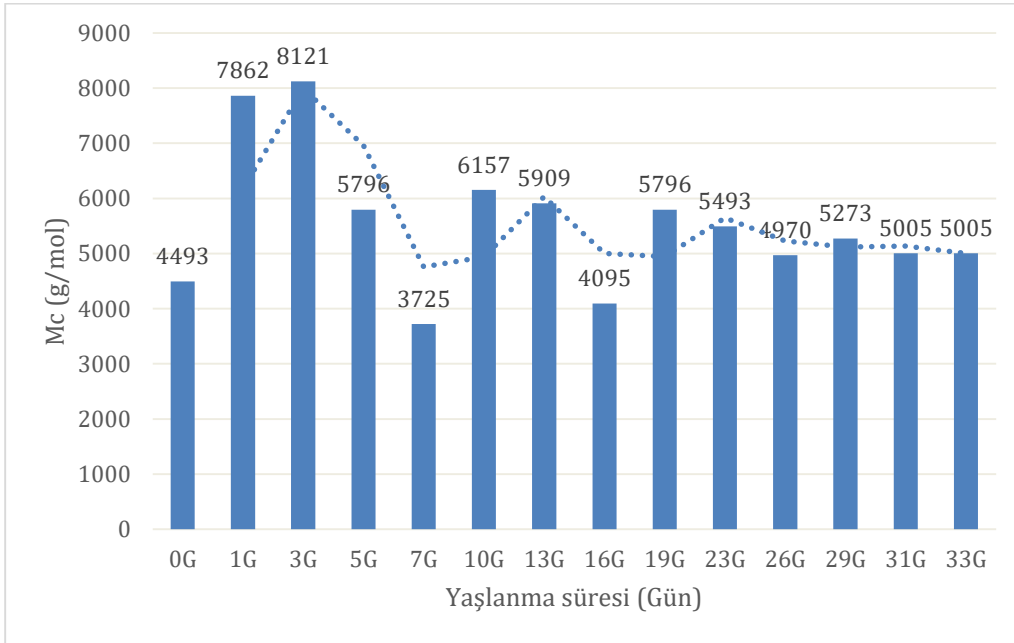
Yaşlandırma koşulları ve süresinin çapraz bağlar arası molekül ağırlığına etkisinin incelenmesi amacıyla yaşlanma süresine karşın çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) değerleri Şekil 4.41-4.48 'de verilmiştir.



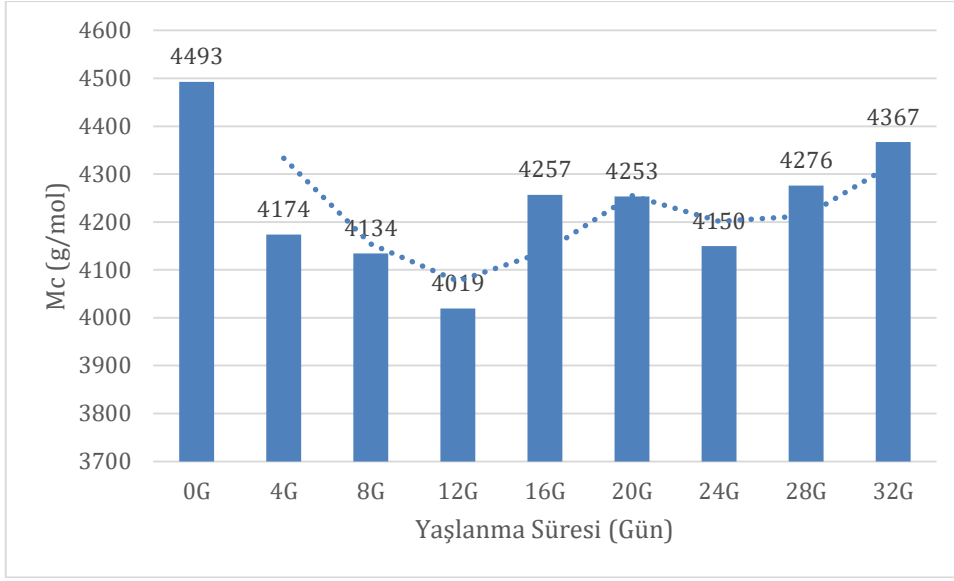
Şekil 4.41. 180°C ısıtılmış yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin çapraz bağlar arası molekül ağırlığının yaşlanma süresi ile değişimi.



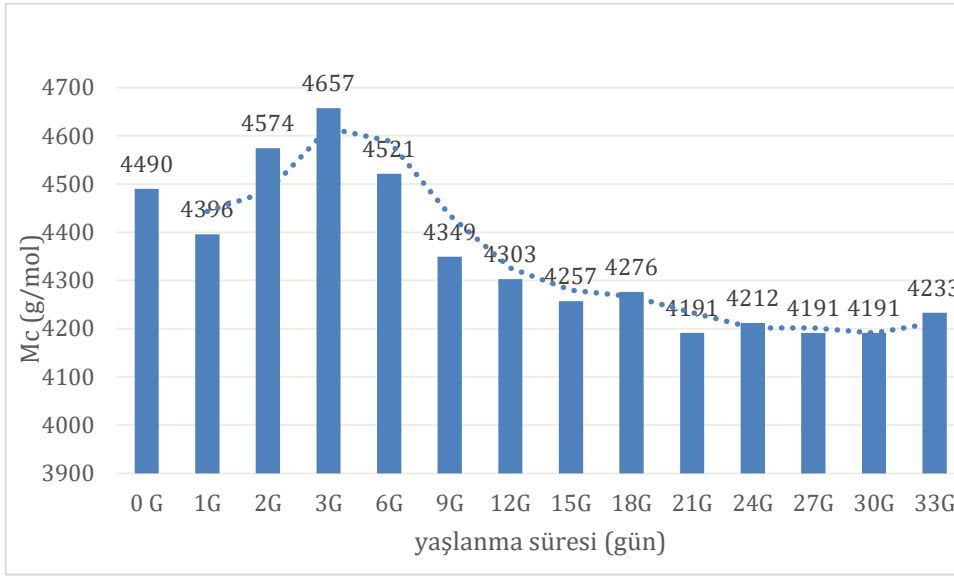
Şekil 4.42 200°C ısıtılmış ve yaşlandırılmış EEL60 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının yaşlanma süresi ile değişimi.



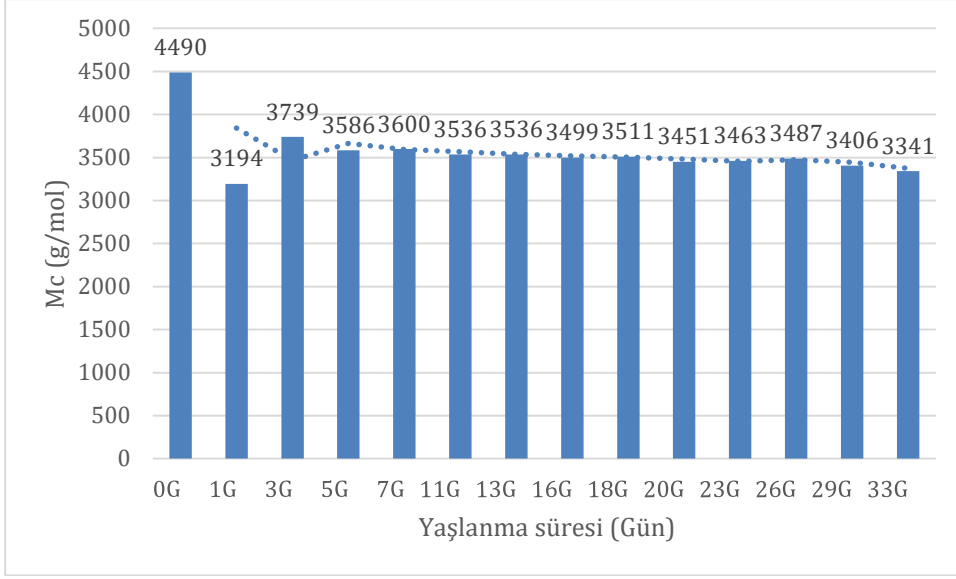
Şekil 4.43. 250°C ısıtılmış ve yaşlandırılmış EEL60 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının yaşlanma süresi ile değişimi



