

Farklı Mineral Katkılı Çimento Pastalarının Elektrik İletkenliklerinin Araştırılması

İsmail Hocaoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2012

Investigation of Electrical Conductivity of Cement Pastes

Including Different Mineral Additives

İsmail Hocaoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

January 2012

Farklı Mineral Katkılı Çimento Hamurlarının Elektrik İletkenliklerinin Araştırılması

İsmail Hocaoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliđi Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Ocak 2012

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İsmail Hocaoğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Farklı Mineral Katkılı Çimento Hamurlarının Elektrik İletkenliklerinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

İkinci Danışma : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Üye: Doç. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Cenk KARAKURT

Üye: Yrd. Doç. Dr. Abdullah DEMİR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih
ve..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada, çimento pastasına sırasıyla % 0, 10, 20 ve 30 oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katılarak elektrik iletkenlikleri araştırılmış, uygun kür koşulları sağlanarak havuzlarda bekletilmiş, 28 günlük basınç dayanımları hesaplanmış, elektrik verilen ve elektrik verilmeyen kontrol numunelerle elektrik iletkenlikleri, basınç gerilmeleri, porozite vb. karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca; çimento pastalarına elektrik akımı verildiğinde, elektrik akımının priz süresine etkisini araştırmak için deneyler yapılmıştır.

Araştırmalarda CEM I 42.5 çimentosu kullanılmıştır. Numunelere sabit akım verebilmek için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Elektrik verilmiş numunelere 15 Volt sabit akım uygulanmıştır. Bir gün içinde geçen akımları kaydetmek için data logger kullanılmıştır. Data logger'da kaydedilen veriler, bilgisayar ortamına taşınarak çizelgeleri çizilmiştir. Deneylerde standart kalıplar, standart elektrotlar kullanılmış olup, elektrotlar arasındaki uzaklıklar eşit tutulmuştur. Yapılan tüm deneylerde sıcaklık ve diğer deney koşulları eşit tutulmuştur.

Sonuç olarak; çimentonun elektriksel iletkenliğinin çimento pastasının priz süresiyle doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Genel olarak, çimentonun belirli oranlarda mineral katkılarla yer değiştirilmesi sonucunda priz başlangıç sürelerinde az bir değişiklik görülürken, priz bitiş sürelerinin kontrol çimento pastasına göre genel olarak arttığı gözlenmiştir. Bu oran % 6 ile % 36 arasında değişmektedir. Bu çalışmadan elde edilen diğer bir önemli sonuç da mineral katkılı çimento pastalarının elektrik akımı uygulanması sonucunda priz sürelerinin kontrol çimento pastasına göre oldukça az olmasıdır. Dolayısıyla, çimento pastasında hem mineral katkı kullanımı hem de elektrik uygulanması ile hızlandırılmış kür gerçekleştirilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik İletkenliği, Uçucu Kül, Silis Dumanı, Yüksek Fırın Cürufu, Çimento Pastası

SUMMARY

In this study, the electrical conductivity of cement pastes to which fly ash, silica fume and blast furnace slag are added respectively 0%, 10%, 20% and 30% has been studied, the cement pastes have been left in the cure pools by being provided suitable cure conditions, their compressive strengths after 28 days have been calculated and various comparisons and contrasts such as electrical conductivity, compressive strength, porosity have been made between being electrified and not being electrified arbitration specimen. Some experiments have been carried out to examine the effect of electrical conductivity on setting time when the electric current has given to the cement pastes.

In the study, CEM I 42.5 cement has been used. DC power supply has been used to provide a constant current to specimens. Constant current (15 Volt) has been given to the electrified specimen. Data logger has been used to record the currents in one day. The data recorded in data logger transferred to computer and their graphics have been drawn. In the laboratory tests, Standard wood molds and electrodes have been used and the gaps between electrodes have been made equal to each other. In all the experiments, temperature and other experimental conditions are equivalent.

