



T.C.
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

**MANYETO-REOLOJİK KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

FHD-2016-5491

Hızlı Destek Projesi (BAP2)

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Recep GÜMRÜK
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği

Yrd. Doç. Dr. Cemalettin AYGÜN, Arş. Gör. Uğur MAZLUM
Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği

Kasım 2016

TRABZON

TEŐEKKÖR

Bu alıŐma Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiŐtir. Çalışma süresince desteğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Recep GÖMRÖK ve Yrd. Doç. Dr. Cemalettin AYGÖN'e teŐekkÖrlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	5
ABSTRACT	5
1. GİRİŞ	5
2. GENEL BİLGİLER	6
3. GEREÇ VE YÖNTEM	9
3. 1. Malzeme	9
3. 2. Numune Üretimi	10
3. 3. Test Düzenegi	11
3.4. Test Prosedürü	12
4. BULGULAR	13
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	36
6. KAYNAKLAR	38

ÖZET

Manyeto-reolojik(MR) malzemeler dış manyetik alan uygulamalarıyla tersinir ve hızlı bir şekilde kontrol edilebilen reolojik özelliklere sahip olan akıllı(smart) malzeme sınıfındandır. Manyeto-reolojik etkilerle beraber kauçuk türü malzemeler daha fonksiyonel bir kullanıma sahip olmuştur. Bundan dolayı, bu proje kapsamında kauçuk türü malzemelere ferromanyetik toz ilavesinin ve manyetik alan uygulanmasının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzemeler genellikle ses kontrolü sistemlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca manyetik olarak kontrol edilebilen damperler, frenler, süspansiyon burçları ve şok izolasyonları gibi pek çok kullanım alanlarına sahiptirler. Bu projede RTV (Room Temperature Vulcanization) silikon matris malzemesi ve karbon katkılı demir tozu dolgu malzemesi kullanılmıştır. Kompozit malzemeler izotrop(manyetik alan olmadığı durum) ve anizotrop(manyetik alan olduğu durum) olarak üretildi ve tek eksenli basma test cihazında mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca basma test cihazına adapte edilmiş olan manyetik alan cihazıyla beraber kompozit malzemelerin MR etkileri tespit edilmiştir

Anahtar Kelimeler: RTV silikon kauçuk, ferromanyetik toz, manyetik alan, Kompozit malzemeler

ABSTRACT

Magneto-Rheological Elastomers are smart materials whose properties can be altered reversibly and almost instantaneously by the application of external magnetic fields. Rubber-like materials has a more functional use with magneto-rheological effect. Therefore, in the scope of this project was investigated the effect mechanical properties of addition of the ferromagnetic powder and of the effect of the magnetic field is applied to rubber-like materials. Composite materials use typically are used in Control Systems. Also use the magnetically controlled dampers, brakes, suspension bushings and many usages, such as shock isolation. In this project, RTV (room temperature vulcanization) silicone matrix material and a carbonyl iron powder has been used. Composite materials produced as isotropic(without magnetic field) and anisotropic(magnetic field) and the mechanical properties were determined in the uniaxial compression testing machine. Also the value of relative MR effect of composite materials were determined with magnetic field device which is adapted to compression testing machine

Keywords: RTV silicone rubber, ferromagnetic powder, magnetic field, composite materials

1. GİRİŞ

Manyeto-reolojik kompozit malzeme üretim sürecinde nem, sıcaklık vb. gibi ortam koşullarını içeren pek çok parametre karşımıza çıkmaktadır. Mekanik özellikler bakımından elde edilen kompozit malzemelerin aynı koşulları ihtiva etmesi gerekmektedir. Farklı zamanlarda üretilen kompozit malzemelerin yaklaşık olarak aynı olması yapılan çalışmanın güvenilirliği açısından önemlidir. Bu yüzden KTÜ Makine mühendisliği laboratuvarında kompozit malzeme üretimi için koşullandırılmış bir ortam oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca laboratuvarında mevcut tek eksenli test cihazına aparatlar ilave edilmiştir. Bu şekilde

kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu malzemelerin daha fonksiyonel hale nasıl getirileceğinin araştırılması amaçlanmıştır. Yapılmış olan çalışmalar neticesinde büyük şekil değişimlerine (%50) kadar basma davranışına maruz bırakılmış olan kompozit malzemelerin izotrop ve anizotrop durumda manyeto-reolojik özellikler bakımından yaklaşık % 200 oranında bir artış gösterdiği ortaya konulmak istenmektedir. Aynı zamanda elde edilen saf, izotrop ve anizotrop durumundaki malzemelerin gerilme değerleri göz önüne alındığında %50'lere varan artışların grafiksel olarak gösterilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada farklı toz çeşidi ve oranlarının kullanılması ve aynı zamanda elektromanyetik sarımlı test düzeneğine sahip olması açısından literatürdeki çalışmalardan farklılık göstermektedir.

Manyeto-reolojik malzemeler günümüzde pek çok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu malzemeler özellikle kauçuk türü malzemeler göz önüne alındığında elastomer, akışkan ve köpük olarak çeşitli şekillerde üretilebilir. Üretimi kolay olması ve MR etkiler bakımından iyi sonuçlar vermesi gibi pek çok parametre dikkate alındığında RTV silikon kauçuk malzemeleri uygulamalarda çok fazla kullanılmaktadır. Çalışmada farklı sertlikteki silikon matris malzemelerine manyetik alana duyarlı mikron boyutlarındaki tozlar ilave edilmesi sonucunda mekanik özelliklerdeki değişim ifade edilmektedir. Aynı zamanda manyetik alan parametresinin kompozit malzeme üretim sürecinde ve tek eksenli basma test cihazıyla deneyler yapılırken etkisi dikkate alınmaktadır. Buna göre test cihazına adapte edilmiş olan manyetik sarım, veri işleme kartı, hız ünitesi ve bağlantı kartı gibi cihazlar vasıtasıyla farklı manyetik alan değerlerinin etkisi ve sonuçların grafiksel olarak yorumlanması sağlanmıştır. Bu çalışmada farklı sertlik değerlerinde üretilen kompozit malzemelerin manyetik alana duyarlılıkları dikkate alınarak en uygun malzeme üretilmiş bulunmaktadır. Bu malzemelerin yüksek hızlarda çarpma testlerinde ne tür davranış gösterdiklerinin test edilmesi gerekmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

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 etkidiği 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 başladı. 2000 yılından sonrada gelişmeye başladı. Hem malzemeyi hemde 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 yerdeğişimi 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 yönlenmesi 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 katkılı demir partikülleri mikrometre çaplarında MR malzemeler için çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [13, 14].

Manyeto-reolojik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi yönelik çalışmalar 1983 yılında Rigbi and Jilken (1983) elastomer malzemelerine yönelik çalışmaları ile devam etmiştir [15]. En önemli gelişim süreci ise 2002 yılında küçük şekil değişimleri göz önüne alınarak yapılan dinamik kayma testleriyle ortaya konulmuştur. Deneysel olarak basma testleriyle MR kompozit malzemelerin özelliklerini belirleme, 2005 yılında Farshad ve Le Roux tarafından yapılmıştır [16]. Farshad ve Le Roux (2005) test cihazının bir tarafına mıknatıs yerleştirmek suretiyle basma testleri yapmışlardır. Ancak bu durumda mıknatıs ile elde edilen manyetik alanın uniform dağılımında problem ortaya çıkmıştır. Farshad and Benine (2004) yılında karşılıklı mıknatıs yerleştirerek testlerini gerçekleştirmiş fakat test yapılırken manyetik alan şiddetinde mesafe değişikliğine bağlı olarak azalma gerçekleştiği için uygun olmamıştır [17]. Mıknatıs dışında ilk çalışma Kallio (2005) tarafından yüzük şekilli sarım vasıtasıyla yaklaşık 1 Tesla uniform manyetik alan uygulanarak gerçekleştirilmiştir [18]. Bu çalışmada 700 mT üzerinde doyuma ulaşıldığı ve %100 seviyesinde relatif etki olduğu gözlenmiştir. Manyetik alanın etkiyebileceği tüm yönleri dikkate alarak manyetik indüksiyonla basma testleri yapılmıştır [19,20]. Deneysel verileri Neo-Hookean model ile kıyaslamasını yapmıştır. En yüksek MR etki değerini, manyetik alan yükleme yönüne paralel ve %30 ağırlıkça toz oranında %58 olarak bulmuştur. Abramchuk (2006) yılında MRE'lerin yükleme-boşaltma davranışını araştırmak için basma testleri gerçekleştirmiştir [21]. Kauçuk türü malzemelerde kalıcı deformasyon etkisi söz konusu olmaktadır. Eğer yüksek şekil değişimi söz konusu olduğunda kalıcı deformasyonu azaltmaya yönelik çalışma yapılmak zorundadır. Bu da mullins etkilerini göz önüne alarak çalışma yapılmıştır [22]. Anizotropik silikon ve poliüretan temelli MRE malzemelerin tek eksenli basma testleri yapılmıştır [23]. En yüksek MR etki değerini ise silikon kauçuk matris malzemesi kullanarak bulmuştur. Gordaninejad et al. (2012) ise sadece %20 şekil değişimi değerine kadar basma yapmamış aynı zamanda %15 şekil değişimi değerine kadar basit

kayma yapmıştır [24]. 2014 yılında Schubert (2014) yaklaşık %50 şekil değişimi değerine kadar silikon türü MR malzemeyi deforme ederek basma testleri yapmıştır [15]. Çalışmayı test düzeneğine karşılıklı mıknatıs yerleştirmek suretiyle elde ettiği iki farklı manyetik alan değeri için yapmıştır. En yüksek MR etki değerini tek eksenli çekme deneyi altında %284 olarak tespit etmiştir. Manyeto-reolojik malzemeler üzerine yüksek şekil değiştirme hızlarında testler son birkaç yıldır yapılmaya başlanmıştır. Liao (2013) yılında yüksek şekil değiştirme hızlarında MR malzemelerin dinamik basma özelliklerini araştırmak için split hopkinson bar sistemi kullanmıştır [26]. Sonuçta şekil değiştirme hızı ve manyetik alanın artışıyla gerilmenin ve MR etkinin arttığını gözlemlemiştir.

Yapılan çalışmada, silikon kauçuk malzemesi saf, izotrop ve anizotrop olarak 5 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 optimum malzemenin elde edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca manyetik partikül ilavesinin mukavemet değerlerine ne gibi etkisi olduğu ortaya konulmuştur.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Malzeme

Yapılan çalışmada matris malzemesi olarak oda sıcaklığında vulkanize olan Dragon Skin FX Pro silikon kauçuk kullanılmıştır. Ayrıca matris malzemesine BASF firmasından temin edilmiş olan ortalama 3.8 – 9.5 µm aralığında değişen beş farklı ferromanyetik karbon katkılı demir tozu (BASF CN, EM, CM, SQ, SQ-I) ilave edilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2’de matris malzemesine ve karbon katkılı demir tozlarına ait teknik bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. Matris malzemesine ait teknik bilgiler

<i>Matris malzemesi</i>	<i>Renk</i>	<i>Yoğunluk</i>	<i>Viskozite</i>	<i>Pişme zamanı</i>	<i>Sertlik</i>	<i>Çekme Mukavemeti</i>	<i>Kopma Uzaması</i>	<i>Yırtılma Mukavemeti</i>
Dragon Skin FX Pro	<i>Yarı Şeffaf</i>	1.062 g/cm ³	18000 mPas	40 dakika	Shore A2	1,98 N/mm ²	%763	10,68 N/mm

Tablo 2. Ferromanyetik karbon katkılı demir tozlarına ait teknik bilgiler

<i>Ferromanyetik Tozlar</i>	<i>Fe min. (%)</i>	<i>C maks. (%)</i>	<i>O maks. (%)</i>	<i>N maks. (%)</i>	<i>Partikül Boyutu (μm)</i>	<i>Geçirgenlik</i>	<i>Özdirenç (ohm)</i>
<i>BASF SQ-I</i>	98.5	0.03	0.7	-	3.8–5.4	<i>Min 28</i>	<i>Min 10</i>
<i>BASF CM</i>	99.5	0.03	0.1–0.25	0.01	7–9.5	-	-
<i>BASF CN</i>	99.5	0.03	0.1–0.25	0.01	6.5–8	-	-
<i>BASF SQ</i>	99.5	0.05	0.22	-	3.9–5	-	-
<i>BASF EM</i>	97	0.65-0.85	0.1-0.3	0.6-0.8	4.5-6	-	-

3.2. Numune Üretimi

Dragon Skin FX Pro 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 dakika süreyle iyice karıştırılmıştır. Daha sonra oluşan hava kabarcıklarını gidermek için karışım kalıba dökülmeden önce vakum pompasıyla 10 dakika vakum uygulanmıştır. Elde edilen karışım 70*40 mm pleksi glass plakadan 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında kalıba (Şekil 1) döküldü ve 70 °C de 20 dakika fırınlanarak vulkanize edilmiş ve bu şekilde izotrop malzeme üretilmiştir. Ayrıca malzeme üretilirken Şekil 2’de görülen manyetik alan cihazıyla yaklaşık 0.2 T manyetik alan uygulandığında ise anizotropik malzeme üretilebilmektedir. Saf ve izotropik numuneler şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1: Kalıp

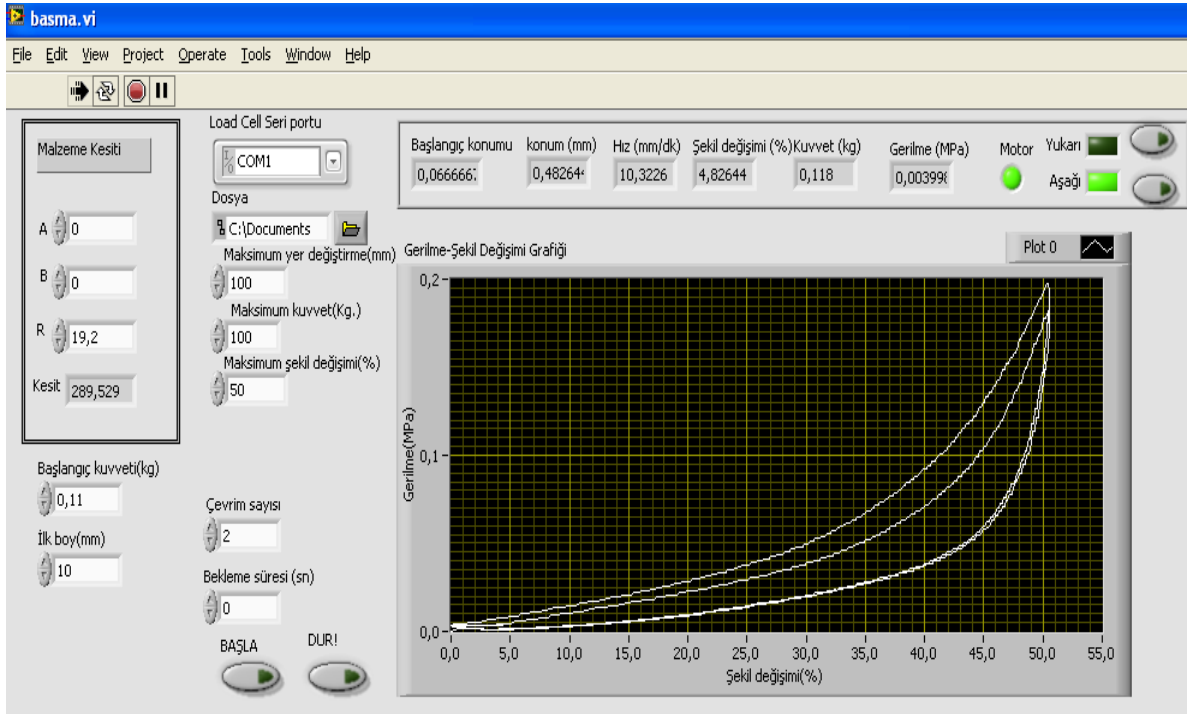


Şekil 2: saf ve izotropik numune

3.3. Test Düzenegi

Kauçuk türü kompozit malzemelerin koşullandırılmış bir ortamda üretilebilmesi için klima, elde edilen malzemelerin sertlik değerlerinin tespiti için sertlik ölçüm cihazı gibi malzemeler alındı. Aynı zamanda bilgisayara LabView ortamında program(şekil3) yazdırılarak elde edilen numunelerin testlerinin yapımına hazır hale getirilmiştir.