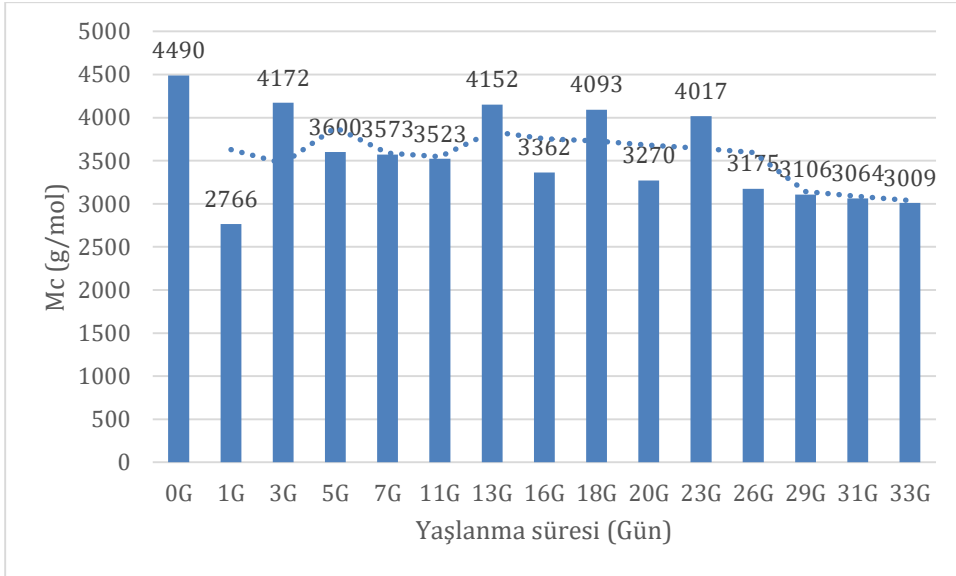
Şekil 4.44. EEL60 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının UV yaşlandırılma süresi ile değişimi.



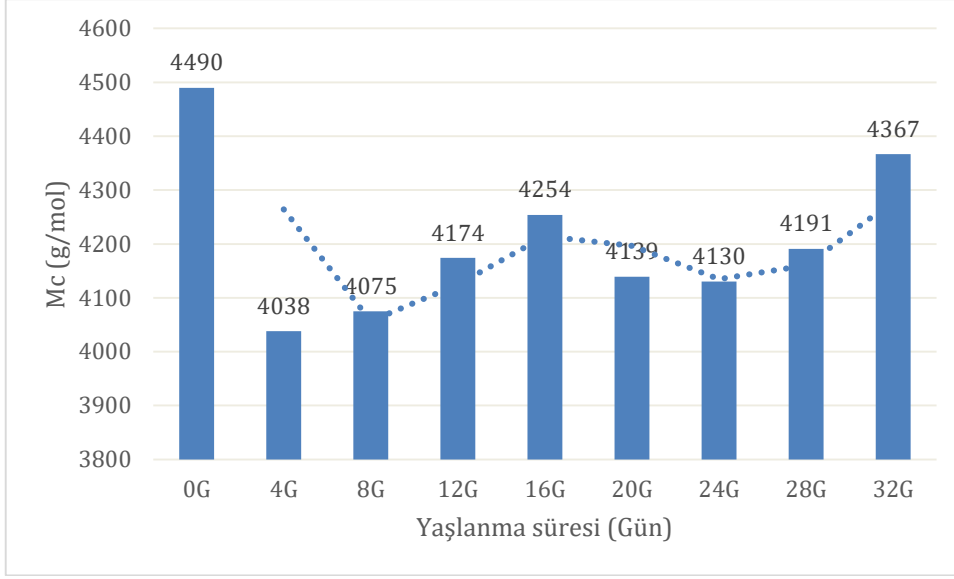
Şekil 4.45. 180°C ısı yaşlandırılmış MG8476 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığı yaşlanma süresi ile değişimi



Şekil 4.46. 200°C ısıtılmış yaşlandırılmış MG8476 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının yaşlanma süresi ile değişimi.



Şekil 4.47. 250°C ısıtılmış yaşlandırılmış MG8476 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının yaşlanma süresi ile değişimi.



Şekil 4.48. EEL60 silikonun çapraz bağlar arası molekül ağırlığının UV yaşlandırma süresi ile değişimi.

Isıl yaşlandırma ve UV yaşlandırma ile çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) değişimi incelendiğinde, EEL60 ve MG8476 silikonları için termal yaşlandırma sıcaklıkları göz önüne alındığında 180°C’de EEL60 silikonunda düzenli bir artış gözlenmektedir. Yine aynı sıcaklıkta MG8476 silikonuna bakıldığında önce artış daha sonra artan yaşlanma süresi ile birlikte azalış gözlenmektedir. EEL60 silikonunun yaşlanma süresi arttıkça Mc değerinin artması ile birlikte zincir kesilme reaksiyonunun devam ettiği düşünülmektedir. Bu durum EEL60 silikonunda mekanik özelliklerde azalmanın MG8476 silikonuna göre daha fazla olduğunun bir göstergesidir. Yine aynı şekilde 200°C’de EEL60 silikonunda yaşlanma süresi ile Mc değerlerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. MG8476 silikonun da, ise genel eğilim yaşlanma süresi ile Mc değerinin azalması yönündedir. 180°C’de başlangıçta bir miktar artmış ama sonradan azalmaya başlamıştır. 200°C’de başlangıçta azalmış ve daha sonra neredeyse sabit bir şekilde azalarak devam etmiştir. Bu durum MG8476’nun EEL60’a göre termal kararlılığının daha fazla olmasının bir göstergesidir. 250°C’de ise MG8476 silikonunda çapraz bağlanma reaksiyonları EEL60’a göre daha hızlı gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, sıcaklığın artmasıyla birlikte silikon mekanik özelliklerin daha hızlı değişmesine yol açmıştır. Çapraz bağlar arası molekül ağırlığındaki artış ile birlikte çapraz bağ yoğunluğunun azalması buna bağlı olarak mekanik özelliklerde azalma gözlenmiştir. Bu durum silikon izolatör kauçukların yapısına ilave edilen ATH miktarı ile ilişkilendirilebilir. Yaşlanmaya bağlı olarak silikon elastomerler için, belirli bir miktarda organik malzeme parçalanmıştır. Katı halde büyük miktarda

inorganik dolgu maddesi kalmıştır. Bu durum mekanik test sonuçları ile de ilişkilendirilmiştir.

4.4. İzolatör Silikon Kauçukların Ömür Süresinin Hesaplanması

4.4.1. Arhenius Modeli

Yaşlanma işlemlerinden elde edilen mekanik test ve çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) değişimi verilerini analiz etmenin en yaygın yöntemlerinden olan Arhenius yaklaşımına göre verilerin başlangıç değerinin %50'sine ulaşma süresi (eşik değeri) gibi malzemede meydana gelen başarısızlık süresini (Failure time) seçmeyi içermektedir.

