



RTV Silikon Kauçuk Temelli Manyeto-reolojik Malzemelere MR Etkilerin Deneysel Olarak İncelenmesi

Uğur MAZLUM^{1*}, Recep GÜMRÜK²

¹Mühendislik ve Doğa Bil. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane Üniversitesi, 29100 Gümüşhane, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 61080 Trabzon, Türkiye

Received: 15.05.2017; Accepted: 05.06.2017

<http://dx.doi.org/10.17776/cs.j.340512>

Özet: Manyeto-reolojik malzemeler, manyetik alan etki ettiği durumlarda tersinir ve hızlı bir şekilde kontrol edilen malzemeler türündendir. Silikon kauçuk türleri, hazırlanması kolay ve oda sıcaklığında vulkanize olduğundan dolayı laboratuvar ortamındaki çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Çalışmada, Üç farklı silikon kauçuk türü ve manyetik alana duyarlı ferromanyetik toz kullanılarak MRE malzemeler üretilmiştir. MRE malzemeler, izotrop(homojen) ve anizotrop(hizalanmış) durumda elde edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemeler tek eksenli basma test cihazında üç farklı test prosedürüne tabi tutularak test edilmiştir. Bu şekilde malzemelerin mekanik özellikleri ve manyeto-reolojik etkilerinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Sonuç olarak anizotropik Sorta Clear40 malzemesi ile yapılan testlerde 0.430 T manyetik alan altında % 30 gerilme artışı varken, saf duruma göre ise bu oran % 50 olarak ortaya konmuştur. Aynı zamanda izotropik Sorta Clear40 ile Vario40 malzemesinin kıyası neticesinde % 5 şekil değişiminde yaklaşık % 325 oranında MR etki artışı olduğu ortaya konmuştur. Kauçuk türleri seçilirken mühendislik açıdan malzeme karakteristiğine en uygun olanlarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: RTV silikon, Smart malzemeler, manyetik tozlar, manyetik alan

Experimental Investigation of MR Effect to RTV Silicone Rubber-based Magneto-rheological Materials

Abstract: Magneto-rheological Elastomers are smart materials whose properties can be altered reversibly and almost instantaneously by application of external magnetic fields. Silicone rubber species are used widely in the laboratory studies because of it is easy to prepare and cured at room temperature.

In this study, MRE material was produced using three different types of silicone rubber and ferromagnetic powder which is sensitive to magnetic field. MRE materials are obtained as isotropic (homogenous) and anisotropy (aligned) state. Composite materials were tested in uniaxial compression testing machine with three different test procedures. In this way, the mechanical properties and the magneto-rheological effect of the materials were compared. As a result, under the magnetic field to 0.430 T with anisotropic Sorta Clear40 materials were found to increase in stress 30%, according to the pure state has been demonstrated that the rate of 50%. When the isotropic Sorta Clear40 and Vario40 materials were comparable, MR effect was revealed that the increases the rate of about 325% at strain to 5%. When selecting to optimum rubber types was reached the result should be used to materials the most appropriate to the material characteristics of engineering aspects.

Keywords: RTV silicone, smart materials, magnetic powders, magnetic field.

1. GİRİŞ

Manyeto-reolojik(MR) malzemeler, manyetik alan etki ettiği durumlarda tersinir ve hızlı bir şekilde kontrol edilebilen malzemeler türündendir. Silikon kauçuk türleri, hazırlanması kolay olduğu ve oda sıcaklığında vulkanize olduğundan dolayı laboratuvar ortamındaki çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

MR malzemeler bir yüzyılı aşkın süredir çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. 1950'li yıllara gelindiğinde ise bu malzemelerin akışkan türleri ile ilgili çalışmalar başlatıldı [1]. Günümüzde ise MR elastomer, köpük ve jel gibi farklı çeşitleri bulunmaktadır. Manyeto-reolojik malzemeler, kauçuk temelli matris malzemeleri ve içerisine katılan manyetik alana duyarlı ferromanyetik tozların etkileşimi sonucu oluşmaktadır.

MR elastomerler smart malzemelerin en son kısmını oluşturmaktadır. Bu malzemelerin kontrol edilebilirliği akışkanlara göre biraz daha zordur. Ama yine de silikon temelli matris malzemeleriyle bu zorluk kısmen aşılmıştır. Bu malzemeler, titreşim ve ses kontrolü için kullanılmaktadır. Ayrıca fren sistemlerinde, kavramalarda ve son on yıldır araç süspansiyon ve konfor için oto koltuk sistemlerinde kullanılmaktadır. MRE uygulamalarına diğer örnekler Brei[2]; Browne ve Johnson[3]; Lerner ve Cunefar[4] şeklinde verilebilir.