Consequently, it has been achieved the electrical conductivity of the cement paste is directly related to the hardening time of the cement paste. In general, as a result of replacing the cement with mineral additives on specific proportions while there has been a slight change in the initial setting time, it has been seen that the final setting times have generally increased when it is compared to control cement paste. This ratio is between 6 and 36%. The other important result is as a result of applying electrical current to the cement pastes with mineral additives, they have less setting times then the control cement paste has. Thus, accelerated curing can be carried out in the cement paste with using mineral additives and applying electrical current.

Keywords: Electrical conductivity, fly ash, silica fume, blast furnace slag, cement paste.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarımın yürütülmesi sırasında, çalışmalarına yön veren, değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam sayın Prof. Dr. İlker Bekir Topçu'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımda bana yardımlarını ve desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Tayfun Uygunoğlu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve laboratuvar olanaklarının kullanılmasındaki katkılarından dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dekanlığına teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. BETONUN ELEKTRİKSEL ÖZELLİĞİ	1
1.2. MİNERAL KATKININ BETON ELEKTRİKSEL ÖZELLİĞİNE ETKİSİ	2
2. KONUYLA İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Elektrik İletkenliği	3
2.1.1 Betonun Elektrik İletkenliği Hakkında Yapılmış Çalışmalar	3
3. AMAÇ	8
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	9
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	9
4.1.1 Çimento.....	9
4.1.2 Yüksek Fırın Cürufu	9
4.1.3 Silis Dumanı	9

İÇİNDEKİLER (devam)

4.1.4 Uçucu Kül	9
4.2. Deneylerin Yapılması	12
4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	12
4.4. Çimento Pastalarının Elektrik iletkenliği	13
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	19
5.1. Mineral katkının priz süresine etkisi	24
5.2. Mineral Katkılı Çimento Pastasının Elektriksel İletkenliği	35
5.3. Mineral Katkının Poroziteye Etkisi	40
5.4. Mineral Katkının Su Emme Oranına Etkisi	44
5.5. Basınç Dayanımı	45
6. TARTIŞMA	51
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1 Çimento ve UK'nın görüntüsü	10
Şekil 4.2 SD ve YFC'nin görüntüsü	10
Şekil 4.3 Deneyde kullanılan ahşap kalıp	12
Şekil 4.4 Deneyde kullanılan DC güç kaynağı	14
Şekil 4.5 Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü	15
Şekil 4.6 Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü	15
Şekil 4.7 Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü	16
Şekil 4.8 Deneyde kullanılan data logger	17
Şekil 5.1 Mineral katkısız numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	19
Şekil 5.2 % 10 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	20
Şekil 5.3 % 20 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	20
Şekil 5.4 % 30 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	21
Şekil 5.5 % 10 SD'li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	21
Şekil 5.6 % 20 SD'li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	22
Şekil 5.7 % 30 SD'li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	22
Şekil 5.8 % 10 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	23
Şekil 5.9 % 20 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	23
Şekil 5.10 % 30 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi	24
Şekil 5.11 UK katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi	25
Şekil 5.12 SD katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi	26
Şekil 5.13 YFC katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi	26
Şekil 5.14 % 10 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	28

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil 5.15 % 20 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi.....	28
Şekil 5.16 % 30 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi.....	29
Şekil 5.17 % 10 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	29
Şekil 5.18 % 20 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	30
Şekil 5.19 % 30 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	30
Şekil 5.20 % 10 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	31
Şekil 5.21 % 20 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	31
Şekil 5.22 % 30 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi	32
Şekil 5.23 UK'lı çimento pastasında elektrik iletkenliğinin zamanına göre değişimi.	37
Şekil 5.24 SD'li çimento pastasında elektrik iletkenliğin zamanına göre değişimi	38
Şekil 5.25 YFC'li çimento pastasında elektrik iletkenliğin zamanına göre değişimi...	39
Şekil 5.26 Akımsız çimento pastalarında mineral katkı tipinin poroziteye etkisi	41
Şekil 5.27 Akımlı çimento pastalarında mineral katkı tipinin poroziteye etkisi	41
Şekil 5.28 UK katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi.....	42
Şekil 5.29 SD katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi	42
Şekil 5.30 YFC katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi.....	43
Şekil 5.31 Akımsız numunelerde mineral katkı tipinin su emmeye etkisi	44
Şekil 5.32 Akımlı numunelerde mineral katkı tipinin su emmeye etkisi.....	45
Şekil 5.33 UK'lı çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi	46
Şekil 5.34 SD'li çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi.....	46
Şekil 5.35 YFC'li çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi	47

