



**T.C.**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETON ÖZELLİKLERİNİN ELEKTROMANYETİK DALGALAR  
YOLUYLA TESPİTİ**

**Murat ÖZTÜRK**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**

**OCAK-2017**



T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETON ÖZELLİKLERİNİN ELEKTROMANYETİK DALGALAR  
YOLUYLA TESPİTİ**

**Murat ÖZTÜRK**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
OCAK-2017**

**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONUN ELEKTROMANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MURAT ÖZTÜRK**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM** danışmanlığında hazırlanan bu tez 04/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM

Başkan

Doç.Dr. Cahit BİLİM

Üye

Yrd. Doç.Dr. Oğuzhan AKGÖL

Üye

**Kod No: 28**

**Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ**

**Enstitü Müdür Vekili**

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

04.01.2016

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Murat ÖZTÜRK**

## ÖZET

### BETONUN ELEKTROMANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada; betonun elektromanyetik karakteristiği incelenerek dört farklı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada lifli beton içerisindeki liflerin yönünün ve dağılımının tespitinin elektromanyetik dalga kullanılarak hasarsız bir şekilde yapılabileceği görülmüştür. Bu test tekniği lifli beton numunenin önüne ve arkasına yerleştirilmiş iki doğrusal polarize edilmiş anten ile yapılmıştır. Lifli betonlardaki dielektrik ve kayıp faktörleri değişiklikleri beton içerisindeki lif yönünü ve dağılımını belirlemede kullanılmıştır. İkinci çalışmada; betonun su-çimento oranı, mekanik özellikler ve elektriksel özellikler 3-18 GHz frekans aralığında birbirleri ile ilişkilendirilmiştir. Elde edilen datalar, hassas sonuçlar veren sabit frekansta çalışan mikro dalga sensör tasarımı için yeterli görülmüştür. Ayrıca betonların elektriksel özellikleri ve basınç dayanımları arasında da bir ilişki kurulmuştur. Deneysel çalışmalar dielektrik sabitini kullanarak betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Dielektrik sabitleri, yansıma ve iletim parametreleri Nicolson Ross Weir (NRW) yönteminde kullanarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre su-çimento oranını belirlemek için 18 GHz frekansı en belirgin sonuçları vermekle birlikte 17 GHz frekansının da betonların basınç dayanımını tespit etmede en kullanışlı frekans değeri olduğuna karar kılınmıştır. Üçüncü çalışmada; Nicolson Ross Weir (NRW) metodu kullanılarak su muhtevası değişikliği, yüksek sıcaklık etkisi, olgunluk ve çatlak oluşumu gibi betonun kimyasal ve fiziksel özellikleri ile betonun elektromanyetik davranışı arasında ilişki kurulmuştur. Beton numunelerinin dielektrik sabitlerini ve kayıp faktörlerini bulmak için her bir numunenin yansıma ve iletim katsayıları 3-18 GHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Numerik datalar NRW metod yardımıyla kurulan sistemden çekilmiştir. Bu çalışmanın en önemli çıktısı ise betonun fiziksel özelliklerinin elektromanyetik davranışı ile açıklanıp hasarsız bir şekilde yeni yöntemlerle bulunabileceğidir. Bu çalışmada son derece geniş bant frekans aralığı incelenmiş olup doğrusal polarize olmuş antenler kullanılmıştır. Araştırmada betonunun su muhtevası değişikliği, mukavemeti, yüksek sıcaklık altındaki davranışı, olgunluğu ve çatlak oluşumu gibi özellikleri ile bu koşullar altındaki elektromanyetik davranışı arasında çok güçlü ilişkiler kurulmuştur. Son çalışmada ise; bor ürünü ve atığı içeren betonların mekanik, elektromanyetik karakteristiği ve ekranlama etkinliği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Betonun elektromanyetik dalga ekranlama etkinliğini arttırmak için bor ürünü ve atığı içeren sertleşmiş betonun elektromanyetik davranışı Elektrik Enstitüsü ve Elektronik Mühendisleri (IEEE) standartlarına göre incelenmiştir. Buna ek olarak bor ürünü ve atığı içeren beton numunelerin katkı içermeyen betonlara göre ekranlama yeteneğinin arttığı bunun yanı sıra mekanik özelliklerinde de azalma olmadığı görülmüştür. Bunu göstermek için dayanım testleri de ayrıca yapılmıştır. Sonuç olarak bor ürünü ve atığı ihtiva eden betonların ekranlama etkinliğinin katkı içermeyen betonlara göre 3.16 ile 100 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra betona eklenen minerallerin dayanımı düşürmediği hatta arttırdığı ayrıca rapor edilmiştir. Bu çalışma ile birlikte betona ilave edilen bor ürünü ve atıklarının betonun dayanımını düşürmeden ekranlama etkinliğini arttırdığı rahatlıkla söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Lif, Dağılım, Yönelim, Elektromanyetik, Tahribatsız Test, Nicolson-Ross Weir, Beton, Olgunluk, Çatlak, High Yüksek Sıcaklık, Nem, Bor, Kalkanlama Etkinliği, Atık

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF CONCRETE**

In this thesis, electromagnetic properties of the concrete is studied in four steps. In the first study; determination of both orientation and dispersion of the fibers regardless of the fiber types in concretes is possible by extracting electromagnetic properties of the structures in microwave regime as a nondestructive method. The measurement technique requires sample under test (SUT) and two wideband linearly polarized antennas placed in the front and the backside of material. A simple and confidential model is carried out to determine both orientation and dispersion of fibers in concrete by observing the changes of dielectric constant and loss factor. In the second study; relationship between water/cement ratios/mechanical properties and electrical characteristics of the concrete is investigated in the frequency spectrum of 3 GHz-18 GHz. The proposed data provides an accurate measurement results for researchers to design microwave sensors operating at constant frequencies. Besides, the relationship between electrical properties and applied pressure to the concrete is investigated experimentally for various cement types. The experimental study demonstrates the determinable mechanical characteristic of the concrete by using dielectric constant. The dielectric constant is retrieved by using Nicolson Ross Weir technique from reflection and transmission coefficients. It is revealed that the most significant frequency point is 18 GHz to determine water/cement ratio and 17 GHz to differentiate applied pressure level by using dielectric constant of concrete. In the third study; Nicolson Ross Weir (NRW) based technique is used to demonstrate the relationship between the changes of some physical and electrical properties of concrete under various effects such as humidity ratio, temperature range, maturity and cracking amount. In order to evaluate the dielectric constant and loss tangent values of the material under test (MUT), the reflection and transmission coefficients are measured for each sample in the frequency spectrum of 3 GHz-18 GHz. The extraction of the electrical properties of each sample is carried out with numerical technique of NRW Method. In the first investigation, the dielectric constant of concrete is extracted for humidity variations and it has been determined that 7 GHz is the most decisive frequency point for this particular parameter. The relationship is also explored for the other physical changes. The importance of the study is to present a novel relationship between the change of some physical and electrical properties of the concrete for microwave engineers to design novel sensing devices as non-destructive systems. In this study, a novel non-destructive approach is developed and some of the most crucial parameters of the concretes are measured by using the variation in the electromagnetic responses of the concrete samples. For this method, a network analyzer working in an extremely wide-band frequency range and two high gain, wideband and linearly polarized horn antennas are used. Frequency bands in which the electrical permittivity has a direct relation with water content, high temperature that the samples are exposed, maturity status and crack propagation for the concretes are determined. In the last study; we have investigated the electromagnetic (EM) and mechanical properties and shielding effectiveness of concrete samples containing boron product and wastes in details. In order to increase shielding effectiveness of concrete samples from electromagnetic waves, hardened concretes

containing boron product and wastes are analyzed according to the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standards. In addition, the effects of the additives on the strength behaviors of the concretes are also examined to report that besides improving shielding behavior, addition of the minerals would not diminish strength parameters. As a result, the concretes containing boron product and wastes provides 3.16 to 100 times better shielding effectiveness than that of concrete containing only Portland cement which is the control sample. While the additives increase or do not affect negatively compressive strength of the concrete. As a conclusion, additives in concretes enhance shielding effectiveness without affecting the strengths parameters negatively.

**Key Words:** Fiber, Dispersion, Orientation, Electromagnetic, Non-destructive testing, Nicolson-Ross Weir, Concrete, Maturity, Cracking, High Temperature, Humidity, Boron, Shielding Effectiveness, Waste



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Umur Korkut Sevim'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen saygı değer hocalarım Doç. Dr. Muharrem Karaarslan, Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan Akgöl ve Doç. Dr. Emin Ünal'a sabırlarını, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgememiş olan mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Nurullah KARACA, Arş. Gör. Kevser KESKİN, Arş. Gör. Yakup TÜREDİ, Arş. Gör. M. Musab ERDEM, Arş. Gör. Olcay GENÇ, Arş. Gör. Müzeyyen BALÇIKANLI , Arş. Gör. Bestami TAŐAR, Arş. Gör. Olcay ALTINTAŐ, Arş. Gör. Mehmet BAĐMANCI ve Mustafa ÖZTÜRK'e, isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş olan herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni bugüne kadar yetiőtiren, desteklerini bir an olsun eksik etmeyen kıymetli anneme, babama ve kardeşlerime en içten saygı ve Őükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	I
ABSTRACT .....	III
TEŞEKKÜR .....	V
İÇİNDEKİLER .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VIII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	IX
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	7
3.1. Materyaller ve Karışım Oranları .....	7
3.2. Yöntem .....	13
3.2.1. Deneysel Çalışmalar .....	13
3.2.2. Test Yöntemleri .....	15
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	20
4.1. Lifli Betonların Elektromanyetik (EM) Davranışları Kaydedilerek Elde Edilen Sonuçlar Yorumlanarak Sertleşmiş Beton İçerisindeki Lif Yönelimi ve Dağılımı Hakkında Yorum Yapılması .....	20
4.1.1. Dağılım Sonuçları .....	20
4.1.2. Oryantasyon Sonuçları .....	23
4.2. Farklı Su Muhtevalarına ve Çimento Çeşitlerine Sahip Betonların Mekanik Davranışlarının Elektromanyetik Test Teknikleri Kullanılarak Tahribatsız Bir Şekilde Tespiti .....	29
4.3. Betonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri ile Betonun Elektromanyetik Davranışı Arasında İlişki Kurulup Beton İçin Kritik Öneme Sahip Güvenilir ve Denenebilir Sonuçlar Elde Edilmesi .....	34
4.3.1. Betonun Su Muhtevası ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi .....	34
4.3.2. Betonun Yüksek Sıcaklık ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi .....	36
4.3.3. Betonun Olgunluk ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi .....	37
4.3.4. Betonun Çatlak Oluşumu ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi .....	39
4.4. Bor Ürün ve Atıklarını İçeren Betonların EM Dalga Emiciliği Mekanik Dayanım Davranışları Dikkate Alınarak İncelenmesi .....	41
4.4.1. Basınç Dayanımı .....	41
4.4.2. Farklı İçeriğe Sahip Betonların Elektromanyetik Karakteristiği .....	42
4.4.3. Bor Ürünü ve Atıkları İçeren Betonların Kalkanlama Etkinliği .....	45
5. SONUÇ ve ÖNERİLER .....	47
KAYNAKLAR .....	50
ÖZGEÇMİŞ .....	54

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Kullanılan karışık agregaya ait elek analizi .....	8
Şekil 3.2.	Kullanılan liflerin görünümü .....	10
Şekil 3.3.	Lif yönelimi .....	10
Şekil 3.4.	Lif yoğunluğu. ....	14
Şekil 3.5.	DeneySEL çalışmanın şematik görünümü .....	15
Şekil 3.6.	Saçılım parametreleri ölçüm düzeneği .....	12
Şekil 4.1.	a Farklı yoğunlukta karbon çelik lif içeren betonların dielektrik sabitleri.....	20
Şekil 4.1.	b Farklı yoğunlukta karbon çelik lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri .....	21
Şekil 4.2.	a Farklı yoğunlukta forta ferro lif içeren betonların dielektrik sabitleri.....	22
Şekil 4.2.	b Farklı yoğunlukta forta ferro lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri .....	22
Şekil 4.3.	a Farklı yoğunlukta propilen lif içeren betonların dielektrik sabitleri .....	23
Şekil 4.3.	b Farklı yoğunlukta propilen lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri .....	23
Şekil 4.4.	a Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip karbon çelik lif içeren betonların dielektrik sabitleri .....	25
Şekil 4.4.	b Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip karbon çelik lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri.....	25
Şekil 4.5.	a Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip forta ferro lif içeren betonların dielektrik sabitleri .....	26
Şekil 4.5.	b Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip karbon çelik lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri.....	27
Şekil 4.6.	a Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip propilen lif içeren betonların dielektrik sabitleri .....	28
Şekil 4.6.	b Gönderilen dalgaya göre farklı yönelime sahip propilen lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri.....	29
Şekil 4.7.	28 günlük numunelerin basınç değerleri ve su-çimento oranı arasındaki ilişki .....	31
Şekil 4.7.	60 günlük numunelerin basınç değerleri ve su-çimento oranı arasındaki ilişki .....	31
Şekil 4.8.	Farklı basınç dayanımlarına sahip beton numunelerin epsilon değerleri .....	34
Şekil 4.9.	Farklı su doygunluk seviyelerine sahip numunelerin epsilon değerleri ....	35
Şekil 4.10.	Farklı sıcaklıklara maruz kalmış numunelerin epsilon değerleri.....	37
Şekil 4.11.	Farklı yaşlara sahip numunelerin kayıp faktörü değerleri .....	39
Şekil 4.12.	Farklı yüklere maruz kalmış numunelerin dielektrik sabitleri.....	40
Şekil 4.13.	Beton numunelerinin basınç dayanımı varyasyonları.....	42
Şekil 4.15.	a Farklı katkı içeren beton numunelerin dielektrik sabitleri .....	43
Şekil 4.15.	b Farklı katkı içeren beton numunelerin kayıp faktörü değerleri .....	43
Şekil 4.16.	a Farklı katkı içeren beton numunelerin saçılım parametreleri (S11) .....	44
Şekil 4.16.	b Farklı katkı içeren beton numunelerin saçılım parametreleri (S12) .....	44
Şekil 4.17.	IEEE standartlarına göre kalkanlama etkinliği ölçüm düzeneği.....	45
Şekil 4.18.	Beton numunelerin kalkanlama etkinliği değerleri.....	46

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Kullanılan liflerin fiziksel özellikleri .....	8
Çizelge 3.2.	CEM I 42,5 çimentoya ait kimyasal kompozisyon .....	9
Çizelge 3.3.	Üretilen lifli betonlara ait karışım dizaynları .....	9
Çizelge 3.4.	2. Çalışmaya ait karışım oranlarının detayları.....	11
Çizelge 3.5.	3. Çalışmaya ait karışım detayı .....	12
Çizelge 3.6.	Mineral katkıların ve çimentonun kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri.....	12
Çizelge 3.7.	4. Çalışmaya ait karışım detayları .....	13
Çizelge 4.1.	28 günlük numunelerin basınç değerleri ve su-çimento oranı arasındaki ilişki.....	29

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\sigma$	: Gerilme
$\Gamma$	: Yansıma sabiti
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
$z$	: Dalga yayılımı kalınlığı
$Z$	: Empedans
$\mu_r$	: Bağıl dielektrik
$\varepsilon_r$	: Bağıl geçirgenlik
$\varepsilon'$	: Dielektrik Sabiti

### KISALTMALAR

<b>EM</b>	:Elektromanyetik
<b>ACI</b>	: American Concrete Institute
<b>S/Ç</b>	: Su/Çimento
<b>PÇ</b>	: Portland çimentosu
<b>NRW</b>	: Nicolson Ross Weir
<b>CW</b>	: Kolemanit atığı
<b>GHz</b>	: Giga Hertz
<b>f</b>	: Frekans
<b>P</b>	: Maksimum yük
<b>a</b>	: Beton numune boyu
<b>W<sub>dyk</sub></b>	: Numunenin doymun yüzey kuru ağırlığı (g)
<b>W<sub>k</sub></b>	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g)

## 1. GİRİŞ

Beton kullanılan en yaygın yapı malzemesidir. Beton çimento, su, ince-iri agrega ve hava muhteva eden heterojen bir malzemedir. Agregalar betonda dolgu malzemesi olarak kullanılıp çimento ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda beton içerisindeki malzemeleri bir arada tutan bir hamur meydana gelir. Doğası gereği kırılmandır ve basınç gerilmelerine dayanıklı olup çekme gerilmelerine olan direnci düşüktür. Bu malzemeye olan ihtiyaç araştırmacıları betonun mukavemet özelliklerini geliştirmek için harekete geçirmiştir. Betonun çekme direncini arttırmak için uzun süreler boyunca beton içerisinde çelik donatılar kullanılmıştır. Fakat son yıllarda betonun mekanik davranışını geliştirmek için beton içerisinde lifler kullanılmaktadır (Beglarigale ve Yazıcı, 2015; Yoo ve ark., 2013). Çelik, elyaf, propilen ve organik lif çeşitleri lifli beton üretiminde kullanılmaktadır.

Lif ile güçlendirilmiş betonlarda beton içerisindeki liflerin dağılımı ve yönelimi büyük bir öneme sahip olup lifli betonun performansını önemli ölçüde etkiler. Lifli beton sertleştikten sonra içerisindeki liflerin homojen dağılıp dağılmadığı veyahut istenilen yönetime sahip olup olmaması lifli betonun amacına hizmet etmesi bakımından önemlidir. Bu şekilde sertleşmiş betonun kalite kontrolü de sağlanmış olacaktır.

Kullanıcı güvenliği ve yapının servis ömrü için bakım onarım çalışmalarının önemi büyüktür. Yapı yaşının artmasıyla bakım onarım çalışmaları olduğundan fazla karmaşık hale gelir. Genellikle hasar tespit çalışmalarında tahribatlı test yöntemleri kullanılır. Bir hasarın oluşum doğasının ve yapının bütünlüğünü izleme yöntemine health monitoring denir (Bosco ve ark., 2006; Noise ve ark., 1992; Hector ve Dairon, 2015).

Betonun zaman içerisinde bozulması, beton içerisindeki donatıların korozyonu ve yapı elemanları arasındaki bağların zayıflaması inşaat mühendisleri için endişe verici bir konudur. Hasarlı bir yapıya gerekli özen gösterilmezse servis ömrü azalacağı gibi yapısal bütünlük de kısa sürede bozulacaktır. Bu nedenle yapıların sürekli bir şekilde izlenmesi, hasar tespitlerinin yapılması ve bakım onarım çalışmalarının yapılması gerekir. Hasar izleme prosedüründe yapı üzerinde lokal ve genel gözlem yapılır. Genel gözlemlerde yapının bütünü hakkında bilgi edinilirken lokal incelemede hasarın yeri, çeşidi, yoğunluğu gibi parametreler elde edilir (Hong ve ark., 2012; Kim ve Kwak,

2008; Selleck ve ark., 1998; Yim ve ark., 2016; Chen ve ark., 2016). Her iki hasar tespit yöntemi de yapının güvenliği için kalıcılık açısından önem arz etmektedir.

Gelişen teknoloji ile birlikte, elektromanyetik kirlilik, hava ve su kirliliğinde olduğu kadar toplum için zararlı olan kirliliğin yeni bir formu olarak kabul edilmiştir. Elektromanyetik kirliliğin son yıllar içinde milyonlarca kat arttığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, elektromanyetik alanların çevre üzerindeki etkileri üzerine çalışmalar artmıştır (Ünal ve ark., 2006). İnsan oğlunu, hayvanları ve hassas aletleri (tıbbi cihazlar, iletişim araçları, kontrol sistemleri, data işlem cihazları) korumak için çeşitli manyetik ve elektrik alanları kalkanlama çalışmaları vardır. İletişim ağlarından ve diğer kaynaklardan meydana gelen elektromanyetik radyasyon önemli bir problem teşkil ettiğinden kalkanlama önemlidir. Kalkanlama etkinliği elektromanyetik enerji yansıtacak yetenek olarak tanımlanır ve mevcut elektriğin iletilen elektriğe oranlanması ile hesaplanır. Bu kalkanlama etkinliği elektromanyetik dalganın frekansı malzemesinin elektromanyetik özelliklerine bağlıdır.

Bu çalışmada;

- Farklı lif oranlarına, yönelimine ve lif tipine sahip lifli betonların elektromanyetik (EM) davranışları kaydedilerek elde edilen sonuçlar yorumlanarak sertleşmiş beton içerisindeki lif yönelimi ve dağılımının hasarsız olarak tespit edilmesi ve yorum yapılabilmesi (1. Çalışma),
- Farklı su-çimento oranına ve çimento çeşitlerine sahip betonların mekanik özellikleri ile elektromanyetik davranışları arasında bir ilişki kurulup kurulmayacağına tespiti (2. Çalışma),
- Değişik su muhtevalarına sahip betonların EM parametrelerinin ölçülmesi ile su içeriği-EM davranış arasında bir ilişki kurulup kurulmayacağına araştırılması, farklı mukavemet değerlerine sahip beton örnekleri ile EM davranış arasında bir ilişki kurulup kurulmayacağına araştırılması, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış beton numunelerinin hasar tespitinin EM ölçümlerle tespit edilip edilmeyeceğinin araştırılması, farklı olgunluk seviyelerine sahip betonların yaş tespitinin EM ölçümlerle tespit edilip edilmeyeceği ve betonda basınçtan dolayı meydana gelen çatlakların EM test teknikleri ile tespiti (3. Çalışma),
- Bor ürün ve atıklarını içeren betonların EM dalga emiciliğinin mekanik dayanım davranışları da dikkate alınarak incelenmesi (4. Çalışma) amaçlanmaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Beton içerisine ilave edilen az miktarda lif dahi betonun eğilme-çekme dayanımı, tokluk, enerji yutma kapasitesi, yorulma ve darbe dayanımı gibi özelliklerini iyileştirir (Mohammadi ve ark., 2008; Yazıcı ve ark., 2007). Bu iyileştirme betonun en zayıf bölgesine gelen yükün lifler aracılığıyla betonun daha dayanıklı kısımlarına aktarımı sayesinde olur (Octavio ve ark., 2016).

Lifli betonların performansı içerisinde bulunan liflerin yönüne, dağılımına, şekline ve cinsine bağlıdır. Bensaid Boulekbachea ve ark. lifli betonların mekanik özelliklerini çalışmışlardır ve bulgularına göre lifli betonların eğilme direncinin çekme gerilmeleri ile lif yönünün aynı olduğu durumlarda önemli ölçüde arttığını rapor etmişlerdir (Baulekbache ve ark., 2010). Lifli betonlardan en iyi verimin alınabilmesi için liflerin beton içerisinde homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir. Aksi takdirde liflerin az olduğu veya olmadığı bölümlerde betonun yük altında istenilen performansı sergilemesi beklenilmez (Sarmiento ve ark., 2016; Kang ve ark., 2011). Yoo ve Yoon (2015) çalışmalarında farklı çeşit lifler kullanıp, bunların yüksek performanslı betonlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre lif uzunluğunun artmasıyla betonun sünekliğinin de arttığını rapor etmişlerdir.