MR elastomerler, akışkan matris malzemesine içerisine katılan manyetik partiküllerin karışımı neticesinde elde edilmektedir. Karışımın üretim süresinde manyetik alan etki etmediği durumda elde edilen malzeme izotrop olarak kabul edilir. Buna karşın dışarıdan manyetik alan etki ettiği durumda manyetik alan yönünde lokal olarak yönlendirmeler oluşmaktadır. Bu durum ise anizotrop

durum olarak ifade edilir. Her iki durumda da vulkanizasyon gerçekleştiğinde manyetik partiküller matris malzemesi içerisinde kilitletir. Elastomerlerin viskoelastik özelliklerini inceleyen alanlara yönelik çalışmalar yapılmıştır [5–9].

MR malzemeler için %99.7 gibi yüksek saflığa, düşük kalıcı manyetik özelliğe, yüksek geçirgenlik değerine ve yüksek doymuş manyetik özelliklere sahip demir tozları kullanılması gerekmektedir [7]. Karbon katkılı demir tozu yukarıda sayılan özellikleri içerisinde barındırdığından pek çok çalışmada kullanılmıştır.

Bu çalışmada, Üç farklı silikon kauçuk türü ve manyetik alana duyarlı ferromanyetik BASF CN tozu kullanılarak MRE malzemeler üretilmiştir. MRE malzemeler, matris malzemesi ve manyetik partikül karışımı neticesinde izotrop(homojen) ve anizotrop(hizalanmış) olarak elde edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemeler tek eksenli basma test cihazında % 50 şekil değişimi değerine kadar üç farklı test prosedürüne tabi tutularak test edilmiştir. Bu şekilde malzemelerin mekanik özellikleri ve MR etkilerinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu şekilde mühendislik açıdan malzeme karakteristiğine en uygun kauçuk türü seçilirken hangi koşullara dikkat edilmesi gerektiğiyle ilgili çalışma yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

Çalışmada üç farklı tür kauçuk (MRTV, Sorta Clear ve Vario) kullanılmıştır. Boyutları 6.5–8 µm olan Basf CN manyetik demir tozu matris malzemesine katılmıştır. Tablo 1'de Matris malzemelerine, Tablo 2'de ise karbon katkılı demir tozuna ait teknik bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. Matris malzemelerine ait teknik bilgiler.

| Matris Malzemesi | Renk | Yoğunluk (g/cm ³) | Viskozite (mPa.s) | Pişme zamanı(sa) | Sertlik | Çekme Mukavemeti (N/mm ²) | Kopma Uzaması (%) |
|------------------|-------------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------|---------------------------------------|-------------------|
| MRTV | Bej | 1.29 | 130000 | 16 | Shore A59 | 4.5 | % 250 |
| SORTA CLEAR | Yarı şeffaf | 1.08 | 35000 | 16 | Shore A40 | 5.51 | % 400 |
| VARIO | Yarı şeffaf | 0.98 | 10000 | 6 | Shore A40 | 8 | % 450 |

Tablo 2. Ferromanyetik karbon katkılı demir tozuna ait teknik bilgiler.

| Manyetik Toz | Tip | Fe min. (%) | C maks. (%) | O maks. (%) | N maks. (%) | Partikül Boyutu(μ m) | Kaplama |
|--------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|---------|
| BASF CN | Yumuşak | 99.5 | 0.03 | 0.1-0.25 | 0.01 | 6.5-8 | - |