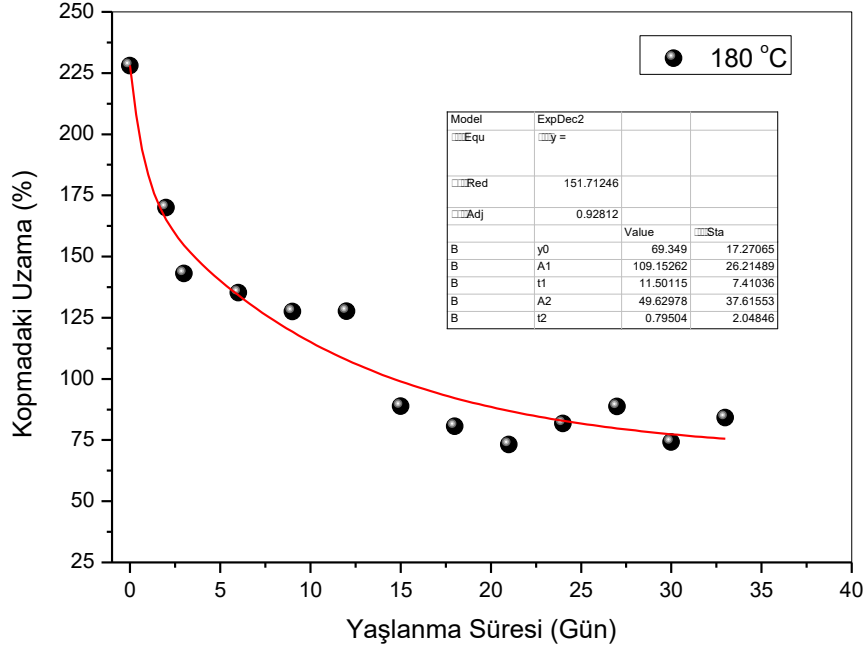
Arhenius yaklaşımına göre, malzemenin başarısızlık zamanının logaritmasına karşın yaşlanma sıcaklığının tersinin doğrusal olup olmadığı test edilir. Bu yöntemle göre her eğriden sadece tek bir nokta seçilmektedir. Bozulma eğrilerinden en az birini analiz etmeyi seçtiği noktadan bağımsız olarak zaman ve sıcaklık arasındaki aynı işlevsel ilişkinin devam edeceği (sonuçların %25, %50, %70 gibi değerlerde de aynı doğrusal eğimle devam edeceği) öngörülmektedir [15]. Zaman -sıcaklık arasındaki ilişkiyi tespit etmek için en iyi yaklaşım, zaman-sıcaklık süper-pozisyon kavramını içermektedir.

Bu çalışmada silikon izolatör olarak kullanılmak amacıyla hazırlanan elastomerlerin ömür süresinin tayin edilmesi için seçilen parametre elastomerin kopmadaki uzama değeridir. Bu özelliğin %25, %50 ve %70 oranında kaybedilmesi ömür süresinin belirlenmesi için seçilen eşik değerleridir. Her iki elastomerin bu sıcaklıklarda yaşlanması sonucunda elde edilen mekanik test eğrilerinden elde edilen % uzama değerleri zamana karşı çizilen eğrileri bir pik fit programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm eğrilerin aşağıda verilen 2. dereceden üstel sönümlenme (exponential decay) denklemi ile yüksek uyumla eğrilerin sönüm denklemleri belirlenmiştir. Bu denklem Eşitlik 4.1'de verilmiştir.

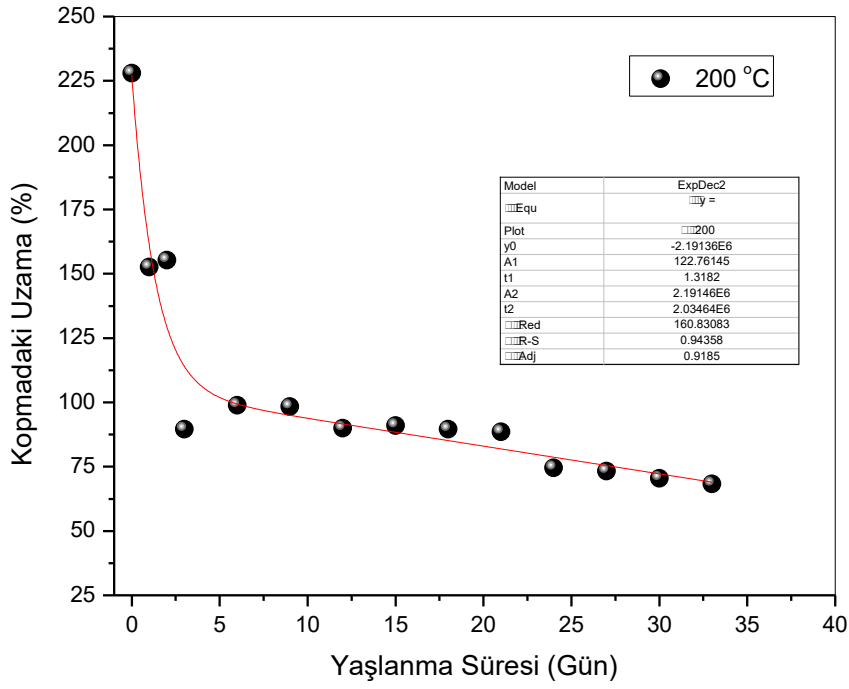
$$y = A_1 * \exp(-x/t_1) + A_2 * \exp(-x/t_2) + y_0 \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

Şekil 4.49-4.52 de MG8476 silikonunun kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin üstel sönümlenme denklemine fit edilmiş eğrileri verilmiştir. EEL60 silikonunun kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin üstel sönümlenme denklemine fit edilmiş eğrileri ise Şekil 4.53 – Şekil 4.56'de verilmiştir. Bu eğrilerin değerlendirilmesi sonucunda her bir sıcaklık için kopmadaki uzamanın belirlenen eşik değeri kadar düşmesi için elde edilen zaman değerlerinin

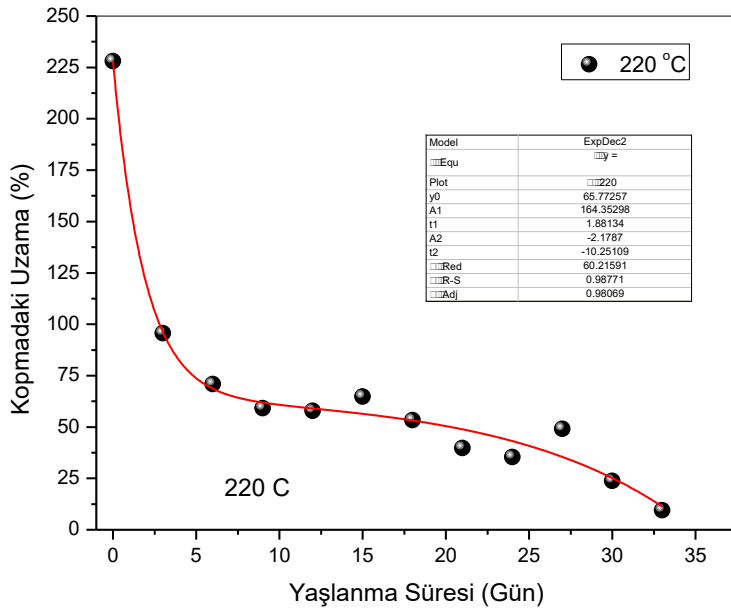
logaritması Arrhenius eşitliğine göre ($\ln k = A - \frac{E_a}{RT}$) $1/T$ değerlerine karşı grafiğe geçirilmiş ve bu eğrilerin 25 °C ye ekstrapole edilmesiyle oda sıcaklığında atmosferik koşullarda silikon elastomerin ömür değeri belirlenmiştir. MG8476 silikonu için $\ln t - 1/T$ grafiği Şekil 4.57 da EEL60 için Şekil 4. 58' de verilmiştir



