



Manyeto-reolojik malzemelere ferromanyetik toz ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin deneysel olarak incelenmesi

Experimental investigation of the effect of ferromagnetic particles addition on mechanical properties of magneto-rheological materials

Uğur MAZLUM^{1*}, Recep GÜMRÜK²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
ugurmazlum@gumushane.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
rgumruk@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 24.10.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 27.02.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.92255
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Ferromanyetik toz partikülleri, manyetik alana duyarlılıklarından dolayı günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu tozların matris malzemeleri ile birleşimlerinden elde edilen kompozit MRE malzemeler bir tür akıllı (smart) malzeme olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada, RTV (room temperature vulcanization) silikon kauçuğuna dört farklı manyetik toz ilave edilmesi ile elde edilen kompozit MRE malzemelerinin bası yüklemesi altındaki mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak mühendislik açısından kullanımı yaygın olan Vario 40 silikon kauçuk malzemesi kullanılmıştır. Kompozit MRE malzemelerde toz oranı hacimce %30 oranında tutulmuştur. Ayrıca, tozların yönlenmesinin etkisini incelemek için, üretim esnasında bazı numunelere dış manyetik alan uygulanmıştır. Bu numuneler anizotropik olarak adlandırılırken diğerleri izotropik numunelere olarak adlandırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki; anizotrop MRE numuneler izotrop numunelere göre çok daha yüksek gerilme değerlerine sahip olmaktadır ve en büyük gerilme artışı BASF CN tozu ilave edilen anizotrop MRE malzemeler için elde edilmiştir. Ayrıca, numuneler MR etki açısından da değerlendirildi ve izotropik versiyonlarına göre %201 gibi bir artış değeri ile en büyük MR etki SQ-1 tozu içeren anizotrop numunelerde gözlemlendi. Sonuç olarak, gerçekleştirilen çalışma ile MRE malzemelerin mekanik ve MR özellikleri, ilave edilen tozun cinsi ve manyetik özelliklerine ciddi bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: RTV silikon kauçuk, MRE kompozit malzemeler, Manyetik tozlar, Manyetik alan

Abstract

The ferromagnetic particles are used in many areas due to their magnetic field sensitivity. Composite MRE materials which obtained from the combination of the matrix material with these particles are classified as a kind of smart materials. In this study, it is aimed that the compressive mechanical properties of MRE materials produced by adding four different magnetic particles in RTV (room temperature vulcanizing) silicone elastomer are investigated. As a matrix material Vario 40 silicone rubber were used, which is common in engineering application. The particle rate inside MRE materials was kept at 30% by volume. In addition, to investigate the influence of orientation of particles inside MRE materials, some samples were subjected to external magnetic field during production. These samples are named as anisotropic MRE materials while the others are described as isotropic ones. The tests showed that anisotropic samples have much more strength values according to isotropic samples. Of all, the MRE samples including BASF CN particles reveal the biggest strength values. Also, the samples were evaluated in terms of MR effect and the largest MR effect with an increase value of 201% was found for anisotropic samples including SQ-1 particles with regard to the corresponding isotropic one. As a result, this study determined that the mechanical and MR properties of MRE materials seriously depend on ferromagnetic particle kind and its magnetic characteristic.

Keywords: RTV silicone rubber, MRE composite materials, Ferromagnetic particles, Magnetic field

1 Giriş

Manyeto-reolojik (MR) malzemeler manyetik alan etkisi altında kontrol edilebilen, aynı zamanda manyetik alan kaldırıldığında tekrar eski halini alabilen malzemeler olarak tanımlanabilir. Manyeto-reolojik (MR) malzemelerin tarihsel süreci 1900'lü yılların başına dayanır. Akışkan olarak uygulamalarda kullanılmaya başlaması 1948 yılında Rabinov'un bu malzemeleri (MRF) keşfetmesiyle olmuştur [1]. MR malzemeler, manyetik olmayan matris malzemeleri ve içerisine katılan ferromanyetik partiküller ile etkileşim sonucu oluşmaktadır. MR elastomer, akışkan, köpük ve jel gibi çeşitleri vardır.