Lifli beton içerisindeki lif dağılımını ve yönelimini tespit etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Gettu, 2004). Al-Mattarneh (2014) çalışmasında çelik lifle güçlendirilmiş lifli betonlarda çelik lif yoğunluğu ve yönelimini belirlemek için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Sistem lifli beton ile teması ihtiyaç duyar ve test için betonun sadece bir yüzünü gerektirir. Yüzey elektromanyetik sensörü, beton yüzeyi üzerinde bükülür ve lif dağılımını değerlendirmek için çeşitli yerlerde dielektrik özellikleri ölçer. Buna ek olarak, sensör elektrik alanını çeşitli açılarla polarize eder ve çelik lif yönünü değerlendirmek için döndürebilir. Ölçülen dielektrik özelliklerin ortalama ve standart sapması, fiber içeriği ve lif dağılımı arttıkça artar. Sonuçlardan, lifin elektrik alan yönüne doğru yönlendirildiğinde direnç özelliklerinin azami olduğu ve dikeyken minimum olduğu tespit edilmiştir. Fakat lifli beton içerisindeki lif dağılım ve yönelimini belirlemek için literatürde standart bir yöntem yoktur. Lifli betonlardan maksimum fayda sağlanabilmesi için liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması



ve mümkün mertebe uygulanan yüke paralel olacak şekilde konumlandırılması gerektiği yapı mühendisleri tarafından onaylanmış bir husustur.

Betonun dayanım kazanmasını ve beton yapısı incelemede hasarsız test teknikleri ve hasarsız değerlendirme teknikleri mevcuttur. Bu yöntemler betonda meydana gelen hasarları izlemede ya da beton kalite kontrolü için kullanılır. Buna ek olarak, hasarsız test teknikleri yapıların kullanılabilirliğini de tespit eder. Bu nedenle birçok araştırmacı hasarsız test teknikleri ve uygulamaları üzerine çalışma yapmıştır (Al-Qadi ve ark., 1991).

(Zoughi ve ark. (1995) yapmış oldukları çalışmada radyo ve mikrodalga hasarsız test tekniği kullanılarak su muhtevası, çatlak, boşluk ve düzensizliklerin tespit etmişlerdir. Bu metotları kullanmak diğer hasarsız test teknikleri (radyografi, ultrasonik, girdap akımları gibi) ile kıyaslandığında daha güvenilir, ucuz ve uygulanabilir sonuçlar verir. Son zamanlarda mikrodalga hasarsız test teknikleri (zemin sondalama radarı, serbest uzay mikrodalga teknikleri) beton kalite kontrolü için etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Mikrodalga hasarsız test teknikleri hızlı, kesin, güvenilir, kolay ve ucuz olduğu için yapı sektöründe tercih edilen ve edilmeye devam edilecek bir yöntemdir (Bois, 1999).

Karl ve ark. (2000) yapmış oldukları çalışmada betonun yakın alan yansıtma özellikleri ile betonun dayanımını önemli ölçüde etkileyen su-çimento oranı ve agrega-çimento oranı arasında bir ilişki kurmuştur. Zoughi ve ark. (1995) ise çalışmalarında farklı su-çimento oranına sahip çimento pastalarını farklı frekans aralığında test etmişlerdir. Bulgularına göre yansıma parametreleri ve su çimento arasında bir ilişki vardır. Böylece dayanım ve yansıma parametreleri arasında da bir ilişki kurduklarını söylemişlerdir.

Yapı mühendisliğinde tahribatsız test teknikleri beton kalitesini belirlemede, hasar çeşidini ve şiddetini tespit etmede, beton özelliklerini belirlemede kullanılır. Beton özelliklerinin elektromanyetik dalgalar kullanarak tespit etmek de hasarsız test yöntemleri kapsamındadır. Bu yöntem ile; boşluk oranı, su muhtevası, çatlak ilerleme, klor içeriği, mukavemet, donatı çatlağı ve korozyonu gibi yapısal özellikleri tespit etmek mümkündür (Plati ve Loizos, 2012; Sanchez ve ark., 2013; Alrifai ve ark., 2013).

Yapı mühendisliğinde genellikle hasarsız test yöntemleri, hasarlı bir şekilde elde edilen test sonuçlarını hızlı bir şekilde elde ederek; beton kalitesi hakkında hızlı bir bilgi

edinmek amacıyla uygulanır. Hasarsız test tekniklerinin direkt olarak kullanılmamasının sebebi; test prosedürlerinin düzgün bir şekilde uygulanmaması, kullanılan aletlerin kullanımının tam bilinmemesi ve veri toplamanın düzgün yapılamamasıdır (Krapez ve ark., 1991).

Mevcut hasarsız test teknikleri gerektiği kadar başarılı ve kesin sonuçlar vermemektedir. Birçok araştırmacı bu nedenden dolayı sinyal işleme, sensör ve teoriler üreterek bu soruna çözüm aramıştır (Chondros ve Dimaronas 1980; Banerjee ve Pohit, 2014a; Banerjee ve Pohit, 2014b).

Elektromanyetik (EM) dalga emici malzemeler kendilerinin karakteristik özelliklerine göre manyetik ve dielektrik emici malzemeler olmak üzere iki gruba ayrılır (Liu ve ark., 2015). Geleneksel olarak genelde ferrit ve metalik tozlar EM dalga emilimi için kullanılır (Gong ve ark., 2009). Bu malzeme tiplerinin uygulaması güçlü emme ve geniş bant genişliği sağlar, ancak aynı zamanda yüksek yoğunluk ve yüksek sıcaklığa zayıflık gibi dezavantajları da vardır (Moucka ve ark., 2007). Dielektrik emici malzeme söz konusu olduğunda, bunların etkinliği ohmik kayba bağlıdır. Bu kayıp karbon siyahı, grafit, silikon karbit gibi iletken dolgu maddeleri kullanılarak sağlanabilir (Park ve ark., 2006). Bu malzemeler, nispeten hafif ama yine de EM dalga emilimi için uygun değildir, çünkü dar bant-genişliğinde düşük emme değerleri verirler (Chen ve ark., 2011). Bu nedenlerden dolayı, EM dalga emici malzemelerin hafif, dayanıklı ve ucuz olmaları için yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Bor cevherleri dünyanın en büyük bor yataklarına sahip olan Türkiye'nin en önemli yeraltı zenginliklerindedir. Bor, sanayinin farklı alanlarında kullanılmaktadır. Türkiye'nin ticari bor cevherleri tinkal, kolemanit ve üleksittir. Bu mineraller borik asit ve boratlar üretmek için üretim tesislerinde yoğunlaştırılmaktadır. Borat ve borik asitlerin üretilmesinden sonra kolemanit ve borojips gibi yan ürünler ve atıklar da ortaya çıkar.

Son yıllarda bor içeren mineraller araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Literatürde bor ürünlerinin, yan ürünlerinin, atıklarının beton içerisinde çimento yerine kullanılması hakkında çalışmalar mevcuttur (Sevim ve Tümen, 2013; Erdoğan ve ark., 1998). Ayrıca bor içeren betonların radyasyon geçirgenliğini inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Demir ve Keleş (2006) bor atığı içeren betonların radyasyon iletimini çalışmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarına göre bor atığı içeren betonlar radyasyon iletimini

engellemek için kullanılabilir. Demir ve ark. (2010) ise kolemanit içeren hafif ve normal betonların radyasyon iletkenliğini çalışmışlardır. Bulgularına göre lineer zayıflama katsayısı betonda kolemanit yoğunluğu arttıkça azalmıştır. Boncukođlu ve ark. (2005) ise tinkalden boraks üretimi aşamasında meydana gelen silindir gövdeli elek atığının radyoaktif dalga geçirimsizliğinin normal betonlara göre daha az olduğunu kaydetmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

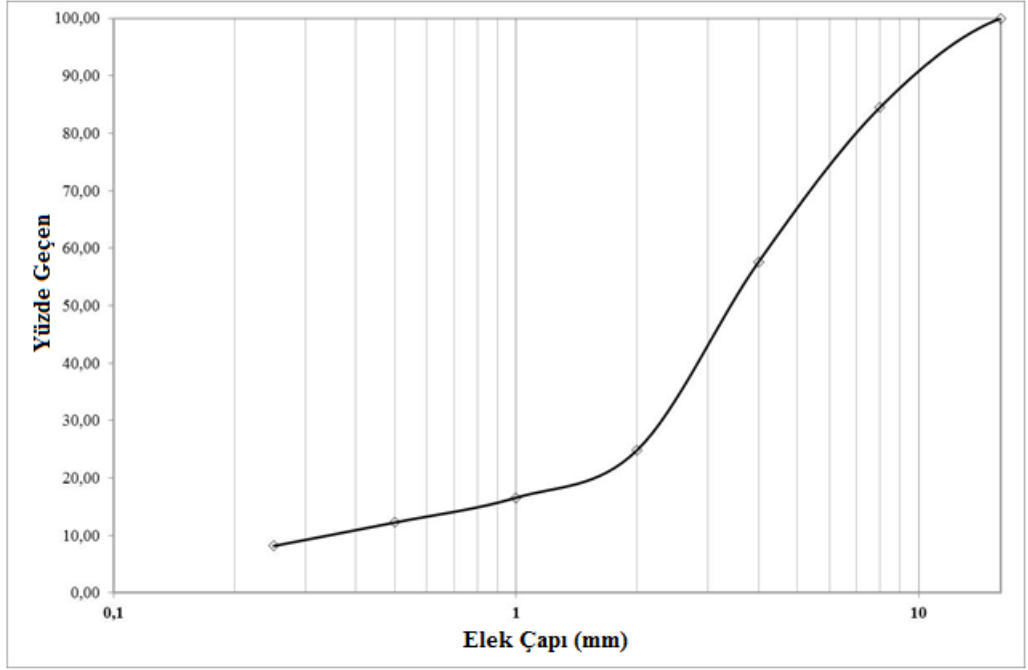
Tez çalışmamız 4 farklı deneysel çalışmanın birleşiminden oluşmaktadır. Bu çalışmalar;

1. Sertleşmiş lifli betonlarda lif dağılımının ve yöneliminin EM dalga yöntemleri ile tespit edilmesi,
2. Betonun mekanik ve geçirim özellikleri ile EM özellikleri arasında bir ilişkinin kurulması,
3. Betonun su içeriği, mukavemet, yüksek sıcaklık, olgunluk ve çatlak oluşumu gibi değerlerin EM özellikler ile açıklanması,
4. Bor ürün ve atıklarını içeren betonların EM dalga emiciliğinin mekanik dayanım davranışları da dikkate alınarak incelenmesidir.

#### 3.1. Materyaller ve Karışım Oranları

**1. çalışmada** özgün bir deney programı kurulmuş olup lifli betonun performansını en çok etkileyen beton içerisindeki lif dağılımını ve yönelimini tespit edebilmek için lifli betonların elektromanyetik davranışları incelenmiştir.

Lifli beton karışımını hazırlamak için; karbon çelik lif, propilen lif, forta ferro lif, maksimum tane çapı 4 mm olan ince agrega, maksimum tane çapı 16 mm olan iri agrega, portland çimentosu ve su kullanılmıştır. Kullanılan karışık agregaya ait elek analizi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Üç farklı tip (karbon çelik lif, propilen lif, forta ferro lif) lifin fiziksel özellikleri ve görünümü Çizelge 3.1. ve Şekil 3.2.'de gösterilmiş olup CEM I 42.5 çimentoya ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.2.'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Kullanılan karışık agregaya ait elek analizi

Çizelge 3.1. Kullanılan liflerin fiziksel özellikleri

	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Özgül Ağılık	Young Modülü (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Karbon Çelik Lif</b>	60	0.75	1100	7.1	210000
<b>Propilen Lif</b>	40	0.7	295	0.9	2150
<b>Forta Ferro Lif</b>	54	0.8	650	0.9	4700



(a) Forta Ferro Lif

(b) Karbon Çelik Lif

(c) Propilen Lif

Şekil 3.2. Kullanılan liflerin görünümü

Çizelge 3.2. CEM I 42.5 çimentoya ait kimyasal kompozisyon

<b>Kimyasal Kompozisyon</b>	<b>Analizler (%)</b>
MgO	2.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.57
SiO <sub>2</sub>	21.56
CaO	61.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00
SO <sub>3</sub>	3.19
K <sub>2</sub> O	0.69
Na <sub>2</sub> O	0.27

Lifli beton karışım hesaplarında ACI tarafından tanımlanan mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Bütün karışımlarda su-çimento oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Lifli betonlarda lif tipinin elektromanyetik dalga üzerindeki etkisini göstermek için üç farklı tipte lif kullanılmış olup liflerin beton içerisindeki yığılmaları ya da dağılım homojenliğini tespit etmek için ise üç farklı (%0.5, 1 ve 1.5) lif yoğunluğu seçilmiştir. Üretilen lifli betonlara ait karışım dizaynları Çizelge 3.3.'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Üretilen lifli betonlara ait karışım dizaynları

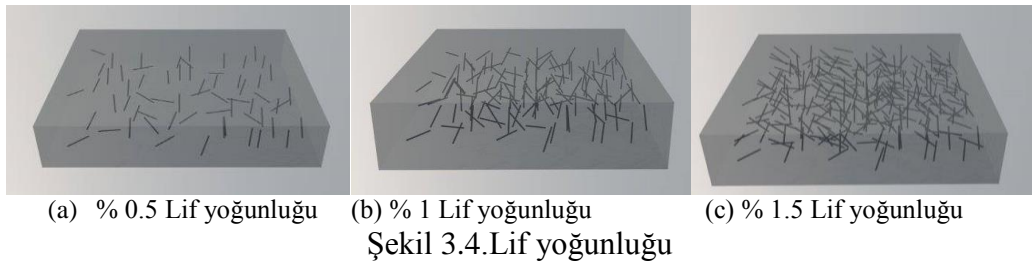
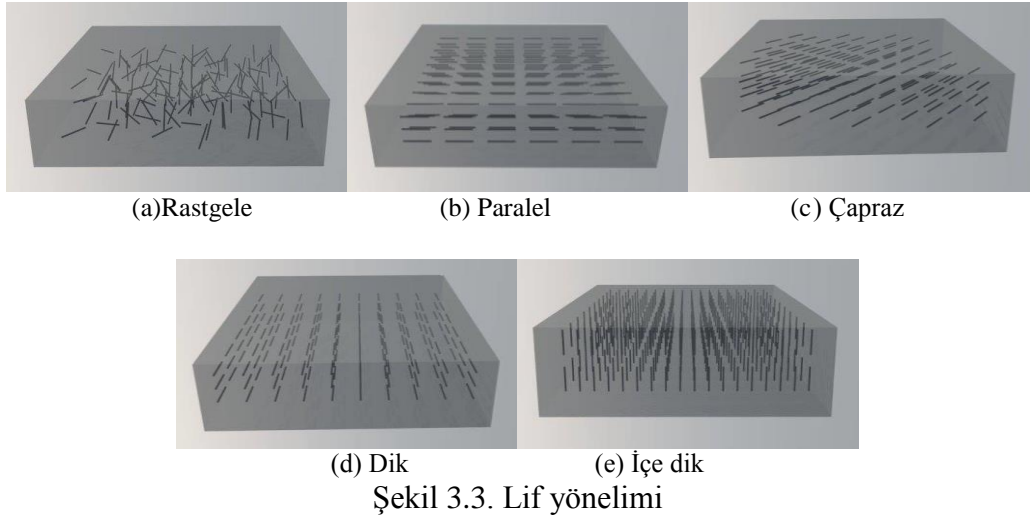
	<b>S/Ç</b>	<b>Su (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Çimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Lif Birim Ağırlığı</b>	<b>İnce Agregat (kg) (0-4 mm)</b>	<b>İri Agregat (kg) (4-11 mm)</b>	<b>Kullanılan Lif Hacmi (dm<sup>3</sup>)</b>
<b>Kontrol</b>	0.5	250	500	-	617.39	637.04	-
<b>ÇLB</b>	0.5	250	500	7,1	617.39	637.04	5-10-15
<b>PLB</b>	0.5	250	500	0,9	617.39	637.04	5-10-15
<b>FFLB</b>	0.5	250	500	0,9	617.39	637.04	5-10-15

Aşağıda detayları verilen yirmi iki farklı test numunesi üretilmiştir;

- Her bir lif çeşidi için beş farklı lif yönelimi (Şekil 3.3.) (paralel, dik, çapraz, içe dik ve rasgele).
- Lifli beton içerisinde her bir lif çeşidi için beton hacminin %0.5, 1 ve 1.5'i kadar lif ( Şekil 3.4.)

- Üç farklı tipte lif (karbon çelik lif, propilen lif, forta ferro lif) içeren lifli betonlar.

Yukarıda içeriği verilen beton karışımları kullanılarak beton numuneler şu şekilde üretilmiştir. İnce ve iri agrega beton karıştırıcısına dökülür ve bir dakika karıştırılmıştır. Çimentonun da karıştırıcıya dökülmesiyle karışım kuru şekilde yaklaşık iki dakika karıştırılmıştır. Son olarak karışıma su eklenmiş ve plastik form elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu karışımlar, hızı kademeli şekilde artan beton karıştırma makinesinde yapılmıştır. Lif yönelimini kontrol edebilmek için kalıplara beton içerisine lifler elle dikkatli bir şekilde yerleştirilmiştir. Bütün beton numunelerinin kalıp ölçüleri (20x20x5 cm<sup>3</sup>) tür. Lifli beton numuneler betonun kalıba dökülmesinden 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp 28 gün boyunca suda kür edildikten sonra elektromanyetik özellikleri tespit edilmiştir.



**2. çalışmada** farklı özellikteki betonların elektriksel özellikleri ile mekanik/geçirimsizlik özellikleri arasındaki ilişkiyi bulmak için kapsamlı bir deney programı yapılmıştır. Beton karışımlarını hazırlamak için; Portland çimentosu, beyaz çimento, alüminli çimento, maksimum tane boyutu 4 mm ve 16 mm olan ince ve iri agrega ve su kullanılmıştır.

Beton karışım hesapları için toplam hacim yöntemi kullanılmıştır (ACI 211.1-91). Portland çimentosu, beyaz çimento ve alüminli çimento içeren betonların su-çimento oranları 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Fakat su çimento oranının mekanik/geçirimsizlik ve elektriksel özelliklere olan etkisini görmek için sadece Portland çimento içeren betonlar test edilmiştir. Bu nedenle farklı bir deney grubu oluşturularak farklı su-çimento oranına sahip numune betonlar üretilmiştir. Karışım oranlarının detayları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. İkinci çalışmaya ait karışım oranlarının detayları

S/Ç	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	İnce Agregası (kg) (0-4 mm)	İri Agregası (kg) (4-11 mm)
0.4	200	500	672.39	693.79
0.5	250	500	617.39	637.04
0.6	300	500	562.39	580.29

Beş farklı beton karışımından aşağıdakiler dikkate alınarak test numuneleri hazırlanmıştır;

- Üç farklı çimento çeşidi (Portland çimentosu, beyaz çimento ve alimünlü çimento) içeren beton numuneler
- Üç farklı su-çimento oranına (0.4, 0.5 ve 0.6) sahip Portland çimentosu içeren beton numuneler

Betonların elektromanyetik (EM) davranışını incelemek için 4 cm kalınlığında 15x15 cm<sup>2</sup> boyutlarında plakalar, basınç dayanımı/aşınma/su emme deneyleri için 10x10x10 cm<sup>3</sup> boyutunda küpler ve yarma/yüksek basınçlı su geçirimsizlik deneyleri için ise 15x15x15 cm<sup>3</sup> boyutunda küp numuneler hazırlanmıştır. Söz konusu boyutlar ölçüm hatalarının önüne geçmek ve NRW metodunun kullanılması için gereken sınır şartlarını sağlayabilmek adına dikkatlice seçilmiştir. Beton numuneler kalıba döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp 28 gün su kürüne maruz bırakılmıştır.

**3. çalışmada** beton hazırlamak için Portland çimentosu, ince ve iri agrega ve su kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal içeriği Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir. Kullanılan ince ve iri agreganın maksimum dane çapı sırasıyla 4 ve 16 mm'dir. Ayrıca incelik modülleri 2.79- 5.13 olup özgül ağırlıkları 2.58 ve 2.61'dir.



Karışımların su-çimento oranları 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Karışımın detayları Çizelge 3.5.'te gösterilmiştir. Karışımın düzgün bir şekilde karışması için kontrollü hızlanan beton karıştırıcısı kullanılmıştır. Plaka (4x15x15 cm<sup>3</sup>) ve küp (10x10x10 cm<sup>3</sup>) numuneler üretilmiştir ve betonun kalıplara dökülmesinden 24 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra 28 gün boyunca suda kür uygulanmıştır. Kür süresi bitikten sonra numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır.

Çizelge 3.5. Üçüncü çalışmaya ait karışım detayı

S/Ç	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	İnce Agregası (kg) (0-4 mm)	İri Agregası (kg) (4-11 mm)
0,5	250	500	617.39	637.04

**4. çalışmada** ise beton karışımları için Portland çimentosu, bor ürünü (kolemanit) ve atıkları (borogypsum, kolemanit atığı 1 (KA1), kolemanite atığı 2 (KA2)), ince ve iri agregası kullanılmıştır. Mineral katkıların ve çimentonun kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.6. ve Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir. Nominal çapı maksimum 4 mm ve 16 mm olan ince ve iri agregası kullanılmıştır. İnce ve iri taneli agregaların incelik modülü sırasıyla 2.79 ve 5.13 olup özgül ağırlıkları 2.58 ve 2.61'dir.

Çizelge 3.6. Mineral katkıların ve çimentonun kimyasal bileşenleri ve fiziksel özellikleri

	Borojips	Kolemanit	KA1	KA2
<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(%)</b>	1.05	40.51	33.99	17.16
<b>SiO<sub>2</sub>(%)</b>	13.17	6.76	15.88	32.1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(%)</b>	2.39	0.92	5.47	10.2
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(%)</b>	1.08	0.50	5.47	3.69
<b>CaO(%)</b>	37.33	23.30	18.51	8.01
<b>MgO(%)</b>	3.10	3.47	4.15	5.63
<b>SO<sub>3</sub>(%)</b>	32.17	-	-	-
<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.45	2.38	2.32	2.33
<b>Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	5000	3500	4000	15000

Çimentonun ağırlıkça %5 i kadar bor ürün ve atıklarını içeren beş farklı karışım ve de kontrol numune olarak seçilen mineral içermeyen beton karışım mekanik ve elektromanyetik (EM) testler yapılmak üzere hazırlanmıştır. Mineral katkı oranının çimento ağırlığının %5' i kadar seçilmesinin sebebi daha önce yapılan çalışmalar ışığında en uygun oranın bu şekilde olması gerektiği önerildiği içindir (Sevim ve Tümen, 2013; Erdoğan ve ark., 1998; Sevim, 2011; Özdemir ve Öztürk, 2003). Su-bağlayıcı oranı bütün karışımlar için 0.5 olarak sabit tutulmuştur ve çimento dozajı 500 kg'dır. Karışım detayları Çizelge 3.7'de verilmiştir. Beton karıştırmak için hızlı aşamalı olarak artan karıştırıcı kullanılmıştır. Plak (40x150x150 mm<sup>3</sup>) ve küp (100x100x100 mm<sup>3</sup> – 150x150x150 mm<sup>3</sup>) numuneler kalıba dökülüp sıkıştırılmıştır. Numuneler beton dökümünden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca su kürüne tabi tutulmuştur.