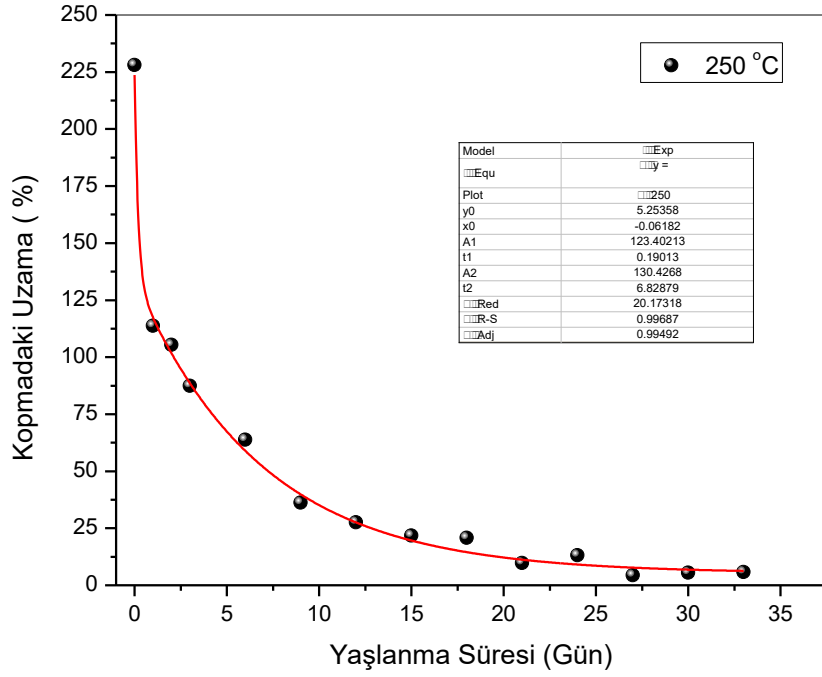
Şekil 4.49. 180 °C de yaşlandırılmış MG8476 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemini.



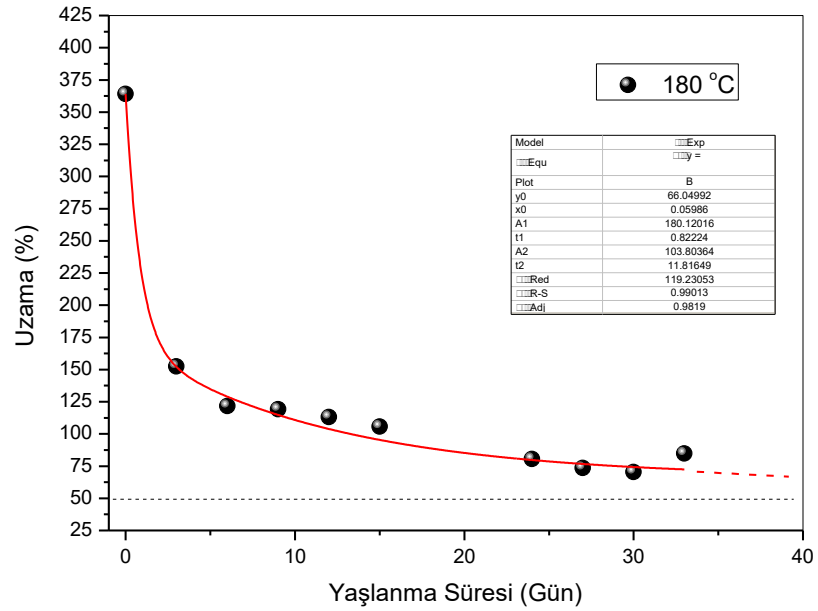
Şekil 4.50. 200°C de yaşlandırılmış MG8476 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi



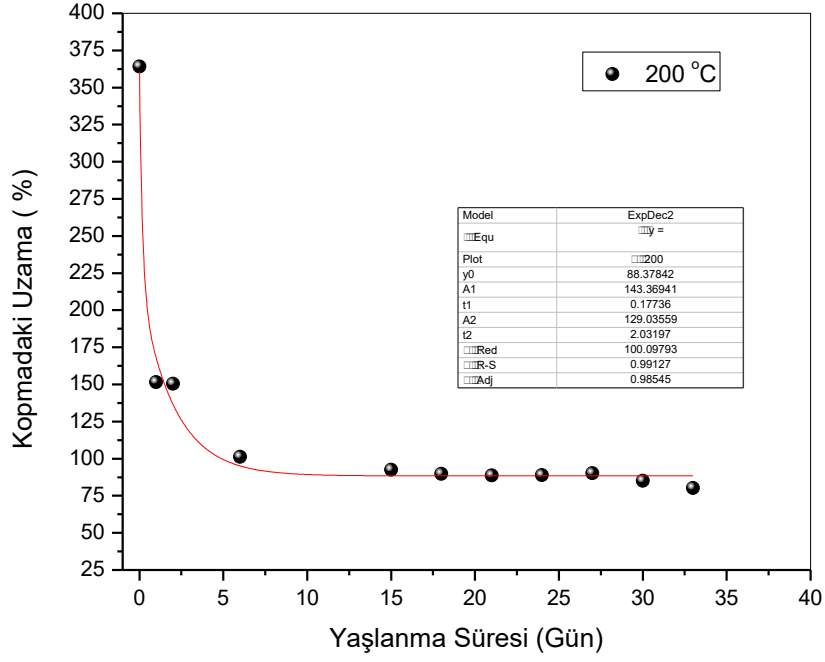
Şekil 4.51. 220 °C de yaşlandırılmış MG8476 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi



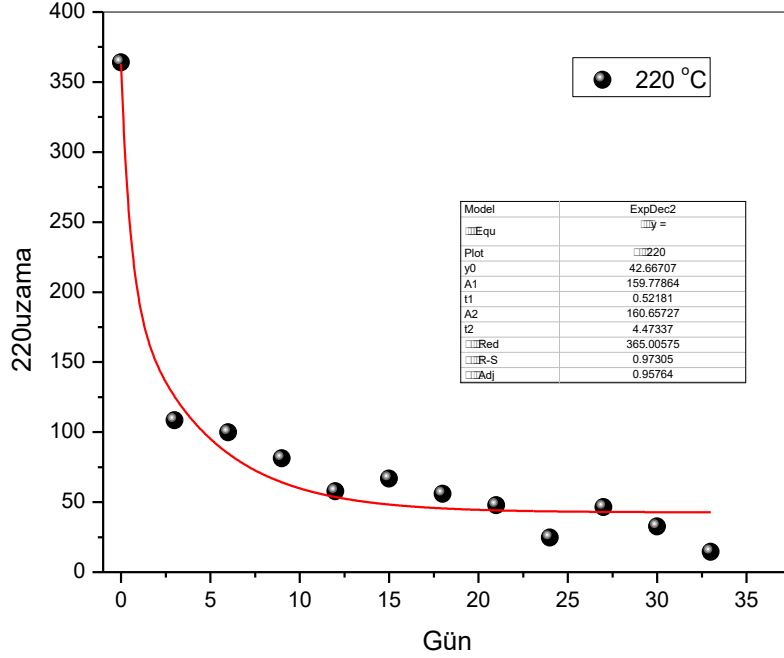
Şekil 4.52. 250 °C de yaşlandırılmış MG8476 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi



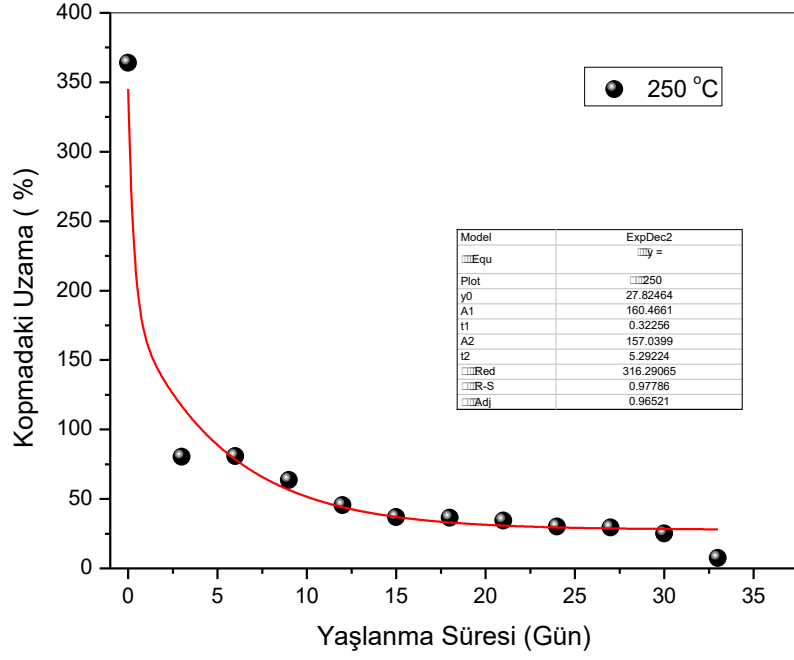
Şekil 4.53. 180 °C de yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.



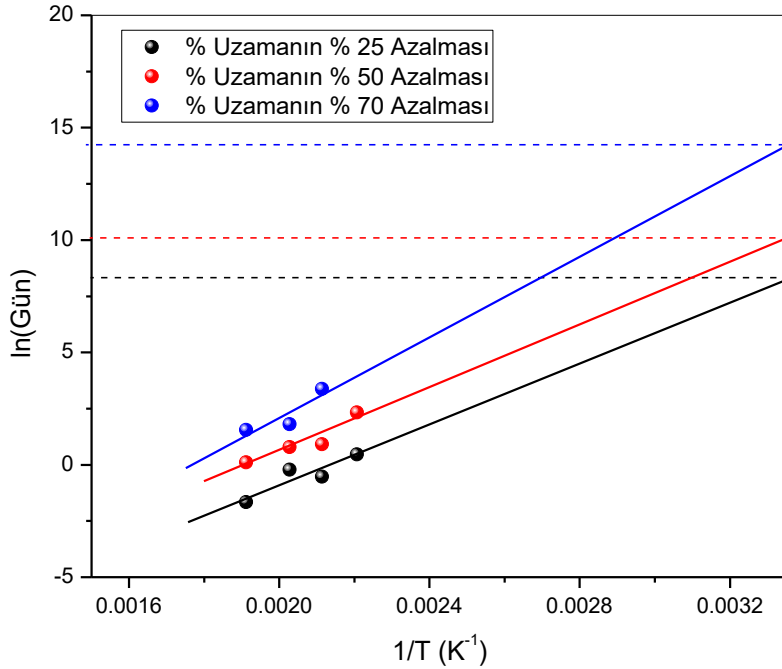
Şekil 4.54. 200 °C de yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.



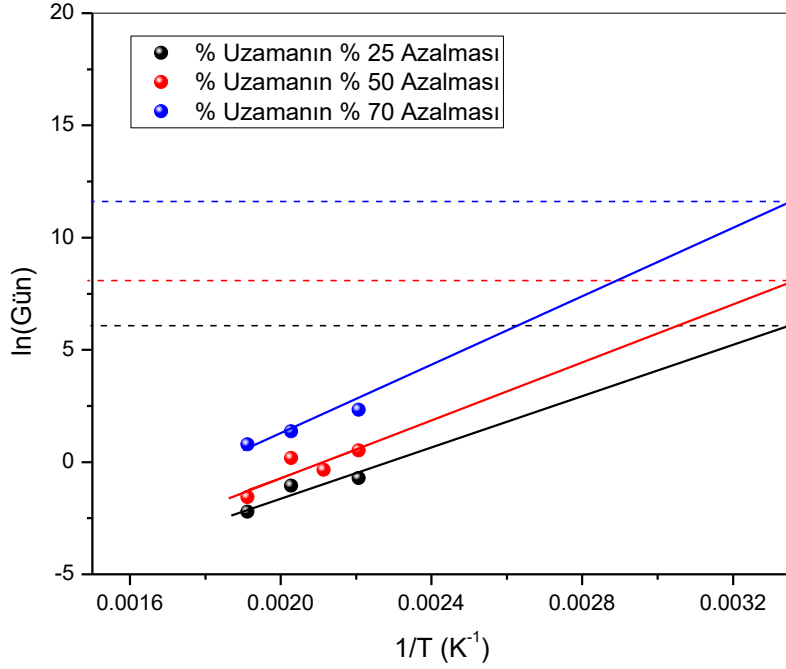
Şekil 4.55. 220°C de yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.



Şekil 4.56. 250 °C de yaşlandırılmış EEL60 elastomerinin kopmadaki uzamasının yaşlandırma süresi ile değişimi ve bu değişimin eğri denklemi.



Şekil 4.57. MG8476G70 silikonu için kopmadaki uzamanın %25, %50 ve %70 oranında azalması için gerekli sürelerin 1/T karşı çizilen Arrhenius eğrileri.



Şekil 4.58. EEL60 silikonu için kopmadaki uzamanın %25, %50 ve %70 oranında azalması için gerekli sürelerin 1/T karşı çizilen Arrhenius eğrileri.