Matris malzemesine ilave edilen ferromanyetik tozlar homojen bir şekilde veya lokal olarak grup halinde yerleşebilir. Homojen yapı elde etmek için vulkanizasyon esnasında (çapraz bağ oluşumu sürecinde) manyetik alan uygulanmaması gerekmektedir. Bu durumda malzeme

izotropik olarak düşünülebilir. Dışarıdan manyetik alan etkilediği durumda sütun halinde hizalanmış yapılar elde edilmiş olur. Bu durumda da malzeme anizotropik olarak ifadelendirilir. Bu malzemelerin viskoelastik özelliklerini inceleyen çalışmalar mevcuttur [2]-[5].

Pek çok endüstriyel uygulamalarda daha çok manyeto reolojik akışkan malzemeler kullanılmaktadır. Bu alanda patent uygulamaları 20. yüzyılın sonlarında ortaya çıkmaya başlamıştır. 2000 yılından sonrada gelişmeye başlamıştır. Hem malzemeyi hem de MRE'nin özgün özelliklerini kullanarak uygulamalarını patentlemişlerdir [6]. 2011 yılına kadar alınan patentlerin anizotropik MRE'lerin çözümüne yönelik olduğu söylenebilir. Otomotivde de MR kompozitlerin kullanımı için pek çok patent uygulamaları da görülmektedir. Bunlardan biri Ford Motor Company Watson'da geliştirilen kontrol edilebilir sertlikteki yatak kullanarak araç süspansiyon elemanının sertliğini dengelemek için kullanılmıştır. Ford, Otomotiv süspansiyonundaki kuvvet ve yer değişimi ölçümü için aygıt

geliştirmiştir [7]. German ThyssenKrupp AG şirketi araç kazaları boyunca adaptif enerji sönümleme sistemiyle alakalı direksiyon dişli kolu geliştirmiştir [8]. MRE uygulamalarına diğer örnekler [9]-[11] makalelerinde görülmektedir.

MR elastomerlerin matrisi için silikon kauçuk, doğal ve sentetik kauçuk, termoplastik kauçuk, plastik vb. gibi pek çok malzeme çeşidi bulunmaktadır. Bunların arasından üretimi kolay olması ve oda sıcaklığında vulkanize olması gibi faktörler göz önüne alındığında RTV silikon kauçuk malzemeler pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Bu malzeme akışkan olduğunda manyetik alan uygulanarak yönlendirilmesi oldukça kolay olmaktadır. Vulkanizasyon işlemi gerçekleştiğinde ise katı bir form almaktadır. Matris seçiminde uygun tasarım koşulları ve performans değerleri göz önüne alınmak zorundadır.

Manyetoreolojik malzemeler için ferromanyetik malzemeler yüksek doymuş indüksiyondan dolayı yüksek MR etki oluşturduğundan en iyi seçimdir. Manyetik alan olmadığında partiküller çok küçük dipol momentlerine sahiptirler ve böylece manyetik itici kuvvetleri yoktur veya küçüktür. Manyetik alan uygulanması momentlerin mesafesini büyük bir şekilde artıran harekete neden olur ve böylece partiküller arası manyetik bir etkileşim oluşmaktadır. MR malzemeler için yüksek doymuş manyetik özellikleri, yüksek geçirgenlikleri ve düşük kalıcı manyetikliklerinden dolayı en yaygın kullanılan partiküller yüksek saflığa (%99.7) sahip demir partikülleridir [12]. Demir, nikel ve kobaltın bazı alaşımları daha yüksek doymuş manyetik özelliklere sahip olduklarından MR malzemeler için ayrıca kullanılır.

Fakat manyetik alan kaldırıldığında sahip oldukları kalıcı manyetik özelliklerinden dolayı demir kadar yaygın kullanıma sahip değildirler. Böylece tamamen tersine MR etkiye sahip değildirler. Partikül boyutu teorik olarak pek çok manyetik yüzey elde etmek için yeterince büyük olabilir.

Böylece büyük MR etki elde edilebilir. Küresel karbon katkı demir partikülleri mikrometre çaplarında MR malzemeler için çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [13],[14].