TABLolar DİZİNİ**Sayfa**

Tablo 4.1 Çimento ve mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri	11
Tablo 5.1 Priz başlangıç ve priz bitiş süresinin katkı ve s/b oranını ile değişimi.....	34
Tablo 5.2 Akımlı ve akımsız numunede SD, UK, YFC'nin basınç dayanımına etkisi	48
Tablo 5.3 Akımlı ve akımsız numunelerde SD, UK ve YFC'nin poroziteye etkisi	49
Tablo 5.4 20. Dakikada farklı mineral katkılı çimento pastasının elektrik iletkenliği.	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Al_2O_3	Dialüminyum Trioksit
C-S-H	Kalsiyum – Silika – Hidrat
CaO	Kalsiyum Oksit
Cr_2O_3	Krom Oksit
Fe_2O_3	Hematit
K_2O	Potasyum Oksit
m^3	Metreküp
MgO	Magnezyum Oksit
Na_2O	Sodyum Oksit
SiO_2	Silisyum Dioksit
SO_3	Kükürt Trioksit
TiO_2	Titanyumdioksit
CSA	Kalsiyum Sülfö Alümino

Kısaltmalar **Açıklama**

ASTM	The American Society for Testing and Materials
cm	Santimetre
EN	Avrupa Normu
ICCP	Impressed Current Cathodic Protection
ITZ	Interfacial Transition Zone
kg	Kilogram
lt	Litre
mg	Miligram
mm	Milimetre
mA	Miliamper
s/b	Su/bağlayıcı
TS	Türk Standardı
SD	Silis Dumanı
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
UK	Uçucu Kül
PÇ	Portland Çimentosu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. BETONUN ELEKTRİKSEL ÖZELLİĞİ

Günümüzde hem deney tekniklerindeki ilerlemeler, hem de teknolojinin laboratuvar koşullarında doğurduğu olumlu sonuçlar, betonun mekanik yapısına da yansıdığı görülmüştür. Betonun oluşturan en önemli etkenlerden birisi çimentodur. Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçaları yapıştırma için kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu bağlayıcılık özelliğini kazanabilmesi için suyla kimyasal tepkimeye girmesi gerekir. Aslında beton elektriksel olarak iletken değildir. Ancak; su içeriğinden dolayı beton prizini alıncaya kadar iletkenlik gösterir. Beton prizini aldıktan sonra elektriksel açıdan iletkenliği yok denilecek kadar azalır. Betonun elektrik iletkenliği içerdiği boşluklarla ilişkilendirilebilir. Çünkü boşlukta iyonların hareket kapasiteleri daha yüksektir.

Mineral katkıları betonda maliyeti düşürmek, basınç dayanımı arttırmak, korozyonu azaltmak gibi farklı amaçlar için; karışımda çimento yerine belli oranlarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada mineral katkıların bu gibi olumlu sonuçlarının yanı sıra mineral katkıların, elektrik iletkenliğine etkisi üzerinde çalışılmıştır.

Bu çalışmada, çimento yerine silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu konulmuş çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri araştırılmıştır. Öncelikle mineral katkıların beton elektrik özelliğine etkisine değinilmiştir. Ardından konuyla ilgili önceden yapılmış çalışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan sonuçların bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.2. MİNERAL KATKININ BETON ELEKTRİKSEL ÖZELLİĞİNE ETKİSİ

Suya doymuş betonun elektriksel iletkenliği sadece gözenek yapısına değil, aynı zamanda gözenek çözeltisinin kimyasına da bağlıdır. Klor iyonlarının taşınması, gözenek çözeltisinin kimyasıyla çok az ilgilidir. Ancak; çimento bileşimi, agrega, beton karışım oranları, kimyasal katkıların kullanılması gibi birçok faktör gözenek çözeltisindeki iletken iyonların değişikliğinde çok önemli etkilere sahiptir. Çimento pastasına çimento yerine UK, YFC ve SD mineral katkıları konulması, çimento pastasının elektrik iletkenlik değerini fark edilebilir derecede arttırmaktadır. Bu elektriksel artış oranı kullanılan mineral katkının içerdiği alkali miktarına, mineral katkının katılma zamanına ve yaşına bağlıdır (Caijun and Shunfu, 2003).