Eğrilerin değerlendirilmesi sonucunda silikon elastomerlerin mekanik özelliklerinin oda sıcaklığında %25, %50 ve %70 oranında kaybedilmesi için gereken zamanlar **Çizelge 4.3**'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Silikon Elastomerlerin Arrhenius yaklaşımı kullanılarak hesaplanan ömür değerleri

Silikon Tipi	Kopmadaki Uzamanın %25 kaybedilmesi için Geçen Zaman (YIL)	Kopmadaki Uzamanın %50 kaybedilmesi için Geçen Zaman (YIL)	Kopmadaki Uzamanın %70 kaybedilmesi için Geçen Zaman (YIL)
MG8476	2	30	2000
EEL60	0,4	5	11

Çizelge 4.3 de elde edilen ömür süreleri bu çalışmada geliştirilen reçeteye göre MG8476 silikon elastomerinin daha yüksek ısıl dayanım ömrüne sahip olduğunu göstermiştir. MG8476'dan hazırlanan silikonun mekanik özelliklerinin oda sıcaklığında %25 oranında kaybedilmesi için 2 yıl %50 oranında kaybedilmesi için de 30 yıl geçmesi gerekmektedir. Eğer bu silikonun mekanik özelliklerinin %70 oranında kaybedilmesi içinde yaklaşık

2000 yıl beklemek gerekmektedir. Bu sonuçlar silikon izolatörün uygun reçeteye göre hazırlandığında ömür süresinin birçok polimerden çok daha uzun olabileceğini göstermiştir. EEL60 silikonu için elde edilen ömür değerleri bir silikon elastomerden beklenen ömür sürelerinin oldukça altında çıkmıştır. Çalışmada geliştirilen reçeteye göre hazırlanan EEL60 silikon elastomerinin mekanik özelliklerinin oda sıcaklığında 4 ay sonunda %25 oranında 5 yıl sonunda da %50 oranında kayba uğrayacağı bulunmuştur. Bu silikonun mekanik özellikleri 11 yıl sonunda %70 oranında kaybedilme olasılığı bulunmaktadır. Bunun sebebinin ya kullanılan silikonun termal kararlılığının düşük olmasından ya da temin edilen silikon kauçuğun formülasyonun yeterli olmamasından kaynaklanabilir. Bu silikon ile bir izolatör hazırlanacak olursa malzemenin ısı kararlılığının artırılması için formülasyona ısı kararlı kılıcı bazı yardımcı kimyasalların eklenmesi kaçınılmazdır.

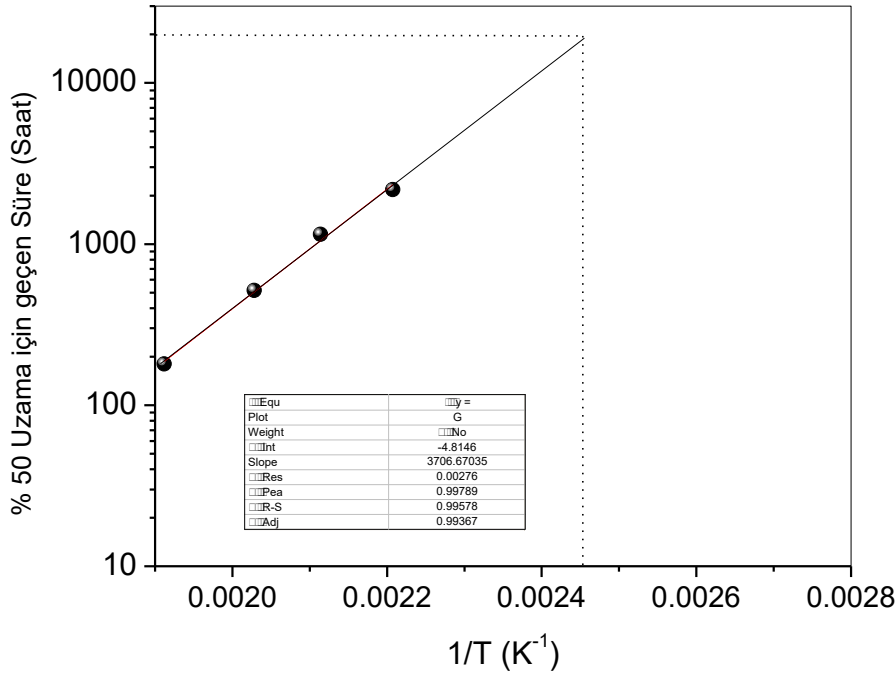
4.4.2. Silikon Elastomerlerin Isıl Kararlılığının Bulunması ve Sıcaklık İndisi Değerinin Tayini

Elastomer veya Termoplastik elastomer esaslı Alçak Gerilim – Yüksek Gerilim (AG-YG) İzolasyon malzemelerinin ısı kararlılığının bulunması ve Sıcaklık İndisi değerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bir başka yöntem TS EN 60216-6 standartında tanımlanmış olan 20000 saat sonunda uzamasının %50 oranına düşmesi için en düşük sıcaklığın kaç derece olduğunun belirlenmesiyle ömür tayini çalışmasıdır. Bu yöntem ülkemizde en büyük izolatör tedarikçisi olan TEİAŞ ve TEDAŞ tarafından da kabul edilmiş bir test prosedürüdür. TEİAŞ ve TEDAŞ 'ın istemlerinde göre bir AG-YG silikon izolatörünün bu test 'de göre RTI değerinin en az 105 °C olması gerekmektedir.

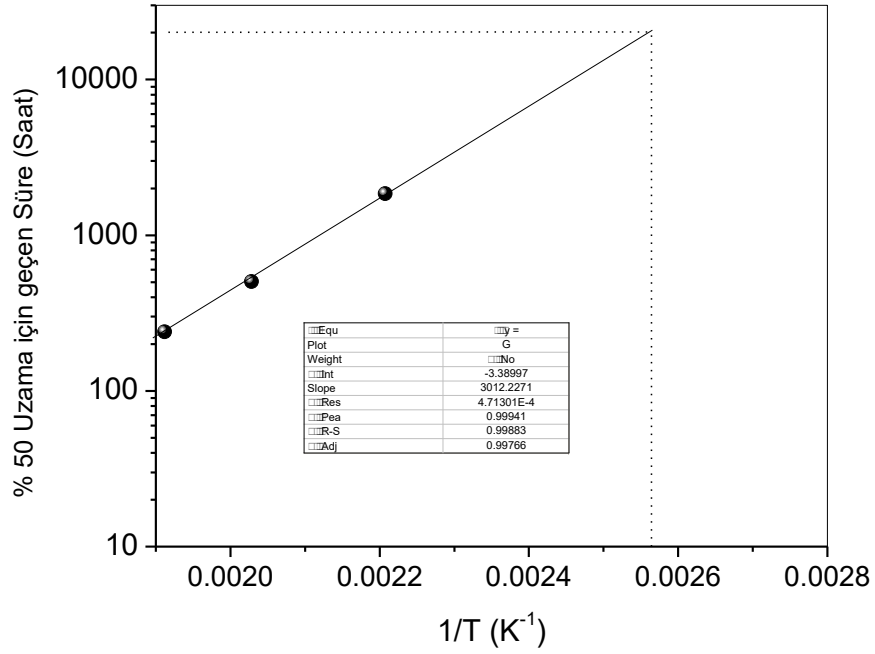
Hazırlanan silikon karışımlarının Bağıl Sıcaklık İndeksi (Relative Temperature Index, RTI) değerinin belirlenmesi amacıyla yaşlandırma çalışmaları sonucunda elde edilen kopmadaki uzama değerleri tekrar değerlendirilmiş ve doğrusal olmayan eğri uydurumu yapılmış yaşlanma eğrilerinden (**Şekil 4.46-4.53**) % uzama değerinin % 50 'ye düşmesi için gerekli zaman değeri tespit edilmiştir. Bu çalışmada örneklerin yaşlandırılması en fazla 33 gün boyunca takip edilmiştir. Özellikle 180 °C ve 200 °C de yapılan yaşlandırmalarda 33 günün sonunda kopmadaki % uzama değeri %50 uzama değerine düşmediği için % uzamanın zamanla değişimini gösteren yukarıda açıklanan üstel sönüm eğrisi kullanılmıştır.

Yapılan eğri analizleri sonucunda MG8476'dan hazırlanan silikon izolatörün 180 °C de yaşlandırılması durumunda kopmadaki uzamanın %50 değerine düşmesi için geçecek süre 2178 saat (90,76 gün) olduğu bulunmuştur. 200 °C de yaşlandırma durumunda bu süre 1149,6 saat (47,9 gün) 220 °C de yaşlandırmada 516 saat (21,5 gün) ve 250 °C de yaşlandırıldığında da 180 saat (7,5 gün) 'e düşmüştür.