Çizelge 3.7. Dördüncü çalışmaya ait karışım datayları

Karışım Adı	S/Ç	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	Mineral Katkı (kg/m <sup>3</sup> )	İnce Agrega (kg) (0-4 mm)	İri Agrega (kg) (4-11 mm)
A0	0.5	250	500	-	617.39	637.04
A1	0.5	250	475	25	617.39	637.04
A2	0.5	250	475	25	617.39	637.04
A3	0.5	250	475	25	617.39	637.04
A4	0.5	250	475	25	617.39	637.04

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Deneysel Çalışmalar

Her malzeme elektromanyetik alana maruz kaldığında farklı elektromanyetik davranış sergiler. Bir malzemenin elektromanyetik özelliklerini tanımlayan parametrelerden biri elektrik geçirgenliği ( $\epsilon$ )'dir. Bir malzeme elektrik alana maruz bırakıldığında alanın genişliğine, fazına ve yönüne bağlı olarak malzemede etkileşim ve polarizasyon meydana gelir. Eşit şartlar altında malzemelerin sadece elektrik

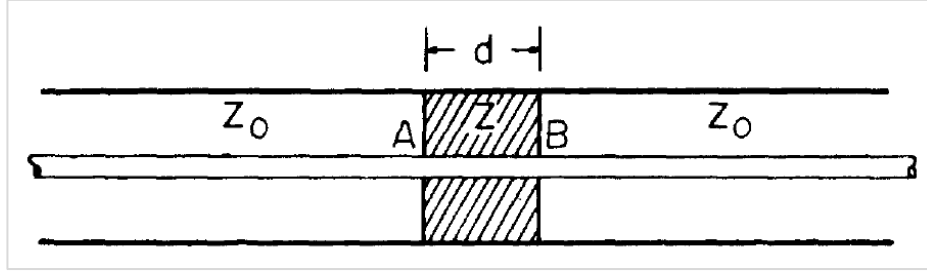
geçirgenliğine bakarak birbirinden ayırt edebilmek mümkündür. Hâlihazırda sıcaklık, yoğunluk, basınç, katkı oranı gibi parametreleri tespit etmek için bu ilkeyi kullanan oldukça fazla sensör uygulaması vardır (Sabah ve ark., 2015; Bakir ve ark., 2016; Ünal ve ark. 2015). Bu parametrelerini kullanarak sağlıktan uzay bilimine kadar yeni keşifler yapılıyor olsa da elektriksel iletkenliği ve onun ürünleri olan kayıp tanjant, colecole parametreleri kullanıp betonda direkt ve hasarsız test yöntemi olarak inşaat sektöründe kullanımı oldukça sınırlıdır. Deneysel çalışmalar oldukça geniş frekans aralığına sahip (3 GHz-18 GHz) vektör ağ analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Saçılma parametrelerini (S parametrelerini) veren vektör ağ analizörünün yanında düzgün sonuçlar elde edebilmek için yüksek kazançlı anten kullanmak gereklidir. Bu çalışmada betonların iletim ve yansıma parametrelerini bulmak için doğrusal polarize edilmiş 3-18 GHz bant aralığına sahip iki anten kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın şematik görünümü Şekil 3.5.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere iki anten beton numunelerinin ön ve arkasına aynı polarizasyonda eşit uzaklıkta konumlandırılmıştır. Bu şekilde betonun elektriksel özellikleri ve kalkanlama etkinliği numunenin co-polar davranışından bulunabilir. Numunenin reaktif aktif elektriksel alanda bulunmaması için numuneler ile anten arasındaki uzaklık dikkatlice ayarlanmıştır.



Şekil 3.5. Deneysel çalışmanın şematik görünümü

Betonların elektromanyetik özellikleri bu çalışmada Nicolson Ross Weir (NRW) metodu kullanılarak yapılmıştır (Nicolson ve Ross, 1970; Weir, 1974). Saçılım parametreleri (S11, S12, S21 ve S22) elde edildikten sonra elektrik geçirgenlik ve ayıp faktörü gibi ana elektromanyetik parametreler çekilmiştir. Parametreler  $\mu = \mu_0\mu_r$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ ,  $Z = \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} Z_0$  ve  $d$  olarak listelenebilir.  $\mu$  manyetik geçirgenlik,  $\varepsilon$  elektriksel geçirgenlik,  $Z$  karakteristik empedans ve  $d$  ise numune kalınlığını temsil eder. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak simülasyonlar ve sensör çalışmaları da yapılabilir. Düzenek Şekil 3.6.'te gösterildiği gibidir.

Yansıma sabiti  $\Gamma$ ;



Şekil 3.6. Saçılım parametreleri ölçüm düzeneği

$$\Gamma = \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}-1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}+1} \quad (3.1)$$

Numuneler içerisinde dalga yayılımı kalınlık cinsinden  $z$  olarak tanımlanır;

$$z = \exp -j\omega\sqrt{\mu\epsilon}d = \exp[-j(\omega/c)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d] \quad (3.2)$$

Bu nedenle, iletim ve yansıma değerleri  $z$  cinsinden tanımlanabilir ve  $\Gamma$ ;

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1+\Gamma)(1-\Gamma)z}{1-\Gamma^2z^2} = \frac{(1-\Gamma^2)z}{1-\Gamma^2z^2}, S_{11}(\omega) = \frac{(1-z^2)\Gamma}{1-\Gamma^2z^2} \quad (3.3)$$

$S_{11}$  and  $S_{21}$  parametrelerine bağlı empedans;

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3.4)$$

Şayet saçılım parametrelerinin toplamı ve farkı  $V_1$  ve  $V_2$  ise;

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (3.5)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (3.6)$$

Bağıl dielektrik ve geçirgenlik;

$$\mu_r \sim \left(\frac{2}{jk_0d}\right) \frac{1-V_2}{1+V_2} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_r \sim \left(\frac{2}{jk_0d}\right) \frac{1-V_1}{1+V_1} \quad (3.8)$$

$k$  numunelerin dalga vektörünü gösterir.

$$k \sim \frac{1}{jd} \frac{(1-V_1)(1+\Gamma)}{1-\Gamma V_1} \quad (3.9)$$

### 3.2.2. Test Yöntemleri

**1. çalışmada** lifli beton içerisindeki lif dağılımını ve yönelimini tespit etmek için Agilent marka, frekans aralığı 10 MHz-43,5 GHz olan 2-Port PNA-L Network Analyzer cihazı kullanılmıştır. Bu yöntem yeni olup hasarsız yöntemler arasında yerini alacaktır.

Aslında Network Analyzer empedansı ölçmek için kullanılır. Düşük frekanslarda bu yöntem basit araçlarla yapılabilir. Ancak liflerin efektif alana göre küçük olmasından dolayı ve düşük frekansların yüksek dalga boylarına sahip olmasından dolayı bizim çalışmamız için etkili bir yöntem olmayacaktır. Bu sebepten, daha doğru ve hassas ölçümler yapılabilmesi için yüksek frekanslarda çalışılması zorunludur. Network Analyzer, saçılma parametreleri olarak bilinen ağ parametrelerini (S parametreleri) ölçmek için kullanılır. Bazı düzeltmelerle sistemden ayrıca elektrik geçirgenlik, colcole ve gürültü parametrelerini de çekmek mümkündür. İki geniş bant anten ve Network Analyzer'e yüklenmiş ticari bir yazılım programı ile Nicolson Ross Weir Metodu kullanılarak dielektrik sabitlerini ve kayıp faktörlerini bulmak mümkündür. İki bağlantılı ölçüm sistemini kalibre etmek için kalınlığı 1.67 mm olan metal kullanılmış olup, havanın ölçülmesiyle sistemin hassasiyet ölçümü yapılmıştır. Lifli beton numuneler iki anten ortasına yerleştirilip numune kalınlığı ve numunenin antenlere olan uzaklığı sisteme girilerek saçılma parametreleri ölçülür. Her malzeme maruz kaldığı elektromanyetik alana farklı davranır. Geçirgenlik karmaşık bir parametredir ve  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  şeklinde tanımlanır.  $\epsilon'$  dielektrik sabiti olarak adlandırılan gerçel kısım olup,  $\epsilon''$  dielektrik kayıp faktör olarak adlandırılan sanal kısmı temsil eder. Dielektrik sabiti malzemenin elektromanyetik dalgaya karşı olan direncini ya da toleransını gösterir.

Ölçüm kurulumu ve deneysel çalışmanın şematik görünümü Şekil 3.4.'te görüldüğü gibidir. Şekilde de görüleceği üzere sistem bir Network Analyzer ve iki geniş bant antenden oluşur. Test numunesi iki antenin tam ortasına yerleştirilir. Test aşamasındaki en önemli husus numune kalınlığının hassas bir şekilde ölçülüp sisteme tanıtılmasıdır.

**2. çalışmada** testler 4 cm kalınlığında  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  boyutlarında plakalar üzerinde yapılmıştır. Ölçüm düzeneği ve şematik görünümü Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Ölçüm çevresi deney sonuçlarının daha hassas olabilmesi için saçılımları ve yakın alan etkisini en aza indirmek üzere ayarlanmıştır.

1000 kN presleme özelliği olan test cihazı kullanılarak  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$  boyutlarındaki küpler ile yarma deneyleri yapıp  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  boyutlarındaki küpler ile ise basınç deneyleri yapılmıştır. Yarma deneylerini yapmak için küp betonun karşılıklı pürüzsüz yüzlerinin tam ortasına gelecek şekilde iki metal şerit yerleştirilip

çizgisel yük uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı denklem 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (3.10)$$

$\sigma$ : Yarmada çekme dayanımı

P: Yük

a: Küp numune boyutu

Basınç dayanımı deneyinde yarmada çekme deneyinden farklı olarak küp numunelere çizgisel yük değil de yayılı yük uygulanmıştır. Beton basınç dayanımı denklem 3.11 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{a^2} \quad (3.11)$$

Sertleşmiş betonun su emme kapasitesini tespit etmek için ilk olarak 28 gün boyunca suda kür edilen beton numuneler doymuş yüzey kuru hale getirilip ağırlığı ölçülmüştür daha sonra aynı numuneler 24 saat boyunca 110 °C'de etüvde bırakılmıştır ve ağırlık tekrar ölçülmüştür. İki ölçüm arasındaki fark betonun su emme kapasitesi olarak alınmıştır.

$$Sa = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \cdot 100 \quad (3.12)$$

Sa: % Ağırlıkça su emme kapasitesi

Wdyk: Doymuş yüzey kuru ağırlık

Wk: Kuru ağırlık

Hazırlanan beton numunelerinin aşınmaya karşı dirençlerinin ölçülmesi için küp numunelerinin bir yüzeyi düşey aşındırma cihazında aşındırıcı toz kullanılarak aşındırılmış ve 75 tur sonunda aşınma miktarları ağırlık cinsinden kaydedilmiştir.

5 bar su basıncının beton içerisinde ne kadar sızabildiğini öğrenmek için yüksek basınçlı su geçirimsizlik deneyi yapılmıştır. Test prosedürünü başlatmadan önce beton numuneler etüvde 105 °C'de 24 saat boyunca kurutulduktan sonra beton numunelerinin su basıncı uygulanan yüzeyi hariç diğer yüzeyleri parafin ile izole edilmiştir. Bu işlemler yapıldıktan sonra numuneler cihaza yerleştirilir ve küpün bir yüzeyi 5 barlık basınçlı suya maruz bırakılır. 72 saat sonunda numuneler cihazdan çıkartılır ve yarmada kırılır. Kırım sonucunda beton içerisinde suyun ne kadar ilerlediği göz ile görünür ve kumpas yardımı ile su işleme derinliği ölçülür.

**3. çalışmada** beton numunelerin su muhtevalarını tespit edebilmek için 4 cm kalınlığında 15x15 cm<sup>2</sup> ölçülerinde beton plakalar üretilmiştir. 28 gün suda kür edilen plakaların yüzey kuru hale getirilmesinden sonra NRW metodunun kullanılması sonucu dielektrik ve kayıp faktörü değerleri kaydedilmiştir. İkinci ve diğer elektromanyetik ölçümler numunenin belirli sürelerde fırında kurutulması sonucu kontrollü bir şekilde numunelerden su eksiltme yöntemiyle elde edilmiştir. En son ölçüm numunenin tamamen kuru olduğu durumda yapıp test sonlandırılmıştır.

Yüksek sıcaklığın beton numuneler üzerindeki etkisini elektromanyetik test tekniği ile belirlemede ise 4cm kalınlığında 15x15 cm<sup>2</sup> ölçülerinde beton plakalar üretilmiştir ve 28 günlük su kürünün ardından hava kurusu hale getirilip fırın içerisinde 200, 400, 600 ve 800 °C’de ikişer saat bekletildikten sonra elektromanyetik ölçümler yapılmıştır.

Betonun olgunluğunu ölçmek için 4cm kalınlığında 15x15 cm<sup>2</sup> ölçülerinde beton plakalar üretilmiştir. Beton üretildikten 24 saat sonra kalıp sökülüş ve 28. güne kadar belirli zaman aralıklarında elektromanyetik testler uygulanmıştır.

Beton içerisinde çatlak oluşumu ve yayılmasını tespit etmek için 10x10x10 cm<sup>3</sup> boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. 28 günlük su kürü bittikten sonra numuneler kurutulup küplerin üzerine farklı yükler uygulanarak kontrollü bir şekilde betonda çatlak meydana getirilmiş ve her yükten sonra elektromanyetik ölçümler yapılmıştır.

**4. çalışmada** ise farklı içeriğe sahip beton numunelerin mekanik ve elektromanyetik testler sonucunda basınç dayanımı, saçılma parametreleri (S11,S12), kayıp tanjant, epsilon değerleri bulunmuştur.

1000 kN sıkıştırma özelliği olan pres makinası ile basınç dayanımı deneyi 10x10x10 mm<sup>3</sup> ölçülerine sahip küpler kullanılarak yapılmıştır. Basınç dayanımını bulmak için betonun pürüzsüz karşılıklı iki yüzüne lineer bir yük değil de yayılı bir yük uygulanır. Beton basınç dayanımını hesaplamak için 3.11. denklem kullanılmıştır.

Elektromanyetik ölçümler için Agilent marka vektör ağ analizörü ve iki anten kullanılmıştır. Ölçümler yapılmadan önce sistemin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 1.67 mm kalınlığında metal plaka ve hava kalibrasyon için kullanılmıştır. Metalin ve havanın elektrik geçirgenliği bilindiği için analizör bu değerleri kontrol ve referans parametreleri olarak seçer. Ölçümlerin doğru olduğundan emin olmak için her bir beton numunenin ölçümünden önce hava elektrik geçirgenliği ölçülerek verilerin doğruluğu test edilmiştir. Hassas ölçümlerin alınabilmesi için antenlerin numuneye olan

uzaklığı ve numunenin kalınlığı hassas bir şekilde ölçülmüş ve hesaplamalara dâhil edilmiştir. NRW metodu kullanılarak saçılım parametreleri ile diğer elektriksel özellikler hesaplanmıştır.

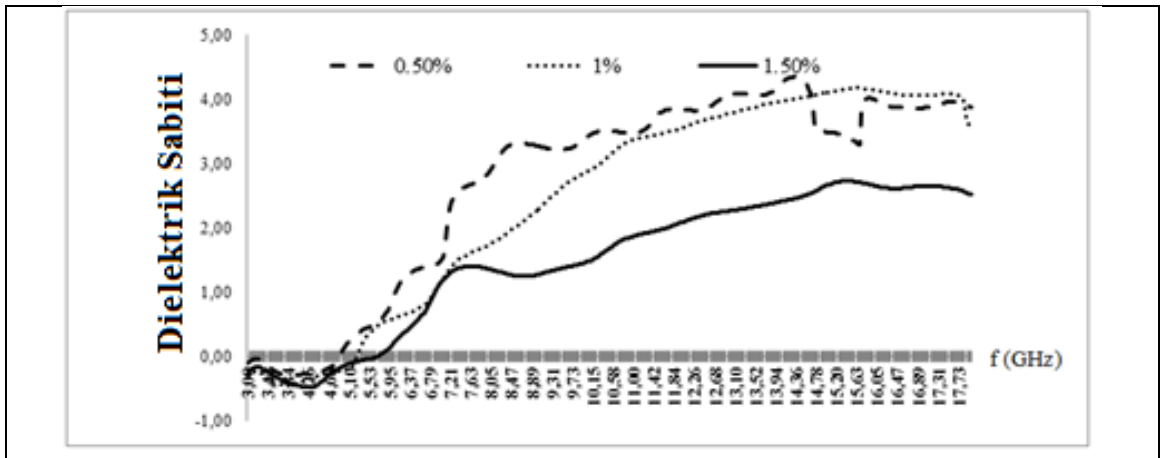


## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

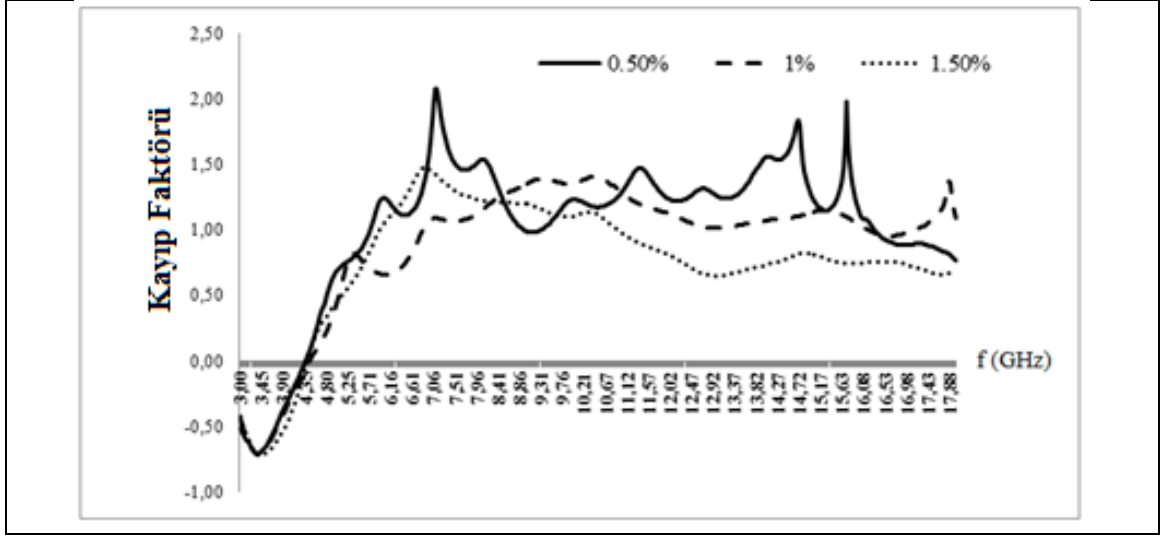
### 4.1. Lifli Betonların Elektromanyetik (EM) Davranışları Kaydedilerek Elde Edilen Sonuçlar Yorumlanarak Sertleşmiş Beton İçerisindeki Lif Yönelimi ve Dağılımı Hakkında Yorum Yapılması

#### 4.1.1. Dağılım Sonuçları

Lifli beton içerisindeki lif dağılımını tespit edebilmek için kalınlığı 5 cm olan 20 cm x 20 cm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Betonların içerisine, rasgele dağılmış, toplam beton hacminin %0.5, %1 ve %1.5'i kadar lif eklenmiştir. Saçılma parametreleri kullanılarak farklı lif yoğunluğuna sahip lifli beton numunelerin dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri elde edilmiştir. İlk ölçümler karbon çelik lif içeren lifli betonlar üstünde yapılmıştır. Şekil 4.1 a ve b de görüleceği üzere karbon çelik lif oranının artmasıyla numunelerin dielektrik sabitleri düşmüştür. Bunun sebebi çelik lif eklenmesi birim yoğunluğunun artmasıyla açıklanabilir. Çelik lif oranlarının değişmesiyle dielektrik sabiti de değişir. Bu fark açıkça 9.13 GHz civarında görülmektedir. Dolayısıyla karbonlu çelik lif oranı, elektromanyetik özelliklerinin analizi sonucunda tahribatsız bir şekilde tespit edilebilir. Buna ek olarak çelik lif oranı tespiti frekansın 14.78 GHz civarında betonun kayıp faktörü değerlendirilerek de hasarsız bir şekilde tanımlanabilir. Bu somut ölçümde ilginç bir nokta göze çarpmakta; 3 GHz ve 5 GHz arasındaki negatif dielektrik sabiti değeri özellikle radar teknolojisinde son derece dayanıklı malzeme yapımında gelecekte endeks medya için bir yenilik sağlayabilecektir.