Davis, 1999 deneysel olarak ve modelleme çalışmaları sonucunda optimum partikül hacim oranının modüllerdeki en büyük değişimi için %27 olduğunu tespit etmişlerdir. Küçük şekil değişimlerinin yanında %50'ye varan şekil değişimlerinde de Basf SQ tozuyla çekme, basma, safi kayma gibi testler gerçekleştirerek MR etki parametresinin değişimini incelenmiştir [15].

Yapılan çalışmada, silikon kauçuk malzemesi saf, izotrop ve anizotrop olarak 4 farklı toz partikülü kullanılarak üretilmiştir. Toz partikülü çeşidi ve MR etki gibi parametreler mekanik özelliklerin anlaşılmasında önemlidir. Bu çalışmada manyeto-reolojik silikon kauçuğunun izotrop ve anizotrop

durumda tek eksenli yükleme altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu şekilde performans değerleri göz önüne alındığında en uygun malzemenin elde edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca manyetik partikül ilavesinin mukavemet değerlerine ne gibi etkisi olduğu ortaya konulmuştur.

2 Deneysel çalışmalar

2.1 Malzeme

Matris malzemesi olarak oda sıcaklığında vulkanize olan Vario 40 silikon kauçuk kullanılmıştır. Ayrıca matris malzemesine BASF firmasından temin edilmiş olan ortalama 3.8-9.5 µm aralığında değişen dört farklı ferromanyetik karbon katkı demir tozu (BASF CN, CM, SQ, SQ-I) ilave edilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2'de matris malzemesine ve karbon katkı demir tozlarına ait teknik bilgiler verilmiştir.

2.2 Metot

2.2.1 Numune üretimi

Vario 40 RTV (Room Temperature Vulkanization) Silikon kauçuk, %10 oranında pişme katkı malzemesi ve viskozitesini azaltmak için %30 oranında silikon yağı ile matris malzemesi elde edilmiştir. MR elastomer malzemesi saf, izotrop ve anizotrop durumda üretilmiştir. Manyetik partiküller literatürde yaklaşık %30 hacim oranında ilave edilmiştir. Silikon kauçuk, manyetik partikül ve pişirme malzemesi 10 dk. süreyle iyice karıştırılmıştır. Daha sonra oluşan hava kabarcıklarını gidermek için karışım kalıba dökülmeden önce vakum pompasıyla 10 dk. vakum uygulanmıştır. Elde edilen karışım 70*40 mm pleksi glass plakadan 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında kalıba (Şekil 1) dökülmüştür ve 70 °C'te 20 dk. fırınlanarak vulkanize edilmiş ve bu şekilde izotrop malzeme üretilmiştir. Ayrıca, malzeme üretilirken Şekil 2'de görülen manyetik alan cihazıyla yaklaşık 0.3 T manyetik alan uygulandığında ise anizotropik malzeme üretilebilmektedir.

2.2.2 Basma test düzeneği

Kauçuk türü MRE numunelerin testleri Şekil 3'te resmi gösterilen, tek eksenli basma deney düzeneği yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Basma testi için 10 mm/dk. hız değeri alınarak numunenin %50 şekil değişimi değerine kadar yüklenmesi sağlanmıştır. Test düzeneği için manyetik alandan etkilenmeyen alüminyum malzemesinden üretilmiş olan basma çenesi tasarımı yapılmış ve bu düzeneğe elektromanyetik sarım ilave edilerek 0.430 Tesla manyetik alan altında deneyler yapılmıştır. Manyetik alan düzeneği 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.

Tablo 1: Matris malzemesine ait teknik bilgiler.

Matris Malzemesi	Renk	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mPas)	Pişme zamanı (sa)	Sertlik (ShoreA)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Yırtılma Mukavemeti (N/mm)
VARIO 40	Yarı şeffaf	0.98	10000	6	40	8	450	15

Tablo 2: Ferromanyetik karbon katkı demir tozlarına ait teknik bilgiler.