1/T değerlerine karşılık uzamanın %50 uzama değerine düşmesi için geçen zamanın grafikten ilgili standart tanımlandığı gibi 20000 saatlik bir yaşlanma süresi için sıcaklık değerinin ne olması gerektiği belirlenmiştir. MG 8476G70 için 1/T- Zaman grafiği **Şekil 4.56** da EEL60 için **Şekil 4.57**'de verilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda MG 8476G70 dan hazırlanan silikon elastomerinin RTI değerinin, 133,6 °C, EEL60'den hazırlanan silikon elastomerin ise 118,6 °C olduğu bulunmuştur. Elde edilen değerler TEİAŞ tarafından AG-YG silikon izolatörler için belirlenen 105 °C sıcaklık isteminin üzerinde bir değerdedir.



Şekil 4.59. MG8476G70 elastomeri için 1/T ile uzamanın %50 değerine düşmesi için geçen sürenin değişimi.



Şekil 4.60. EEL60 elastomeri için $1/T$ ile uzamanın %50 değerine düşmesi için geçen sürenin değişimi.

Bu sonuçlar MG8476 ve EEL60 kodlu VMQ silikonlar kullanılarak bu tez kapsamında geliştirilen reçeteye göre hazırlanan elastomerlerinin bir silikon izolatörden beklenen istemleri karşıladığı tespit edilmiştir. MG8476 için daha yüksek bir Sıcaklık İndisi sıcaklığının elde edilmesi Arrhenius yaklaşımında da görüldüğü gibi bu silikon elastomerinin ısı bozunmaya karşı daha kararlı bir ağ yapısına sahip olmasının bir sonucudur.

5. TOPLU SONUÇLAR

- MG 8476G70 ve EEL60 silikon olarak isimlendirilen 2 farklı silikonun karakterizasyonu yapılmış silikonların vinil metil silikon olduğu ve içerisinde Alüminyum trihidroksit'in dolgu olarak kullanıldığı tespit edilmiştir.
- MG 8476G70 ve EEL 60 silikon olarak isimlendirilen 2 farklı silikon kauçuk kullanılarak tez kapsamında geliştirilen reçete kullanılarak silikon izolatör olarak kullanılabilecek elastomer sistemleri hazırlanmıştır.
- Silikonların pişme koşulları MDR reometresi ile tayin edilmiştir.
- Silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunluğunun puls-NMR tekniği ile hesaplanabileceği gösterilmiştir.
- Silikon elastomerlerin yaşlandırma çalışmaları ısı ve UV yaşlandırması ile yapılmış ve mekanik özelliklerinin değişimi Evrensel test cihazı, çapraz bağ yoğunluğunun değişimi ise puls-NMR ile tayin edilmiştir.
- 180, 200, 220 ve 250 °C de yapılan ısı yaşlandırma çalışmaları sonunda silikon elastomerlerin mekanik özelliklerinin hızlı bir değişim gösterdiği görülmüştür. Yaşlandırma ile tüm sıcaklıklarda uzama değeri hızla azalmış kopma dayanımı ve elastik modül değeri hızla azalmıştır.
- Örneklerin çapraz bağ yoğunluğunda artması yaşlandırmanın silikon elastomerler üzerindeki ana etkisinin çapraz bağlanma olduğu sonucuna varılmıştır.
- Elastomerlerin ömür süreleri Arrhenius, Bağıl Sıcaklık İndisi (RTI) modelleri kullanılarak tayin edilmiştir.
- Arrhenius yaklaşımına göre MG8476G70'dan hazırlanan silikonun mekanik özelliklerinin oda sıcaklığında %25 oranında kaybedilmesi için 1,9 yıl % 50 oranında kaybedilmesi için de 30,2 yıl geçmesi gerekmektedir. Eğer bu silikonun mekanik özelliklerinin %70 oranında kaybedilmesine izin verilirse yaklaşık 2 asır beklemek gerekmektedir.
- Bu sonuçlar silikon izolatörün uygun reçeteye göre hazırlandığında ömür süresinin birçok polimerden çok daha uzun olabileceğini göstermiştir.
- Elde edilen yaşlandırma test sonuçlarına göre yapılan Arrhenius ve RTI ömür süresi modellerine göre EEL 60 silikonu için elde edilen ömür değerleri bir silikon elastomerden beklenen ömür sürelerinin oldukça altında çıkmıştır. Çalışmada geliştirilen reçeteye göre hazırlanan EEL 60 silikon elastomerinin mekanik

özelliklerinin oda sıcaklığında 4 ay sonunda %25 oranında 5,3 yıl sonunda da % 50 oranında kaybedeceği bulunmuştur. Bu silikonun mekanik özellikleri 11,3 yıl sonunda %70 oranında kaybedilme olasılığı olduğu görülmüştür.

- Yapılan değerlendirme sonucunda MG 8476G70 dan hazırlanan silikon elastomerinin RTI değerinin, 133,6 °C, EEL 60 hazırlanan silikon izolatörün ise 118,6 °C olduğu bulunmuştur. Elde edilen değerler TEİAŞ tarafından AG-YG silikon izolatörler için belirlenen 105 °C sıcaklık isteminin üzerinde bir değerdedir.
- Sıcaklık İndisi değerleri bu proje kapsamında geliştirilen reçetelere göre hazırlanan silikon elastomerlerinin bir silikon izolatörden beklenen istemleri karşılayacağı tespit edilmiştir. MG 8476G70 için daha yüksek bir sıcaklık indisi sıcaklığının elde edilmesi Arrhenius yaklaşımında da görüldüğü gibi bu silikon elastomerinin ısı bozunmaya karşı daha kararlı bir ağ yapısına sahip olmasının bir sonucudur.
- Tez çalışması kapsamında kullanılan silikon izolatör kauçuklar için yaşlandırma mekanik test sonuçları, çapraz bağ yoğunlukları gibi değerler göz önüne alındığında MG 8476G70 silikon kauçuğunun EEL60 silikon kauçuğuna göre daha iyi dayanım gösterdiği görülmüştür. Fakat uygun reçete ve formülasyon çalışmaları ile her iki silikon kauçuğun termal kararlılıklarının artırılması sağlanabilir.
- Literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında, izolatör silikon kauçukların yüzey hidrofobiklik kaybının çevresel faktör,ısı ve UV ile olduğu görülmüştür. Tez çalışması kapsamında bu ortam koşulları simüle edilmiştir. Silikon kauçukların bozunma mekanizmasının mevcut çevresel koşullara bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bozunma ürünleri ise silika benzeri bozunma ürünleri ve düşük molekül ağırlıklı bozunma ürünlerinden meydana geldiği termogravimetrik analizler ile doğrulanmıştır. Silikon ana zincirindeki bozunmaya bağlı olarak yapıda kalan inorganik dolgu mazlemelerinin varlığı mekanik test sonuçlarındaki kopma kuvvetindeki artış ve kopma uzamasındaki azalma ile de doğrulanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] İ. Teknolojileri, V. E. Porselen, İ.İle, E.-B. E. E. A. Ş, “ELEKTRİK ŞEBEKELERİNDE YENİ NESİL SİLİKON KOMPOZİT İZOLATÖR,” pp. 1–19.
- [2] S. Simmons, M. Shah, J. Mackevich, and R. J. Chang, “Polymer outdoor insulating materials part III-silicone elastomer considerations,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 13, no. 5, pp. 25–32, 1997.
- [3] S. Kashi *et al.*, “Mechanical, Thermal, and Morphological Behavior of Silicone Rubber during Accelerated Aging,” *Polym. - Plast. Technol. Eng.*, vol. 57, no. 16, pp. 1687–1696, 2018.
- [4] R. M. Malczewski, D. A. Jahn, and W. J. Schoenherr, “Peroxide or Platinum? Cure System Considerations for Silicone Tubing Applications,” *Dow Corning*, p. 5, 2003.
- [5] D. Feng, J. Hao, R. Liao, X. Chen, L. Cheng, and M. Liu, “Comparative study on the thermal-aging characteristics of cellulose insulation polymer immersed in new three-element mixed oil and mineral oil,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2019.
- [6] R. S. Gorur, G. G. Karady, A. Jagota, M. Shah and A. M. Yates, "Aging in silicone rubber used for outdoor insulation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 525-538, April 1992.
- [7] D. Feng, J. Hao, R. Liao, X. Chen, L. Cheng, and M. Liu, “Comparative study on the thermal-aging characteristics of cellulose insulation polymer immersed in new three-element mixed oil and mineral oil,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2019.
- [8] Mitra A, Choudhary S, Garg H, Jagadeesh HG. Maxillofacial prosthetic materials an inclination towards silicones. *J Clin Diagn Res* 2014;8:8-13
- [9] E. M. Hoang and D. Lowe, “Lifetime prediction of a blue PE100 water pipe,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 8, pp. 1496–1503, 2008.
- [10] S. Simmons, M. Shah, J. Mackevich, and R. J. Chang, “Polymer outdoor insulating materials part III-silicone elastomer considerations,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 13, no. 5, pp. 25–32, 1997.
- [11] “BSI Standards Publication Rubber , vulcanized or thermoplastic — Estimation of life-time and maximum temperature of use,” 2014.