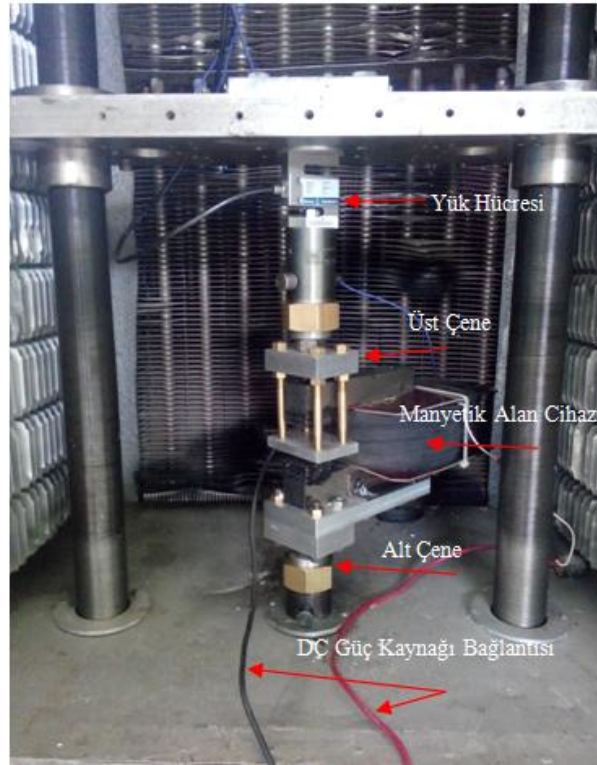
Program yardımıyla dairesel ve dörtgenel numunelerin test edilmesi için kesiti A, B ve R değerlerinden hesaplanmaktadır. Aynı zamanda numunenin kalınlık değerleri ilk boy olarak istenmektedir. Verilerin text dosyasına kaydedilmesi için dosya sekmesi oluşturuldu. Maksimum şekil değişimi, çevrim sayısı ve bekleme süresi gibi değerler deney başlamadan girilmesi gerekmektedir. Motorun hareketi aşağı-yukarı sekmeleriyle elle kontrol edilebilmektedir. Başlangıç konumu, gerilme değeri arasındaki değerler otomatik olarak enkoder yardımıyla alınmaktadır. Grafiğin ara yüzü sağ alt köşede senkronize olarak görülmektedir.



Şekil 3: Tek Eksenli Basma Test Programı

Testler şekil 4'te görülen tek eksenli basma test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Basma testi için 10 mm/dakika hız değeri alınarak numunenin %50 şekil değişimi değerine kadar yüklenmesi sağlanmıştır. Test düzeneği için manyetik alandan etkilenmeyen alüminyum ve pirinç malzemelerinden üretilmiş olan basma çenesi tasarımı yapılmış ve bu düzeneğe

elektromanyetik sarım ilave edilerek 0,430 Tesla manyetik alan altında deneyler yapılmıştır. Manyetik alan düzeği için 0,9 mm çapında bakır tel ile C tipi silisyum sa nüvenin etrafına 4000 sarım yapılmıştır. Direnç değeri 40 ohm dur. DC güç kaynağı ile 5 amper akım değerine kadar beslenmesi sağlanmıştır. 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 4. Tek Eksenli Basma Deney Düzeneği

3.4. Test Prosedürü

Manyeto-reolojik malzemelere, kalıcı deformasyon etkisini gidermek ve test sonuçlarının uygun değerlere ulaşmasını sağlamak amacıyla test prosedürleri uygulanmıştır. En yüksek gerilme ilk yükleme-boşaltma 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 (0,430 T) (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 [15]. 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. Tanjant modülü değerleri (1) ve relatif MR etki değerleri ise (2) denklemi ile hesaplanır.

$$E_M = \sigma_M / \epsilon_M \quad , \quad E_0 = \sigma_0 / \epsilon_0 \quad (1)$$

Burada σ_M ; 0,430 T manyetik alan altında elde edilen gerilme, ϵ_M ; 0,430 T manyetik alan altında elde edilen şekil değişimi, σ_0 ; 0 T manyetik alan altında elde edilen gerilme, ϵ_0 ; 0 T manyetik alan altında elde edilen şekil değişimi,

$$MR_{rel} = E_M / E_0 \quad (2)$$

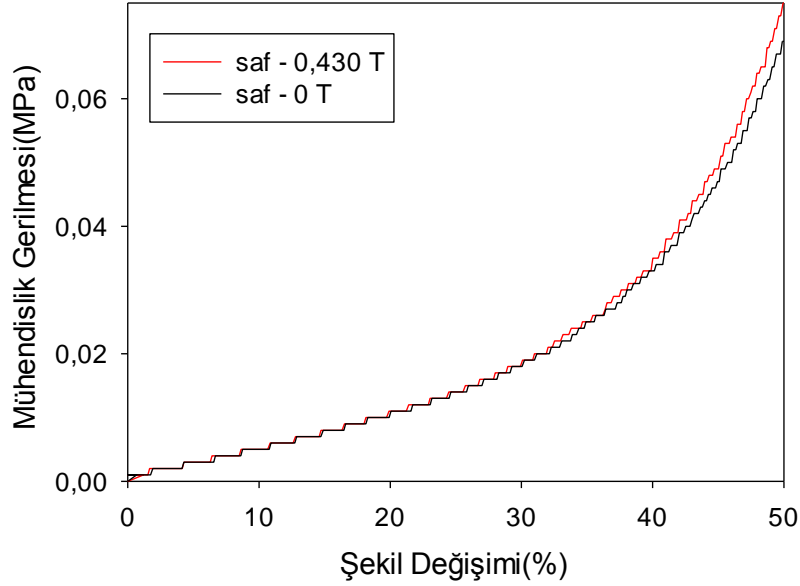
Ayrıca E_M manyetik alanlı elastisite modülü, E_0 ; manyetik alansız elastisite modülü olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, farklı tip silikon kauçuk temelli kompozit malzemelerin Mullins etkilerinden arındırılarak mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve MR etki parametrelerinin 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 uygun özelliklere sahip olması için çalışmalar yapılabilecektir.

4. BULGULAR

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 %10, 20, 30, 40 oranında ilave edilerek en uygun toz oranı % 30 olarak belirlenmiş ve tüm toz oranlarında bu oran kullanılmak suretiyle testler yapılmıştır.

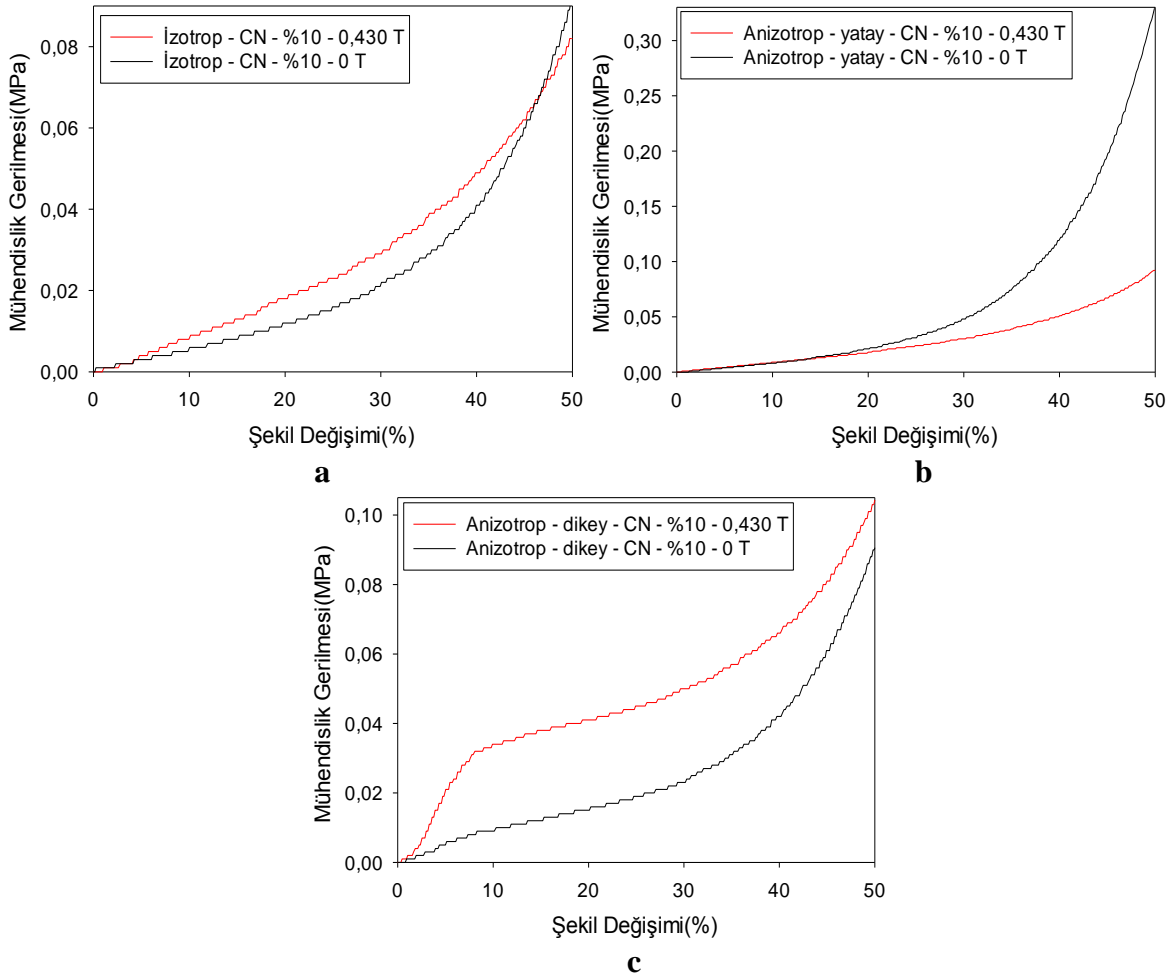
Çalışma shore A2 sertliğindeki silikon kauçuk malzemesiyle yapılmıştır. Literatürde çalışmalar genellikle shore A25 değerlerinden yüksek sertlik değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Silikon kauçuğuna ait gerilme-şekil değişimi grafiği manyetik alansız ve 0,430 T manyetik alan altında şekil 5'te görülmektedir. Testler %50 şekil değişimi değerine kadar yapılmıştır. Farshad ve le roux(2005) % 30 değerine, kallio(2005) % 6 ve

Schubert(2015) ise % 50 şekil değişimi değerine kadar testler yapmışlardır. Şekil 5'te %50 şekil değişimi değerinde 0,08 MPa gerilme değeri elde edilmiştir. Manyetik alanın saf numune üzerinde etkisinin olmadığı grafiklerin hemen hemen üst üste çakışmasından anlaşılabilir.



Şekil 5. Saf silikon malzemesinin 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı kıyası

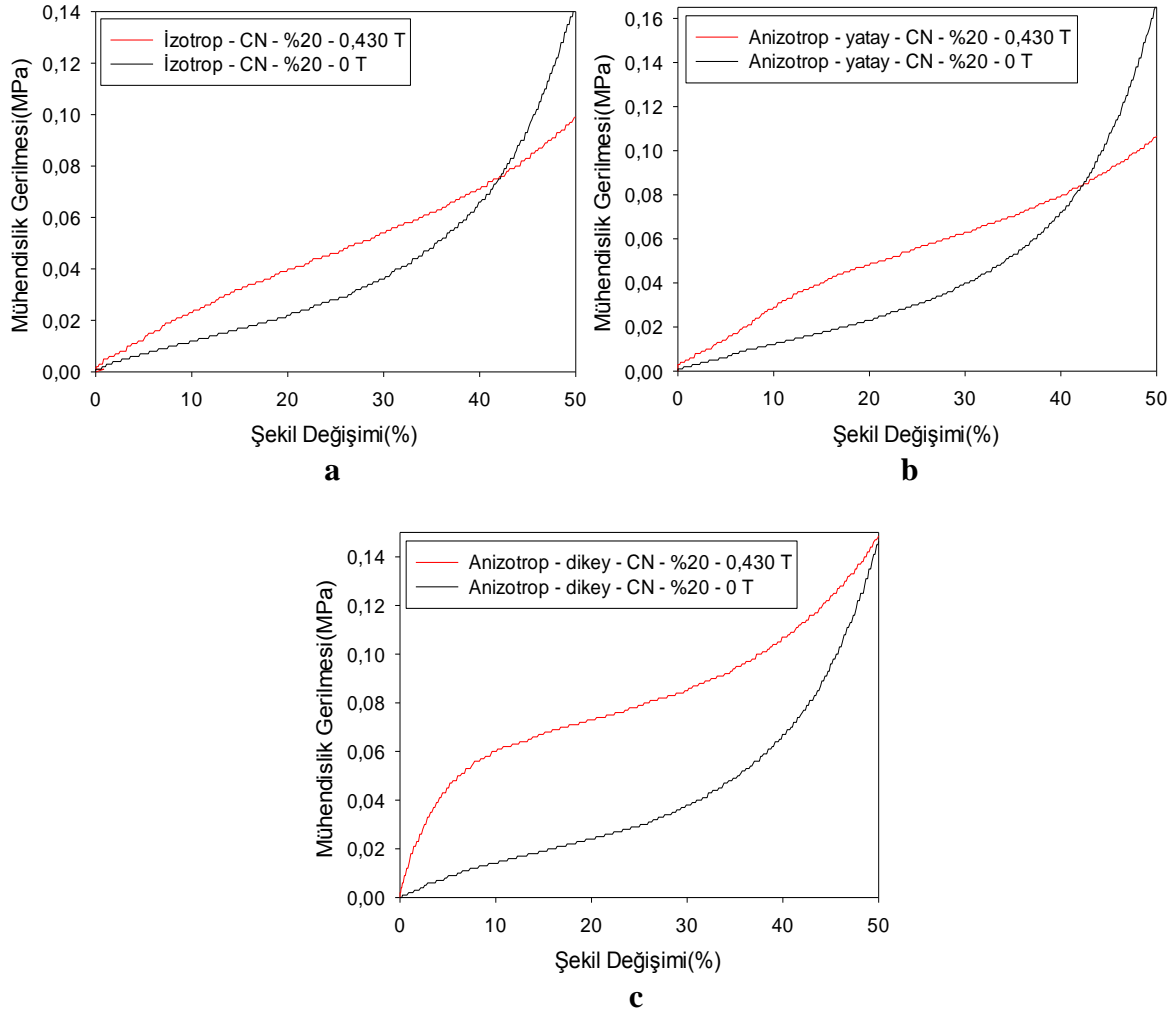
Farklı toz çeşitleriyle testler yapılırken en uygun toz çeşidinin ve toz oranının belirlenmesi gerekmektedir. Mukavemet değerlerinin yüksek olması, manyetik alana duyarlılığı ve matris malzemesiyle uyum sağlaması gibi parametreler en uygun tozun belirlenmesinde önemlidir. Aşağıda bu şekilde tespit edilmiş olan CN tozunun %10, 20, 30, 40 oranlarında izotrop, yatay ve dikey anizotrop grafikleri manyetik alan etkilediği durumda ve 0,430 T manyetik alan altında gerilme şekil değişimi grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerin toplu olarak kıyasının yapılabilmesi için grafikler aynı grafik üzerinde verilmiştir. Şekil 6, %10 toz oranında izotrop, yatay ve dikey anizotrop MRE malzemesine ait 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında gerilme şekil değişimi grafiklerini göstermektedir. Şekil 6a grafiğinde izotrop durum için %30 şekil değişimi değerinde %36 gerilme artışı söz konusudur. Şekil 6b'de yatay (basma eksenine dik) olarak yönlendirilmiş anizotrop numuneler için elde edilen grafikte manyetik alan ile gerilme düşüşü söz konusu olmaktadır. En fazla gerilme artışı dikey (basma eksenine paralel) yönlendirilmiş numunelerde elde edilmektedir. Şekil 6c'de bu değer %10 şekil değişimi değerinde %277 olarak bulunmuştur.