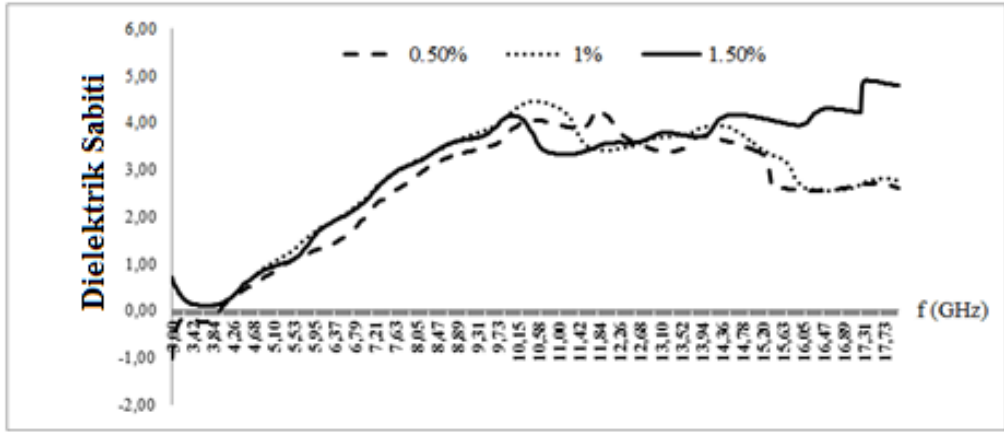


Şekil 4.1.a Farklı yoğunlukta karbon çelik lif içeren betonların dielektrik sabitleri

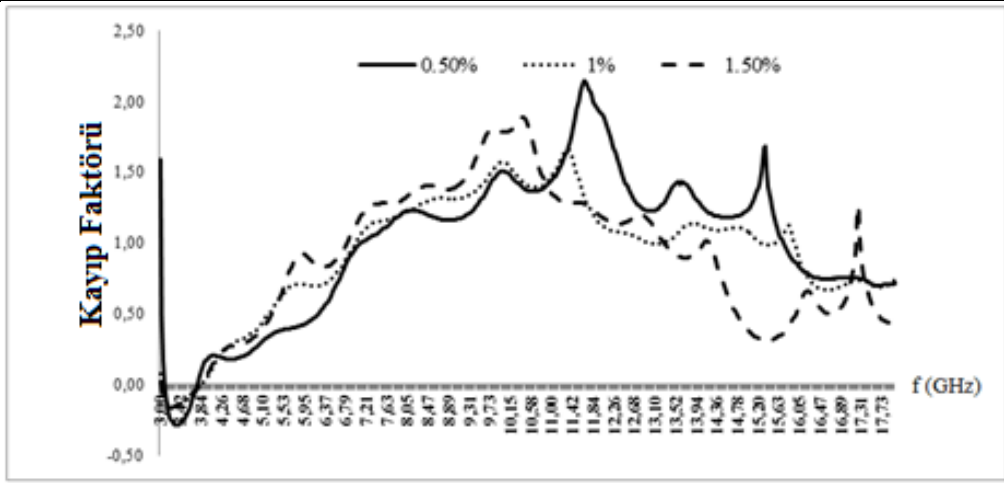


Şekil 4.1.b Farklı yoğunlukta karbon çelik lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri

İncelenen bir diğer lifli beton numunesi Forta ferro lif içermektedir. Şekil 4.2. a ve b de gösterilen sonuçlar yukarıda bahsedilen aynı metod kullanılarak aynı frekans aralığında dielektrik sabiti ve kayıp faktörleri elde edilmiştir. En anlamlı sonuçlar 15.63 GHz civarında elde edilmiştir. 15.63 GHz'de dielektrik sabiti ve Forta ferro lif yoğunluğu arasındaki ters ilişki lifin metalik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi bir malzemenin metalik özelliğinin artırılmasıyla dielektrik sabiti de artar. Lif oranı bu frekans aralığında hasarsız bir şekilde kolayca tespit edilebilir. Ayrıca lif yoğunluğu kayıp faktörü kullanılarak da tespit edilebilir. 15.4 GHz'de kayıp faktörlerinin değerleri 1.7, 1.0 ve 0.38'dir. Buna ek olarak, bir başka ilginç olay yaklaşık 3.84 GHz civarında negatif dielektrik sabitidir. Bu mikrodalga rejimi gelecekteki beton Metamalzemeler için önemli bir adımdır. Bunun yanında betonun dielektrik sabiti 5.6 GHz'de 1'dir. Bu nedenle, lifli betonun empedansı hava ile eşleşmiştir dolayısıyla manyetik özellik göstermediğinden manyetik geçirgenlik aynı zamanda 1'dir. Bu nedenle, çalışılan lifli beton empedans uyumu nedeniyle iyi radyasyon özelliklerine sahip radomlar için bir potansiyele sahiptir (Radom, anten üzerinde olumsuz etkiler yaratan toz, su, su buharı, rüzgar, böcekler, partiküller, güneş radyasyonu, vs. etkilerden anteni korur.)



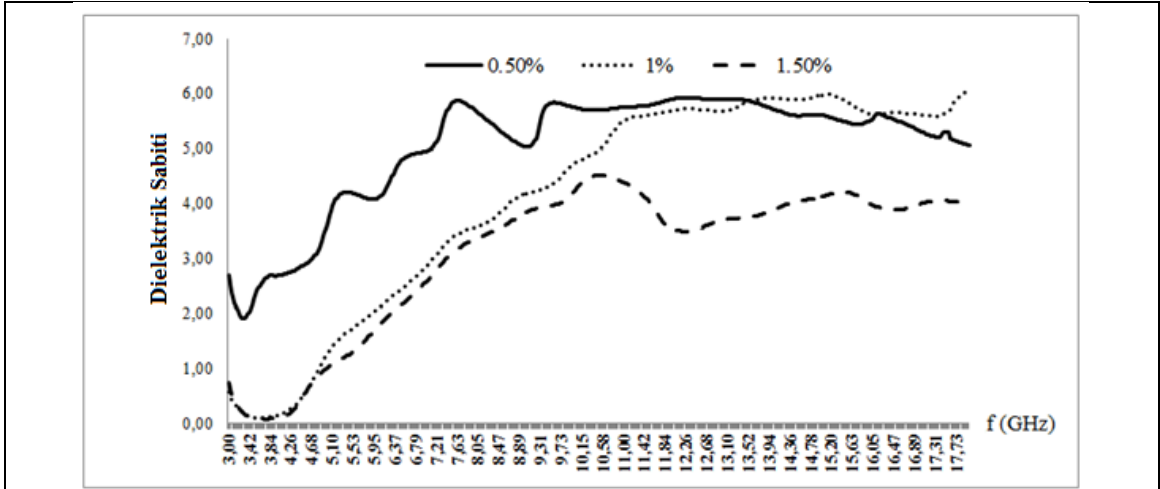
Şekil 4.2. a Farklı yoğunlukta forta ferro lif içeren betonların dielektrik sabitleri



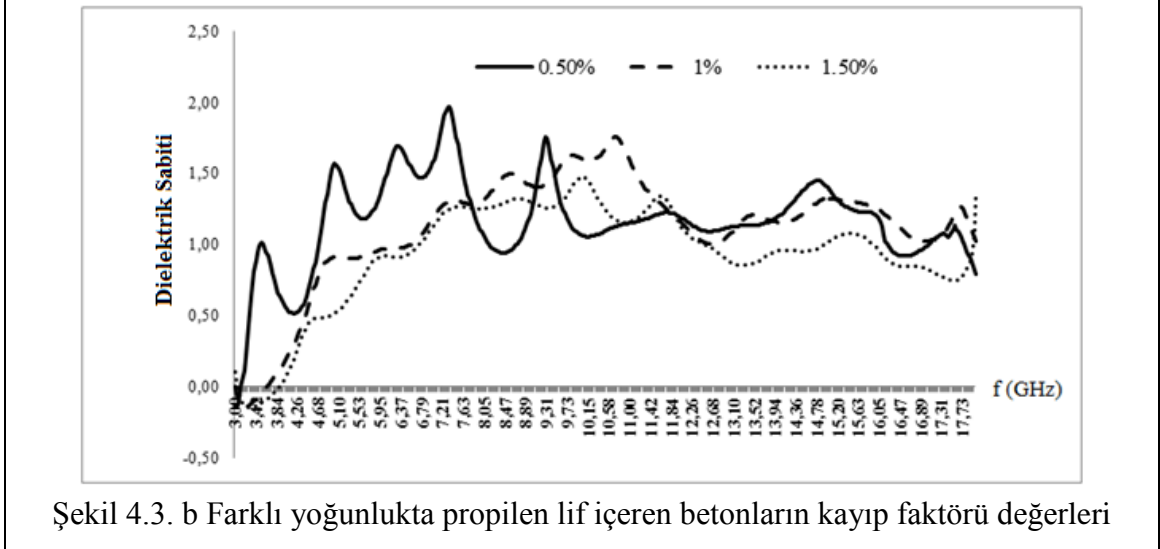
Şekil 4.2. b Farklı yoğunlukta forta ferro lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri

Son olarak propilen lif içeren lifli betonların lif yoğunluğu tespit edilmiştir. Yukarıda bahsi geçen lif yoğunlukları oranı ve test yöntemi aynı şekilde kullanılmıştır. Lifli betonların dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri yansıma ve iletim katsayıları kullanılarak Şekil 4.3. a ve b de gösterilen frekans aralığında hesaplanmıştır. Dielektrik sabitinin lif oranının en yüksek (%1.5) olduğu numunede düşük olmasının sebebi kendine has elektromanyetik özelliğe sahip lif yoğunluğun artmasıyla açıklanır. Dielektrik sabitinin en ayırt edilebilir olduğu frekans 12.26 GHz civarındadır. Böylece lif yoğunluğu mikrodalga ölçüm tekniği kullanılarak hasarsız bir şekilde tespit edilebilir. Ayrıca kayıp faktörü değerleri kullanarak özellikle 5.25 GHz, 9.01 GHz ve 14.27 GHz frekans değerlerinde lif yoğunluğu tespit edilebilir. Yukarıdaki bilgiler ışığında, lif tipi ve oranı Dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, değişikliklerden belirlenebilir. Bunun yanında lif oranı tespitinde, yeni ve uygulanabilir ölçüm sonuçları lifli betonların

negatif indeks ve yüksek derecede empedans uyumlu radom malzeme olarak kullanılabilceği görülmüştür.



Şekil 4.3. a Farklı yoğunlukta propilen lif içeren betonların dielektrik sabitleri



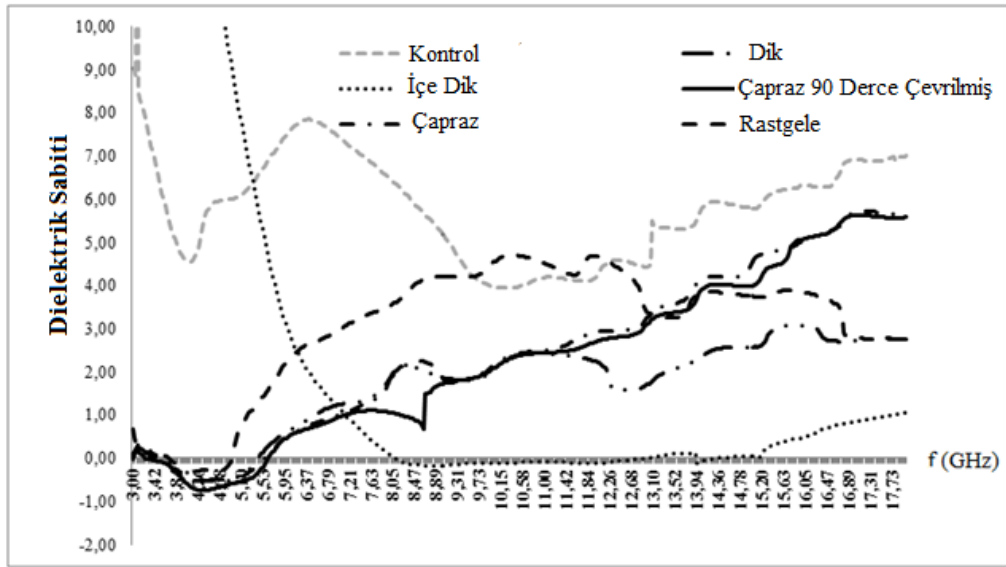
Şekil 4.3. b Farklı yoğunlukta propilen lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri

#### 4.1.2. Oryantasyon Sonuçları

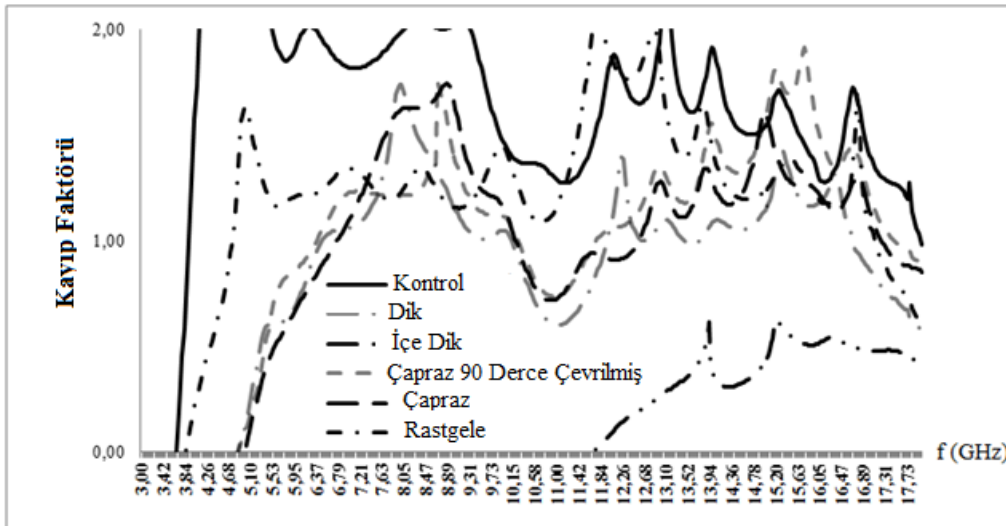
Tezin bu kısmında mikrodalga test yöntemleri kullanılarak lifli beton içerisindeki lif oryantasyonunun hasarsız bir şekilde tespiti çalışılmıştır. Lif oryantasyonunun tespiti lifli betonların mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir parametredir. Beton içerisindeki lif yönelimi betonun mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu bağlamda, dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri kullanılarak farklı çeşitlere ve oryantasyona sahip lif içeren lifli betonların lif oryantasyonu mikrodalga test teknikleri ile tespit edilmiştir. Lif oryantasyonunu tespit edebilmek için öncelikle yukarıda detayları verilen beton boyutları 20cm x 20 cm, kalınlığı 5 cm olan kalıplara

dökülmüştür daha sonra plastik kıvamdaki betona lifler istenilen yönelime sahip (paralel, dik, çapraz, içe dik ve rasgele) olacak şekilde elle yerleştirilmiştir. Ayrıca çalışma üç farklı lif çeşidi ile yapılmıştır. Bütün numunelerde lif oranı toplam beton hacminin %1'i kadar olup bütün karışımlarda bu oran sabit tutulmuştur.

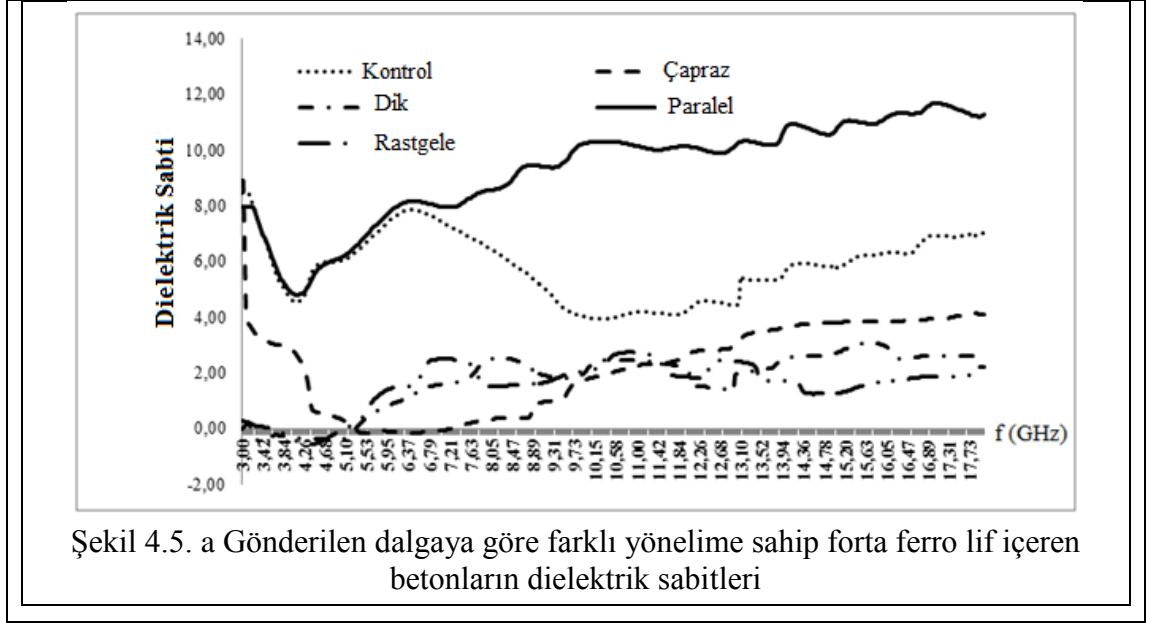
İlk ölçümler farklı oryantasyonda karbon çelik lif içeren numuneler üzerinde yapılmıştır. NRW metodu kullanılarak yansıma ve iletim katsayıları ile dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre iletim ve yansıma katsayıları ile numunenin elektromanyetik özellikleri elde edilip lifli beton içerisindeki lif yönelimi rahatlıkla tespit edilebilir. Şekil 4.4. a'da gösterildiği gibi, 15.17 GHz de farklı yönlere sahip lifli betonlar birbirinden ayırt edilebilir. Dielektrik sabitleri içe dik, dik, rastgele, çapraz 90 derece çevrilmiş, çapraz ve içerisinde lif olmayan kontrol numunesinin sırasıyla 0, 2.8, 3.8, 4, 4.2 ve 5.8 dir. Bunun yanında kayıp faktörleri frekansın 12.20 olduğu civarda içe dik, çapraz, çapraz 90 derece çevrilmiş, dik, kontrol ve rastgele dağıtılmış lif oryantasyonunda sırasıyla 0.18, 0.88, 1.12, 1.43, 1.67 ve 2.00' dir. Bu nedenle dielektrik sabitleri ve kayıp faktörü kullanılarak sabit bir frekans aralığında (Şekil 4.4. a-b) lifli beton içerisindeki lifin oryantasyonu hakkında yorum yapılabilir. Böyle bir mikrodalga devrenin tasarımı sabit bir frekansta çalışır ve bir tahribatsız yöntem olup oldukça ucuzdur. Bu çalışmada bu lif içeriğine sahip numunelerin diğer yeni elektro manyetik özelliklere de sahip olduğu keşfedilmiştir. 3 GHz- 5.43 GHz frekans aralığında çapraz, çapraz 90 derece çevrilmiş, dik ve rastgele dağıtılmış lif oryantasyonuna sahip lifli betonlar negatif dielektrik sabitine sahip olmaları dolayısıyla meta malzeme uygulamaları için gelecek vadetmektedir (Meta malzemeler, doğada bulunmayan yapay olarak elde edilen negatif kırılma indisine sahip solak malzemelerdir). Ayrıca içe dik lif oryantasyonuna sahip lifli betonların geniş bant aralığında yaklaşık 'sıfır' dielektrik değerine sahip olması radom uygulamalarında radyasyon şiddetini geliştirmek için kullanılabilir.



Şekil 4.4. a Gönderilen dalgaya göre farklı yönetime sahip karbon çelik lif içeren betonların dielektrik sabitleri

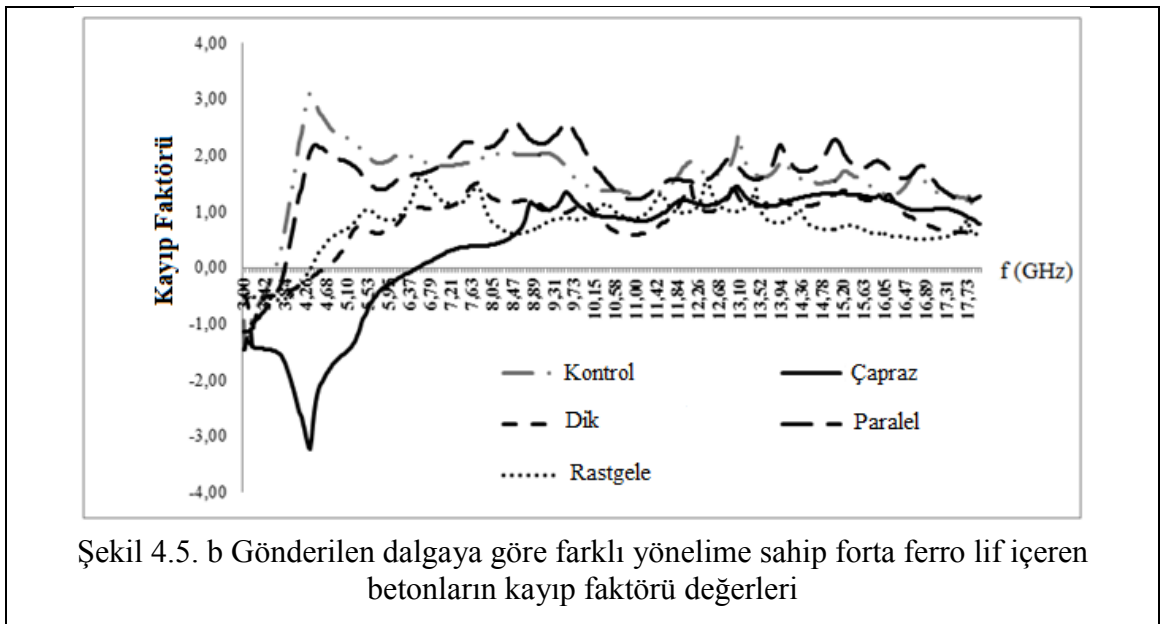


Şekil 4.4. b Gönderilen dalgaya göre farklı yönetime sahip karbon çelik lif içeren betonların kayıp faktörü değerleri



Şekil 4.5. a ve b’de gösterildiği gibi lifli beton içerisindeki Forta ferro lif oryantasyonu ile lifli beton dielektrik sabiti/kayıp faktörü ilişkisi de mikrodalga frekans bandında incelenmiştir. NRW metodu ile yansıma ve iletim parametreleri kullanılarak sistemden nispi dielektrik sabiti değerleri çekilmiştir. Farklı oryantasyona sahip forta ferro liflerin dielektrik sabitleri arasındaki fark çelik liflerde yapılan çalışmaya göre daha ayırt edilebilirdir. Şekil 4.5. a ve b’de farklı oryantasyona sahip forta ferro lif ile güçlendirilmiş beton numunelerinin dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri gösterilmiştir. Farklı oryantasyona sahip lif içeren lifli betonların dielektrik sabitleri 18 GHz civarında en ayırt edici bir şekilde görülmektedir. Rasgele, dik, çapraz, lif içermeyen ve paralel oryantasyonda lif içeren numunelerin dielektrik sabitleri değerleri sırasıyla 11.5, 7, 4, 2.4 ve 2.1’dir. Bu bağlamda, betonda Forta ferro fiberin oryantasyonu mikrodalga devresi ile 18 GHz’ de sabit bir frekansta çalışan bir alıcısı ve vericisi olan 2 küçük anten ile kolaylıkla tespit edilebilir. Önerilen bu basit sistem tahribatsız yöntem olarak çok ucuz ve yenidir. Bu yanında, kayıp faktörü de beton içerisindeki Forta ferro liflerin yönünü belirlemek için kullanılabilir. Bu çalışmada kayıp faktörün kullanılması ile beton içerisindeki lif oryantasyonunu tespitite en saptanabilir sonuçlar veren frekans 5.04 GHz civarındadır. Lifsiz, paralel, rasgele, dik ve çapraz oryantasyonda lif içeren numunelerin kayıp faktörü değerleri sırasıyla 3.1, 2.2, 0.8 ve -1.5’dir. Böylece lifli beton içerisindeki forta ferro lif oryantasyonunu belirlemek için 18 ve 5.04 GHz frekanslarında dielektrik sabiti ve kayıp faktörü değerleri karşılaştırılarak da oryantasyon teyidi yapılabilir. Bu çalışmada ayrıca farklı forta ferro

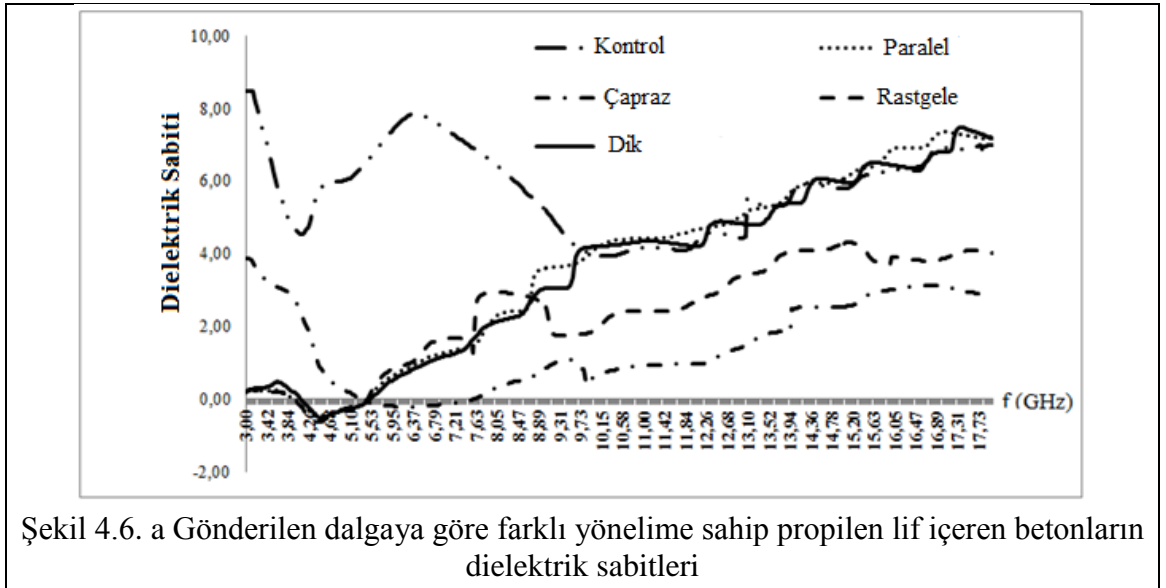
lif yöneliminde bazı ilgi çekici elektromanyetik parametreler elde edildi. Frekansın 5.04-7.09 GHz olduğu aralıkta dielektrik sabitinin 'sıfıra' yaklaştığı görülmekte. Bu davranış forta ferro içeren lifli betonların radom uygulamalarında radyasyon şiddeti arttırmak için kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Bir başka ilgi çekici sonuç 3-5.04 GHz frekans aralığında tespit edilmiştir. Bu aralıkta rastgele ve dik oryantasyonda lif içeren lifli betonların negatif dielektrik sabiti değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, tartışılan beton negatif indeks meta malzeme betonların gelecekteki uygulamaları için potansiyel teşkil etmektedir.