- [12] M. Le Huy and G. Evrard, “and WLF models a,” vol. 262, no. 4624, pp. 135–142, 1998.
- [13] M. K. Moghadam, J. Morshedian, M. Ehsani, M. Bahrami, and H. Saddadi, “Lifetime prediction of HV silicone rubber insulators based on mechanical tests after thermal ageing,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, pp. 711–716, 2013.
- [14] C. Rusu-Zagar, P. V. Notingher, S. Busoi, M. Lungulescu, and G. Rusu-Zagar, “Rapid estimation of lifetime and residual lifetime for silicone rubber cable insulation,” *UPB Sci. Bull. Ser. C Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 79, no. 1, pp. 181–196, 2017.
- [15] K. T. Gillen and R. L. Clough, “ELASTOMER- SERVICE LIFE PREDICTION SYMPOSIUM '97 - University of Akron, Akron, Ohio,” 1997.
- [16] J. Wise, K. T. Gillen, and R. L. Clough, “An ultrasensitive technique for testing the Arrhenius extrapolation assumption for thermally aged elastomers,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 49, no. 3, pp. 403–418, 1995.
- [17] T. H. Khang and Z. M. Ariff, “Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 109, no. 3, pp. 1545–1553, 2012.
- [18] S. K. Rath, S. K. Sharma, K. Sudarshan, J. G. Chavan, T. U. Patro, and P. K. Pujari, “Subnanoscopic inhomogeneities in model end-linked PDMS networks probed by positron annihilation lifetime spectroscopy and their effects on thermomechanical properties,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 101, pp. 358–369, 2016.
- [19] Larsen, A. L. 2003. Elastic properties of nonstoichiometric reacted PDMS networks. *Macromolecules*, 36: 26, 10063- 10070.
- [20] C. Cai, D. C. Miller, I. A. Tappan, and R. H. Dauskardt, “Degradation of thermally-cured silicone encapsulant under terrestrial UV,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 157, pp. 346–353, 2016.
- [21] C. S. Woo, S. S. Choi, S. B. Lee, and H. S. Kim, “Using Accelerated Testing,” vol. 59, no. 1, pp. 11–17, 2010.
- [22] ASTM, “G154 Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials 1,” *Astm*, pp. 1–12, 2014.

[23] Xiang, K., Huang, G., Zheng, J., Wang, X., Li, G. X., & Huang, J. Accelerated thermal ageing studies of polydimethylsiloxane (PDMS) rubber. *Journal of Polymer Research*,19(5). **2012**

[24] Kaymazlar, E., Silikon Elastomerlerin Durulma özelliklerine Hızlandırıcı tipinin ve Oranının etkisi, Yüksek lisans Tezi , Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Samsun, **2007**

EKLER

EK 1 – Çizelgeler

Çizelge-1: MG 8476G70 silikonun 180°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0 G	4490	356
1G	4396	362
2G	4574	342
3G	4657	347
6G	4521	352
9G	4349	360
12G	4303	370
15G	4257	378
18G	4276	372
21G	4191	380
24G	4212	370
27G	4191	375
30G	4191	374,5
33G	4233	371

Çizelge-2: MG 8476G70 silikonun 200°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0 G	4490	356
1G	3194	515
2G	3739	428
3G	3586	437
6G	3600	436
9G	3536	445
12G	3536	444
15G	3499	448
18G	3511	447
21G	3451	455
24G	3463	453
27G	3487	450
30G	3406	460
33G	3341	479

Çizelge-3: MG 8476G70 silikonun 250°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0 G	4490	356
1G	2766	567
2G	4172	376
3G	3600	436
6G	3573	444
9G	3523	445
12G	4152	378
15G	3362	467
18G	4093	383
21G	3270	480
24G	4017	390
27G	3175	495
30G	3106	505
33G	3064	512

Çizelge-4: MG 8476G70 silikonun UV yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0GY	4490	356
4GY	4038	388
8GY	4075	385
12GY	4174	376
16GY	4254	370
20GY	4139	383
24GY	4130	380
28GY	4191	374

32GY	4367	365
------	------	-----

Çizelge-

5.: EEL60 silikonun 180°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0 G	4493	325
1G	4396	332
2G	4420	330
3G	4521	323
6G	4521	323
9G	4529	322
12G	4547	321
15G	4547	321
18G	4580	327
21G	4568	326
24G	4623	316
27G	4623	315
30G	4651	312
33G	4623	316

Çizelge-6: EEL60 silikonun 200°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/m ³)
0 G	4493	325
1G	4574	321
2G	4775	305
3G	4806	304
6G	4903	297
9G	5005	292
12G	5005	292
15G	4936	295
18G	4974	294
21G	4936	295
24G	4970	293
27G	4870	300
30G	4903	297
33G	4936	295

Çizelge-7: EEL60 silikonun 250°C termal yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/cm ³)
0 G	4493	325
1G	7862	186
2G	8121	180
3G	5796	252
6G	3725	392
9G	6157	237
12G	5909	247
15G	4095	357
18G	5796	252
21G	5493	266
24G	4970	294
27G	5273	277
30G	5005	292
33G	5005	292

Çizelge-8: EEL60 silikonun UV yaşlandırma sonrası çapraz bağlar arası molekül ağırlığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri

Yaşlanma süresi (gün)	Çapraz bağlar arası molekül ağırlığı (Mc) (g/mol)	Çapraz bağ yoğunluğu (γ) (mol/cm ³)
0GY	4493	325
4GY	4174	357
8GY	4134	353
12GY	4019	363
16GY	4257	343
20GY	4253	343
24GY	4150	351
28GY	4276	341
32GY	4367	334