2.2. Metod

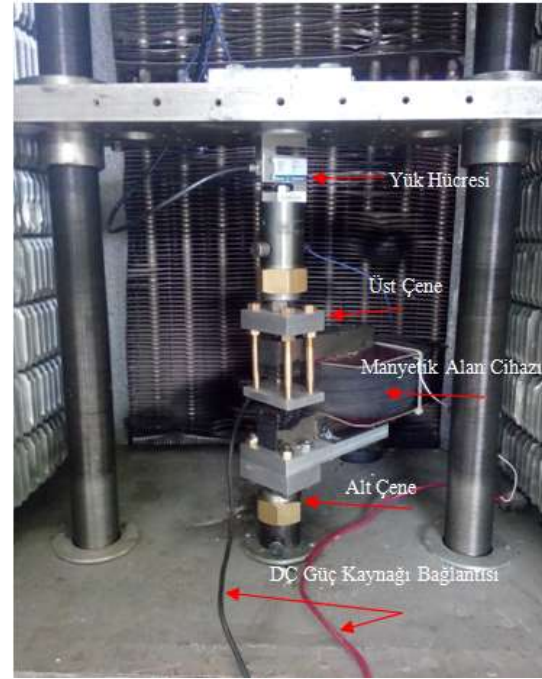
2.2.1. Numune Üretimi

RTV(Room Temperature Vulkanization) Silikon kauçuk temelli kompozit malzeme üretimi için bu çalışmada üç farklı tip matris malzemesi, bu malzemelere 10:1 oranında ilave edilmiş pişme katkı malzemesi, viskozitesini azaltmak için % 30 oranında silikon yağı ve karbon katkılı demir tozu kullanılmıştır. MR elastomer malzemesi saf, izotrop ve anizotrop durumda üretilmiştir. BASF CN manyetik partikülü yaklaşık % 30 hacim oranında ilave edilmiştir. Silikon kauçuklar, manyetik partikül ve pişirme malzemeleri 10 dakika süreyle iyice karıştırılmıştır. Vakum pompası yardımıyla karışım kalıba dökülmeden önce yaklaşık 10 dakika vakum uygulanmıştır. Karışım 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki boyutlarda numune elde etmek için 70 °C de 20 dakika fırınlanarak vulkanize edildi. Manyetik alan etki etmediğinden üretilen malzeme izotrop malzeme olarak ifade edilir. Ayrıca malzeme üretilirken Şekil 1'de görülen manyetik alan cihazıyla yaklaşık 0.2 T manyetik alan uygulandığında ise anizotropik malzeme üretilmektedir.

**Şekil 1.** Manyetik Alan Cihazı.

2.2.2. Test Düzenegi

Kauçuk türü manyeto-reolojik malzemelerin testleri Şekil 2'de resmi verilen, tek eksenli basma test cihazıyla yapılmıştır.

**Şekil 2.** Tek Eksenli Basma Deney Düzenegi.

Basma testleri 10 kN yük kapasitesine sahip basma cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Testler için 10 mm/dakika hız değeri alınarak numunenin % 50 şekil değişimi değerine kadar yüklenmesi sağlanmıştır. Test düzenegi için manyetik alandan etkilenmeyen alüminyum ve pirinç malzemelerinden yapılmış olan basma çenesi ve bağlantı çubukları tasarımı yapılmıştır. Basma cihazına 3 adet 35*5 mm boyutlarında neodyum mıknatısla desteklenmiş elektromanyetik sarım ilave edilerek 0.43 Tesla manyetik alan altında deneyler yapılması sağlanmıştır. Manyetik alan düzeği için 0.9 mm çapında bakır tel ile C tipi silisyum saç nüvenin etrafına 4000 sarım yapılmıştır. Direnç değeri 40

ohm dur. DC güç kaynağı ile 5 amper akım değerine kadar beslenmesi sağlanmıştır. Ayrıca basma test düzeneği hız kontrol ünitesi yardımıyla kontrol edilebildiği gibi, hassas verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için NI-LABVIEW'de yazılmış paket programıyla desteklenmiştir. Böylece enkoderden alınan veriler yük hücresi amplifikatörü yardımıyla bilgisayara işlenmektedir.

2.2.3. Test Prosedürü

Manyeto-reolojik malzemeler üzerindeki kalıcı deformasyon etkisini gidermek ve test sonuçlarının en uygun değerlere ulaşmasını sağlamak amacıyla test prosedürleri uygulanmaktadır. En yüksek gerilme ilk yükleme çevriminde elde edilmektedir. Daha sonraki gerilme değerlerinde ise gitgide gerilme düşmektedir. Yükleme prosedürleri belirli bir tekrardan sonra hemen hemen üst üste çakışmaktadır. Mullins etkilerini gidermek için aşağıda ifade edilen test prosedürleri kullanılmıştır.

- i. Manyetik alan olmadığı durum için testler (prosedür1)
- ii. Manyetik alan etkidiği durum için test(0.430T)(prosedür2)
- iii. i. test prosedürünün tekrarlandığı durum için gerçekleştirilen test (prosedür3)

Mullins etkileri zamana bağımlı olduklarından aynı MRE numuneleriyle yapılan testler arasında yeterince zaman olduğunda kalıcı deformasyon oluşmaktadır. 2015 yılında Schubert, basma testi için üç ayrı prosedür uygulamış ve her prosedür ile 4 yükleme-boşaltma yaptıktan sonra üçüncü yükleme-boşaltma verilerini alarak sonuçları kıyaslamıştır [10]. Bu çalışmada ise Mullins etkisinden kaçınmak için basma testleri başlangıçta 5 defa yükleme-boşaltma çevrimine tabi tutuldu. Daha sonraki prosedürlerde ise ilk yükleme değerleri alınarak test sonuçları irdelenmiştir. MRE malzemelerin manyetik alansız ve manyetik alanlı olarak cevabını karakterize etmek için MR etki değerinin bilinmesi gerekmektedir. Relatif MR etki değeri (1) denklemi ile hesaplanır.