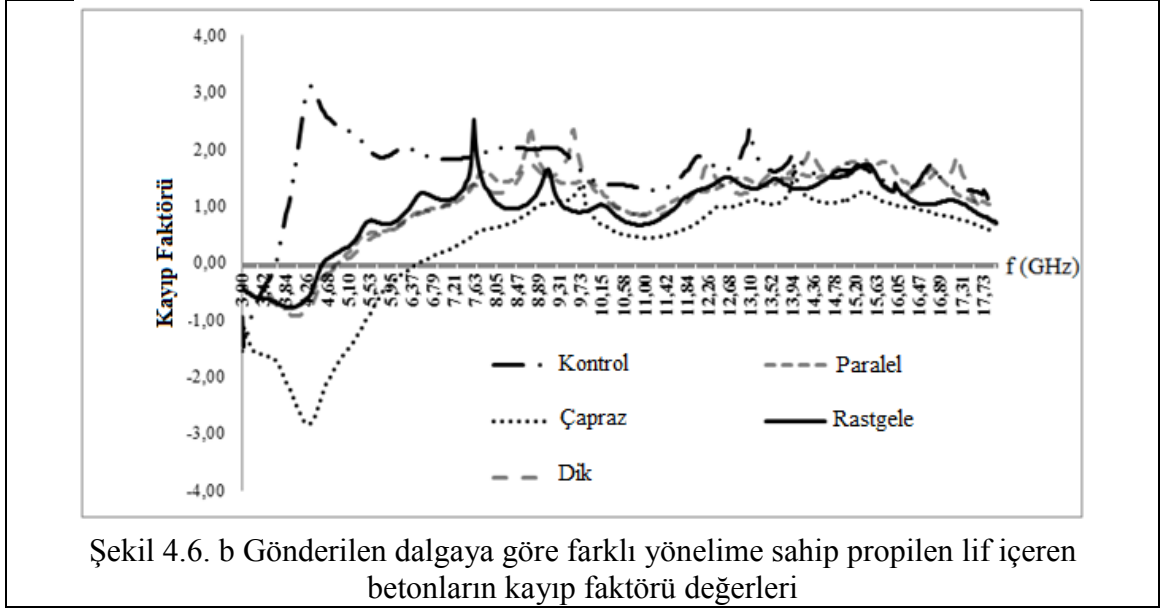


Farklı propilen lif oryantasyonuna sahip lifli beton numunelerin lif yönelimini tespit etmek için dielektrik sabiti ve kayıp faktörü kullanılmıştır. Lif oryantasyonu ile elektromanyetik davranışların da değişmesi sonucu elde edilen veriler ile lif oryantasyonu hasarsız bir şekilde tespit edilebilmektedir. Lifli beton numunelerin dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri NRW metodu kullanılarak ölçülen yansıma değeri (S11) ve iletim katsayılarından (S21) elde edilir. Şekil 4.6. a.'da gösterildiği gibi lifli betonda propilen liflerin çeşitli yönlerde en tanınan dielektrik sabiti farklılıkları 9.73 GHz civarındadır. Çapraz, rasgele, dik, paralel ve lifsiz oryantasyonda lif içeren numunelerin dielektrik sabiti değerleri sırasıyla 1.2, 1.8, 3.1, 3.7 ve 4.4'dür. Çeşitli oryantasyona sahip propilen liflerin beton içerisindeki yönelimini tahribatsız bir şekilde 9.73 GHz'de sabit bir frekansta çalışan bir mikro-dalga sistemi ile tespit edilebileceği



görülmektedir. Beton içerisindeki lif oryantasyonunun bilinmesiyle lifli betonun mekanik özellikleri hakkında da yorum yapılabilir. Bu bağlamda lifli beton kalite kontrolü için yeni sensör çalışmalarının da önü açılacaktır. Ayrıca farklı lif oryantasyonuna sahip bazı lifli betonlar ilgi çekici sonuçlar vermiştir. İlk olarak dielektrik değerinin çapraz lif oryantasyonuna sahip lifli beton numunelerinde 10.1-12.62 GHz aralığında 0.5 gibi bir değer vererek hava gibi davranmasıdır. Bu çeşit lifli betonlar enerji kaybı çok az olan radar ve anten yapımında kullanılabilir. İkinci olarak; rastgele, paralel ve dik oryantasyonda propilen lif içeren lifli betonlar 3.96-5.29 GHz frekans aralığında negatif dielektrik sabitine sahiptirler. Bu nedenle söz konusu oryantasyona sahip polipropilen lifli betonlar yeni uygulamalarda Metamalzeme üretimi için kullanılabilir. Bunun yanı sıra çapraz lif oryantasyonuna sahip lifli betonlar yaklaşık 'sıfır' dielektrik sabiti değrine sahiptir. Bu nedenle bu yapı radyasyon şiddeti iyileştirilmesi için bir potansiyele sahiptir. Buna ek olarak, kayıp faktörü de Şekil 4.6. b.'de gösterildiği gibi propilen liflerin yönünü belirlemek için kullanılabilir.





#### 4.2. Farklı Su Muhtevalarına ve Çimento Çeşitlerine Sahip Betonların Mekanik Davranışlarının Elektromanyetik Test Teknikleri Kullanılarak Tahribatsız Bir Şekilde Tespiti

Bir beton numunenin basınç dayanımının belirlenmesi ya da tahmin edilmesi, diğer beton özellikleri hakkında fikir sahibi olunmasına yardımcı olur. Bu bağlamda beton numunelerin elektriksel özellikleri ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulursa betonun genel özellikleri hakkında bilgi edinilmiş olur. Bu bağlamda su-çimento oranı 0.4, 0.5 ve 0.6 olan beton karışımları hazırlanıp deneyler yapılmıştır. Bu oranların seçilmesinin sebebi beton özelliklerini kontrol altına alabilmektir. Betonda su oranının artması sonucunda; çimento pastası ve agregalar arasında daha zayıf bağlar oluşur, geniş kapiler boşluklar oluşur ve betonda segregasyon meydana gelir. Çizelge 4.1.'de de görüleceği üzere su çimento oranının azalmasıyla; basınç, yarma ve aşınma dayanımı artmış, su emme ve basınçlı su geçirirliliği ise azalmıştır.

Çizelge 4.1. 28 günlük numunelerin basınç değerleri ve su-çimento oranı arasındaki ilişki

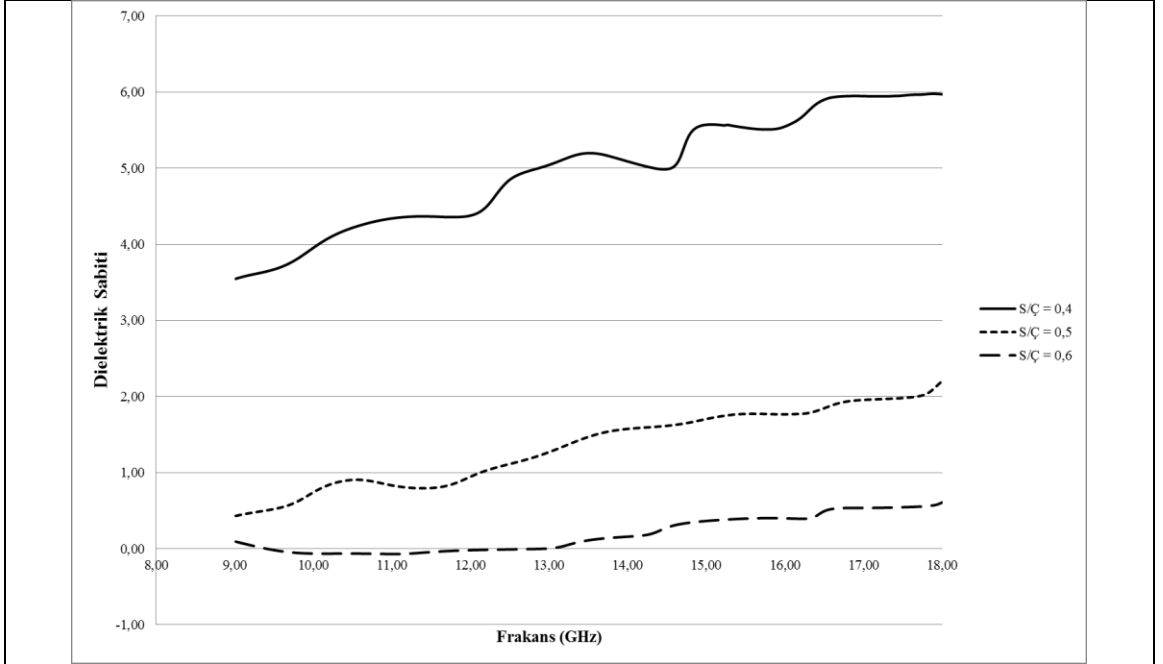
	S/Ç=0.4	S/Ç=0.5	S/Ç=0.6
<b>Basınç Dayanımı (Mpa)</b>	46.09	29.98	22.62

Çizelge 4.1. (Devam) 28 günlük numunelerin basınç değerleri ve su-çimento oranı arasındaki ilişki

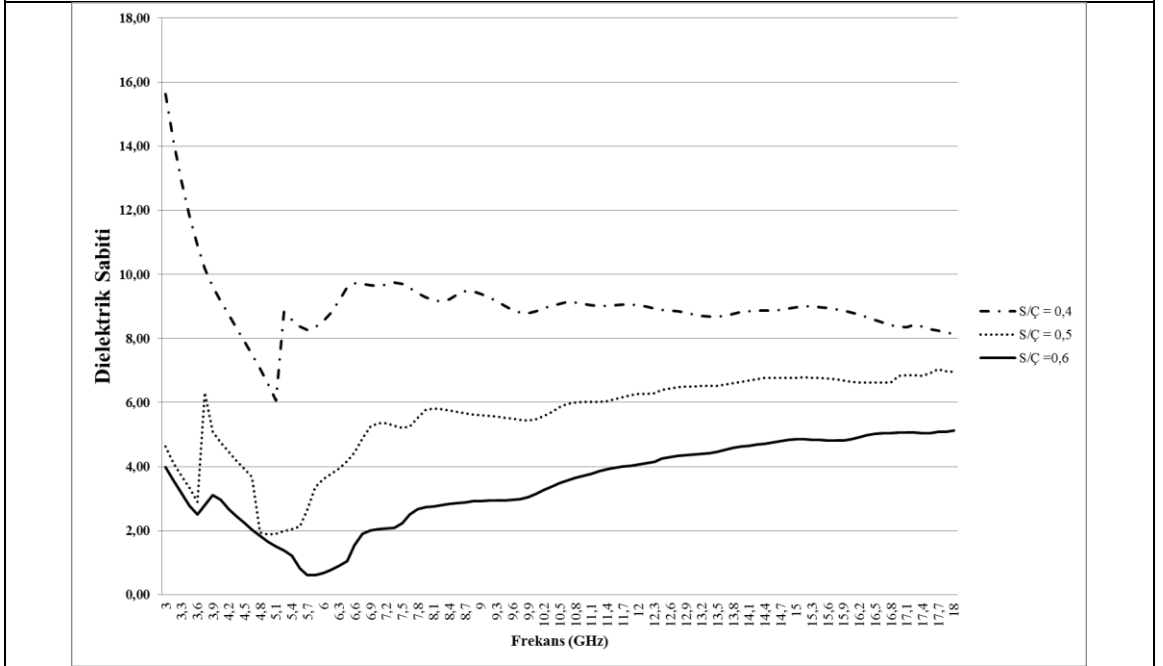
<b>Yarmada Çekme Dayanımı (Mpa)</b>	2.34	2.26	1.81
<b>Aşınma Direnci (Ağırlıkça Kayıp) (%)</b>	0.04	0.08	0.09
<b>Su Emme (%)</b>	3.65	7.49	8.72
<b>Yüksek Basınçlı Su Geçirimsizliği (cm)</b>	0.5	3.5	5

Çizelge 4.1.'deki sonuçlar ile de kanıtlandığı gibi beton basınç dayanımını tahmin edilirse betonun diğer özellikleri (mekanik ve geçirimsizlik karakteristikleri) hakkında da bilgi sahibi olunur.

Bu çalışmada sadece farklı su muhtevasına sahip betonlar incelenmeyip farklı çimento içeren beton türleri de incelenmiştir. Bu betonların basınç dayanım ve elektriksel deneyleri yapıp sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Her malzeme bir elektrik alana maruz kaldığında içerdiği yapıya göre kendine has tepkiler verir. Bir malzemenin elektromanyetik karakterini belirleyen parametrelerden biri efektif elektrik geçirgenliğidir. Bir malzeme elektrik alana maruz kaldığında uygulanan alanın fazına, büyüklüğüne ve yönüne göre etkileşime girer ve polarize olur. Aynı koşullar altındaki malzemelerin elektrik geçirgenliğine bakarak birbirinden ayırt etmemiz mümkündür. Deneysel çalışmalar, önemli ölçüde büyük frekans aralığında (43.5 GHz ile 10 MHz arasında) bir vektör ağ analizi kullanılarak yürütülmüştür. Betonların yansıma ve iletim parametrelerini bulmak için iki adet 3-18 GHz bant aralığında çalışan lineer polarize anten kullanılmıştır.



Şekil 4.7. a Farklı su-çimento oranına sahip numunelerin dielektrik sabitleri-28 günlük numuneler



Şekil 4.7. b Farklı su-çimento oranına sahip numunelerin dielektrik sabitleri-60 günlük numuneler

Tezin bu aşamasında beton dayanımının tespiti ya da izlenmesi mikrodalga test yöntemleri kullanılarak hasarsız bir şekilde elde edilmesiyle çalışılmıştır. Bu bağlamda farklı su muhtevasına sahip beton numunelerin etkin dielektrik sabiti ölçümleri iki farklı zaman diliminde mikrodalga test teknikleri uygulanarak yapılmıştır. Yansıma ve iletim katsayılarının ölçülmesi ve dielektrik sabitinin hesaplanması beton kalıplara

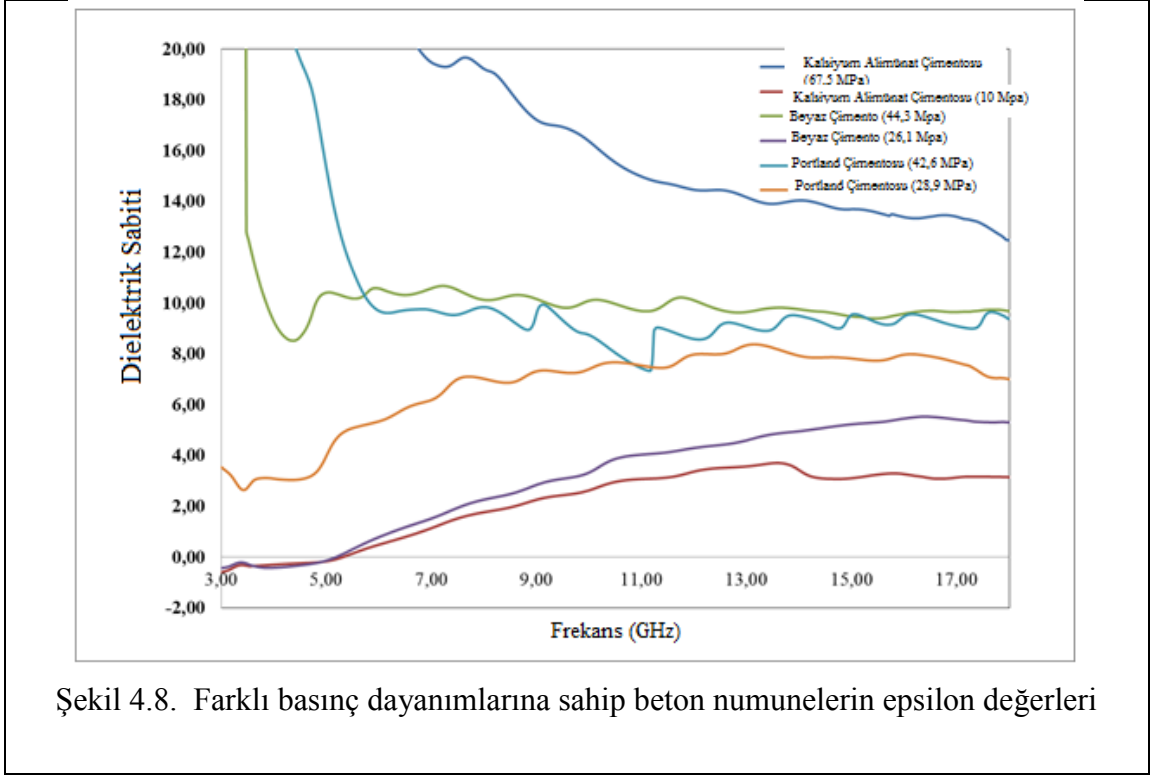
döküldükten 28 ve 60 gün sonra yapılmıştır (beton numuneler kalıba döküldükten 24 saat sonra kalıpran çıkartılmış ve 28 gün boyunca su kürüne maruz bırakılmıştır). Literatürde de açıkça bahsedildiği gibi zamanın ilerlemesi ile birlikte çimentodaki hidrasyon tepkimeleri de devam eder. Böylece beton daha yoğun hale gelir ve dayanım kazanır. Çalışmalar beton dayanım değerleri ile elektromanyetik ölçümleri arasında bir ilişkinin olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 4.7. a'da görüldüğü üzere betonda su-çimento oranının artmasıyla etkili dielektrik sabiti düşmüştür. Su oranının artmasıyla betonun yoğunluğu azalacağından dielektrik sabiti değeri de düşmüştür. Dielektrik değerleri arasındaki en belirgin fark 18 GHz frekansta görülür. 0.4, 0.5 ve 0.6 su-çimento oranına sahip betonların dielektrik sabitleri sırasıyla bu frekansta 6.2 ve 0.6'dır. Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda basit bir mikrodalga cihazı betonun su-çimento oranını tespit etmek için tasarlanabilir. Bilindiği ve deneyler ile ispatladığımız üzere su-çimento oranı dayanım parametreleri için belirleyicidir. Bu nedenle dielektrik sabiti değerlerine bakarak dayanım hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Ayrıca bunun yanı sıra dielektrik sabitine bakarak aşınma direnci, su emme kapasitesi ve yüksek basınçlı su geçirimsizlik hakkında da yorum yapılabilir. Bunlara ek olarak 0.6 su-çimento oranına sahip beton numuneler 9 GHz-14 GHz frekans aralığında 0 dielektrik değerine sahiptirler. Dolayısıyla bu betonlar pseudophoton saçılımına sebep olan radyasyon mekanizmasında yoğunluk artırıcı olarak kullanılması mümkündür (Arakelian ve Gevorkian, 2013). Böylece söz konusu betonlar radar ve antenlerin çevresel koşullardan korunması için yeni radom malzeme tasarımında kullanılabilir. Sonuç olarak su-çimento oranının, aşınma direnci, su emme kapasitesi ve yüksek basınçlı su geçirimsizliği gibi beton özelliklerini belirlemek, tahmin etmek veya fikir sahibi olmak, hasarsız test yöntemlerinden olan mikro dalga test tekniklerini kullanarak sabit bir frekansta tespit etmek mümkün kılınmıştır.

Şekil 4.7. b'de farklı su-çimento oranına sahip beton numunelerinin betonlar kalıba döküldükten iki ay sonra yapılan dielektrik sabiti ölçüm değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dielektrik sabiti değerleri su-çimento oranı değerleriyle ters orantıya sahiptir. Ayrıca dielektrik sabitleri de 28. günde ölçülen değerlerden yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi bünyedeki suyun hidrasyon reaksiyonlarında kullanılarak tüketilmesi ve daha yoğun yapının oluşmasıyla açıklanabilir. Bu sonuçlar ışığında betonun su-çimento oranını mikrodalga ölçüm yöntemleri ile tespit edilebileceği görülmüştür. Bunun

yanında su-çimento oranının bilinmesi ile betonun mekanik ve geçirimsizlik özellikleri hakkında da yorum yapılabileceği kanısına varılmıştır. Dielektrik sabitleri arasındaki en belirgin fark 8.5 GHz frekans bandında görülmüştür. 0.4, 0.5 ve 0.6 su-çimento oranına sahip betonların sırasıyla dielektrik sabiti değerleri 9.6 ve 2.8'dir. Bunun yanında su-çimento oranının belirlenmesi bütün frekans değerlerinde de yapılabilir. Bu nedenle basit bir mikro dalga cihazı tasarlanıp bahsi geçen mekanik ve geçirimsizlik özellikleri de hasarsız bir şekilde betonun elektriksel özellikleri kullanılarak tespit edilebilir.