Şekil 6. %10 CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE grafiklerinin kıyası

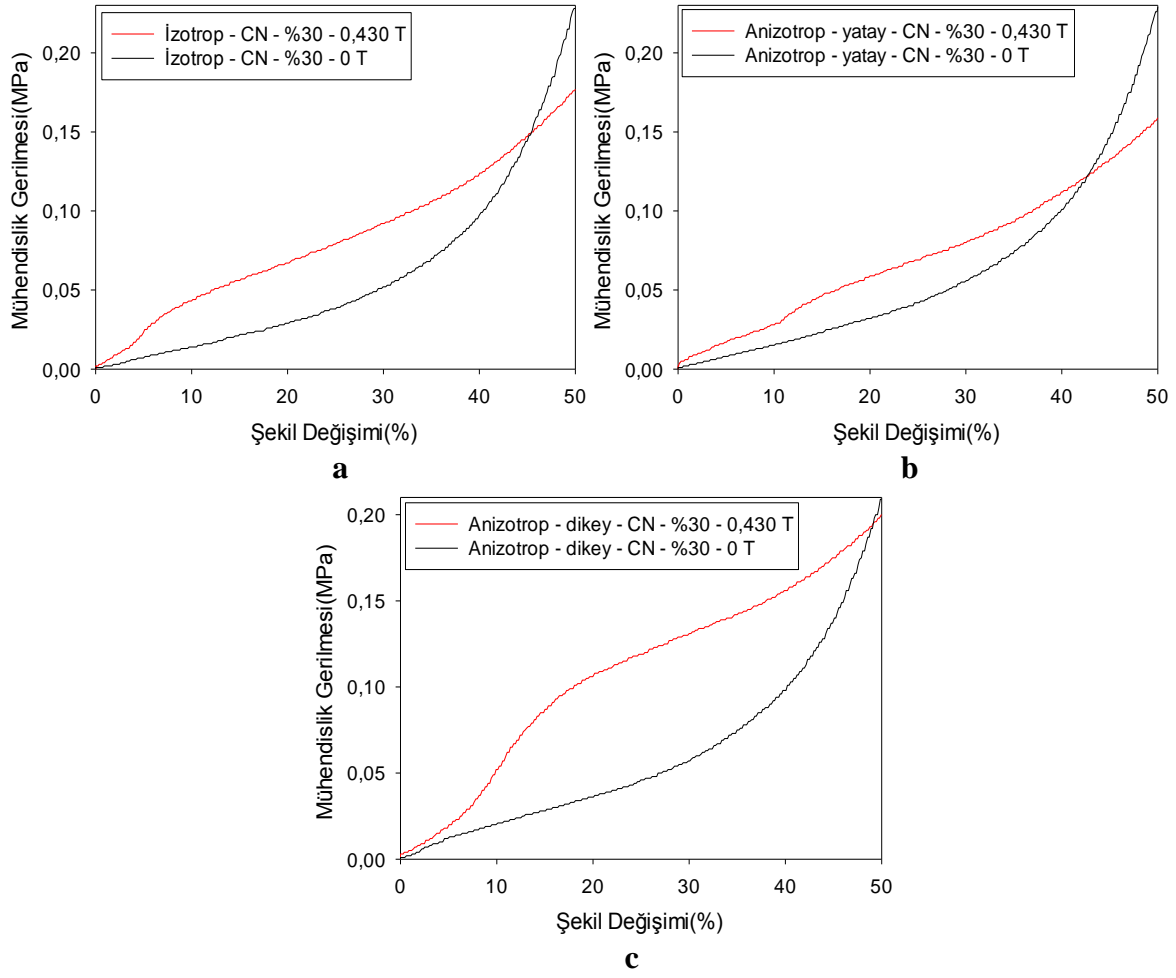
Aynı şekilde %20 toz oranında izotrop, yatay ve dikey anizotrop MRE malzemesine ait 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında gerilme şekil değişimi grafikleri şekil 7'de görülmektedir. Şekil 7a grafiğinde izotrop durum için % 25 şekil değişimi değerinde % 64 gerilme artışı söz konusudur. Şekil 7b'de yatay olarak yönlendirilmiş anizotrop numunelerde bu oran %20 şekil değişimi değerinde %113 iken, şekil 7c'deki dikey (basma eksenine paralel) yönlendirilmiş numunelerde ise %10 şekil değişimi değerinde %328 gerilme artışı elde edilmektedir.

Toz oranının artışıyla beraber manyeto-reolojik malzemelerin manyetik alana duyarlılıkları da artmaktadır. Manyetik alanın %40 şekil değişimi değerinden sonra azalma eğilimi göstermesi neticesinde manyetik alansız test prosedürü ile elde edilen grafiklerle çakışma durumu söz konusu olmaktadır. Bu toz oranında izotrop ve anizotrop yatay ve dikey yönlendirilmiş numunelerde söz konusu iken dikey yönlendirilmiş numunede %50 şekil değişiminde çakışma söz konusudur.



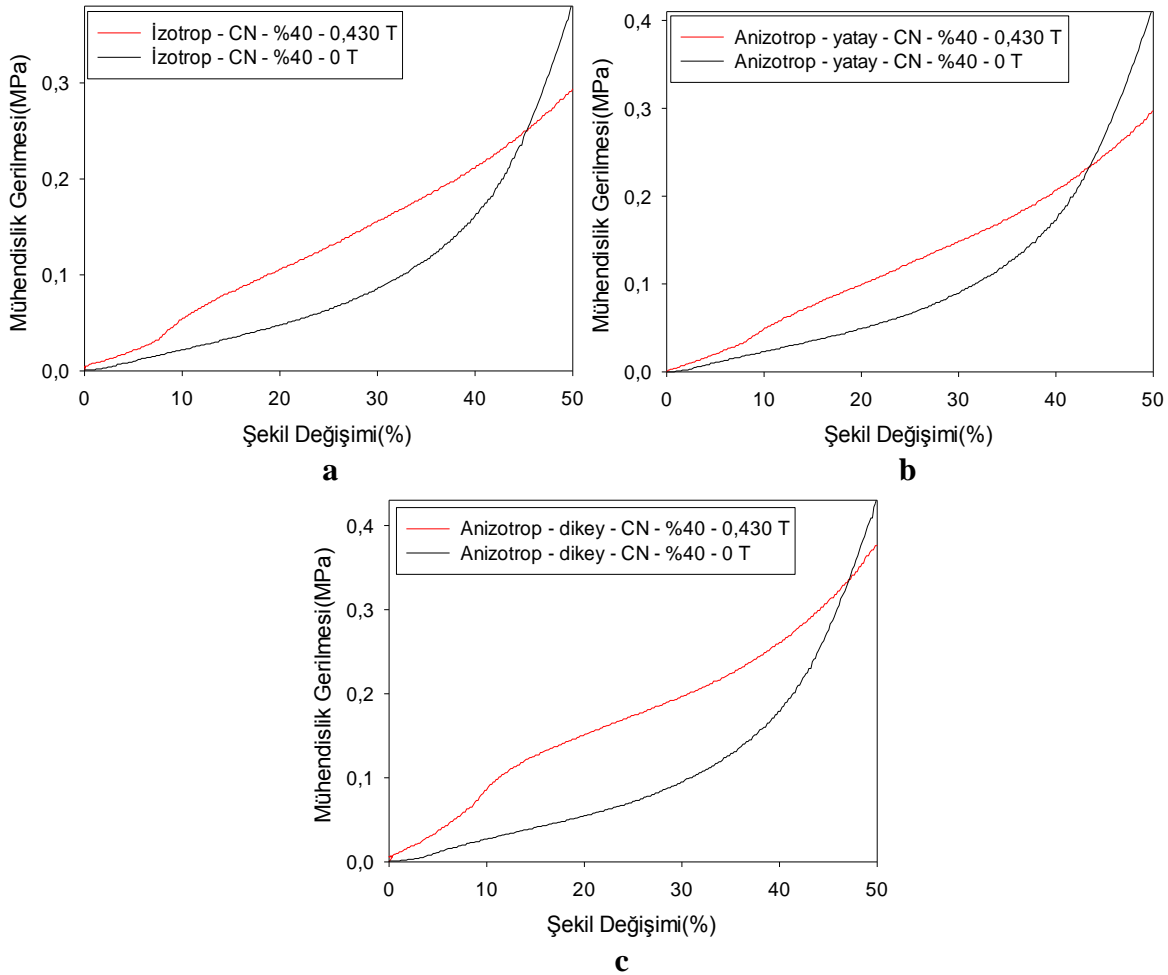
Şekil 7. %20 CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE grafiklerinin kıyası

Yukarıda %20 toz oranındaki izotrop, yatay ve dikey anizotrop MRE numuneleri için ifade edilen durumlar %30 toz oranı içinde geçerlidir. Burada şekil 8a grafiğinde izotrop durum için % 20 şekil değişimi değerinde % 131 gerilme artışı söz konusudur. Şekil 8b’de yatay olarak yönlendirilmiş anizotrop numunelerde bu oran %20 şekil değişimi değerinde %75 iken, şekil 8c’deki dikey yönlendirilmiş numunelerde ise %25 şekil değişimi değerinde %158 gerilme artışı elde edilmektedir.



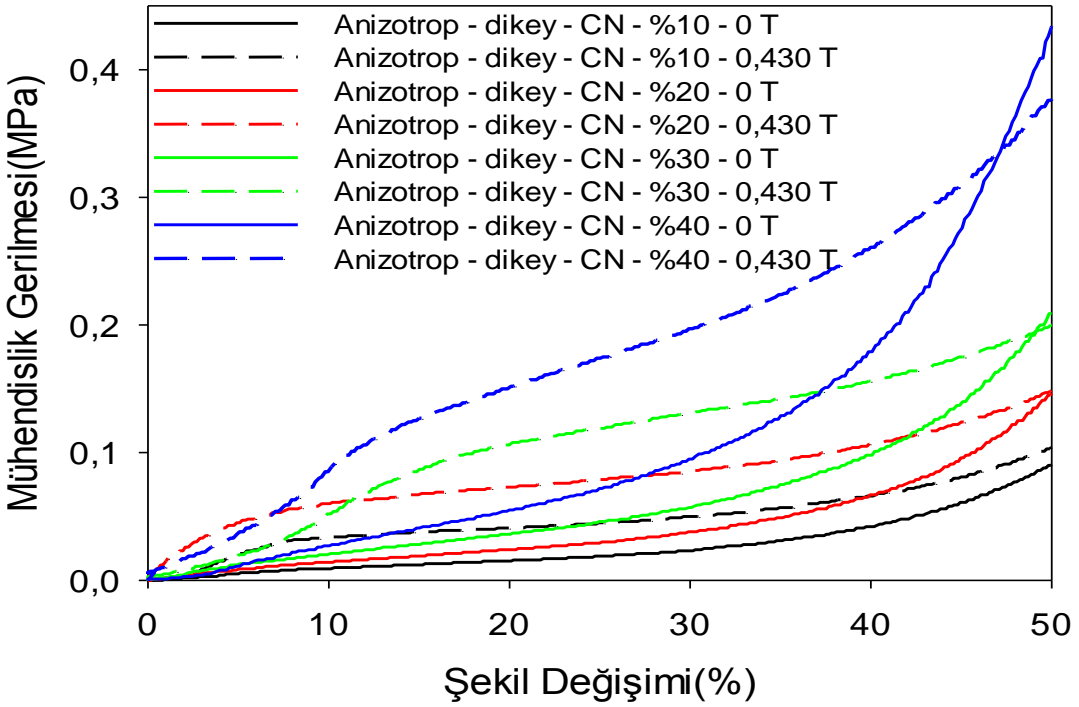
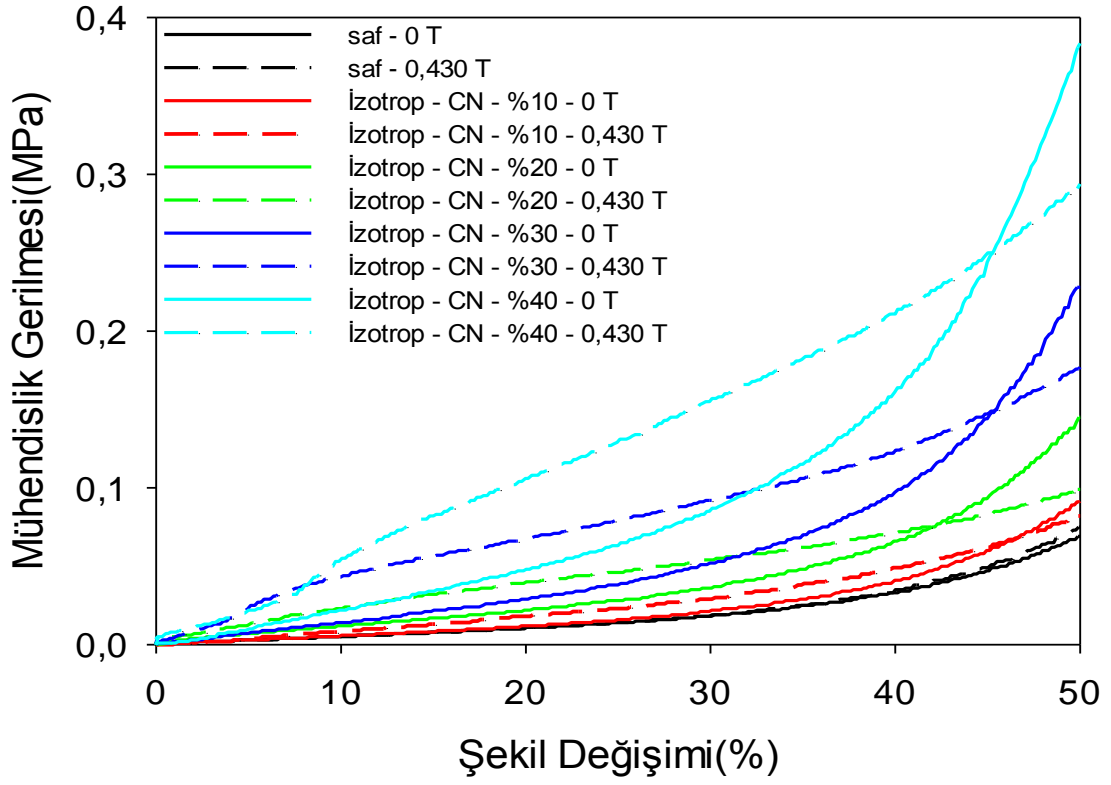
Şekil 8. %30 CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE grafiklerinin kıyası