Çimento pastalarında elektrik direnç ve elektrik iletkenlik ölçümleri çimentonun hidrasyonu hakkında bilgi edinilmesini sağlar (Deng and Tang, 1994; Tamas, et al., 1987). Yapılan araştırmalar sıcaklığın, su/bağlayıcı oranının ve mineral katkı tipi ve içeriğinin elektrik iletkenliği üzerinde etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yine hidrasyonun ilk aşamasında çimento pastalarında, çimento yerine belirli oranlarda SD konulması çimento pastasının elektrik iletkenliğini en yüksek değere ulaştırmaktadır (Salem and Ragai, 2000).

Bu tezde s/b oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve çimento yerine % 10, 20 ve 30 oranlarda SD, YFC ve UK katılarak çimento pastaları hazırlanmıştır. Ayrıca mineral katkı içermeyen kontrol numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan çimento pastalarına hazırlandıkları andan itibaren akım verilmeye başlanarak 1 gün süreyle akım verilerek, mineral katkıların ve çimento pastasına elektrik verilmesinin priz sürelerine etkileri araştırılmış, bununla mineral katkıların, numunelerdeki hidrasyon zamanına etkisi ve akımın çimento pastasının bazı özelliklerine etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

KONUyla İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

2.1 Elektrik İletkenliği

Beton iletken bir malzeme değildir, ancak; prizini alıncaya kadar su içeriğinden dolayı iletkenlik özelliği gösterir. Ayrıca beton içerisine katılan mineral katkıları betonun elektrik direnci açısından farklılık göstermektedir.

Elektrik iletkenliği, çimento bazlı sistemlerde iyonların boşlukta hareket etmeleriyle açıklanabilir. İletkenlik hem poroziteye hem de boşluk miktarının iletkenliğine bağlıdır.

2.1.1. Betonun Elektrik İletkenliği Hakkında Yapılmış Çalışmalar

Betonun elektrik iletkenliğinin ölçümü için çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve çimentonun mikroyapı gelişimlerini inceleyen çeşitli uygulama çalışmaları yapılmıştır (McCarter, et al., 2003; Whittington, et al., 1981).

Sonuçlardan görüldüğü üzere betonun elektrik iletkenliğinin ölçümünde karşılaşılan problemler, elektrotlar arasındaki etkileşimden, taze çimentonun elektrokimyasal reaksiyon göstermesinden ve büzülme boşluklarından kaynaklanmaktadır. Son zamanlarda ulaşılamaz elektrik direnç yöntemi ile beton karışımları içerisindeki boşluk solüsyonları ve taze betonun direnç gelişimlerinin ölçümü hakkında çalışmalar yapılmıştır. Yapmış olduğu çalışmada çimentonun hidratasyon işlem araştırmaları olumlu sonuçlar vermiştir (Wei and Li, 2006). Çimento pastalarındaki su/bağlayıcı oranı çimento hidratasyon alkali etkisi ve çimento pastasının akışkanlaştırıcılığı araştırılmıştır (Wei and Li, 2006; McCarter, et al., 2003).

Su/bağlayıcı oranıyla elektriksel direnç karşılaştırılarak, elektriksel direnç arttıkça, ısı artışı olacağı tahmin edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcıların iki tipi elektriksel direnç ve kıvam açısından karşılaştırılmıştır (Wei and Li, 2006).