Ferromanyetik Tozlar	Fe min. (%)	C maks. (%)	O maks. (%)	N maks. (%)	Partikül Boyutu (µm)	Geçirgenlik	Özdirenç
BASF SQ-I	98.5	0.03	0.7	-	3.8-5.4	Min 28	Min 10 ohm
BASF CM	99.5	0.03	0.1-0.25	0.01	7-9.5	-	-
BASF CN	99.5	0.03	0.1-0.25	0.01	6.5-8	-	-
BASF SQ	99.5	0.05	0.22	-	3.9-5	-	-

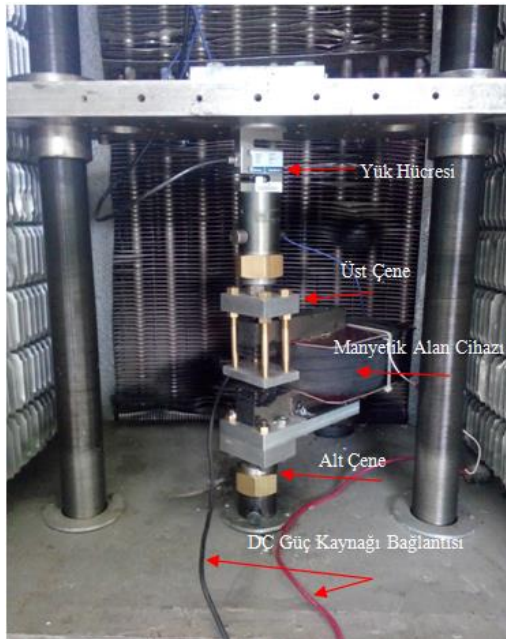
Ayrıca deney düzeneği bilgisayar kontrollü yapılmıştır. Buradan mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve basma cihazına daha hassas ve güvenilir bir şekilde komutlar verilebilmesi amaçlanmıştır. NI-LABVIEW paket programı yardımıyla test cihazından elde edilen veriler bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 1: Kalıp.



Şekil 2: Manyetik alan cihazı.



Şekil 3: Tek eksenli basma deney düzeneği.

2.2.3 Test prosedürü

Manyeto-reolojik malzemeler üzerindeki kalıcı deformasyon etkisini gidermek ve test sonuçlarının uygun değer değerlere ulaşmasını sağlamak amacıyla test prosedürleri uygulanmaktadır. En yüksek gerilme ilk yüklemeye çevriminde elde edilmektedir. Daha sonraki gerilme değerlerinde ise gitgide gerilme düşmektedir. Yüklemeye prosedürleri belirli bir tekrardan sonra hemen hemen üst üste çakışmaktadır. Mullins etkilerini gidermek için aşağıda ifade edilen test prosedürleri kullanılmıştır. Mullins etkileri zamana bağımlı olduklarından aynı MRE numuneleriyle yapılan testler arasında yeterince zaman olduğunda kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada Mullins etkisinden kaçınmak için basma testleri başlangıçta 5 defa yüklemeye-boşaltma çevrimi şeklinde gerçekleştirildi. Daha sonraki prosedürlerde ise ilk yüklemeye değerleri alınarak test sonuçları irdelenmiştir. MRE malzemelerin manyetik alansız ve manyetik alanlı olarak cevabını karakterize etmek için üç farklı test adımı uygulanmıştır.

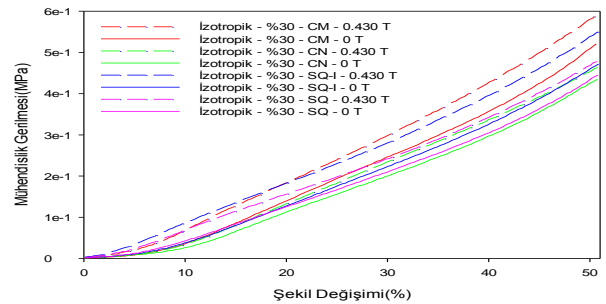
- Manyetik alan olmadığı durum için testler (prosedür 1),
- Manyetik alan etkilediği durum için test (0.430 T)(prosedür 2),
- Prosedür 1'in tekrarlandığı durum için gerçekleştirilen test (prosedür 3).

Bu test adımları gerçekleştirilirken i. ve iii. durum arasında farklar oluşmaktadır. Bu çalışmada, MR etki olarak ifade edilen dış manyetik alan etkisiyle tersinir ve hızlı davranış gösteren kompozit malzemelerin Mullins etkilerinden arındırılarak mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Manyeto-reolojik malzemeler çift komponentli bileşimlerin kimyasal reaksiyonuyla beraber saf, izotrop ve anizotrop olarak üretilmiştir. Tek eksenli basma deney cihazı yardımıyla MRE numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Aynı zamanda karbon katkılı demir tozları hacimce %30 oranında eklenmiştir.