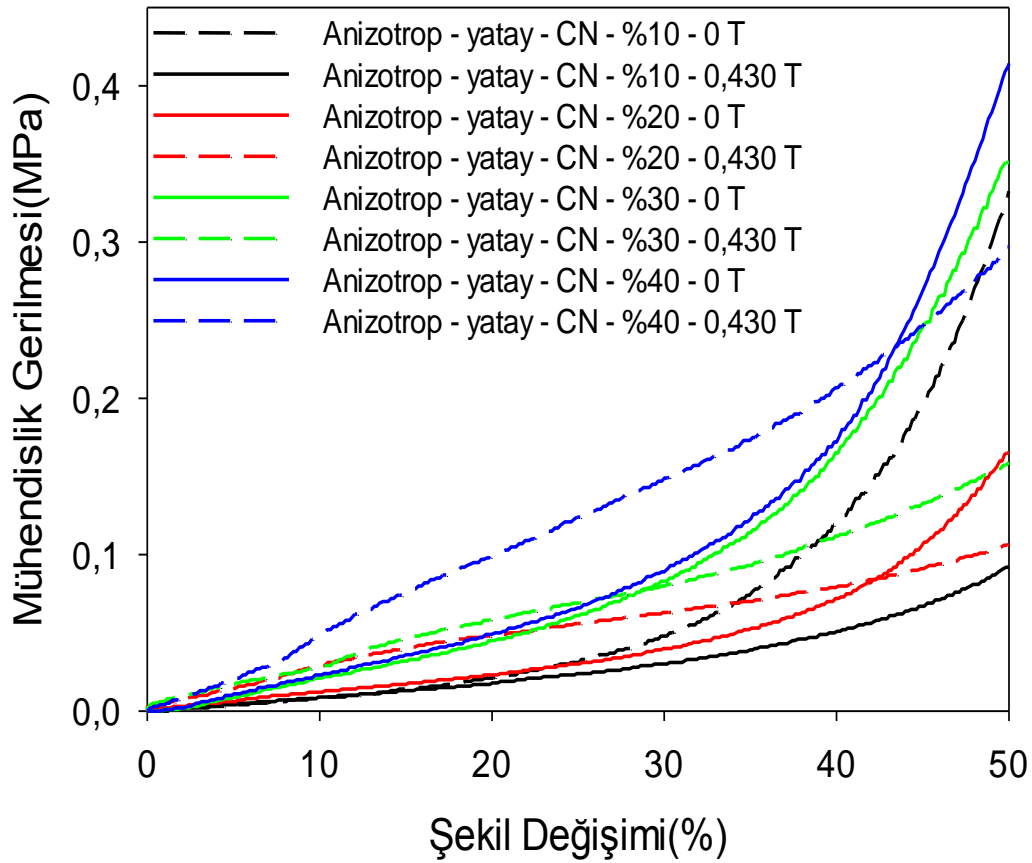
%40 toz oranı göz önüne alındığında ise izotrop, yatay ve dikey anizotrop MRE numuneleri için elde edilen grafik şekil 9'da görülmektedir. Şekil 9a grafiğinde izotrop durum için % 20 şekil değişimi değerinde % 116 gerilme artışı söz konusudur. Şekil 9b'de yatay olarak yönlendirilmiş anizotrop numunelerde bu oran %20 şekil değişimi değerinde %96 iken, şekil 9c'deki dikey yönlendirilmiş numunelerde ise %25 şekil değişimi değerinde %133 gerilme artışı elde edilmektedir.



Şekil 9. %40 CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE grafiklerinin kıyası

Dört farklı toz oranında CN tozu kullanılarak üretilen numunelerin test sonuçları izotrop, anizotrop yatay ve dikey olarak ayrı ayrı grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 6, 7, 8, 9 grafiklerinin toplu olarak gösterilmesi neticesinde gerilme değerleri bakımından artış oranı belirlenmiştir. Bu bakımdan üç ayrı durum için kıyas grafikleri çizilmiştir. Şekil 10'da izotropik CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafikleri farklı toz oranları için toplu olarak gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi toz oranının artışı neticesinde gerilme değerleri paralel olarak artmaktadır. %40 şekil değişimi değerinde en büyük gerilme değeri 0,211 MPa ile % 40 toz oranındaki numunede elde edilmiştir. En küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,035 MPa bulunmuştur. Çalışmada önemli olan manyetik alan etkisiyle beraber gerilmedeki artışın yüksek olmasıdır. Şekil 11'de en büyük gerilme değeri 0,249 MPa ile % 40 toz oranında, en küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,042 MPa bulunmuştur. Aynı şekilde şekil 12'de ise maksimum gerilme 0,2 MPa iken en küçük gerilme ise 0,047 MPa olarak belirlenmiştir.





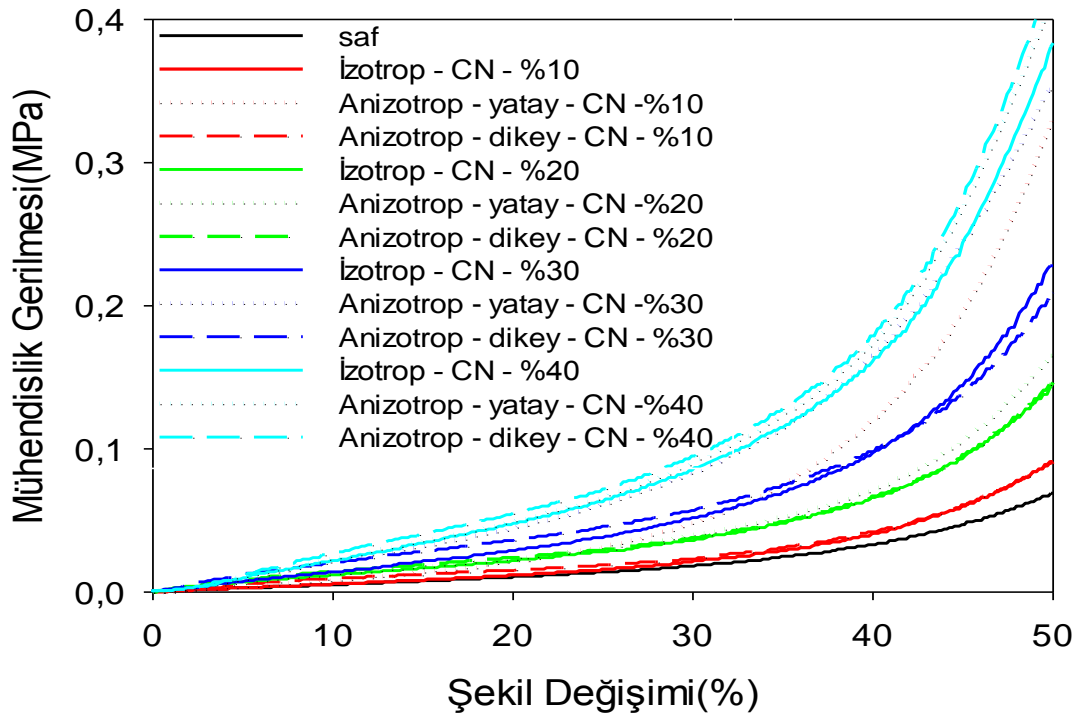
Şekil 12. Anizotropik(yatay) CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin farklı toz oranlarında toplu gösterimi

Tablo 3'te izotrop, anizotrop yatay ve dikey durumlar için şekil 10, 11 ve 12'den elde edilen gerilme artışı değerleri verilmiştir. Tablodan her üç durum için artış oranlarında göz önüne alındığında %30 toz oranı için gerilme değerlerinin en uygun malzeme özelliklerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı kullanılan matris malzemesine ilave edilen toz oranı %30 alınarak CM, SQ, SQ-I ve EM tozları içinde numuneler üretilmiş ve basma testleri %50 şekil değişimi değerine kadar yapılmıştır.

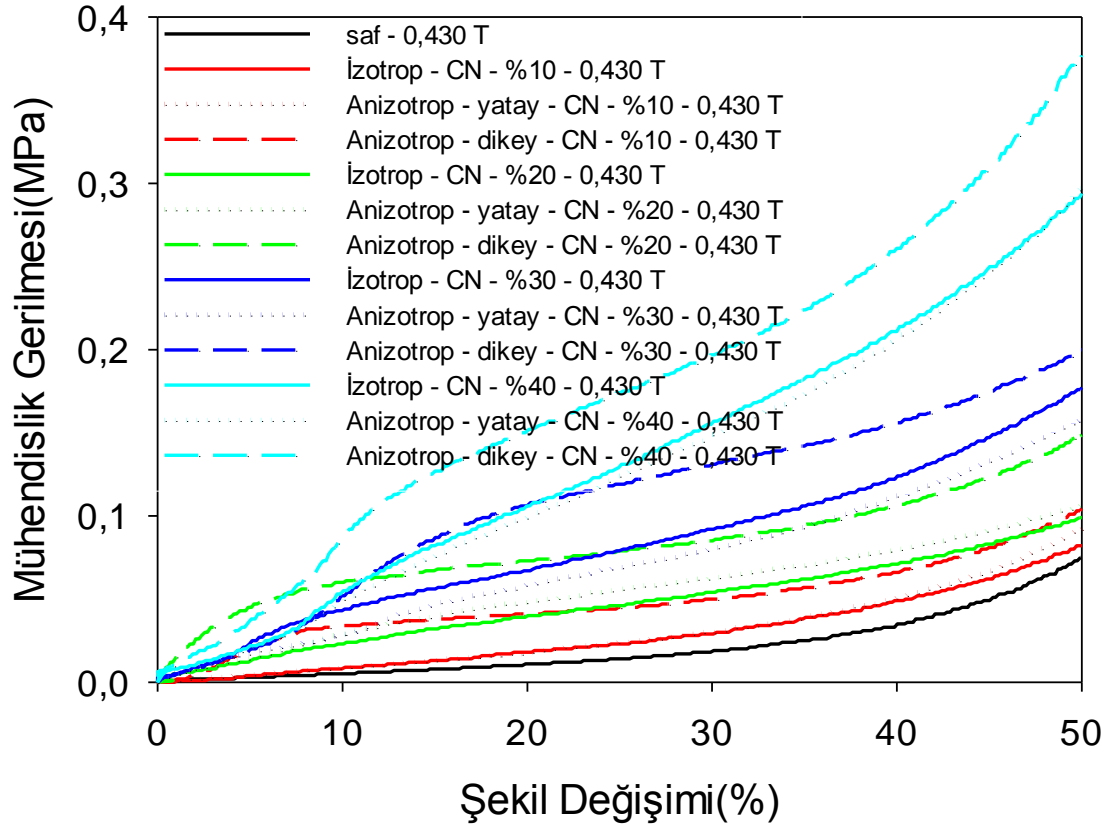
Tablo 3. İzotrop, anizotrop yatay ve dikey durumlar için gerilme artışı değerleri

%10 Toz Oranı			%20 Toz Oranı			Şekil Değişimi(%)
İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	
58	-19	173	82	113	204	20
50	-25	131	64	86	163	25
%30 Toz Oranı			%40 Toz Oranı			Şekil Değişimi(%)
İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	
131	75	200	116	96	165	20
105	62	158	98	83	133	25

Şekil 13'te saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafikleri toplu olarak gösterilmiştir. Bu grafikte %10 şekil değişiminden sonra tüm numunelerin non linear bir davranış gösterdiği açıkça görülmektedir. Bu durum toz oranından bağımsız bir durumdur. Toz oranının etkisi gerilme değerlerine etki etmektedir. Manyetik alansız durumda yatay yönlü numunelerde belirgin gerilme artışları söz konusudur. Manyetik alan uygulanmış testlerde ise izotrop ve anizotrop duruma göre artışlar olmaktadır. Aksine yatay yönlü durumda gerilme düşüşleri görülmektedir. Şekil 14'te ise saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0,430 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafikleri toplu olarak gösterilmiştir.

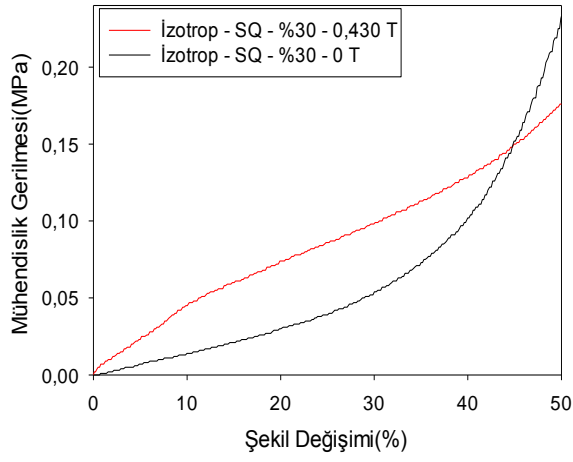


Şekil 13. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

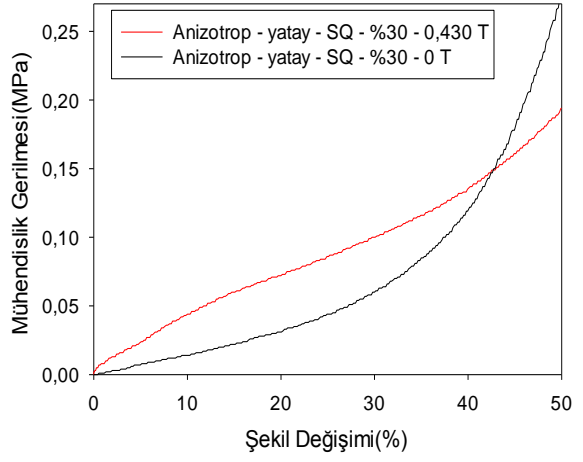


Şekil 14. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0,430 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

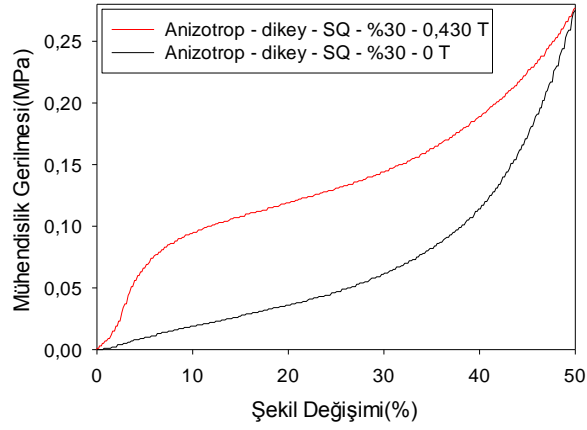
Buraya kadar CN tozunun farklı toz oranlarındaki test sonuçları irdelenmiştir. Şekil 15, 16, 17, 18 grafikleri % 30 toz oranı göz önüne alınarak elde edilmiş MRE malzemelerine ait izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0 T ve 0,430 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafiklerini göstermektedir.