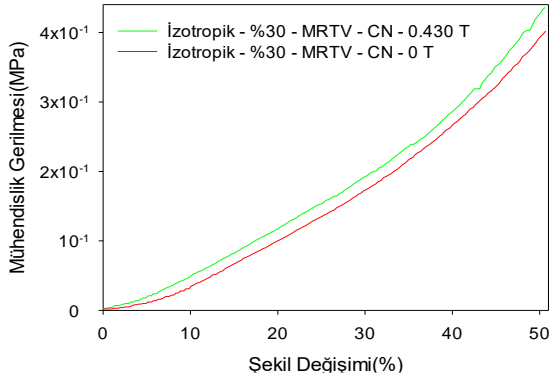
$$MR_{rel} = E_m/E_0 \quad (1)$$

Burada E_m ; manyetik alanlı elastisite modülü, E_0 ; manyetik alansız elastisite modülü olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, farklı tip silikon kauçuk temelli kompozit malzemelerin Mullins etkilerinden arındırılarak mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve MR etki parametrelerinin kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu şekilde hangi silikon kauçuk malzemesinin mekanik özellikler ve MR etki bakımından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiş olacak ve böylece kullanım alanlarını göz önüne alarak en optimum özelliklere sahip olması için çalışmalar yapılabilecektir.

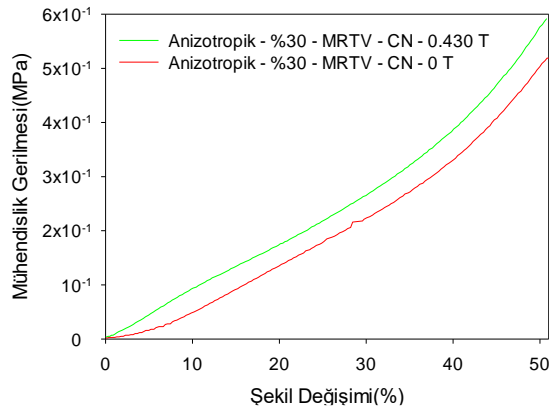
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Manyeto-reolojik malzemeler çift komponentli bileşimlerin kimyasal reaksiyonuyla beraber saf, izotrop ve anizotrop durumda üretilmiştir. Basma test düzeneğiyle deneyler yapılmıştır.

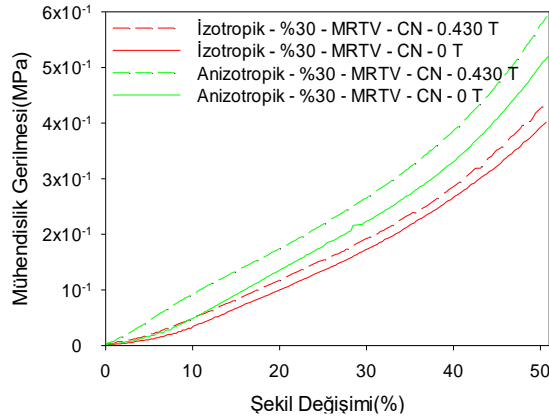
Şekil 3a-b'deki grafiklerde MRTV silikon kauçuk malzemesine ait anizotropik ve izotropik numunelerin manyetik alanlı (0.430 T) ve manyetik alansız olarak gerilme-şekil değişimi grafikleri ayrı ayrı verilmiştir. Şekil 3c'de ise grafikler toplu olarak verilmiştir. Bu grafikler dikkate alındığında 0.430 T manyetik alan uygulanması neticesinde manyetik alansız duruma göre % 50 şekil değişimi değerinde yaklaşık % 15 gerilme artışı gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

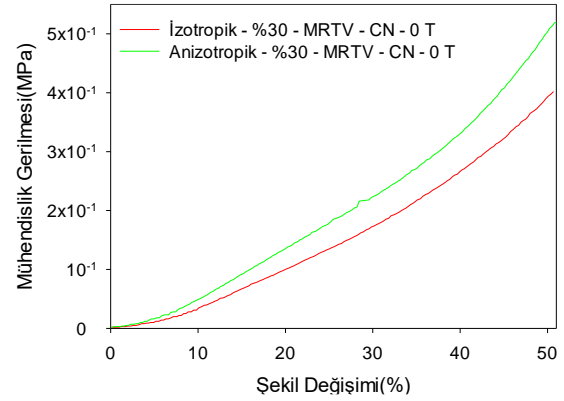


(c)

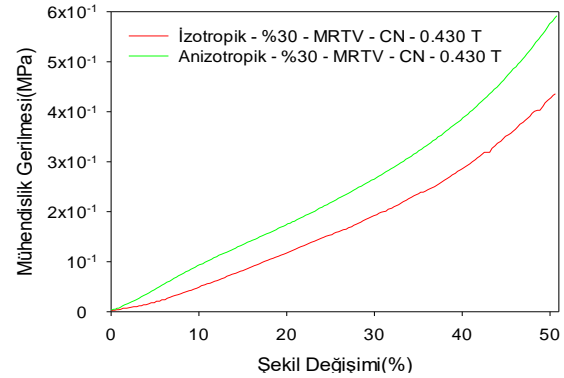
Şekil 3. MRTV silikon kauçuk malzemesine ait 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı a) İzotropik b) Anizotropik c) Toplu gösterim MRE malzeme grafikleri.