Son olarak farklı tiplerde çimento içeren ve dayanımları birbirinden farklı olan betonların 3-18 GHz frekans aralığında elektriksel özellikleri yansımaya-iletim parametreleri vasıtasıyla belirlenmiştir ve Şekil 4.8.'de sunulmuştur. Testler basınç dayanımları 67.5 ve 10 MPa olan alimümlü çimento içeren, 44.3 ve 26.1 MPa olan beyaz çimento içeren, 42.6 ve 28.9 MPa olan portland çimentosu içeren betonlar üzerinde yapılmıştır. Basınç dayanımı yüksek olan betonlarda içerdiği çimento çeşidine bakılmaksızın etkili dielektrik sabitinin de yüksek olduğu görülmüştür. Dielektrik sabitinin dayanımı yüksek olan betonlarda yüksek çıkmasının sebebi yoğunluğun armasıyla açıklanabilir. Böylece betonların basınç dayanımı içerdiği çimento türüne bağlı olmaksızın hasarsız bir şekilde mikrodalga testleri kullanarak tespit edilebilir. 17 GHz frekansta ölçülen etkili dielektrik sabiti değerleri dayanımı 67.5 MPa alimünat çimento içeren, 44.3 MPa beyaz çimento içeren, 42.6 MPa portland çimentosu içeren, 28.9 MPa portland çimentosu içeren, 26.1MPa beyaz çimento içeren, 10 MPa alimünlü çimento içeren betonlar için sırasıyla 14, 10, 9, 7.5, 4,2'dir. Sonuç olarak sabit bir frekansta dielektrik sabiti değerlerine bakılarak betonun içerdiği çimento çeşidi ve beton basınç dayanımı elde edilebilir. Test sonuçları basınç dayanımı ve epsilon değerleri arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Böylelikle beton dayanım değerleri hasarsız ve kolay bir şekilde tespit edilir.

Bu çalışma ile birlikte farklı su-çimento oranına sahip betonlar arasında hangisinin su-çimento oranının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



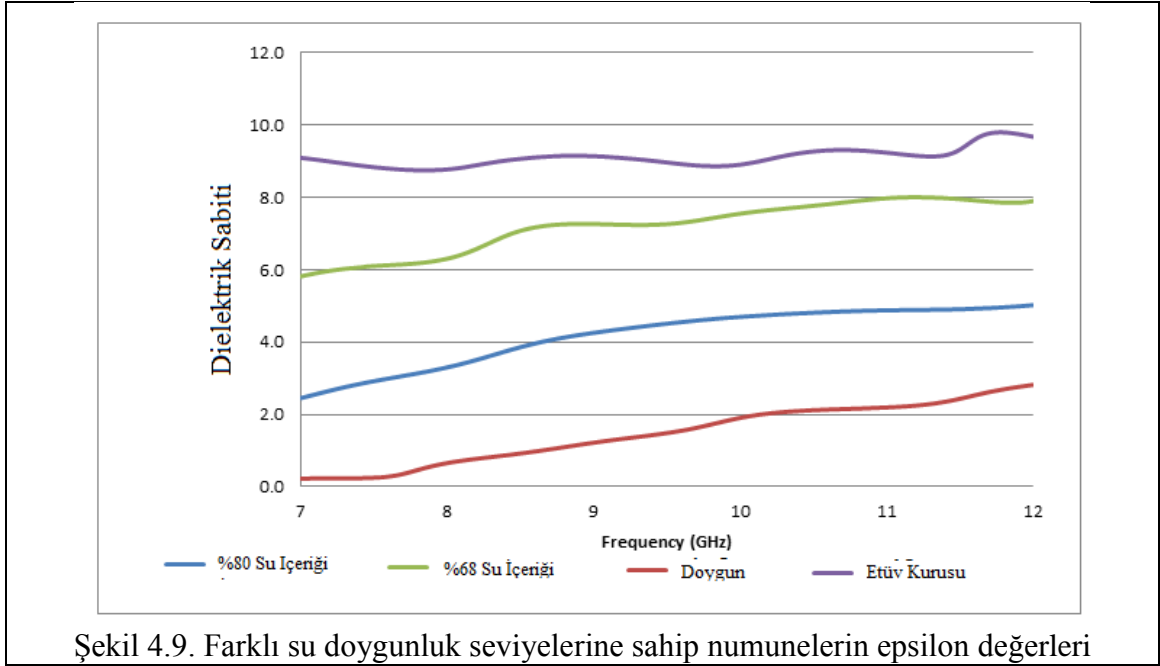
#### 4.3. *Betonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri ile Betonun Elektromanyetik Davranışı Arasında İlişki Kurulup Beton İçin Kritik Öneme Sahip Güvenilir ve Denenebilir Sonuçlar Elde Edilmesi*

##### 4.3.1. **Betonun Su Muhtevası ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi**

Sertleşmiş betonun su muhtevasını tespit etmek için beton numune tartılır ve ağırlık kaydedilir ardından numune etüve konur, 105 °C altında 24 saat bekletilir ardından numune ağırlığı tekrar kaydedilir. İlk ve ikinci ağırlıklar arasındaki fark numunenin su muhtevasını verir. Bu yöntemin laboratuvarında uygulanması oldukça kolaydır fakat özellikle büyük yükler altında olan beton bloklar için çok da mümkün değildir. Bu sebeple araştırmacılar su muhtevasını tespit etmek için hasarsız test tekniklerine yönelmişlerdir.

Su, çimentoda hidrasyon reaksiyonlarının gerçekleşmesi için önemli olmasına rağmen uzmanlar sertleşmiş betonda fazla su istemezler. Bunun sebebi; su beton

içerisine zararlı kimyasal maddeler taşıyabileceği gibi alkali silika reaksiyonu, karbonatlaşma ve klor penetrasyonu gibi olaylara sebep olabilir.



Şekil 4.9. Farklı su doygunluk seviyelerine sahip numunelerin epsilon değerleri

Bu çalışmada betonun su muhtevasını tahmin edebilmek için literatüre yeni bir hasarsız test tekniği kazandırılmıştır. Bu yöntem sayesinde betonu su muhtevası hakkında güvenilir yorumlar yapılabilecektir. Şekil 4.9.'da görüleceği üzere betonun su muhtevasının kademeli bir şekilde azalmasıyla birlikte epsilon değerlerinin kademeli bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi epsilon değerleri NRW metodu kullanılarak yansıma ve iletim parametreleri ile elde edilmiştir (7 GHz- 12 GHz bant aralığında). Şekilde de görüleceği üzere epsilon değerleri ve su muhtevası arasında direkt bir ilişki vardır. Isıyı arttırarak su içeriğini azaltması sonucu betonun toplam yoğunluğu azalmıştır. Şu da iyi bilinir ki epsilon değerleri ile yoğunluk arasında direkt bir ilişki vardır. Buna ek olarak, su dielektrik iletkenliğinin ters göstergesidir. Dielektrik sabitleri elde ederek bütün frekans spektrumunda betonda su içeriğini belirlemek mümkündür. Numunelerin dielektrik sabitleri arasındaki en yüksek fark 7 GHz'de görülmektedir. Numunelerin etkin dielektrik değerleri doymuş, %80 nem içeren, %68 nem içeren ve kuru numuneler için sırasıyla 0.2, 2.4, 5.8 ve 9.2'dir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere dielektrik sabitleri direkt olarak su muhtevası ile ilişkilidir. Dolayısıyla, bu yeni yöntem ile betonun su muhtevası ile ilgili bir fikir

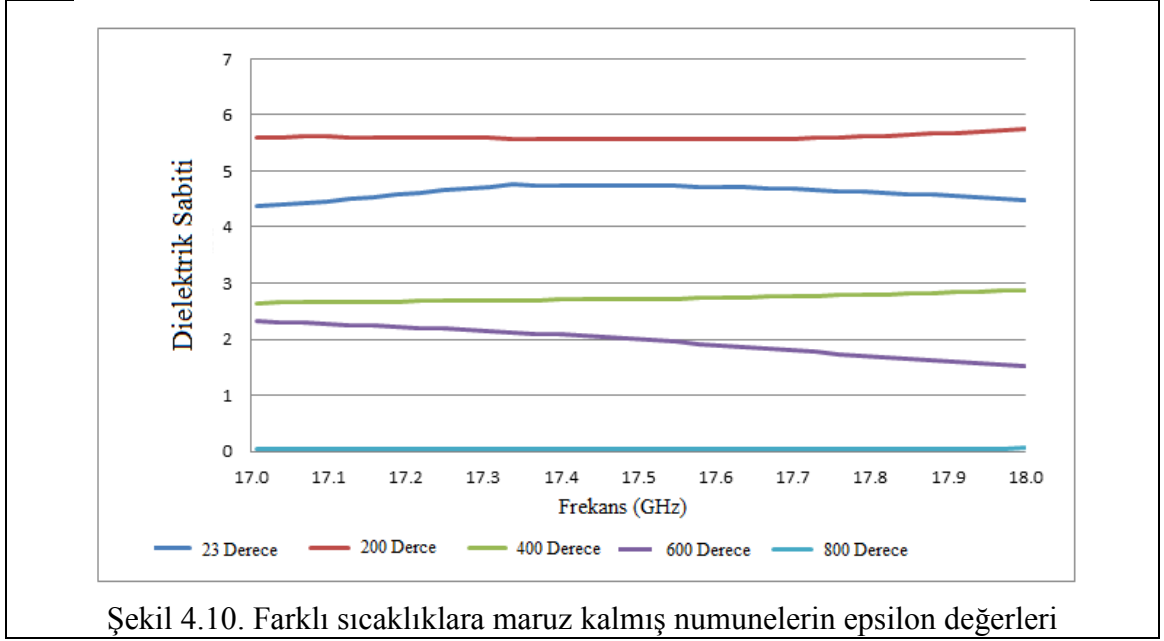


yürütülebilir. Sabit bir frekansta çalışan basit bir mikrodalga cihaz / sensör kullanarak betonun su içeriğini belirlemek de mümkündür.

#### **4.3.2. Betonun Yüksek Sıcaklık ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi**

Beton diğer yapı malzemeleri ile karşılaştırıldığı zaman en yüksek ısıya en iyi dayanan malzemeler arasında yer alır. Yüksek sıcaklık altında beton zarar görebilir ya da zehirli gazların oluşmasına neden olabilir. Ayrıca betonun göreceli bir şekilde daha düşük ısı iletkenliğine sahip olmasından dolayı içerisindeki donatıyı da sıcaklıktan korur. Fakat bu direnç sınırlı bir sıcaklık ve süre için geçerlidir.

Betonun 250 °C'ye kadar ısıdan olumsuz bir şekilde etkilendiği söylenemez. Fakat dayanım düşmesi ısının 300 °C'yi aşmasıyla başlar (Munoz ve ark., 2011). Bu çalışmada da olduğu gibi beton numunelerin fırındaki sıcaklığının oda sıcaklığından 200 °C'ye çıkarılmasından sonra dayanımın arttığı gözlemlenir. Isının artmasıyla hidrasyon tepkimeleri hızlanır ve bunun sonucunda daha yoğun bir malzeme elde edilir. Fakat fırın sıcaklığının 200 °C'den 400 °C'ye çıkarılmasının ardından beton numunelerde dayanım düşüklüğü gözlemlenir. Literatürden de bilindiği üzere sıcaklığın 400 °C olduğu betonlarda  $\text{Ca(OH)}_2$  CaO ya dönüşür ve %33 hacim azalması gözlemlenir. Sonuç olarak daha az dayanımı olan beton meydana gelir. Sıcaklık 600 °C olduğunda C-S-H jelleri bozulmaya başlar, 800 °C olduğunda ise C-S-H jelleri tamamen bozulur ve beton tamamen kullanılmaz hale gelir.



Şekil 4.10. Farklı sıcaklıklara maruz kalmış numunelerin epsilon değerleri

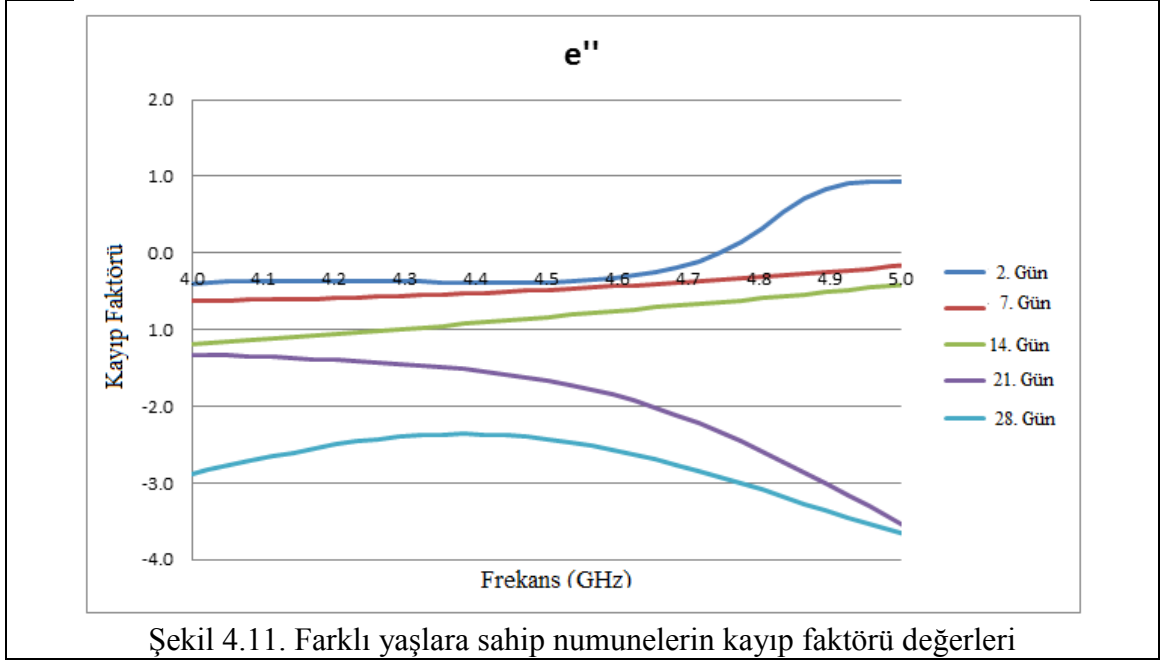
Beton için sıcaklık önemli bir parametredir. Sıcaklığın betonda meydana getirdiği değişikliklerin tespiti durabilite ve güvenlik için önemli bir analizdir. Farklı sıcaklığa maruz kalan beton numunelerin yansımaya ve iletim parametreleri NRW metodu kullanılarak 17 GHz-18 GHz frekans aralığında dielektrik değerleri bulunmuştur. Şekil 4.10.'daki sonuçlar incelendiğinde literatürle örtüşen sıcaklık dayanım ilişkisi ile epsilon değerleri arasındaki ilişki göze çarpar. Beton numunelerinin sıcaklığının oda sıcaklığından 200 °C'ye çıkarılmasıyla hem dayanımı hem de epsilon değerleri artmıştır. Sıcaklığın 200 °C'den 800 °C'ye kademeli bir şekilde yükseltilmesi dayanımda ve dolayısıyla epsilon değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Dielektrik sabiti değerleri arasındaki en belirgin fark 18 GHz'de yer almaktadır. Etkili dielektrik sabitleri değerleri oda sıcaklığı, 200-400-600-800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler için sırasıyla 4.3, 5.8, 2.9, 1.5 ve 0'dır. Bu bağlamda, sıcaklık etkisinin belirlenmesi, saçılma parametrelerin ölçülmesi ile kolay ve tahribatsız bir şekilde yapılabilir. Ayrıca sabit bir frekansta çalışan basit bir mikrodalga cihaz ile de ölçümler gerçekleştirilebilir.

#### 4.3.3. Betonun Olgunluk ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Bir yapının en hızlı bir şekilde tamamlanması düzgün ve zamanında kalıp alınmasına bağlıdır. Kalıp sökümü için betonun yeteri kadar dayanım alıp almadığı

konusunda fikir sahibi olunması gerekmektedir. Beton dayanımı tahmini zaman ve sıcaklık verileri gerektiren karmaşık denklemler yardımıyla yapılır. Bu yöntemin detayları ASTM (1978) de açıklanmıştır. ‘olgunluk yöntemi’ betonun ısı geçmişi ile basınç mukavemetinin tahmin edilmesini açıklar. En kabul gören olgunluk yöntemi eşdeğer yaş fonksiyonudur ve bu yaklaşım için en önemli parametre görünür aktivasyon enerjisidir. Basınç dayanımını doğru tespit edilmesi için aktivasyon enerjisi doğru bir şekilde hesaplanmalıdır.

Bu çalışma ile birlikte literatüre betonun yaşını tespit edebilmek için yeni bir yöntem kazandırılmıştır. Bu yöntem ile birlikte betonun olgunluğu hakkında kesin sonuçlar veremeyen ve güvenilir olmayan yöntemler yerine basit ve güvenilir bir şekilde betonun yaşı ve dayanımı hakkında yorum yapma olanağı sağlayan hasarsız bir yöntem literatüre kazandırılmıştır. Betonun yaşına bağlı olarak değişen elektriksel özellikler 4-5 GHz frekans aralığında NRW metodu kullanılarak tespit edilmiştir. Saçılma parametreleri kullanılarak beton numunenin kayıp faktörleri bulunmuştur. Şekil 4.11.’de görüleceği üzere beton dökümünden ikinci günden sonra yapılan elektromanyetik ölçümlerde günlerin geçmesiyle kayıp faktörü değeri de düşmüştür. Şu da iyi bilinmektedir ki zamanın geçmesiyle beton dayanımını almıştır. Bu sonuçlar ışığında zamanla birlikte değişen kayıp faktörü değerlerine bakarak zamanla dayanımını alan beton arasında bir ilişkinin kurulması kaçınılmazdır. Zamanın geçmesiyle beton dayanımının artması çimentodaki hidrasyon reaksiyonlarının devam etmesi; kayıp faktörü değerinin düşmesi ise beton içerisindeki serbest suyun hidrasyon reaksiyonlarından dolayı azalması olaylarıyla açıklanabilir. En belirgin sonuçlar 4.75 GHz’de elde edilmiştir. 2, 7, 14, 21 ve 28. gün sonunda alınan kayıp faktörleri değerleri sırasıyla 0.2, -0.5, -0.75, -2.5 ve -3’tür. Bu sonuçlar kullanılarak sabit bir frekansta çalışacak şekilde tasarlanmış bir mikro dalga cihazı kolayca beton yaşlanma belirlemek için kullanılabilir. Pratikte bu veriler kullanılarak kalıp sökülmesi için gereken süre daha hassas bilinip, iş hızı ve verimi artırılması sağlanacaktır.



Şekil 4.11. Farklı yaşlara sahip numunelerin kayıp faktörü değerleri

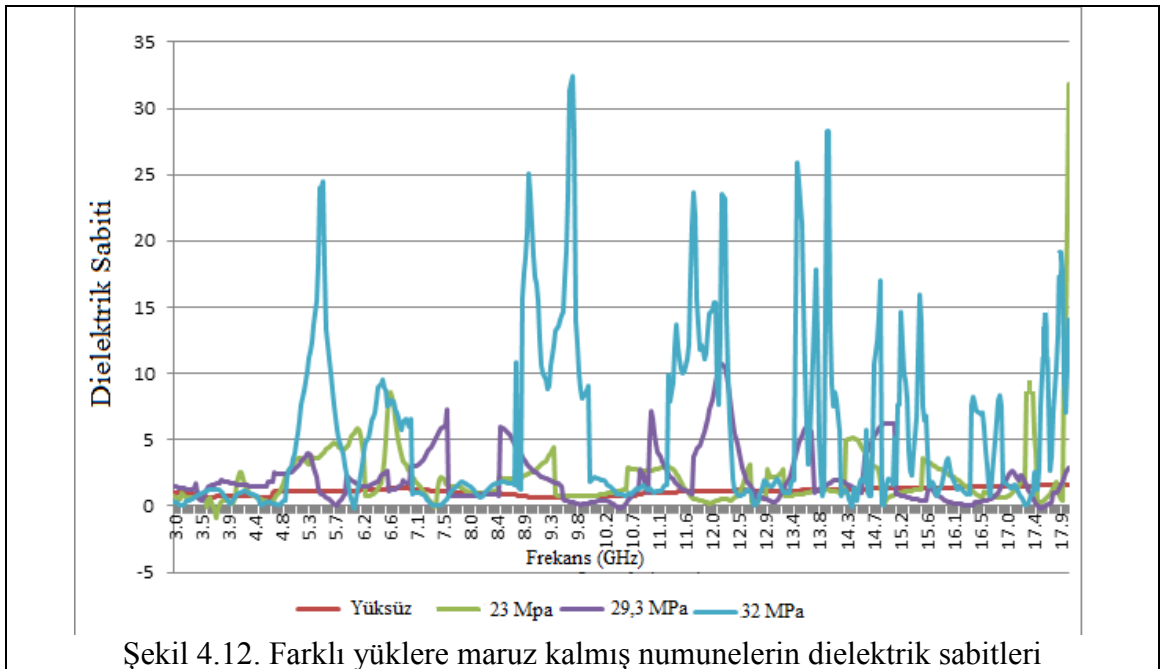
#### 4.3.4. Betonun Çatlak Oluşumu ve Elektrik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Barajlar, tüneller ve köprüler gibi özel yapılar dikkatli ve düzenli bakım onarım çalışmaları gerektiren ulaşım ve enerji sistemlerinin ana elemanlarıdır. Betondaki çatlamlar genellikle aşırı yük, sünme, korozyon ve ısıl genişmeden dolayı meydana gelir. Fakat betonda meydana gelen deformasyonlar zaman gerektiren, yoğun trafiğe sebep olan, pahalı olan testler yapılmadan gözle fark edilmesi olanaksızdır.

Çatlak ilerlemesinin gözlemlenmesi bir yapının servis verimliliği ve ömrü hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Yapı içerisindeki çatlaklar yük taşıma kapasitesini düşüreceği gibi yapının içine su sızmasına neden olur. Çatlak boyutunu, yoğunluğunu, derinliğini tespit edebilmek için yer radarı gibi hasarsız test yöntemleri geliştirilmiştir. Fakat bu yöntemleri sınırlayan karmaşık prosedürler ve düzeltmeler vardır (Al-Qadi ve ark., 2003; Plati ve Loizos, 2012; Boizos ve Plati, 2007).