Yapılan bazı çalışmalarda UK'nın betondaki etkisi araştırılmış, kontrol numuneleri ve mineral katkılı numunelerdeki elektriksel direnç gelişiminin poroziteye etkisi belirlenmiştir. Çimento pastasının elektriksel özellikleri çimento maddesinin mikro yapısındaki değişimle ilgilidir. Çeşitli tekniklerin yanı sıra taze betonda çeşitli deneyler yapılmıştır. Bunun için Spektroskopi aleti kullanılmıştır. Spektroskopi aleti yüksek duyarlılığa sahip olup, uzaktan kumanda edilebilmektedir. Ek olarak bu alet ivmelendirilmiş kür gelişiminde de kullanılabilir (Leivo, 1996; Levita, et al., 2000). Transfer özellikler; elektrik iletkenliği, difüzyon ve geçirimsizlik uygulamalarında kullanılabilir (Ping, 1991; Karen and Kamran 1996). Geçirimsizlik kısmen çimento pastasında gözlenmiş ve iletkenlik arasında daha fazla ilişki olduğu ortaya çıkarılmıştır (Halamicova, et al., 1995). Yapılan bazı çalışmalarda iletkenlik ve makroskopik gerilim arasındaki ilişki kurulmuştur.

Betonun elektrik direnci ve betondaki akım ilerlemesinin mikro yapı özellikleri hakkında çalışmalar yapılmıştır (Koleva, et al., 2008). Mikro yapıda yapılan araştırmalar, betondaki akım etkisinin durumu, maddenin kimyasal kompozisyonlardaki değişimi, elektrik özelliği hakkında tahminler yapılmasını sağlar. Yapılan deneyde optimizasyon ICCP tekniği kullanılmış ve iyon değişiminin elektrik direnciyle yakın alakalı olduğu ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak betondaki elektrolit yol sistemi; agresif iyon transfer mekanizmasının kinetik etkisinin, boşluk iletkenliğine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır (Koleva, et al., 2008). Backe et al., (2001) iletkenlik, porozite, çimento kimyası ve iyon içeriği arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Teorilerine göre porozitenin artması iletkenliğin artmasıyla ilişkilidir, dolayısıyla hidrasyon derecesiyle de ilgilidir.

Normal Portland çimentolara YFC ve SD'nin eklenmesinin agresif iyon saldırısına karşı kimyasal direnci arttırdığını ve hidrasyon sıcaklığının azalmasına yol açtığını önceki çalışmalar kanıtlamıştır (Morsy, 1998). Morsy yaptığı çalışmalarda

çimento pastasının elektrik iletkenliğini, farklı sıcaklıkta, kururken ve sertleşirken incelemiştir. Çimento pastasının elektrik iletkenliği, çimento hidratasyon sürecini anlamak için etkili bir yoldur ve çimento pastası içindeki yapısal değişiklikleri gözlemlemek için kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda kür sıcaklığına göre, katkılı çimentonun priz süresinin değişiklik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Elektrik iletkenliğinin çeşitliliği ve onun zamana göre türevi, çimento pastasının mikro yapısal gelişiminde farklı aşamalarla ilişkilendirilebilir (Schwarz, et al., 2007).

Yapılan çalışmalarda su/bağlayıcı oranı 0.37 olan çimento pastalarına, çimento yerine ağırlıkça % 5 SD koyarak numunelere elektrik akımı uygulamıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda, çimento pastalarına hem SD koyulması hem de elektrik akımı uygulanması ile elektrik iletkenlik, porozite, priz süresi, zamanla büzülme ve katıların bağlayıcılığı arasında önemli ölçüde ilişkiler olduğu bulunmuştur (Princigallo, et al., 2002).

Salem and Ragai (2000) yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranları 0.30, 0.40 ve 0.50 olan çimento pastalarına çimento yerine ağırlıkça belirli oranlarda SD, YFC ve UK koymuştur. Bu numuneler elektrik akımı uygulamak için kullanılmıştır. Bu yüzden karşılaştırmak için aynı oranlarda kontrol numuneleri hazırlanmıştır. Oluşturulan çimento pastaları düşük, normal ve yüksek porozite oranlarına sahiptir. Çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri 30 ve 50 °C'de ölçülmüştür. Bu çalışmada çimento pastalarının priz alıncaya kadar geçen sürede elektrikselsel karakteristiklerini ve hidratasyonu belirlemektir. Diğer amaçlanan konu ise çimento pastalarına çimento yerine mineral katkı koyulduğunda (SD, YFC ve UK) mineral katkıların çimento pastalarının yapısal değişimlerine etkilerini ve mineral katkıların priz süresine etkisini belirlemektir.