a

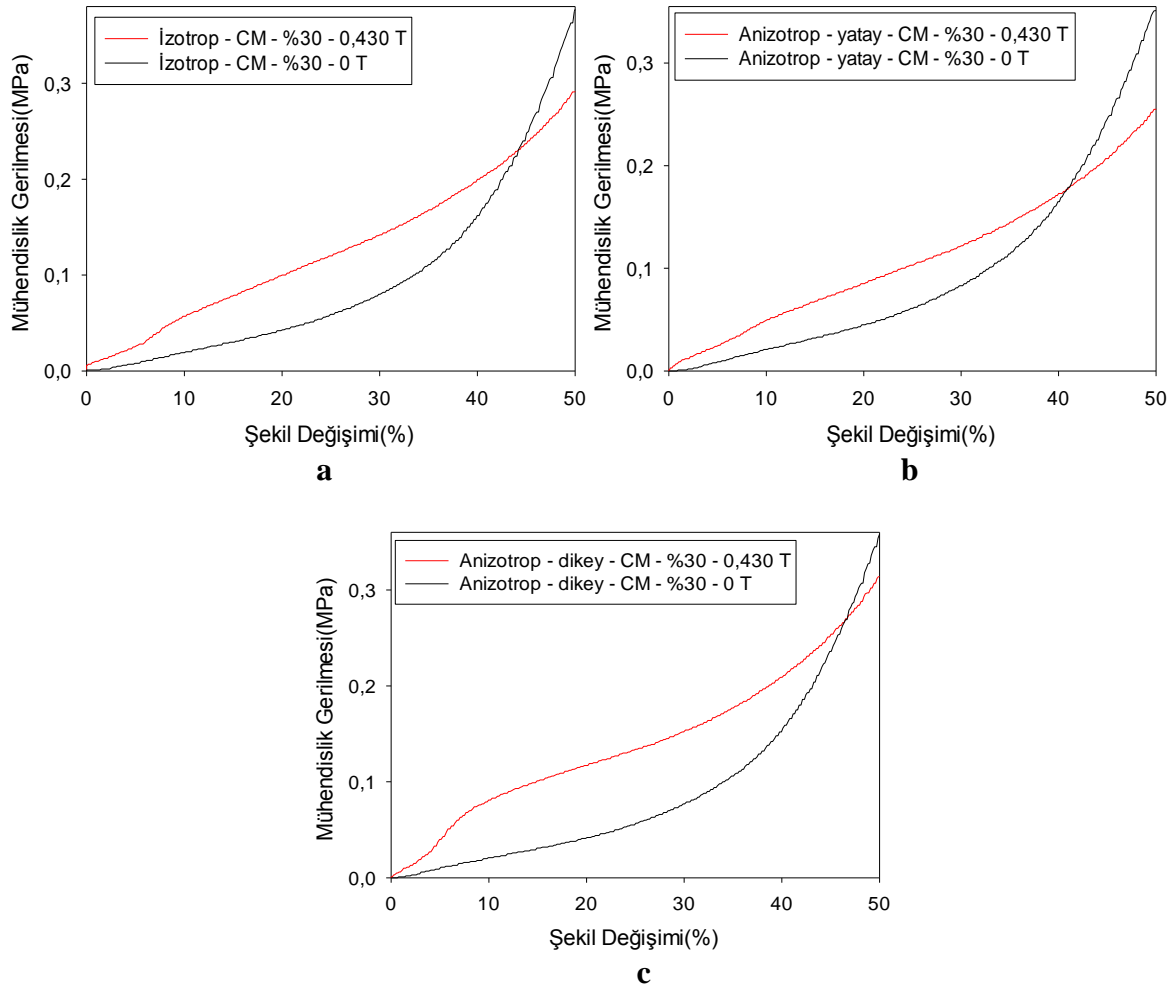


b

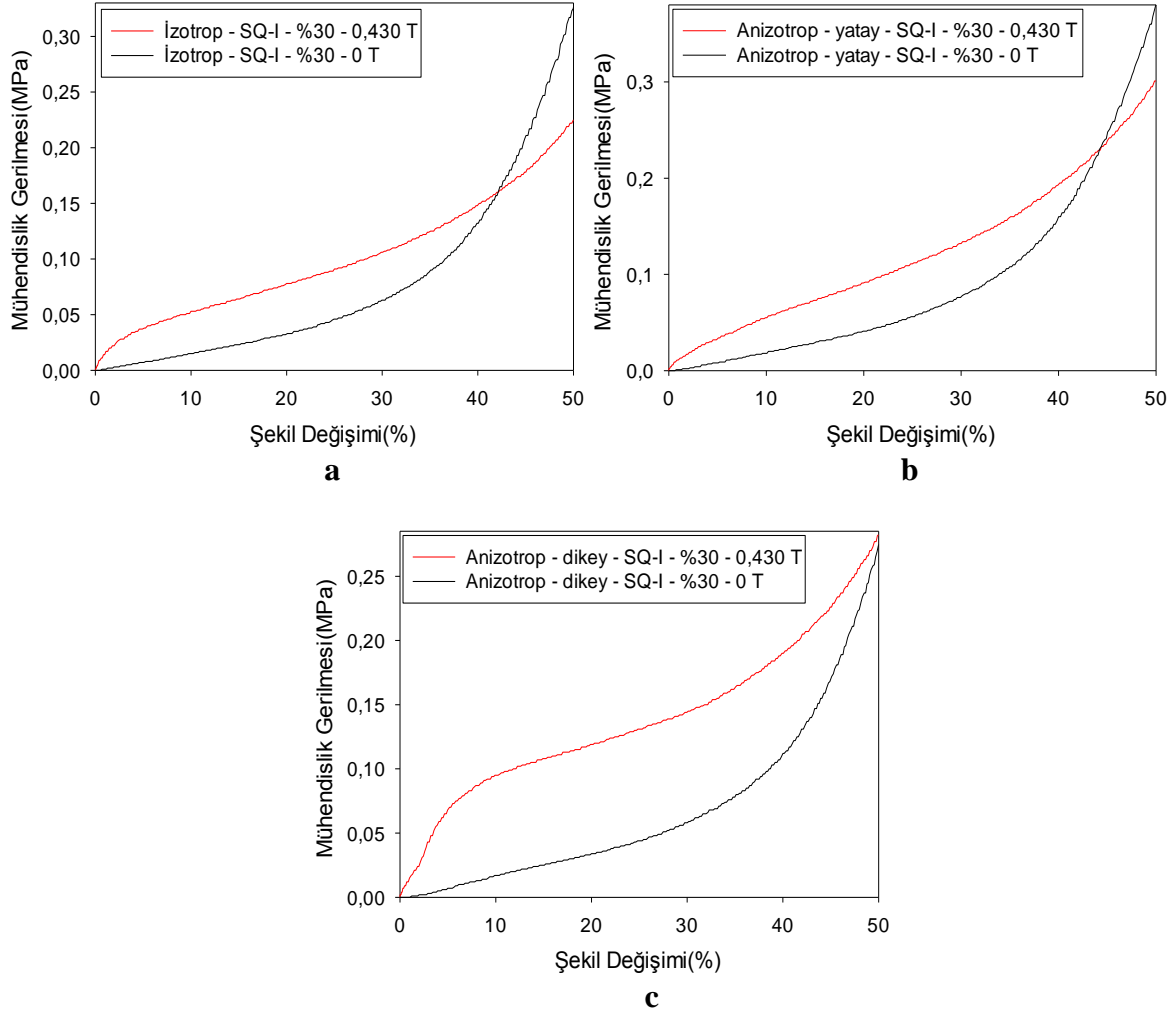


c

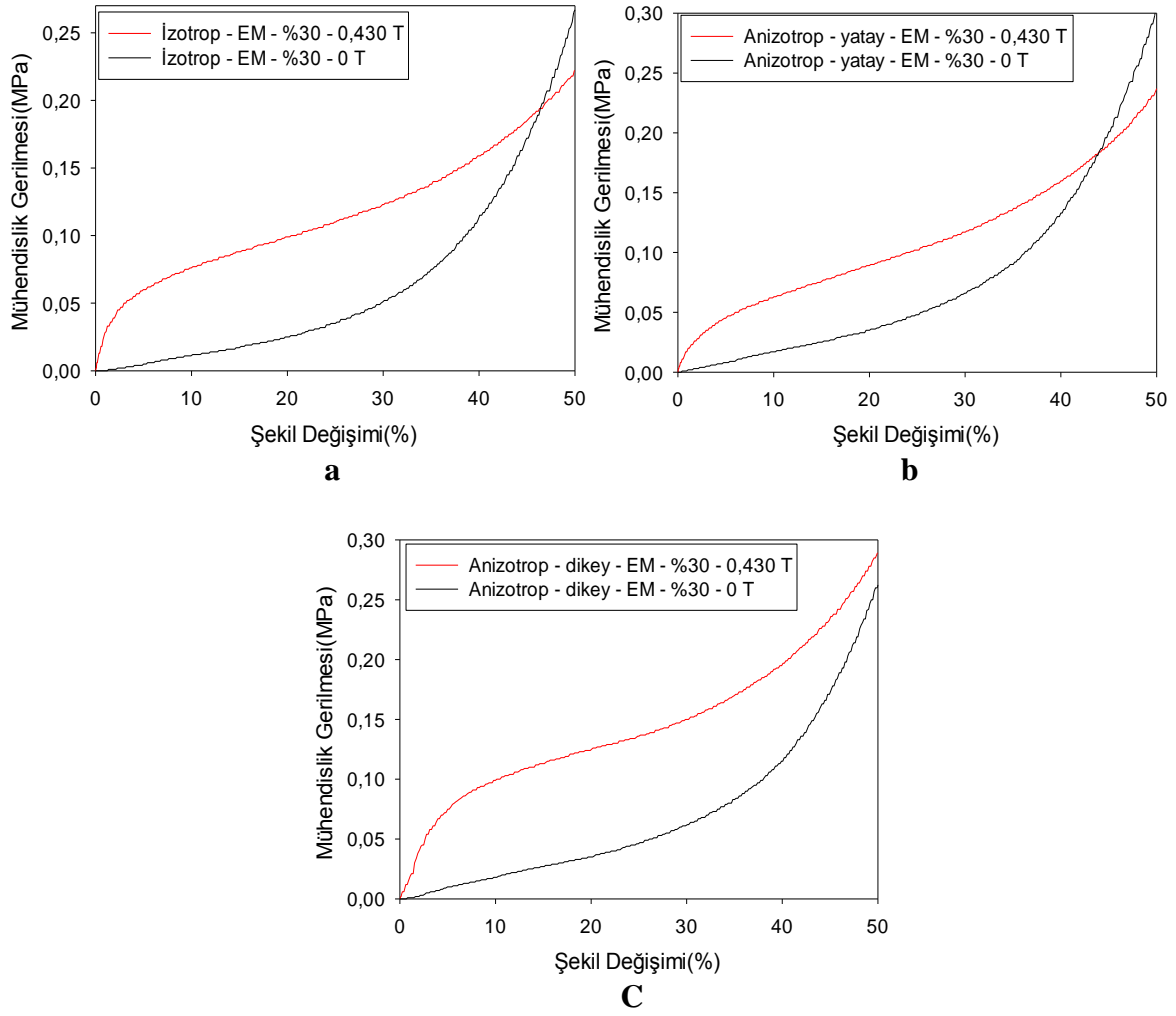
Şekil 15. %30 SQ tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin kıyası



Şekil 16. %30 CM tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin kıyası

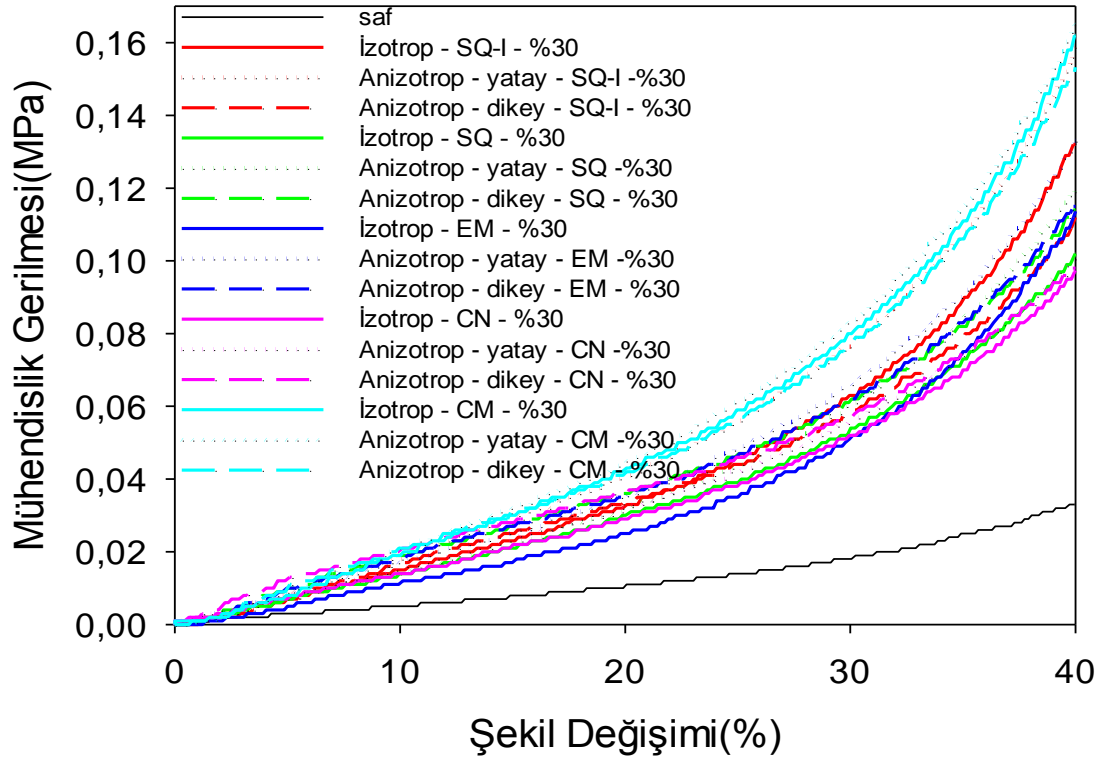


Şekil 17. %30 SQ-I tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin kıyası

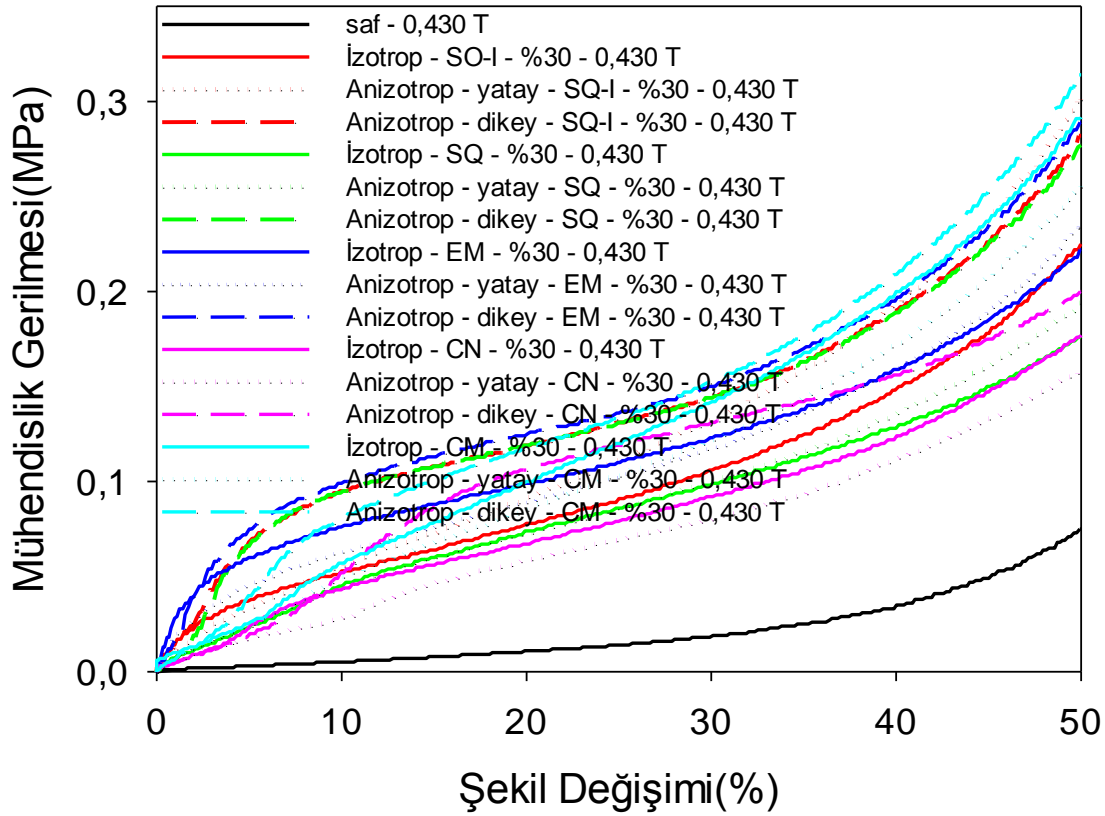


Şekil 18. %30 EM tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin kıyası

Şekil 19’da saf, izotrop ve anizotrop (yatay ve dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafikleri toplu olarak gösterilmiştir. Manyetik alansız durumda %40 şekil değişimi değerinde maksimum gerilme değerleri yatay yönlenmiş anizotrop CM tozuyla 0,17 MPa, en küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,03 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme artışı yaklaşık olarak %466 olarak bulunmuştur. Manyetik alan uygulanmış testlerde ise izotrop ve anizotrop duruma göre artışlar olmaktadır. Şekil 20’de ise %50 şekil değişimi değerinde maksimum gerilme değerleri dikey yönlenmiş anizotrop CM tozuyla 0,32 MPa, en küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,07 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme artışı yaklaşık olarak %357 olarak bulunmuştur.