Bu çalışma ile birlikte beton içerisinde meydana gelen deformasyonlar kolaylıkla tespit edilecektir. Bu yöntem karmaşık prosedürler ve özel yetenekler gerektirmeksizin sonuç vermektedir. Betonda deformasyon meydana getirmek için 0.5 kN/sn yük 10x10x10 cm<sup>3</sup> boyutlarındaki küp numunelere uygulanmıştır.

Farklı yüklere maruz kalan beton numunelerin elektriksel özellikleri (gerçek epsilon değerleri) yansıma ve iletim katsayıları kullanılarak NRW metodu yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm değerleri en net 2-18 GHz frekans aralığında yakalanmıştır. Ölçümler numunelerin 0 Mp, 23 MPa, 29.3 MPa ve 32 MPa yük altında olduğu koşullarda yapılmıştır. test kurulumu ve yapılışı daha önceki bölümlerde detaylıca anlatılmıştır. Ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı üzere çatlak oranını arttıran yük artışı ile birlikte dielektrik sabiti arasında direkt bir ilişki vardır. En düşük dielektrik sabitine sahip numune yüke maruz kalmamıştır; en yüksek dielektrik sabitine sahip numune ise en yüksek yüke maruz kalan betonlarda gözlemlenmiştir (32 MPa yük altında beton işlevsiz hale gelip çatlaklar göz ile fark edilebilmiştir). Elde edilen sonuçlar ışığında sabit frekans bandında çalışabilen basit bir mikrodalga cihazı tasarlayarak beton içerisinde meydana gelen çatlak hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu frekans bandı 9 GHz olarak seçilebilir. Bizim ölçümlerimize göre 0, 23, 29.3 ve 32 MPa yüke maruz kalan beton numunelerin dielektrik sabitleri sırasıyla 1, 3, 3.5 ve 15'tir. Sonuç olarak beton numunelere uygulanan yükün artırılmasıyla betonda çatlamlar meydana gelmiştir ve bu çatlak tespiti de betonun dielektrik sabitleri ile ilişkilidir (Şekil 4.12.). Böylelikle dielektrik sabitlerine bakılarak betonun çatlaklığı ile ilgili yorum yapılabilmektedir ve göz ile tespit edilemeyen çatlak oluşumları tespit edilebilir.



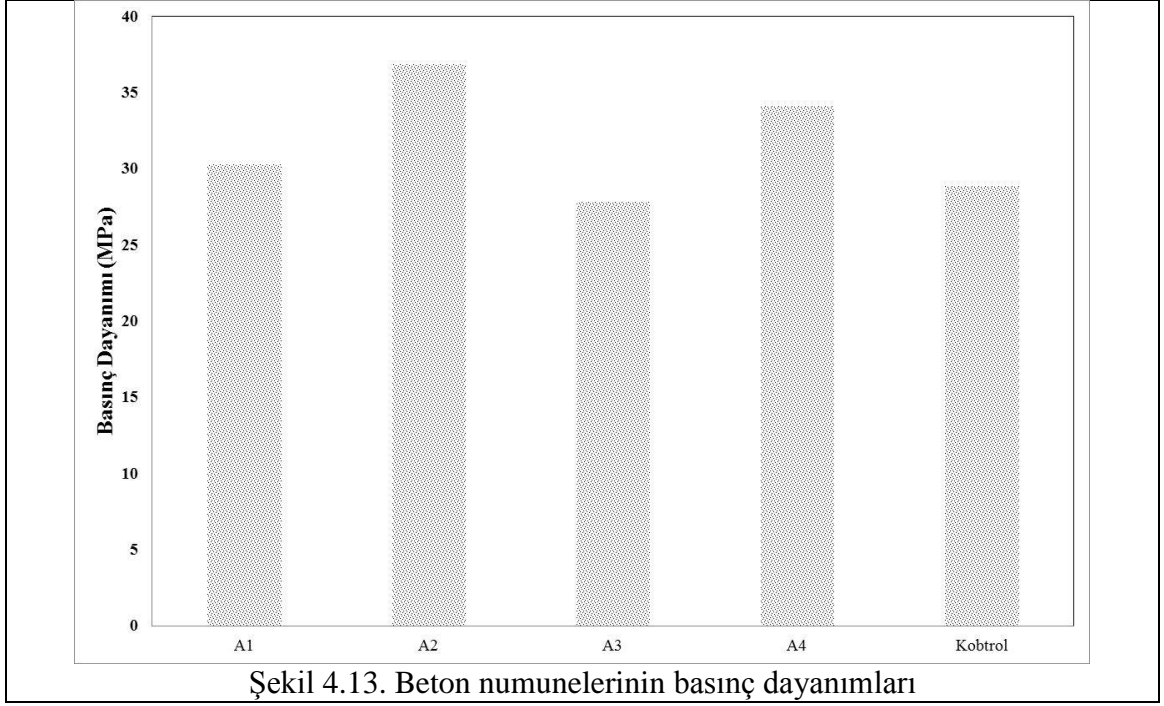
Şekil 4.12. Farklı yüklere maruz kalmış numunelerin dielektrik sabitleri

#### 4.4. *Bor Ürün ve Atıklarını İçeren Betonların EM Dalga Emiciliği Mekanik Dayanım Davranışları Dikkate Alınarak İncelenmesi*

Bor ürünü (kolemanit) ve bor atıkları (borogypsum, KA1 ve KA2) belirli oranda çimento ile yer değiştirerek kübik ve prizmatik beton numuneler üretilmiş, basınç dayanımı, EM dalga özellikleri ve kalkanlama etkinliği deneyleri yapılmıştır. Betonların dayanım deneylerinin yapılmasının sebebi kalkanlama etkinliğini değiştirirken beton için önemli bir parametre olan dayanımdaki değişimin tespit edilmesidir. Betonda bazı konularda iyileştirme yapılırken bazı özelliklerin de zayıflamamasına özen gösterilmelidir.

##### 4.4.1. Basınç Dayanımı

Beton numunelerinin basınç dayanım varyasyonları şekil 4.13.'de rapor edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 28. gündeki %5 borojips içeren beton numunelerin basınç dayanımı kontrol numuneye göre %15 daha fazladır. Bunun sebebi borojips-çimento karışımı içeren betonlarda sadece Portland çimento içerenlere göre daha az etrenjit oluşmakta ve bunun sonucunda daha yoğun bir mikro yapı oluşturarak basınç dayanımını arttırmaktadır (Kavas ve ark., 2004). Yine Şekil 18'e göre %5 kolemanit içeren betonlar kontrol betonlarına göre %23 daha fazla dayanım göstermektedir. %5 KA1 içeren numunelerin basınç dayanımı kontrol numunelere yakın değerler vermiştir. KA2 içeren betonlar ise kontrol betonlardan %18 daha fazla dayanım sergilemişlerdir. Bunun sebebi borojips içeren betonlarda olduğu gibi daha yoğun yapının oluşması ile açıklanabilir (Olgun ve ark., 2007). Sonuç olarak bu katkı mineraller ile kontrol betonun dayanımına yakın veya daha yüksek dayanım davranışları sergileyen betonlar üretilebilir.

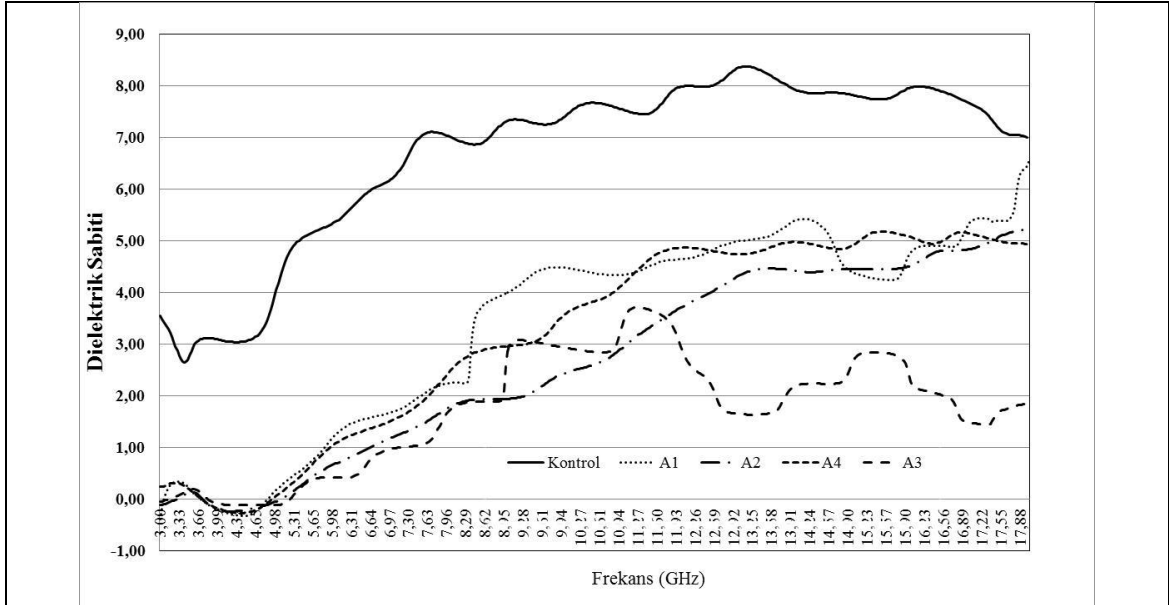


Şekil 4.13. Beton numunelerinin basınç dayanımları

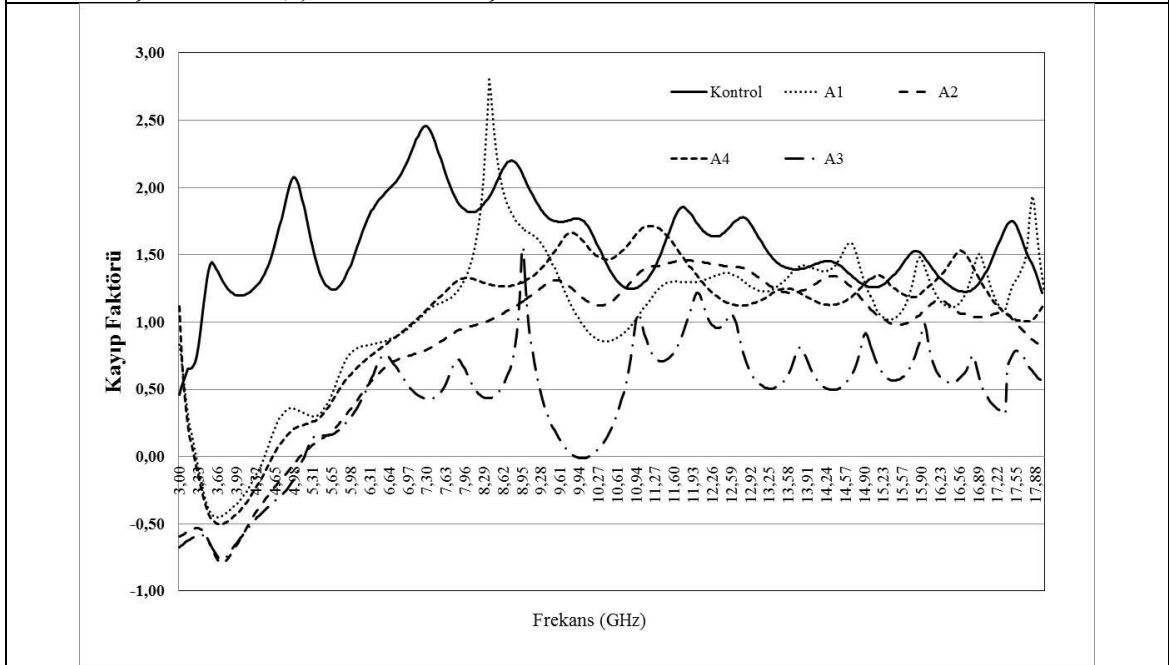
#### 4.4.2. Farklı İçeriğe Sahip Betonların Elektromanyetik Karakteristiği

Farklı karışımlara sahip betonların elektromanyetik özellikleri daha önce açıklanan, belirli bir mikrodalga aralığında ölçülen saçılma parametreleri ile NRW yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.15 a ve b’de beton numunelerinin sırasıyla dielektrik sabitleri ve kayıp faktörleri gösterilmiştir. Bu veriler kullanılarak beton içerisindeki mineral katkının ne olduğu ayrıca tespit edilebilir. Özellikle bazı frekans aralıklarında göze çarpan birbirinden uzak değerler inşaat mühendisliği uygulamalarında hasarsız test yöntemlerinde bu sistemin kullanılabileceği hakkında ilham vermektedir. 14.54 GHz frekansında dielektrik sabiti KA1. Kolemanit, KA2 ve borojips içeren betonlar ve kontrol numuneleri için sırasıyla 2.2, 4.5, 5, 5.4 ve 8’dir. Bu veriler ile birlikte betonun hangi minerali ihtiva ettiği basit bir mikrodalga cihaz ile hasarsız bir şekilde kolaylıkla tespit edilebilir. Kayıp faktörleri kullanılarak da aynı şekilde hangi mineral katkının hangi betonda olduğu tespit edilebilir. Katkı mineral ile katkılı beton basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulursa; katkının cinsinin tespitiyle basınç tespiti de hasarsız bir şekilde yapılmış olacaktır. Bu yöntem daha sonraki çalışmalar için ilham kaynağı olma ihtimali taşımaktadır. Ayrıca KA1 içeren betonların dielektrik sabiti hava ya yakındır (1-2 arasında) ve kayıp faktörü diğer numuneler ile

karşılaştırıldığında düşük sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, KA1 içeren betonlar sert çevre koşullarında yüksek frekanslı uygulamalar için yeni bir radom türü olarak tasarlanabilir. Bunun yanı sıra borojips, kolemanit, KA1 ve KA2 içeren betonlar 5GHz'e kadar negatif dielektrik sabitlerine sahiptirler. Bu tip betonlar belirli bir mikrodalga rejiminde yeni bir meta malzeme tasarımı için potansiyele sahiptirler.



Şekil 4.15. (a) Farklı katkı içeren beton numunelerinin dielektrik sabitleri

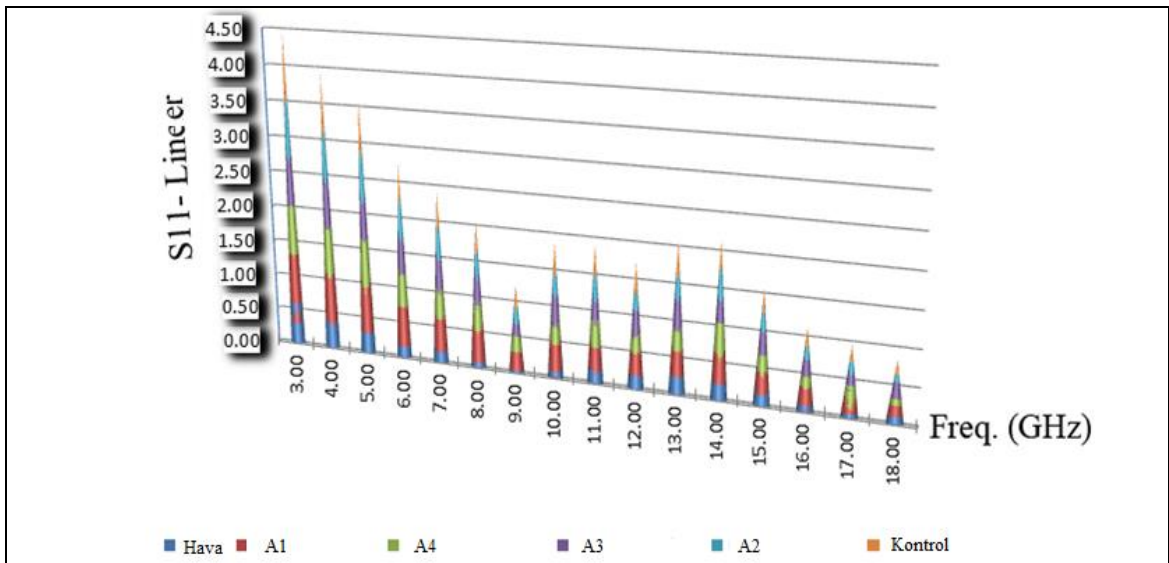


Şekil 4.15. (b) Farklı katkı içeren beton numunelerinin kayıp faktörü değerleri

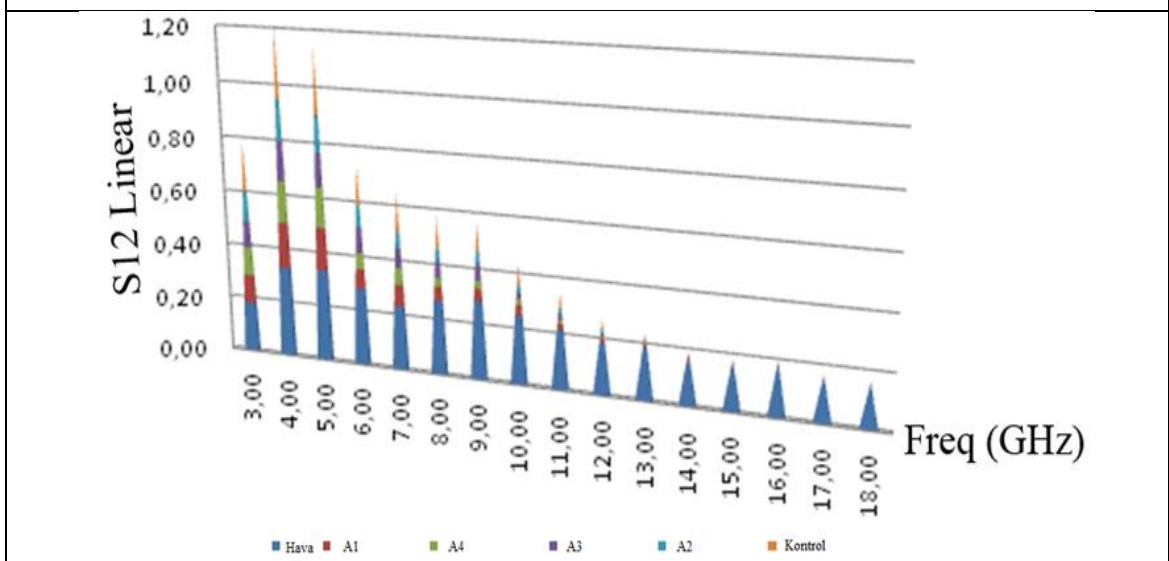
Şekil 4.16. a ve b'de gösterildiği gibi farklı içeriğe sahip betonların yansımaya parametreleri 1 GHz aralıklı 3-18 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. Beton katkı



maddesini tespit etmek için bütün frekans aralıkları kullanılabilir fakat ayırt etme olayı kablosuz iletişimde kullanılan frekans aralığı 3 GHz'de en belirgindir. Beton katkı maddesini tespit etmede en basit ve en ucuz yol yansımaya parametrelerinin ölçümüdür. 3 GHz sabit frekansta çalışabilen tek anten bu işlem için yeterlidir. Bu frekansta borojips, KA2,KA1,kolemanit içeren ve kontrol betonu için yansımaya değerleri sırasıyla 0.6, 1.4, 2.2, 2.8 ve 3.6'dır. Beton içerisindeki mineral çeşidiyle dayanım değerleri ilişkilendirilirse bu şekilde hasarsız bir şekilde dayanım tahminleri de yapılabilir. Bu işlem sabit frekansta çalışan basit bir mikrodalga cihazı kullanılarak yapılabilir.



Şekil 4.16. (a) Farklı katkı içeren beton numunelerin saçılım parametreleri (S11)



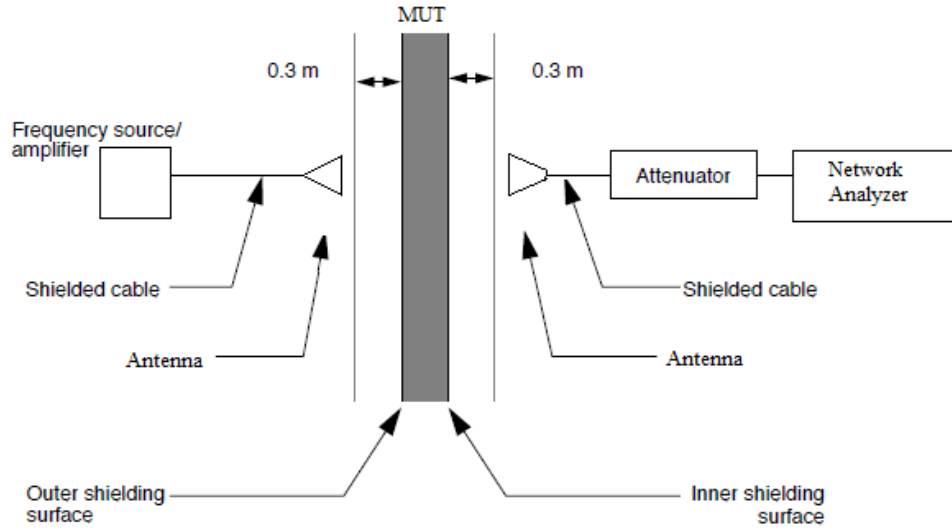
Şekil 4.16. (b) Farklı katkı içeren beton numunelerin saçılım parametreleri (S12)

#### 4.4.3. Bor Ürünü ve Atıkları İçeren Betonların Kalkanlama Etkinliği

En basit şekilde kalkanlama ya da ekranlama; kart, devre ya da cihaz düzeyinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik alanda izole etmek olarak tanımlanabilir. Kalkanlama etkinliği şu formüller ile tanımlanabilir:

$$S. E. = 20 \log \frac{E - \text{Numune yerleştirilmediğinde kaynaktan alınan alan}}{E - \text{Numune yerleştirildiğinde kaynaktan alınan alan}} \quad (4.1)$$

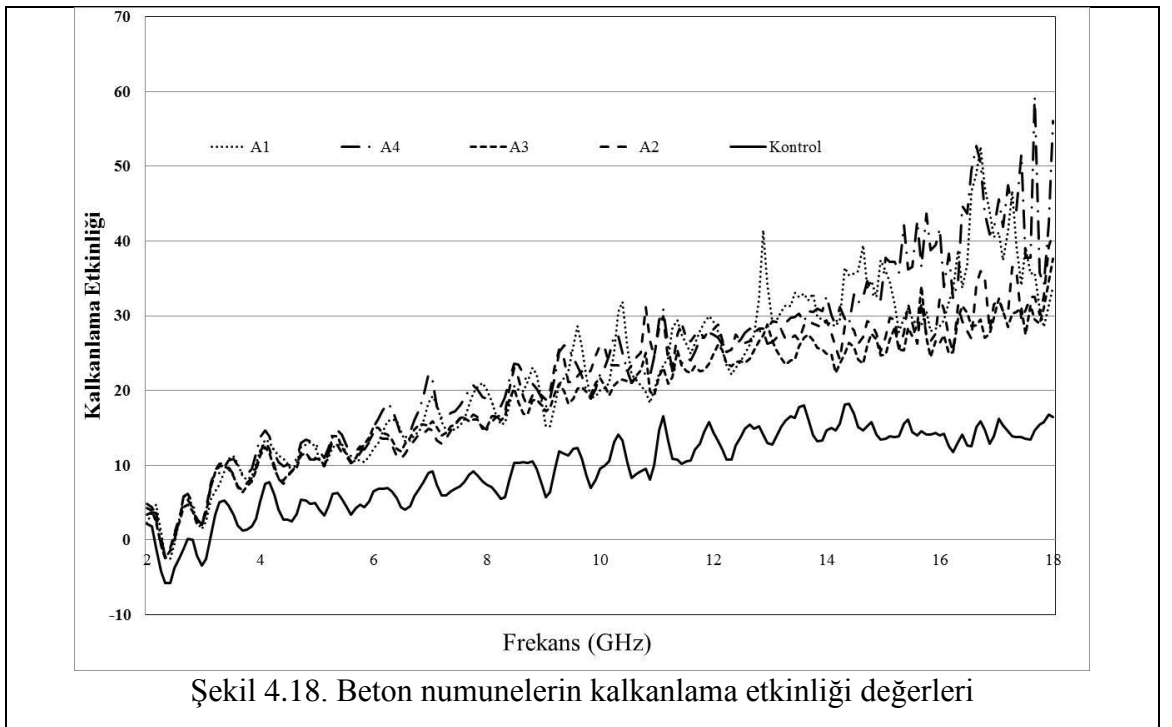
Bu bağlamda elektrik alanı serbest alan ölçümü kullanılarak numuneli ve numunesiz ölçümler IEEE standartlarına uygun bir şekilde iki horn anten kullanılarak yapılır. Kalkanlama etkinliğinin IEEE standartlarına göre ölçüldüğünü gösteren deney düzeneği Şekil 4.17.'de gösterilmiştir. Ölçümler 2-18 GHz frekans aralığında yapılmıştır.