Şekil 4'te ise manyetik alanın etkisini ortaya koyabilmek için ayrıca izotropik ve anizotropik numuneler manyetik alanlı ve alanlız olarak kıyaslanmıştır. Genel olarak grafikte başlangıç şekil değişiminden itibaren bir artış trendi göze

çarpmaktadır. Şekil 4b'de görülen manyetik alanlı durum ile Şekil 4a'daki manyetik alanlız durum arasında % 50 şekil değişimi değerinde yaklaşık % 18'lik gerilme artışı söz konusu olmaktadır.



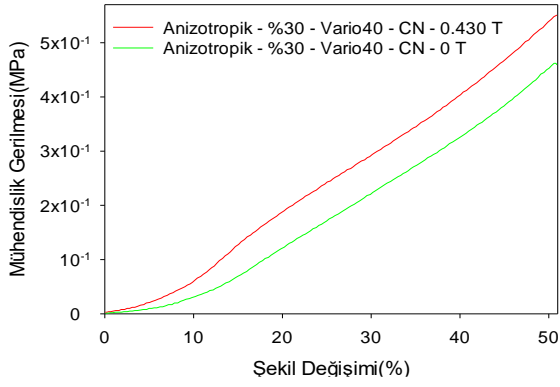
(a)



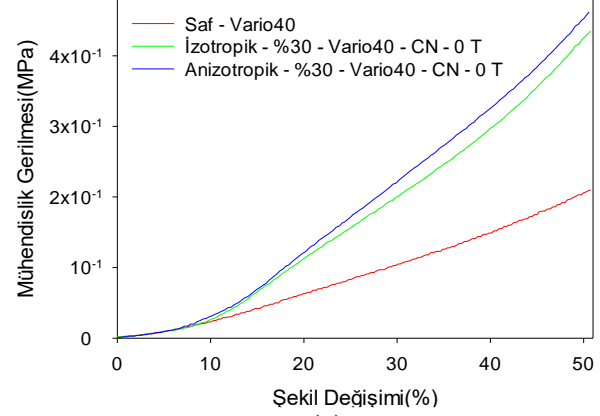
(b)

Şekil 4. MRTV silikon kauçuk malzemesine ait izotropik ve anizotropik numunelerin a) 0 T b) 0.430 T manyetik alanlı kıyas grafikleri

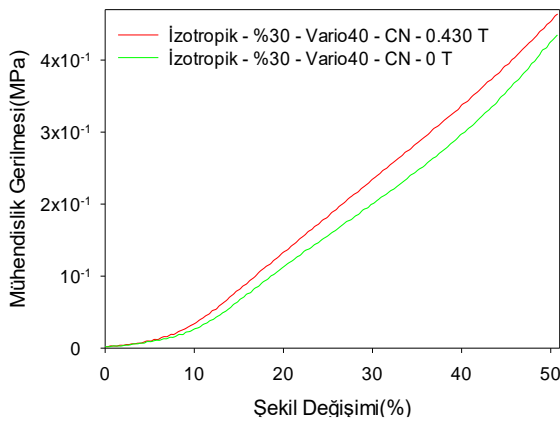
Shore A 40 sertlik değerine sahip olan Vario 40 RTV silikon kauçuk malzemesi saf, izotrop ve anizotrop olarak üretilmiştir. Üretim süreci yukarıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Test esnasında 0.430 T manyetik alan uygulanmak suretiyle gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 5a'daki gibi elde edilmiştir. Şekil 5b ise manyetik alanlız durumdaki grafiği göstermektedir.



(a)

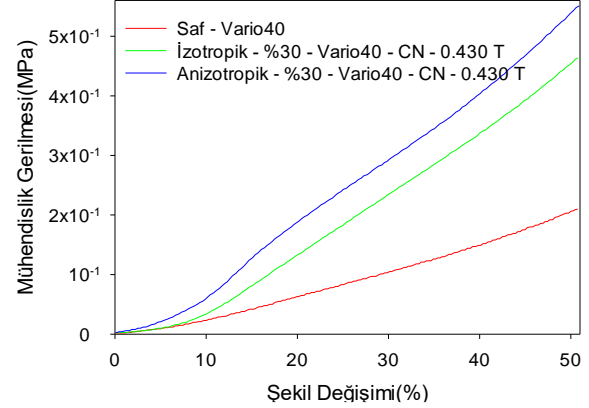


(a)



(b)

Şekil 5. Vario40 silikon kauçuk malzemesine ait 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı a) Anizotropik b) İzotropik MRE malzeme grafikleri