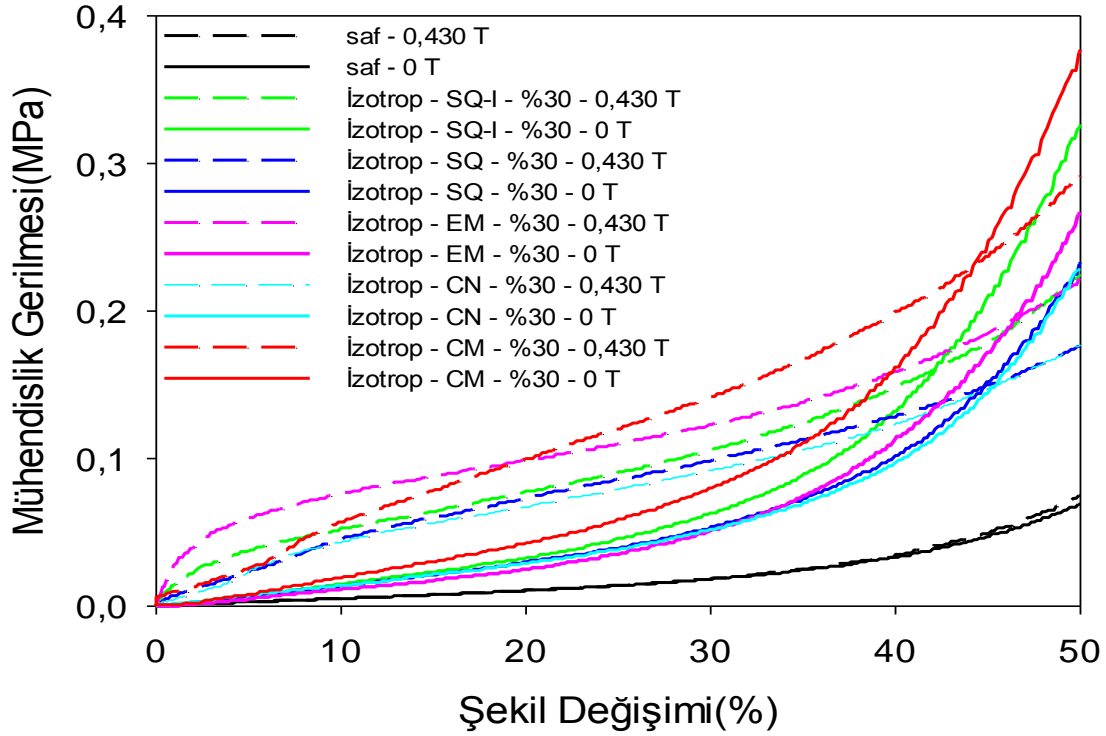


Şekil 19. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

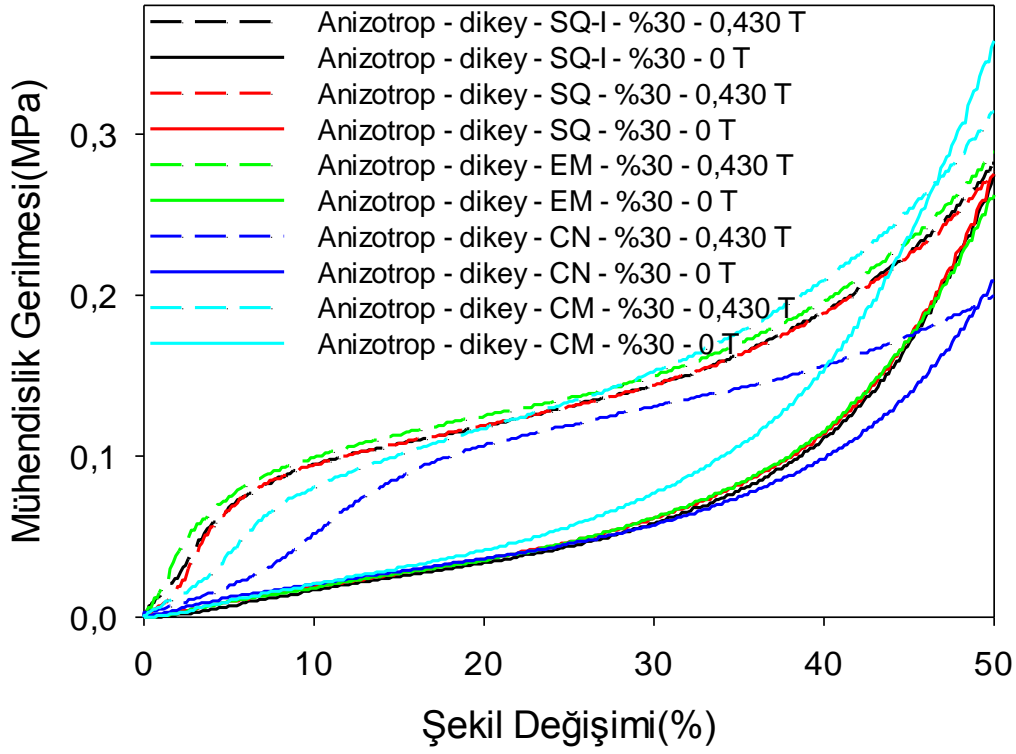


Şekil 20. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0,430 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

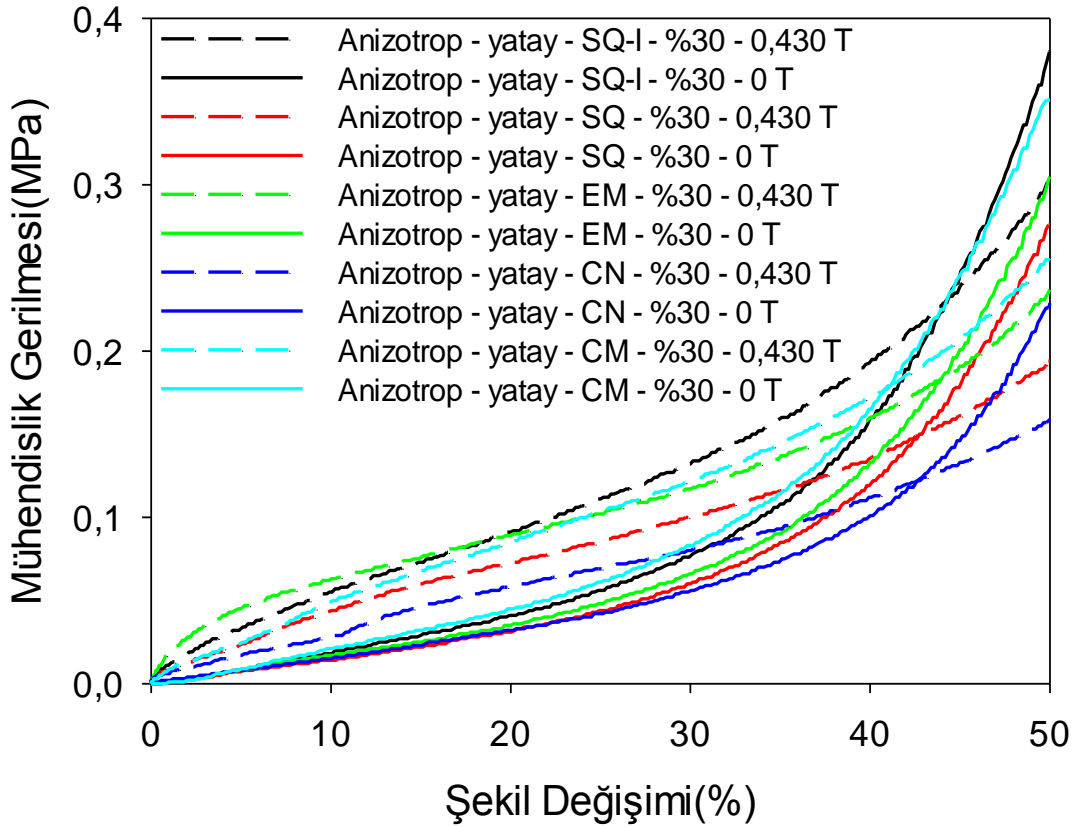
Beş farklı toz çeşidi kullanılarak üretilen numunelerin test sonuçları izotrop, anizotrop yatay ve dikey olarak ayrı ayrı grafiklerle gösterilmiştir. Şekil 21, 22, 23 grafiklerinin toplu olarak gösterilmesi neticesinde gerilme değerleri bakımından artış oranı belirlenmiştir. Bu bakımdan üç ayrı durum için kıyas grafikleri çizilmiştir. Şekil 21’de izotropik CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında gerilme-şekil değişimi grafikleri toplu olarak gösterilmiştir. %40 şekil değişimi değerinde en büyük gerilme değeri 0,207 MPa ile CM tozlu numunede elde edilmiştir. En küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,05 MPa bulunmuştur. Çalışmada önemli olan manyetik alan etkisiyle beraber gerilmedeki artışın yüksek olmasıdır. Şekil 22’de en büyük gerilme değeri 0,209 MPa ile CM tozlu numunede, en küçük gerilme değeri ise CN tozlu numunede 0,1 MPa bulunmuştur. Aynı şekilde şekil 23’de ise maksimum gerilme 0,193 MPa ile SQ-I tozlu numunede iken en küçük gerilme ise CN tozlu numunede 0,101 MPa ile olarak belirlenmiştir.



Şekil 21. Saf ve izotrop CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu gösterimi



Şekil 22. Anizotrop(dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu gösterimi



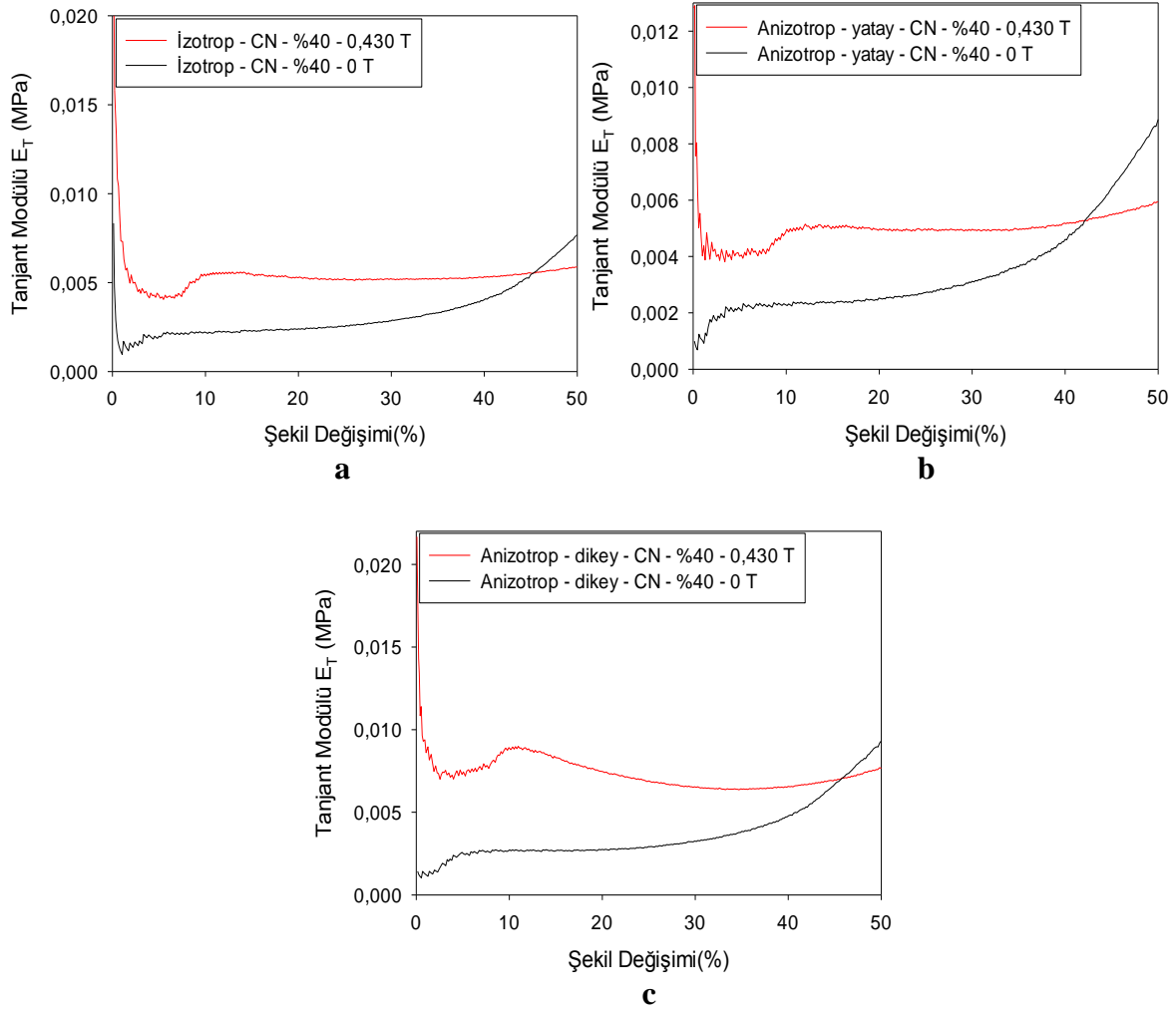
Şekil 23. Anizotrop(yatay) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0.430 T ve 0 T manyetik alanlı MRE gerilme-şekil değişimi grafiklerinin toplu gösterimi

Tablo 4’te izotrop, anizotrop yatay ve dikey durumlar için şekil 21, 22 ve 23’den elde edilen gerilme artışı değerleri verilmiştir. Tablodan her üç durum için artış oranlarında göz önüne alındığında EM toz çeşidinin gerilme değerlerinin en uygun malzeme özelliklerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Hem izotrop hemde anizotrop numunelerle yaklaşık %288’lere varan gerilme artışları elde edilmiştir.