Dört farklı toz çeşidi göz önüne alındığında izotropik numunelerin manyetik alanlı ve manyetik alansız durumda gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 4'te toplu olarak görülmektedir. Bu grafikler dikkate alındığında 0.430 T manyetik alan uygulanması neticesinde manyetik alansız duruma göre %50 şekil değişimi değerinde en fazla gerilme artışı SQ-I tozuyla üretilen malzemede gerçekleşmiştir. Bu da yaklaşık %17 gerilme artışı değerine karşı gelmektedir.



Şekil 4: İzotropik CN, CM, SQ-I, SQ tozu 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE grafiklerinin toplu gösterimi.

Aynı şekilde anizotrop numuneler göz önüne alındığında gerilme-şekil değişimi grafiklerindeki gerilme artışı, %50 şekil değişimi değerinde en fazla CN tozuyla üretilen malzemede gerçekleşmiştir. Bu da yaklaşık olarak %40 gerilme artışı değerine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde SQ-I tozuyla üretilen numunelerde ise %27 gerilme artışı görülmektedir. Buradan kalınlık yönünde manyetik partiküllerin hizalanması ile yaklaşık %20 oranında gerilme artışı olduğu görülmektedir. Şekil 5'te ise anizotropik numunelere ait gerilme-şekil değişimi grafikleri toplu olarak verilmiştir.

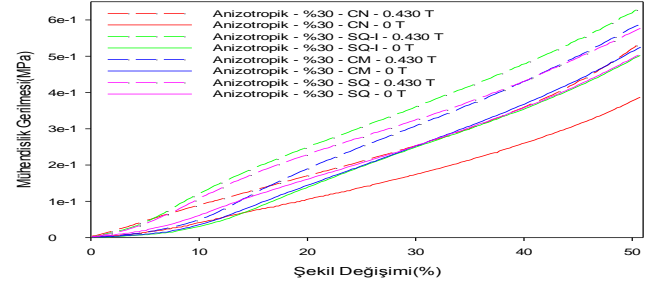
Aynı zamanda malzemelere manyetik alan uygulanması gerilme-şekil değişimi grafiklerini artırıcı etki oluşturmaktadır.

Bu özellikler MR malzemelerin manyetik olarak hassasiyetlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4'te bu artış görülebilmektedir. MR malzemeler manyetik alan etkisiyle beraber mukavemet artışı göstermektedir. Malzeme üretim sürecinde manyetik alan uygulanıp uygulanmaması da aynı şekilde mekanik özelliklere etki etmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5 grafiklerinde bu durum açıkça görülmektedir. Şekil 6'da, Şekil 4 ve Şekil 5 grafiklerinin birleştirilmesi sonucunda izotropik ve anizotropik MR malzemeler arasında kıyas yapılması sağlanmıştır. Bu durumda ise CM tozuyla üretilen malzemede herhangi bir değişim olmazken diğer üç toz ile yaklaşık %21.5 gerilme artışı gerçekleşmiştir.

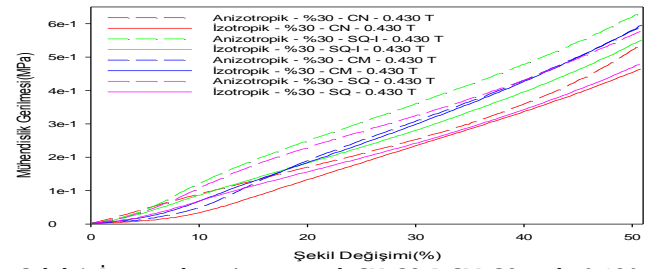
Aynı zamanda dört farklı toz oranında elde edilen MRE malzemelerini manyetik alanlı ve alanlı olarak karşılaştırmak için MR etki değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Şekil 7'den görüleceği gibi en yüksek relatif MR etki değeri %1.29 şekil değişimi değerinde SQ-I tozuyla anizotropik numunede yaklaşık 6.6279 birim değerinde elde edilmiştir. En küçük değer ise CN tozuyla 1.1150 birim değerinde bulunmuştur. Buradan SQ-I tozuyla izotrop ve anizotrop numune arasında %201 oranında artış elde edilmiştir.