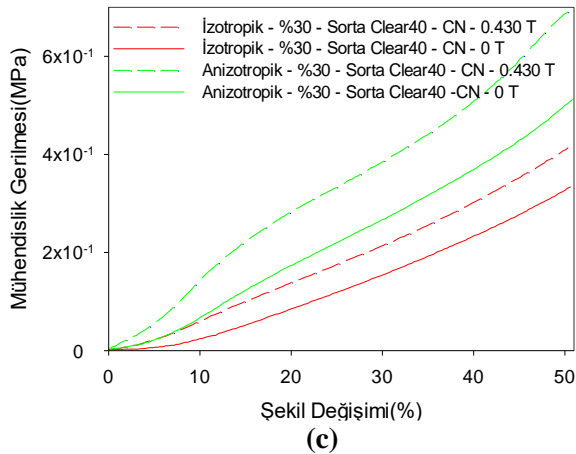
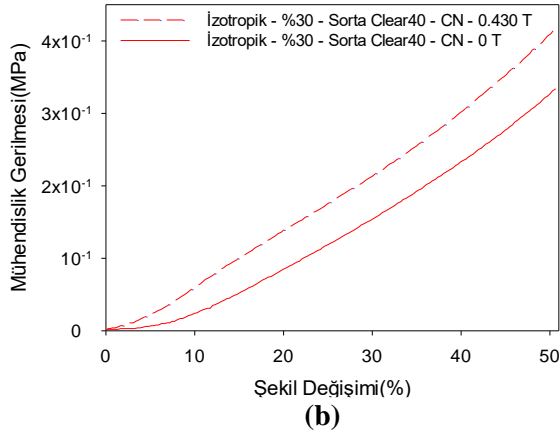
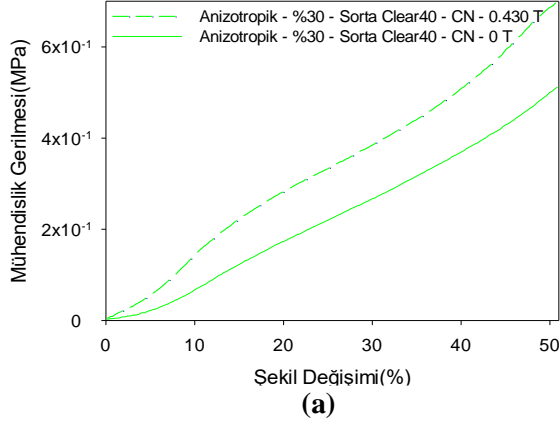
(b)

Şekil 6. Vario40 silikon kauçuk malzemesine ait saf, izotropik ve anizotropik numunelerin a) 0 T b) 0.430 T manyetik alanlı kıyas grafikleri

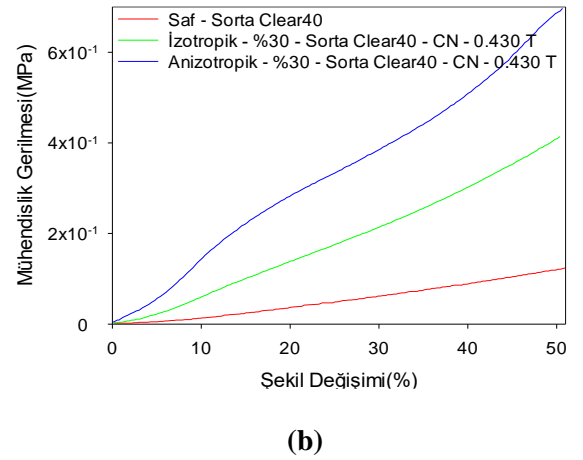
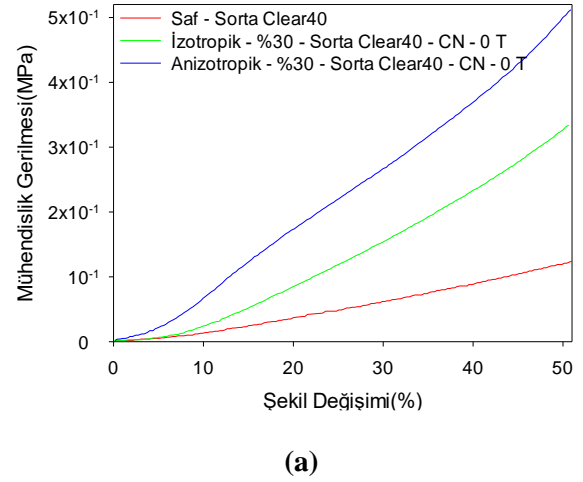
Test esnasında numunenin yönlendirilmesi ile elde edilen anizotrop durumdaki grafiklerde manyetik alanın etkisiyle beraber gerilme artış daha fazla olmaktadır. Aynı şekilde saf, izotrop ve anizotrop durumların 0 T ve 0.430 T manyetik alan altında grafikleri sırasıyla Şekil 6a ve Şekil 6b'de verilmiştir. Şekil 6b dikkate alındığında saf duruma göre izotrop durumda % 40 artış söz konusuken, anizotrop durumda ise % 50 artış olduğu açıkça görülmektedir.