Tablo 4. İzotrop, anizotrop yatay ve dikey durumlar için gerilme artışı değerleri

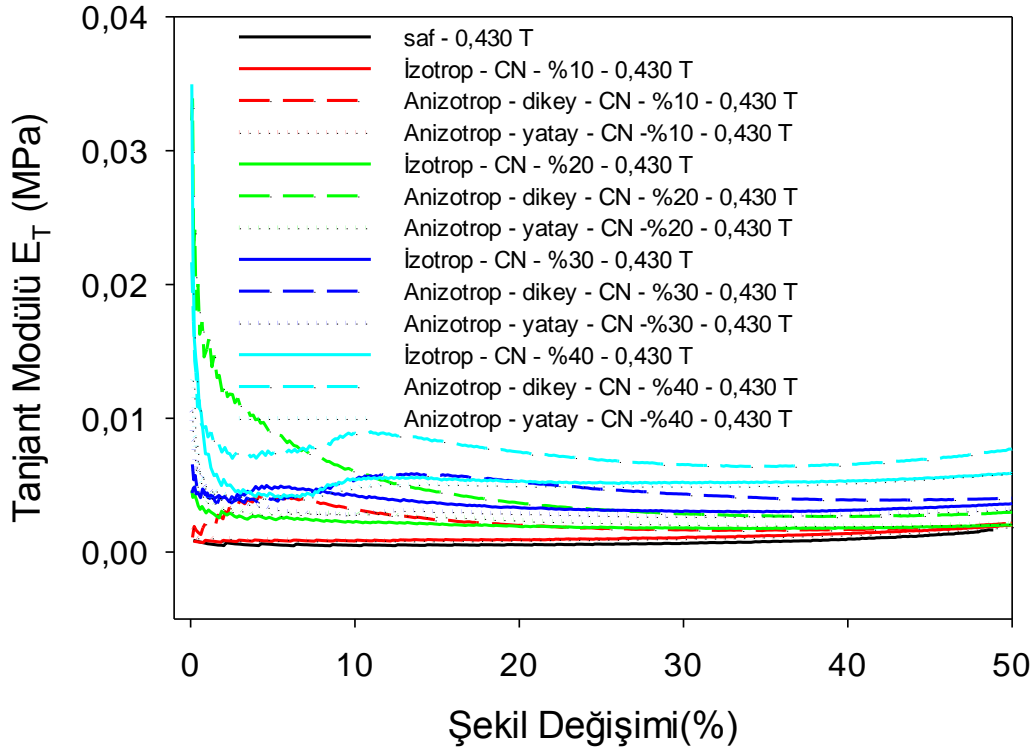
CM			EM			CN			Şekil Değişimi (%)
İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	
141	84	183	288	145	251	131	75	200	20
110	64	135	208	108	185	105	62	158	25
SQ			SQ-I			Şekil Değişimi(%)			
İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)	İzotrop (%)	Anizotrop yatay(%)	Anizotrop dikey(%)				
146	129	227	124	122	244				20
117	90	174	89	98	193				25

Manyeto-reolojik kauçuk türü malzemelerde gerilme şekil değişimi grafikleri manyetik alan varlığında ve yokluğunda elde edilmiştir. Bu grafik verileri kullanılarak relatif MR etki değerleri belirlenebilmektedir. Öncelikle tanjant modülü değerlerinin bulunması ve grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir. Tüm toz çeşitleri ve toz oranları göz önüne alındığında en yüksek tanjant modülü değerleri %40 toz oranında CN tozunda elde edilmiştir. Bu değerler şekil 24a’daki izotrop durumda %1 şekil değişimi değerinde yaklaşık olarak 0,067 MPa, şekil 24b’deki anizotrop yatay yönelmeli durumda 0,012 MPa ve şekil 24c’deki anizotrop dikey yönelmeli durumda ise 0,098 MPa olarak belirlenmiştir.

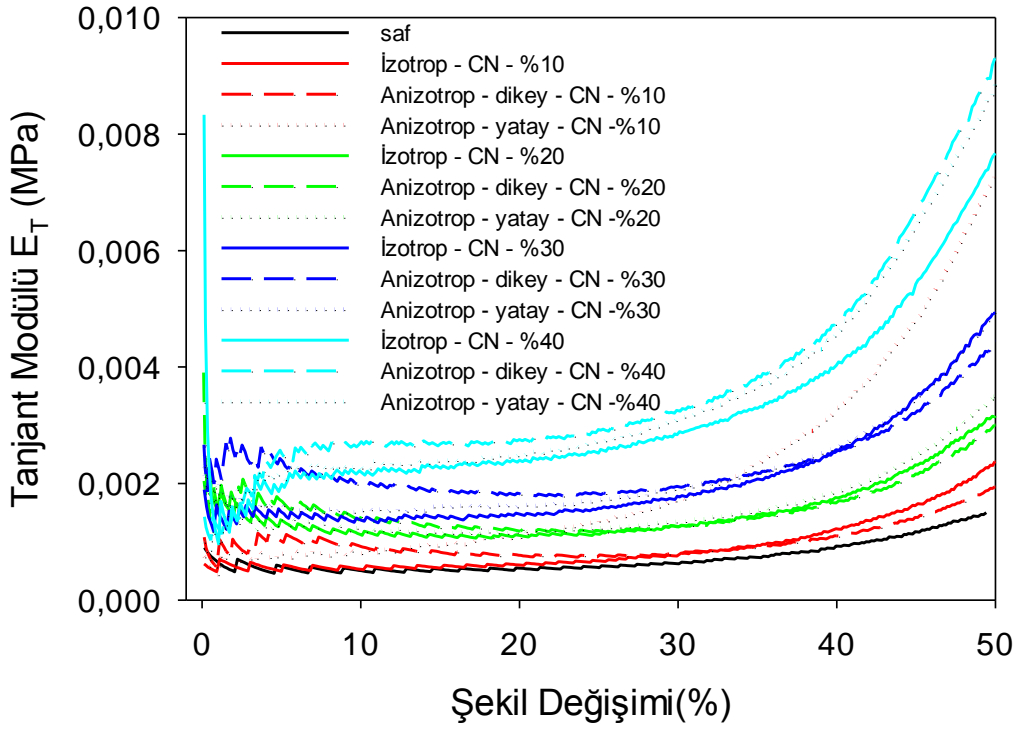


Şekil 24. %40 CN tozunun 0.430 T ve 0 T manyetik alan altında a) izotrop b) izotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) MRE tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin kıyası

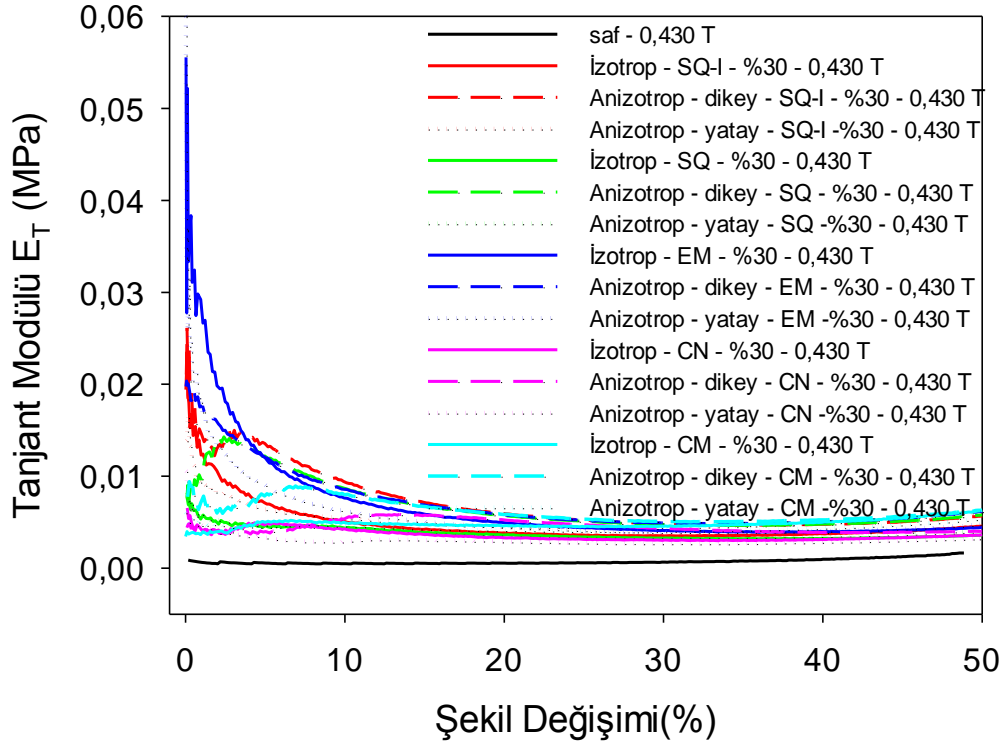
Tanjant modüllerinin saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozu için 0,430 T manyetik alan altında belirlenmesi için çizilen tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak şekil 25’te gösterilmiştir. Buradan toz oranının artışının modül değerinin artışına etkisi açıkça görülmektedir. Aynı şekilde manyetik alansız durumlar göz önüne alınarak çizilen tanjant modülü-şekil değişimi grafiği şekil 26’da görülmektedir. Şekil 27’de ise saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0,430 T manyetik alan altında tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 25. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0,430 T manyetik alan altında tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

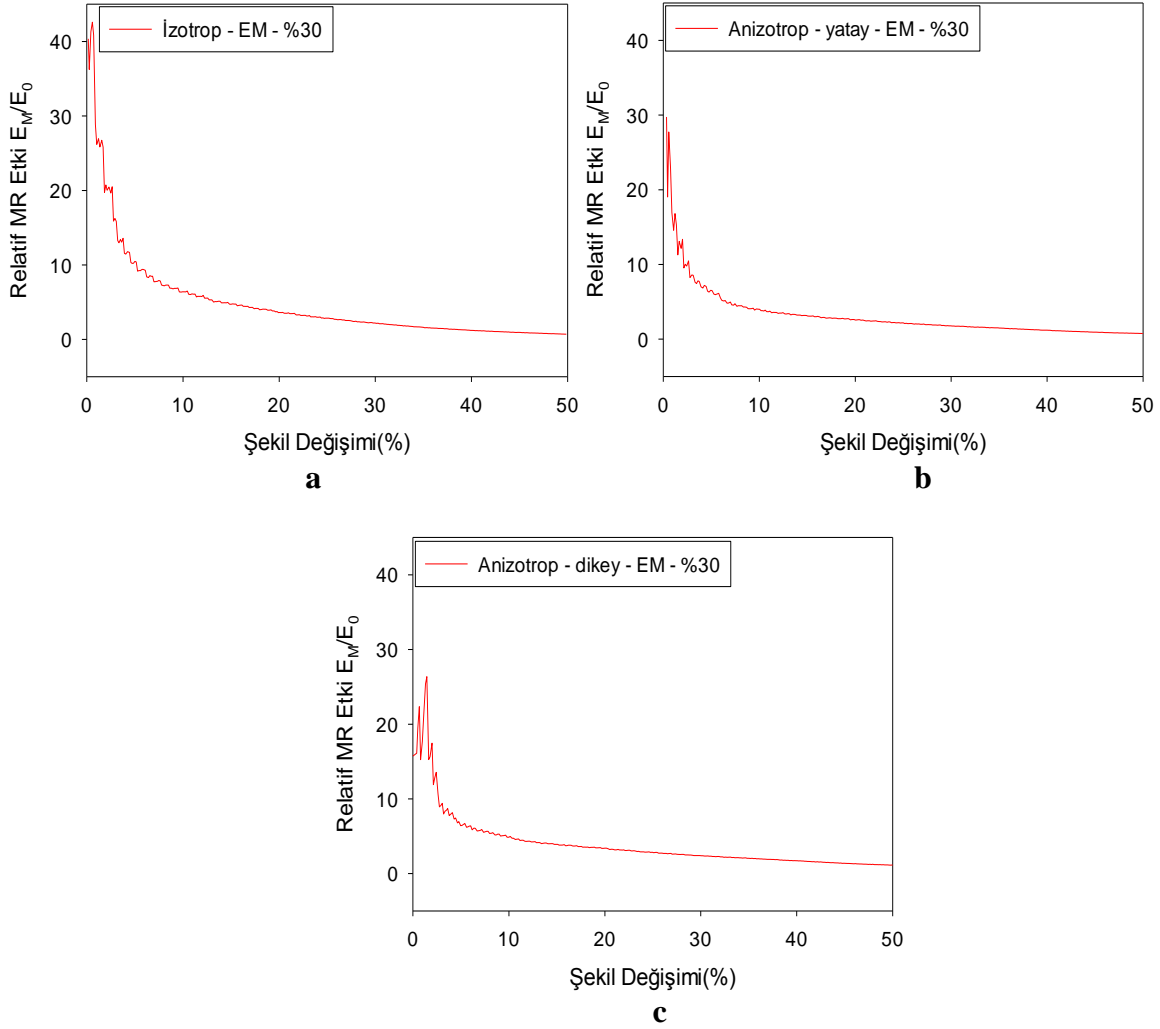


Şekil 26. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) %10, 20, 30, 40 oranlarında CN tozunun 0 T manyetik alan altında tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi



Şekil 27. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, SQ-I, CM, SQ, EM tozlarının 0,430 T manyetik alan altında tanjant modülü-şekil değişimi grafiklerinin toplu olarak gösterimi

Basma testleri 0,430 T manyetik alan altında ve manyetik alansız olarak yapılmıştır. Tüm toz çeşitleri ve oranları için relatif MR etki değerlerinin irdelenmesi neticesinde %30 toz oranındaki EM tozunda en yüksek etki bulunmuştur. Küçük şekil değişimi değerlerinde maksimum relatif MR etki değerleri söz konusuysen şekil değişimi değeri arttıkça manyetik etkinin azalmasından dolayı MR etki değeri de eksponansiyel olarak azalmaktadır. Bu MR etki değerleri şekil 28a'daki izotrop numunede %1 şekil değişimi değerinde 42,6 birim, şekil 28b'deki anizotrop yatay yönlenmeli numunede %0,5 şekil değişimi değerinde 27,8 birim iken şekil 28c'deki anizotrop dikey yönlenmeli numunede ise %0,66 şekil değişimi değerinde 22,4 birim olarak bulunmuştur.