Ferromanyetik toz ilavesi ve dışarıdan manyetik alan uygulanması neticesinde MRE malzemelerde lokal olarak hizalanmalar elde edilmiştir. Bu şekilde elde edilmiş malzemelerde mekanik özellikler bakımından hizalanmanın olmadığı malzemelere göre mukavemet artışı söz konusu olmaktadır.

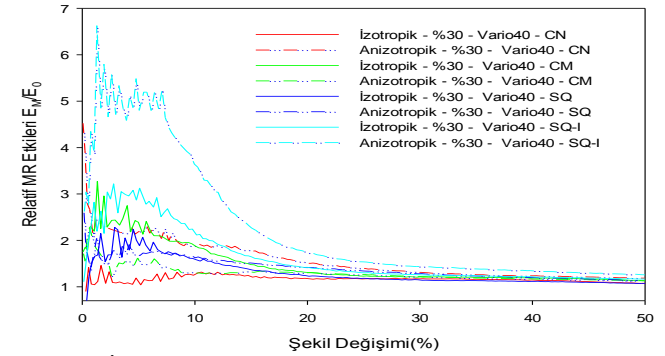
SEM görüntüleri Şekil 8'de izotropik ve anizotropik durumlar için verilmiştir. Şekil 8b'de silikon MRE numunesine uygulanan 0.3 Tesla manyetik alan ile ferromanyetik tozların lokal olarak hizalanmış görüntüsü verilmektedir.



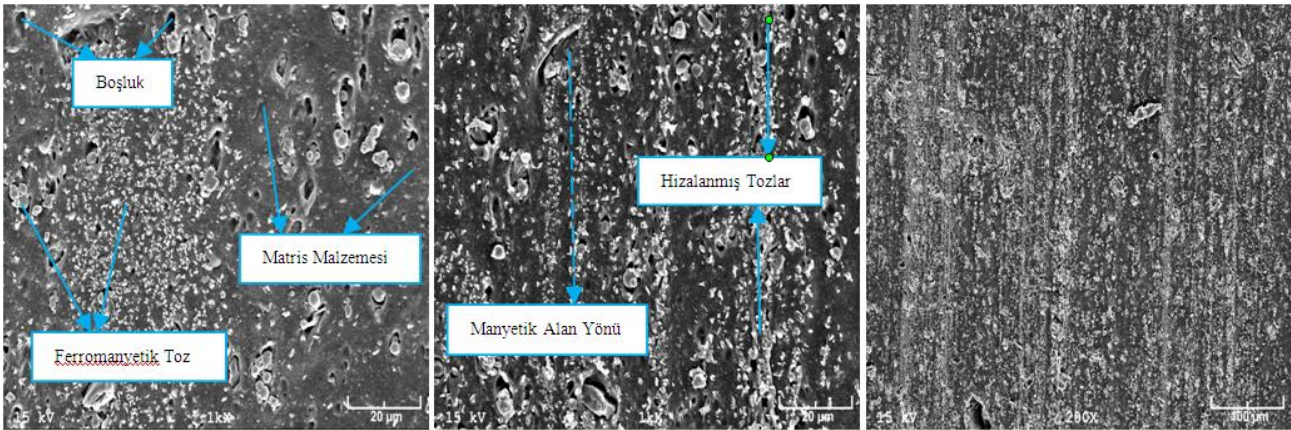
Şekil 5: Anizotropik CN, SQ-I, CM, SQ tozlu 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE grafiklerinin toplu gösterimi.



Şekil 6: İzotropik ve Anizotropik CN, SQ-I, CM, SQ tozlu 0.430 T manyetik alanlı toplu olarak verilmiş MRE malzeme grafikleri.



Şekil 7: İzotropik ve anizotropik CN, CM, SQ, SQ-I tozlarının relatif MR etki grafiklerinin toplu gösterimi.



(a): İzotrop.

(b): Anizotrop.