Sorta Clear40 RTV silikon kauçuk malzemesi içinde saf, izotrop ve anizotrop olarak numuneler üretilmiştir. Vario40 ve MRTV silikon kauçuklarına uygulanan prosedürler aynen bu kauçuğuda uygulanmıştır. Test esnasında 0.430 T manyetik alan uygulanmak suretiyle gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 7 de görülmektedir. Şekil 7a-b'de sırasıyla anizotropik ve izotropik numunelerin gerilme-şekil değişimi grafikleri verilmiştir. Şekil 7c'de ise bu grafikler toplu halde gösterilmiştir. Test esnasında numunenin yönlendirilmesi ile elde edilen anizotrop durumdaki grafiklerde manyetik alanın etkisiyle beraber gerilme artış diğer iki kauçuk türüne göre daha fazla olmaktadır. Aynı şekilde saf, izotrop ve anizotrop durumların 0 T ve 0.430 T manyetik alan altında grafikleri sırasıyla Şekil 8a ve Şekil 8b'de verilmiştir. Şekil 8b dikkate

alındığında saf duruma göre izotrop durumda % 40 artış söz konusuysen, anizotrop durumda ise % 50 artış olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7. Sorta Clear40 silikon kauçuk malzemesine ait 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı a) Anizotropik b) İzotropik c) Toplu gösterim MRE malzeme grafikleri.

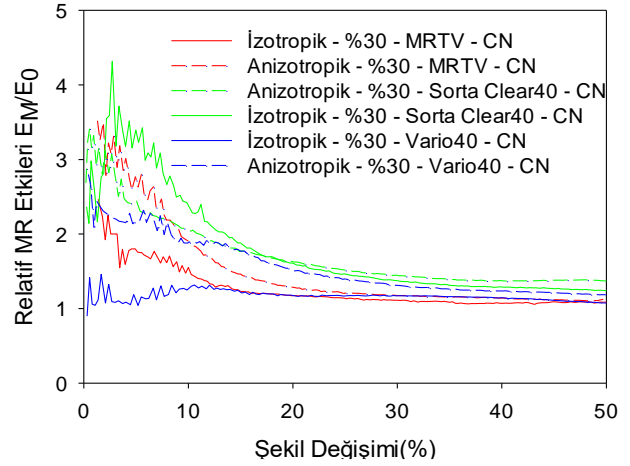


Şekil 8. Sorta Clear40 silikon kauçuk malzemesine ait saf, izotropik ve anizotropik numunelerin a) 0 T b) 0.430T manyetik alanlı kıyas grafikleri.

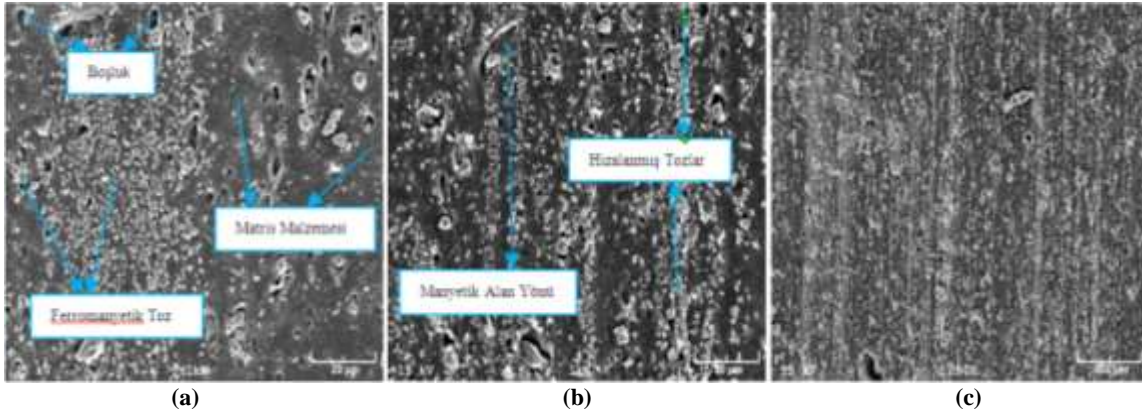
Bu çalışmada üç farklı RTV silikon kauçuk türünün mekanik özellikleri yukarıda incelenmiş ve grafikleri değerlendirilmiştir. Aynı zamanda MRE malzemelerin manyetik alansız ve manyetik alanlı olarak cevabını karakterize etmek için MR etki değerinin bilinmesi gerekmektedir. MR etki bu tür smart malzemelerin manyetik alana karşı hassasiyetlerini gösteren bir ölçü olarak ifade edilebilir. MRTV, Vario40 ve Sorta Clear40 MRE malzemeleri için % 50 şekil değişimi değerine kadar relatif MR etki grafikleri çizilmiştir. Bu şekilde farklı kauçuk türlerinin MR etkiye duyarlılığını kıyaslama olanağı bulunmuştur. Şekil 9 grafiği irdelendiğinde en yüksek MR etkinin izotropik Sorta Clear40 malzemesinde yaklaşık % 5 şekil değişimi değerinde olduğu görülmektedir. Buradan izotropik Sorta Clear40 ile Vario40 malzemeleri irdelendiğinde MR etkinin % 325 oranında artış