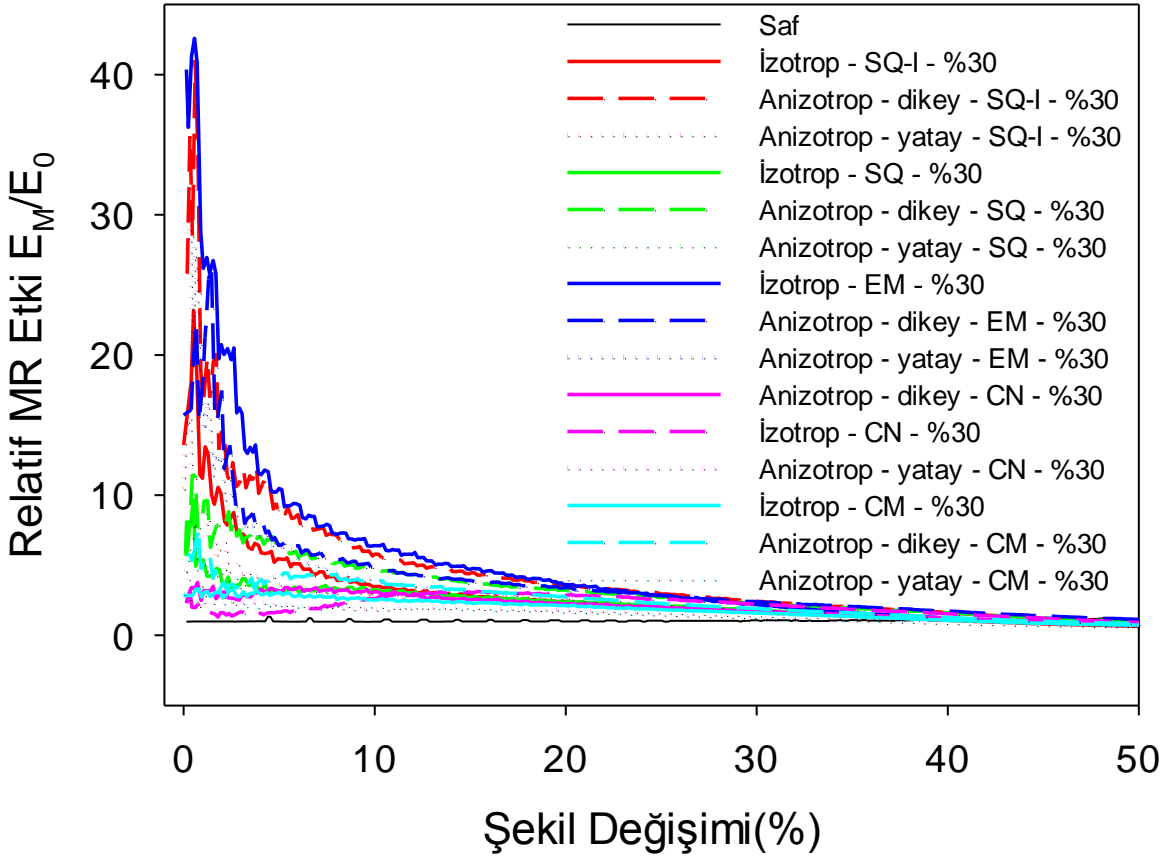


Şekil 28. EM tozunun a) izotrop b) anizotrop(yatay) c) anizotrop(dikey) relatif MR etki-şekil değişimi grafiklerinin toplu gösterimi

Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, CM, SQ, SQ-I, EM tozlarının relatif MR etki-şekil değişimi grafikleri Şekil 29'da toplu olarak gösterilmiştir. Bu grafikte %10 şekil değişimine kadar relatif MR etki değerlerinde eksponansiyel bir azalış söz konusudur. %10 dan %50 şekil değişimi değerine kadar ise yaklaşık lineer bir davranış göstermektedir. Tablo 5'te farklı şekil değişimindeki relatif MR etki değerleri ortaya konulmuştur. Saf duruma göre en fazla artış değeri izotrop EM tozuyla yaklaşık %8788, en küçük artış ise anizotrop yatay yönlü SQ-I tozuyla ile %162 olarak bulunmuştur. İzotrop ve anizotrop dikey yönlü numunelerin kıyası neticesinde EM tozunda %233 artış söz konusuysen SQ tozunda hemen hemen bir değişim olmamaktadır.

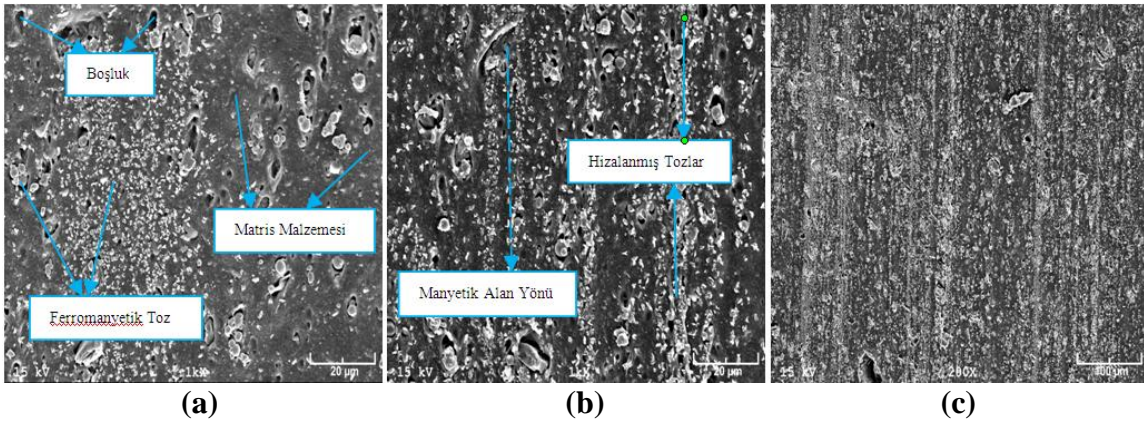
Tablo 5. CN, CM, SQ, SQ-I, EM tozlarının üç farklı durum için maksimum relatif MR etki ve saf duruma göre artış değerleri

		Relatif MR Etki(-)	Şekil Değişimi (%)	Saf duruma göre artış (%)
CM	İzotrop	8,61	0,19	796
	Anizotrop yatay	7	0,16	636
	Anizotrop dikey	10,8	0,62	990
CN	İzotrop	3,76	0,72	279
	Anizotrop yatay	4,67	0,21	387
	Anizotrop dikey	3,08	0,32	214
EM	İzotrop	88	0,41	8788
	Anizotrop yatay	29,7	0,32	293
	Anizotrop dikey	26,4	1,44	259
SQ	İzotrop	9,63	0,51	872
	Anizotrop yatay	8,24	0,55	732
	Anizotrop dikey	9,65	1,25	874
SQ-I	İzotrop	23,2	0,52	436
	Anizotrop yatay	16,9	0,33	162
	Anizotrop dikey	41	0,60	404



Şekil 29. Saf, izotrop ve anizotrop(yatay ve dikey) CN, CM, SQ, SQ-I, EM tozlarının relatif MR etki-şekil değişimi grafiklerinin toplu gösterimi

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 30'da izotropik ve anizotropik durumlar için verilmiştir. Şekil 30-b'de silikon MRE numunesine uygulanan 0,25 Tesla manyetik alan ile ferromanyetik tozların lokal olarak hizalanmış görüntüsü verilmektedir.



Şekil 30. Silikon kauçuk numunesinin (a) izotrop (b) anizotrop (c) anizotrop(200x) SEM görüntüleri

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Proje kapsamında yapılması planlanan bütün işlem adımları gerçekleştirilmiştir. Sadece matris malzemesi ile ilgili olarak sertlik değerlerinin mekanik özelliklere etkisinden dolayı Dragon Skin FX Pro malzemesi kullanılmıştır. Bu matris malzemesinin özelliği sertlik değerinin shore A2 değerinde olması ve ferromanyetik toz ilavesi neticesinde manyetik alana duyarlılıklarının sert malzemelerden çok daha iyi olmasından dolayıdır. MRE silikon kauçuk malzemeleri CN, SQ-I, CM, SQ, EM toz çeşitleri ve hacimce %10, 20, 30, 40 oranında CN tozu kullanılarak numuneler üretilmiştir. Basma testleri için üç farklı test prosedürü uygulanmıştır. Manyetik alanlı ve alansız testler gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar grafik formunda elde edilmiştir. Bu şekilde grafiklerin irdelenmesi ile mekanik özellikler bakımından en uygun numunelerin elde edilmesi sağlanmıştır. Matris malzemelerinin toz çeşidiyle uyum göstermesi, toz çeşidinin manyetik alana duyarlılığı, matris malzemesinin sertliği gibi parametreler mukavemet değerlerine etki etmektedir. Aynı zamanda manyetik alanlı ve alansız gerilme değerlerinin kıyaslanması için relatif MR etki değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- %10 CN toz oranı kullanıldığında elde edilen gerilme şekil değişimi grafiklerinde en fazla gerilme artışı dikey (basma eksenine paralel) yönlenmiş numunelerde, %10 şekil değişimi değerinde %277 olarak bulunmuştur. %20 toz oranında ise bu değer %328'e çıkmaktadır.
- 0,430 T manyetik alanlı duruma göre manyetik alansız durumda anizotrop dikey yönlenmeli numunelerde gerilme artışının en büyük değeri 0,249 MPa ile % 40 toz oranında, en küçük değeri ise saf numunede 0,042 MPa olarak bulunmuştur.
- Manyetik alansız durumda %40 şekil değişimi değerinde maksimum gerilme değerleri yatay yönlenmiş anizotrop CM tozuyla 0,17 MPa, en küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,03 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme artışı yaklaşık olarak %466 olarak bulunmuştur. Manyetik alan uygulanmış testlerde ise izotrop ve anizotrop duruma göre artışlar olmaktadır. %50 şekil değişimi değerinde maksimum gerilme değerleri dikey yönlenmiş anizotrop CM tozuyla 0,32 MPa, en küçük gerilme değeri ise saf numunede 0,07 MPa olarak elde edilmiştir. Gerilme artışı yaklaşık olarak %357 olarak bulunmuştur.
- Testlerde kullanılan beş farklı toz oranından %40 şekil değişimi değerinde en büyük gerilme değeri 0,209 MPa ile CM tozlu numunede, en küçük gerilme değeri ise CN tozlu numunede 0,1 MPa bulunmuştur.
- EM toz çeşidinin gerilme değerlerinin en uygun malzeme özelliklerine daha yatkın olduğu tespit edilmiştir. Hem izotrop hemde anizotrop numunelerle yaklaşık %288'lere varan gerilme artışları elde edilmiştir.
- Tüm toz çeşitleri ve toz oranları göz önüne alındığında en yüksek tanjant modülü değerleri %40 toz oranında CN tozunda elde edilmiştir. Maksimum tanjant modülü değeri anizotrop dikey yönlenmeli durum 0,098 MPa olarak belirlenmiştir.
- Tüm toz çeşitleri ve oranları için relatif MR etki değerlerinin irdelenmesi neticesinde %30 toz oranındaki EM tozunda en yüksek MR etki bulunmuştur. %10 şekil değişimine kadar relatif MR etki değerlerinde eksponansiyel bir azalış söz konusudur. %10 dan %50 şekil değişimi değerine kadar ise yaklaşık lineer bir davranış göstermektedir. Bu MR etki değeri en yüksek izotrop numunede %1 şekil değişimi değerinde 42,6 birim olarak bulunmuştur.
- Relatif MR etki değerleri saf duruma göre kıyaslandığında en fazla artış değeri izotrop EM tozuyla yaklaşık %8788, en küçük artış ise anizotrop yatay yönlenmeli

SQ-I tozuyla ile %162 olarak bulunmuştur. İzotrop ve anizotrop dikey yönlennmeli numunelerin kıyası neticesinde EM tozunda %233 artış söz konusuyken SQ tozunda hemen hemen bir değişim olmamaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Rabinow, J., “The magnetic fluid clutch”, AIEE Transactions, 67, 1308–1315, 1948.
- [2] Zhou, G.Y. ve Li, J.R., “Dynamic behavior of a magnetorheological elastomer under uniaxial deformation: I. Experiment”, Smart Materials and Structures, 12, 859–872, 2003.
- [3] Zhou, G.Y., “Shear properties of a magnetorheological elastomer”, Smart Materials and Structures, 12, 139-146, 2003.
- [4] Lokander, M., ve Stenberg, B., “Performance of isotropic magnetorheological rubber materials”, Polymer Testing, 22, 245–251, 2002.
- [5] Davis, L.C., “Model of magnetorheological elastomers”, Journal Applied Physics, 85, 3348–3351, 1999.
- [6] Bose, H. ve Roder, R. (2009b). US Patent 7.608.197 B2. Magnetorheological Elastomers and use thereof.
- [7] Elie, L., Ginder, J., Mark, J. & Nichols, M. (1998). Us patent 5.814.999. method and apparatus for measuring displacement and force.
- [8] Klukowski, C. ve Meier, R. (2006). Adaptive linear crash systems – intelligent materials for passenger car steering column, ThyssenKrupp techforum 1: 41–47.
- [9] Brei, D., Redmond, J., Wilmot, N., Browne, A., Johnson, N. ve Jones, G. (2006). US patent application US 2006/0012191 A1. Hood latch assemblies utilizing active materials and methods of use.
- [10] Browne, A. ve Johnson, N. (2006). US Patent 7.029.056 B2. Closure lockdown assemblies and methods of utilizing active materials.
- [11] Lerner, A. ve Cunefar, K. (2006). US Patent 7,102,474 B2. Adaptable vibration absorber employing a magnetorheological elastomer with a variable gap length and methods and systems therefor.
- [12] Lokander, M., ve Stenberg, B., “Improving the magnetorheological effect in isotropic magnetorheological rubber materials”, Polymer Testing, 22, 677–680, 2003.
- [13] Ginder, J.M., Researches Laboratory, Ford Motor Company, Rheology Controlled by Magnetic Fields, Encyclopedia of Applied Physics, Vol. 16, 487–503, 1996 VCH Publishers, Inc.
- [14] Ginder, J.M., Nichols M.E., Elie L.D. ve Tardiff J.L., “Magnetorheological elastomers: Properties and applications”, SPIE- The International Society for Optical Engineering. Proceedings of the 1999 Smart Structures and Materials on Smart Materials Technologies, March 3–4, Newport Beach, CA, USA,3675, 131–138, 1999.
- [15] Schubert, G. ve 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.
- [16] Rigbi, Z. ve Jilken, L., “The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 37:267 – 276, 1983.
- [17] Farshad, M. ve Le Roux, M., “Compression properties of magnetostrictive polymer composite gels”, Polymer Testing, 24:163–168, 2005.

- [18] Farshad, M. ve Benine, A., “Magnetoactive elastomer composites”, *Polymer Testing*, 23: 347–353, 2004.
- [19] Kallio, M., “The elastic ve damping properties of magnetorheological elastomers”, *Doktora Tezi*, VTT Technical Research Centre of Finland, 2005.
- [20] Varga, Z., Filipcsei, G., Szilagyi, A. ve Zrinyi, M., “Electric and Magnetic Field-Structured Smart Composites”, *Macromolecular Symposia*, 227:123–134, 2005a.
- [21] Varga, Z., Filipcsei, G. ve Zrinyi, M., “Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus”, *Polymer*, 47:227–233, 2006.
- [22] Abramchuk, S., Grishin, D.A., Kramarenko, E.Yu., Stepanov, G.V. ve Khokhlov. A.R., “Effect of a homogeneous magnetic field on the mechanical behavior of soft magnetic elastomers under compression”, *Polymer Science Series A*, 48(2):138–145, Feb 2006.
- [23] Boczkowska, A., Awietjan, S.F. ve Wroblewski R., “Microstructure - property relationships of urethane magnetorheological elastomers”, *Smart Materials and Structures*, 16:1924–1930, 2007.
- [24] Gudmundsson, I., “A Feasibility Study of Magnetorheological Elastomers for a Potential Application in Prosthetic Devices”, *Master’s thesis*, Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, 2011.
- [25] Gordaninejad, F., Wang, X. ve Mysore, P., “Behavior of thick magnetorheological elastomers”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23:1033–1039, 2012.
- [26] Liao, G., Gong, X. ve Xuan, S., “Magnetic Field-Induced Compressive Property of Magnetorheological Elastomer under High Strain Rate”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 8445 – 8453, 2013.