(c): Anizotrop(200x)

Şekil 8: Silikon kauçuk numunesine ait SEM görüntüleri.

4 Sonuçlar

Manyeto-reolojik malzemeler dolgu malzemesi olarak kullanılan manyetik partiküllerin özelliklerine göre değişik davranışlar göstermektedir. Üretilen malzemenin izotrop olduğu durumda manyetik alansız duruma göre 0.430 T manyetik alan uygulandığında %17 gerilme artışı SQ-I tozuyla elde edilmiştir. Aynı şekilde anizotrop numuneler dikkate alındığında CN tozuyla %40 gerilme artışı söz konusuken SQ-I tozunda bu oran %27 seviyelerinde kalmaktadır. İzotrop ve anizotrop malzemelerin birbirleriyle kıyası neticesinde ise CM tozunda herhangi bir değişim söz konusu olmamaktadır. Diğer üç toz partikülleriyle ise yaklaşık %21.5 gerilme artışı ortaya konulmuştur. Bu çalışmada en yüksek relatif MR etki değeri %1.29 şekil değişimi değerinde SQ-I tozuyla anizotropik numunede yaklaşık 6.6279 birim değerinde elde edilmiştir. En küçük değer ise CN tozuyla 1.1150 birim değerinde bulunmuştur. Buradan SQ-I tozuyla izotrop ve anizotrop numune arasında %201 oranında artış elde edilmiştir. Tüm elde edilen sonuçlara matris malzemesi, manyetik partiküller ve manyetik alanın şiddeti gibi parametreler etki etmektedir. Bu çalışmayla Vario 40 matris malzemeli ve CN, CM, SQ, SQ-I gibi dört farklı toz çeşidiyle testler yapılarak manyetik alanın ve tozların mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

5 Kaynaklar

- [1] Rabinow J. "The magnetic fluid clutch". *AIEE Transactions*, 67, 1308-1315, 1948.
- [2] Zhou GY, Li JR. "Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: I. Experiment". *Smart Materials and Structures*, 12(6), 859-872, 2003.
- [3] Zhou GY. "Shear properties of a magnetorheological elastomer". *Smart Materials and Structures*, 12(1), 139-146, 2003.
- [4] Lokander M, Stenberg B. "Performance of isotropic magnetorheological rubber materials". *Polymer Testing*, 22(3), 245-251, 2002.
- [5] Davis LC. "Model of magnetorheological elastomers". *Journal Applied Physics*, 85(6), 3348-3351, 1999.
- [6] Bose H, Roder R. US Patent 7.608.197 B2. Magnetorheological Elastomers and use thereof, 2009b.
- [7] Elie L, Ginder J, Mark J, Nichols M. Us Patent 5.814.999. method and apparatus for measuring displacement and force, 1998.
- [8] Klukowski C, Meier R. "Adaptive linear crash systems-intelligent materials for passenger car steering column". *ThyssenKrupp techforum*, 1, 41-47, 2006.
- [9] Brei D, Redmond J, Wilmot N, Browne A, Johnson N, Jones G. US patent application US 2006/0012191 A1. Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use 2006.
- [10] Browne A, Johnson N. US Patent 7.029.056 B2. Closure lockdown assemblies and methods of utilizing active materials, 2006.
- [11] Lerner A, Cunefar K. US Patent 7,102,474 B2. Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with a variable gap length and methods and systems therefor, 2006.
- [12] Lokander M, Stenberg B. "Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials". *Polymer Testing*, 22(6), 677-680, 2003.
- [13] Ginder JM. "Rheology Controlled by Magnetic Fields". *Encyclopedia of Applied Physics*, 16, 487-503, 1996.
- [14] Ginder JM, Nichols ME, Elie LD, Tardiff JL. "Magnetorheological elastomers: Properties and applications". *SPIE-The International Society for Optical Engineering. Proceedings of the 1999 Smart Structures and Materials on Smart Materials Technologies*, Newport Beach, CA, USA, 3-4 March 1999.
- [15] Schubert G, Harrison P. "Large-strain behaviour of Magneto-Rheological Elastomers tested under uniaxial compression and tension, and pure shear deformations". *Polymer Testing*, 42, 122-134, 2015.