Şekil 4.17. IEEE standartlarına göre kalkanlama etkinliği ölçüm düzeneği

Ölçümlere karşılık gelen sonuçlar Şekil 4.18.'de grafik haline getirilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere en az kalkanlama etkinliği olan beton kontrol numunedir. Özellikle yüksek frekanslarda borojips içeren betonlar en yüksek kalkanlama etkinliğine sahiptir. Frekansın artmasıyla kalkanlama etkinliği artış eğilimindedir. Borojips, KA2, KA1 ve kolemanit içeren betonların Kalkanlama Etkinliği (KE) 3.12 GHz'den sonra 10dB, 10.96 GHz den 18 GHz'e kadar olan aralıkta 30 dB'e kadar çıkar. Bunun yanında genellikle 10.96 GHz in altındaki frekanslarda KE 10 dB altındadır. 10.96-18 GHz aralığında ise 10-20 dB aralığında değişir. Kontrol numune ve bor ürünleri içeren betonlar arasındaki KE farkı 4.24 GHz-10.96 GHz aralığında 10dB kadardır. 11 GHz üstü frekanslarda kontrol betonları ve diğer betonların KE değerleri arasında en az 11

dB fark vardır. Özellikle borocips içeren betonarda bu fark 40 dB'e kadar çıkmaktadır. Bu sonuçlar bor ürünü ve atıkları içeren betonların elektrik alanın enerji azaltma oranını kontrol betonlara göre 3.26 ile 100 kat daha iyidir. Bunun sebebi mineral içeren betonların daha yoğun olması ile açıklanabilir ya da minerallerin kimyasal yapılarından kaynaklanıyor olabilir. Bunun yanı sıra borun yüksek dalga emme özelliğinin olduğu uygulamalar da mevcuttur (Demir ve Keleş, 2005). Bu bağlamda, insan, hayvan ve hassas cihazları korumak için bor ürün ve atıkları ile yüksek kalkanlama etkinliği olan yapılar tasarlanabilir.



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Lifli betonlarda lif dağılımı ve yönelimi önemli bir parametre olmasına rağmen sertleşmiş betonda lif oryantasyonu ve lif dağılımının homojenliğini tespit etmede henüz standart bir yöntem yoktur. Lifli beton kalitesini kontrol eden yöntemler ya pahalıdır ya da sahada uygulaması oldukça zordur ve de kesin güvenilir sonuçlar vermezler. Bu tez çalışmasında geliştirilen yeni uygulama ile lifli beton kalite kontrolü ucuz, güvenilir ve sahada uygulanabilir hale getirilmiştir. Lif içerisindeki dağılımı tespit eden çalışma ile birlikte sertleşmiş beton içerisinde dağılmış olan liflerin homojen dağılıp dağılmadığı tespit edilip liflendirilmemiş bölgeler tespit edilmiş olacaktır. Ayrıca sertleşmiş beton içerisindeki lif oryantasyonunun tespitinde ise bazı özel imalatlarda istenilen yönelimde lif içeriğine sahip betonların üretilip üretilmediği kontrolü yapılmış olacaktır. Böylelikle ilerde niteliksiz imatlardan kaynaklanan maddi manevi hasarların önüne geçilmiş olacaktır. Dolayısıyla, sonuç olarak, beton içindeki liflerin dağılımı ve yöneliminin belirlenmesi belirli bir mikrodalga aralığında dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün ölçülmesi ile mümkündür. Ayrıca bu sistem hasarsız ve ucuzdur. Aynı zamanda bu ölçümler mobil olabilir ve yerinde tahribatsız ölçümler yapılabilir. Bu çalışma sonucunda sertleşmiş betonda liflerin homojen olarak dağılıp dağılmadığı bilinecek ve özel yapılarda istenilen lif yöneliminin elde edilip edilmediği öğrenilerek lifli betonların kalite kontrolü daha efektif ve daha kolay bir şekilde yapılacaktır.

İkinci çalışmada 10 MHz-43.5 GHz frekans aralığında ölçüm alabilen Agilent marka 2-Port PNA-L Network Analyzer kullanılarak beton numunelerinin saçılma parametreleri ve elektriksel özellikleri tespit edilmiştir. Testler sonucunda betonun elektriksel özellikleri ile basınç dayanımı (dolayısıyla geçirimsizlik özellikleri) arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bu ilişki hem EM özellikler hem de dayanım özelliklerinin malzemenin yoğunluğu ile açıklanıyor olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Testler sonucunda bu sonuçlara varılabilir;

- Basınç dayanımları ve epsilon değerleri arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

- Betonun epsilon parametrelerinin belirlenmesi beton basınç dayanımını hasarsız bir şekilde belirlemede yardımcı olmuştur.
- Beton basınç dayanımı ve epsilon değerleri arasındaki ilişki ayrıca beton epsilon değeri ile yarmada çekme dayanımı, aşınma direnci, su emme kapasitesi ve yüksek basınçlı su penetrasyonu arasında da bir ilişki olduğu anlamına gelir.

Nicolson Ross Weir yöntemi tabanlı mikrodalga tekniği kullanılarak farklı su-çimento oranına sahip betonlar ile basınç dayanımı birbirinden farklı olan ve farklı çeşitlerde çimento içeren betonların elektriksel özellikleri (dielektrik sabitleri) belirlenmiştir. Bütün betonların iletim ve yansıma parametreleri 3-18 GHz frekans aralığında ölçülmüştür. Deneysel araştırmalar sonuçlarına göre, önerilen tahribatsız mikrodalga metodu, belirli frekans spektrumunda betonun mekanik ve elektriksel özellikler arasında makul bir fark ve bir ilişki sergiler. Bu nedenle, NRW tekniği sabit bir frekansta çalışan mikrodalga cihaz/sensör tasarımı için kullanışlıdır. Yapılan çalışmalarda su-çimento oranı ile dielektrik değerleri arasında ters bir orantının olduğu görülmüştür. Bu nedenle dielektrik sabiti su-çimento oranını belirlemede kullanılabilir. Bunun yanı sıra, su çimento oranıyla birlikte değişen beton özellikleri de tespit edilebilir. Betonun yaşlanmasının dielektrik sabiti üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir. Bu bağlamda beton numunelerinin 28. günde ve 2. ayda dielektrik ölçümleri yapılmıştır. Zamanın geçmesiyle beton yoğunluğu arttığı ve dielektrik sabiti değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Farklı basınç dayanımına sahip numuneler de test edilmiştir. Fakat bu deney grubunda farklı olan çimento türlerinin de farklı olmasıdır. Böylelikle çimentonu ölçümleri değiştirip değiştirmediği gözlemlenmiştir. Test sonuçlarında dayanımın artmasıyla dielektrik sabitinin de arttığı görülmüştür. Bunun nedeni birim hücredeki yoğunluğun dayanımın artmasıyla arttığı gerçeği ile açıklanmıştır. Sonuç olarak, mikrodalga tabanlı teknikler sensör, mikrodalga cihaz, mikrodalga tomografi ve gibi birçok tahribatsız test uygulamaları için iyi bir aday olabileceği görülmüştür.

Üçüncü çalışmada su muhtevası değişikliği, yüksek sıcaklık etkisi, olgunluk-mukavemet ve çatlak oluşumu gibi betonun kimyasal ve fiziksel özellikleri ile betonun belirli bir mikrodalga rejimde NRW metodu kullanılarak elektromanyetik özellikleri tespit edilip bunlar arasında bir ilişki kurulmuş ve böylece betonun kalite kontrolünün hasarsız bir şekilde yapılması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Ölçüm sonuçları bu yöntemin doğruluğunu kanıtlamıştır. Hassas sonuçlar alabilmek için 3-18 GHz frekans

aralığında ölçümler yapıp en uygun frekans aralığındaki sonuçlar ile çeşitli ilişkiler kurulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ile yeni mikrodalga cihazlar tasarlanarak hasarsız bir şekilde beton kalite kontrolü yapıp sonuçlar alınabilir. Önerilen NRW yöntemi ile farklı koşullar altındaki beton numunelerin açıkça değişen elektriksel özelliklerine bakılarak bahsi geçen betonun dört fiziksel ve kimyasal özelliği (nem, sıcaklık, olgunluk ve çatlama) tespit edilebilir. Literatüre sunulan bu çalışma, betonun bu dört özelliğini betonun elektrik parametreleri ile açıklayan ilk çalışmadır. Su muhtevası değişikliği, yüksek sıcaklık etkisi, olgunluk-mukavemet ve çatlak oluşumu sırasıyla 7 GHz, 18 GHz, 4.75 GHz ve 9 GHz frekansta çalışan basit mikrodalga cihazlar tasarlanarak yapılması mümkündür. Bundan sonraki çalışmalarda, dört fiziksel değişiklik için sabit bir frekans elde edilebilir. Böylelikle verimli ve düşük maliyetli ve basit bir mikrodalga sensör cihazı tasarlanabilir.

Son çalışmanın amacı ise bor üretim aşamasında meydana gelen ürünlerin ve atıkların tekrar kullanılarak betonun dayanımını arttırmada ve elektromanyetik dalga kalkanlamasında kullanımınıdır. Bor ürünü ve atıkları içeren betonların EM davranışını ve dayanım değerlerini ölçmek için kapsamlı bir test programı yapılmıştır. bu çalışmada betonun kalkanlama etkinliğini arttırmak için beton içerisine bor ürün ve atıkları karıştırılmış ve IEEE standartlarına göre analizler yapılmıştır. Buna ek olarak mineral katkıların dayanım üzerindeki etkisi de çalışılmıştır. Test sonuçlarına göre bor ürünü ve atıklarının çimento mineral katkı gibi kullanılmasının sonucunda kalkanlama etkinliği geleneksel betona göre 3.16 ile 100 kat arasında iyileştiğini; bunun yanı sıra mekanik özelliklerin de olumsuz etkilenmediği görülmüştür. Hatta mineral katkı olarak kullanım betonların dayanımında artışa bile sebep olmuştur. Bunun yanında NRW metodu kullanarak betonda hangi mineral katkının kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bulgular ışığında beton özelliklerinin hasarsız tespiti için yeni yollar açılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Al-Mattarneh H., 2014. Electromagnetic quality control of steel fiber concrete. **Constr Build Mater**, 73:350–6. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.101.
- Al-Qadi I., Lahouar S. ve Loulizi A., 2003. From The State-Of-The-Art To The State-Of-The-Practice. In: International Symposium Of Non-Destructive Testing In Civil Engineering. Proceedings Bb85-Cd; Berlin, Germany: The German Society For Non-Destructive Testing :16–19.
- Alrifai A., Aggoun S. ve Kadri A., 2013. Paste and Mortar Studies On The Influence Of Mix Design Parameters On Autogenous Shrinkage Of Self-Compacting Concrete. **Constr. Build. Mater**, 47:969–976
- Apagyi Z., Csetenyi L. J., 2001. Phase equilibrium study in the CaO–K<sub>2</sub>O–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O system at 25°C. **Cem. Concr. Res**, 31:1087–1091. doi:10.1016/S0008-8846(01)00529-4.
- Bakir M., Karaaslan M., Dincer F., Akgol O. ve Sabah C., 2016. Electromagnetic energy harvesting and density sensor application based on perfect metamaterial absorber, **Int. J. Mod. Phys. B**, 16:50-133. doi:10.1142/S0217979216501332.
- Banerjee A. ve Pohit G., 2014. Comparison Study Of Crack Detection Of Cantilever Beam Using Artificial Neural Network and Wavelet Transform. **J Mechatron Intell Manuf.**, 2:161–176.
- Banerjee A. ve Pohit G., 2014. Crack Detection in Rotating Cantilever Beam By Continuous Wavelet Transform. **Appl Mech Mater**, 592–594:2021–2025.
- Beglarigale A. ve Yazıcı H., 2014. Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. **Constr Build Mater**75:255–65. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.037.
- Boncukcuoğlu R., İçelli O., Erzeneoğlu S. ve Muhtar Kocakerim M., 2005. Comparison of radioactive transmission and mechanical properties of Portland cement and a modified cement with trommel sieve waste, **Cem. Concr. Res**, 35:1082–1087. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.018.
- Bosco F., Patrick G. ve Burdekin F. M., 2006. An Intelligent Sensor System For Monitoring Fatigue Damage In Welded Steel Components. **Nondestr.Test. Eval**, 21 (1): 13-25.
- Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M. ve Amziane S., 2010. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. **Constr Build Mater**, 24:1664–71. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025.
- Chen J., Ren J. ve Yin T., 2016. Nondestructive Evaluation Of Notched Cracks In Mortars By Nonlinear Ultrasonic Technique. **Nondestr.Test. Eval**, 31(2): 109-121.
- CHEN X.-G., YE Y. ve CHENG J.-P., Recent Progress in Electromagnetic Wave Absorbers. **J. Inorg. Mater**, 26:449–457. doi:10.3724/SP.J.1077.2011.00449.
- Chondros T. ve Dimarogonas A., 1980. Identification Of Cracks In Welded Joints Of Complex Structures. **J Sound Vibr**, 69:531–538.
- Demir D. ve Keleş G., 2006. Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99keV gamma rays, Nucl. **Instruments Methods Phys**.

- Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms, 501–504. doi:10.1016/j.nimb.2005.11.139.
- Demir F., Budak G., Sahin R., Karabulut A., Oltulu M. ve Şerifoğlu K., 2010. A. Un, Radiation transmission of heavyweight and normal-weight concretes containing colemanite for 6MV and 18MV X-rays using linear accelerator. **Ann. Nucl. Energy**, 339–344. doi:10.1016/j.anucene.2009.12.010.
- Erdoğan Y., Zeybek M. ve Demirbaş A., 1998. Cement Mixes Containing Colemanite from Concentrator Wastes. **Cem. Concr. Res**, 28:605–609. doi:10.1016/S0008-8846(98)00018-0.
- Gettu R., 2004. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. **Mater Struct**, 38:31–7. doi:10.1617/14021.
- Gong Y. X., Zhen L., Jiang J. T., Xu C. Y. ve Shao W. Z., Preparation of CoFe alloy nanoparticles with tunable electromagnetic wave absorption performance. **J. Magn. Magn. Mater**, 321:3702–3705. doi:10.1016/j.jmmm.2009.07.019.
- Hector A. T. ve Dairon J. M., 2015. Damage Identification In Active Plates With Indices Based On Gaussian Confidence Ellipses Obtained Of The Electromechanical Admittance. **J Nondestruct Eval**, 34 (28): 1-16.
- Hong J. Y., Kwak H. G. ve Jae H. K., 2012. Wave Attenuation Measurement Technique For Nondestructive Evaluation Of Concrete. **Nondestr. Test. Eval**, 27 (1): 81-94.
- Kang S. T., Lee B. Y., Kim J. K. ve Kim Y. Y., 2011. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. **Constr Build Mater**, 25:2450–7. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.057.
- Kavas T., Olgun A. ve Erdogan Y., 2005. Setting and hardening of borogypsum–Portland cement clinker–fly ash blends. Studies on effects of molasses on properties of mortar containing borogypsum. **Cem. Concr. Res**, 35:711–718. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.019.
- Kim J. H. ve Kwak H. G., 2008. Nondestructive Evaluation Of Elastic Properties Of Concrete Using Simulation Of Surface Waves. **Comput.Aided Civ. Infrastruct.Eng**, 23: 611–624.
- Krapez J. C., Maldague X. ve Cielo P., 1991. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results. **J Res in Nondestruct Eval**, 3:(2): 101-124.
- Liu S.-T., Yan K., hu Zhang Y., Jin S., Ye Y. ve Chen X.-G., 2015. Magnesiothermic reduction of rice husk ash for electromagnetic wave adsorption. **J. Magn. Magn. Mater**, 394:266–273. doi:10.1016/j.jmmm.2015.06.074.
- Loizos A. ve Plati C., 2007. Accuracy Of Pavement Thicknesses Estimation Using Different Ground Penetrating Radar Analysis Approaches. **Ndt& E Int**, 40:147–157.
- Mittal K L., 1978. Adhesion Measurement Recent Progress, Unsolved Problems, and Prospects in Adhesion Measurement Of Thin Films, Thick Films and Bulk Coatings , Astm Stp 640, **American Society For Testing and Materials ,Philadelphia ( Usa )**.
- Mohammadi Y., Singh S. P. ve Kaushik S. K., 2008. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. **Constr Build Mater**, 22:956–65. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004.



- Moučka R., Lopatin A. V., Kazantseva N. E., Vilčáková J. ve Sáha P., 2007. Enhancement of magnetic losses in hybrid polymer composites with MnZn-ferrite and conductive fillers. **J. Mater. Sci**, 42:9480–9490. doi:10.1007/s10853-007-2081-0.
- Munoz M., Alonso G. M., Vela N. ve Chenlo F.. 2011. Early Degradation Of Silicon PvModules and Guaranty Conditions. **Sol Energy**, 85:2264–2274.
- Nicolson A.M. ve Ross G.F., 1970. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 19:377–382. doi:10.1109/TIM.1970.4313932.
- Noise J. L., Chicois J. ve Fleischmann P., 1992. Monitoring Fatigue Damage In Industrial Steel By Barkhausen. **Nondestr. Test. Eval**. 1(6): 603-614
- Octávio C., Dias-da-Costa D. and Alfaiate J., Júlio E., 2016. Modelling the behaviour of steel fibre reinforced concrete using a discrete strong discontinuity approach. **Eng Fract Mech**, 154:12–23. doi:10.1016/j.engfracmech.2016.01.006.
- Olgun T., Kavas Y. ve Erdogan G., 2007. Once, Physico-chemical characteristics of chemically activated cement containing boron. **Build. Environ**, 42:2384–2395. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.003.
- Özdemir M. ve Öztürk N. U., 2003. Utilization of clay wastes containing boron as cement additives, **Cem. Concr. Res**, 33:1659–1661. doi:10.1016/S0008-8846(03)00138-8.
- Park K., Lee S., Kim C. ve Han J., 2006, Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures. **Compos. Sci. Technol**, 576–584. doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.034.
- Plati C. ve Loizos A., 2012. Using Ground-Penetrating Radar For Assessing The Structural Needs Of Asphalt Pavements. **Nondestr. Test. Eval**, 27:273–284
- Plati C. ve Loizos A., 2012. Using Ground-Penetrating Radar For Assessing The Structural Needs Of Asphalt Pavements. **Nondestr. Test. Eval**, 27:273–284.
- Sabah C., Dincer F., Karaaslan M., Bakir M., Unal E. ve Akgol O., 2015. Biosensor applications of chiral metamaterials for marrowbone temperature sensing, **J. Electromagn. Waves Appl**, 2393–2403. doi:10.1080/09205071.2015.1084894.
- Sánchez I., Antón C. ve Vera G., 2013. Moisture Distribution In Partially Saturated Concrete Studied By Impedance Spectroscopy. **J Nondestruct Eval**, 32: 362–371.
- Sarmiento E. V., Geiker M. R. ve Kanstad T., 2016. Influence of fibre distribution and orientation on the flexural behaviour of beams cast from flowable hybrid polymer–steel FRC. **Constr Build Mater**, 109:166–76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.005.
- Selleck S. F., Landis E. N., Peterson M. L., Shah S. P. ve Achenbach, J. D., 1998. Ultrasonic Investigation Of Concrete With Distributed Damage. **Aci Mater. J**, 95: 27–36.
- Sevim U. K. ve Tümen Y., 2013. Strength and fresh properties of borogypsum concrete. **Constr. Build. Mater**, 48:342–347. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.054.
- Sevim U. K., 2011. Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. **Mater. Struct**, 44:187–193. doi:10.1617/s11527-010-9618-4.

- Unal E., Dincer F., Tetik E., Karaaslan M., Bakir M. ve Sabah C., 2015. Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications. **J. Mater. Sci. Mater. Electron**, 9735–9740. doi:10.1007/s10854-015-3642-7.
- Unal E., Gokcen A. ve Kutlu Y., 2006. Effective electromagnetic shielding, **IEEE Microw**, 48–54. doi:10.1109/MMW.2006.1663989.
- Weir W. B., 1974. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. **Proc. IEEE**. 62:33–36. doi:10.1109/PROC.1974.9382.
- Yazıcı Ş., İnan G. ve Tabak V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. **Constr Build Mater**, 21:1250–3. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025.
- Yim H. J., Park S. J. ve Kim J. H., 2016. Evaluation Of Freezing And Thawing Damage Of Concrete Using A Nonlinear Ultrasonic Method. **Smart Str. Syst**, 17(1): 45-58.
- Yoo D. Y. ve Yoon Y. S., 2015. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. **Eng Struct**, 102:409–23. doi:10.1016/j.engstruct.2015.08.029.
- Yoo D. Y., Lee J. H. ve Yoon Y.S., 2013. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. **Compos Struct**, 106:742–53. doi:10.1016/j.compstruct.2013.07.033.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yazar 1991 yılında Ağrı’da doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Liseyi Kocaeli’nde tamamladı. Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2009’da kazandı. Üniversiteden 2014 yılında “İnşaat Mühendisi” unvanı ile mezun oldu. 2015 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. İskenderun Teknik Üniversitesi’nde Araştırma Görevlisi olarak görev almakta ve çalışmalarını sürdürmektedir.