gösterdiği görülmektedir. En düşük MR etki ise izotropik Vario40 malzemesinde ortaya çıkmaktadır. Şekil değişimi arttıkça manyetik etkinin azalmasından dolayı MR etkide tüm MRE malzemelerde azalma ortaya çıkmaktadır. % 25 şekil değişimi değerine kadar eksponansiyel bir azalış varken bu değerden sonra ise grafikler hemen hemen sabit olarak devam etmektedir.

Şekil 10'da Sorta Clear40 matris malzemesinin SEM resimleri görülmektedir. Şekil 10-a MRE malzemesinin izotrop durumdaki görüntüsünü verirken, Şekil 10-b ise 0.2 T manyetik alan altında tozların yönlendirilmiş görüntüsü verilmiştir. Üç farklı silikon temelli MRE malzemesiyle elde edilen grafiklerden manyeto-reolojik etkilerin kıyaslaması yapılabilmektedir. MR etki bakımından optimum durum ortaya konulabilmektedir.



Şekil 9. MRTV, Vario40 ve Sorta Clear 40 silikon kauçuk malzemelerine ait izotropik ve anizotropik durumda relatif MR etki grafiklerinin toplu olarak gösterilmesi



Şekil 10. Silikon kauçuğa ait (a) izotrop (b) anizotrop (c) anizotrop(200x) SEM görüntüleri.

4. SONUÇLAR

Manyeto-reolojik malzemeler kullanılan matris malzemesine göre değişik davranışlar göstermektedir. Bu matris malzemeleri içerisinde anizotrop durumda manyetik alansız duruma göre 0.430 T manyetik alan uygulandığında % 30 gerilme artışı Sorta Clear40 malzemesiyle elde edilmiştir. Aynı şekilde saf, izotrop ve anizotrop numuneler dikkate alındığında yine Sorta Clear40 malzemesiyle saf duruma göre izotrop durumda % 40 artış söz konusuken, anizotrop durumda ise % 50 artış olduğu ortaya konulmuştur. En yüksek MR etki izotropik Sorta Clear40

malzemesinde yaklaşık % 5 şekil değişimi değerinde oluşmaktadır. Aynı zamanda izotropik Sorta Clear40 ile Vario40 malzemesinin kıyası neticesinde % 5 şekil değişiminde yaklaşık % 325 oranında bir artış olduğu bulunmuştur. En düşük MR etki ise izotropik Vario40 malzemesinde görülmektedir. Şekil değişimi arttıkça manyetik etkinin azalmasından dolayı MR etkide tüm MRE malzemelerde azalma ortaya çıkmaktadır. % 25 şekil değişimi değerine kadar eksponansiyel bir azalış varken bu değerden sonra ise grafikler hemen hemen sabit olarak devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Rabinow, J., 1948. The Magnetic Fluid Clutch. American Institute of Electrical Engineers Transactions. 67(2): 1308-1315.
- [2]. Brei, D., Redmond, J., Wilmot, N., 2006. Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use. U.S. Patent A1 0012191.
- [3]. Browne, A., Johnson, N., 2006. Closure lockdown assemblies and methods of utilizing active materials. U.S. Patent B2 7.029.056.
- [4]. Lerner, A., Cunefar, K., 2005. Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with a variable gap length and methods and systems therefor. U.S. Patent B2 7.102.474.
- [5]. Zhou, G.Y., Li, J.R., 2003. Dynamic Behavior of a Magnetorheological Elastomer under Uniaxial Deformation: I. Experiment. Smart Materials and Structures. 12(6): 859–872.
- [6]. Zhou, G.Y., 2003. Shear properties of a magnetorheological elastomer. Smart Materials and Structures. 12: 139–146.
- [7]. Lokander, M., Stenberg, B., 2003. Improving the Magnetorheological Effect in Isotropic Magnetorheological Rubber Materials. Polymer Testing. 22(6): 677–680.
- [8]. Lokander, M., Stenberg, B., 2002. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. Polymer Testing. 22(3): 245-251.
- [9]. Davis, L.C., 1999. Model of magnetorheological elastomers. Journal Applied Physics. 85: 3348–3351.
- [10]. Schubert, G., Harrison, P., 2015. Large-strain behaviour of Magneto-Rheological Elastomers Tested under Uniaxial Compression and Tension, and Pure Shear Deformations. Polymer Testing. 42: 122-134.