Çimento pastasının elektrik iletkenliği hakkında yapılan bir diğer çalışmada, çimento pastalarına sade ve iri cam tozu katılarak elektrik iletkenlikleri ölçülmüştür. Çimento pastalarına cam tozunun eklenmesi, çimento tanelerinin gelişmiş hidratasyonunu kolaylaştırdığı gözlenmektedir. Cam tozunun eklenmesiyle çimento hamurunun sertleşme zamanında sadece küçük değişikliklere yol açacağı, çimento pastalarının

iletkenlik değerlerinden kolayca görülmüştür. Hidratasyonun ilk aşamasında cam tozu içeriği arttıkça normalize iletkenliğin arttığı görülmüştür. Daha sonra iletkenlik değeri 1 mA'e yakın ya da daha az bir değere düşmüştür (Schwarz, et al., 2007).

Yapılan bir diğer araştırmada s/b oranları farklı olarak hazırlanmış çimento pastalarına belirli oranda CSA katılarak, çimento pastalarındaki elektrik direnç 1 gün süreyle araştırılmıştır. Karıştırıldıktan hemen sonra elektriksel direncin zamanla arttığı gözlenmiştir. Daha sonra prizini alıncaya kadar 2 kez en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Son olarak yaklaşık 1440 dakikada elektriksel iletkenlik en düşük değerlere ulaşmıştır. Hidratasyonun ilk aşamasında çimento pastalarındaki elektriksel iç dirençte porozite en önemli rolü oynarken, daha sonra iyon transferi önemli rol oynar. Elektriksel direnç ve su/bağlayıcı oranı arasında ilk bir saatte olumsuz eğilim varken, 24 saat sonunda aslında elektrik dirençle su/bağlayıcı oranı arasında ilişki kurulabileceği ortaya çıkmıştır. Farklı su/bağlayıcı oranlarında hazırlanmış karışımlar için, 24 saat sonunda elektrik dirençle basınç dayanımı arasında ilişki olmadığı ortaya çıkmıştır (Liao, et al., 2011).

Yapılan çalışmalarda elektrik iletkenliği öncesinde geçen sürenin indüksiyon süreciyle çok iyi bağlantılı olarak düştüğü ortaya çıkmıştır. İletkenliğin düşmesi agrega tarafından kısmen ertelenmiştir. Farklı sayısal ve analitik modeller [hard core soft shell model (HCSS), diferansiyel etkili orta teorisi (DEMT), Lu–Torquato, Maxwell] aracılığıyla, elektrik veri analizi, ara yüzey geçiş bölgesinin (ITZ) özelliklerinin bir tahminine izin vermiştir. Özellikle, yaklaşık 9 μ kalınlıkta bir ITZ ve 2.5 iletkenlik oranını bünyesinde bir ITZ bulunmuştur. Agrega hacim fonksiyonu % 60'ı aştığı zaman, hem elektrik ölçümü hem de modelleme tarafından, ara yüz bölgelerine süzülen bir yolun var oluşu bulunmuştur. Sonuç olarak, elektrik iletkenliği, basınç dayanımı ve agrega miktarı arasında yeni bir ilişki elde edilmiştir (Princigallo, et al., 2003).

Bir diğer çalışmada, şantiyedeki betonun öz direncini incelemek için kullanılan yöntemleri, donatı paslanmasından korunmasıyla ilgili çeşitli amaçlar için tanımlanmıştır. Betonun elektrik direnci, donatının paslanmasını içeren iki işlemle ilgili

olabilir: i) başlama (klorür penetrasyonu) ve ii) yayılma (korozyon hızı). Klorüre maruz kalan bir yapının özdirenci, erken korozyon hasarı riskini belirtir; çünkü düşük bir özdirenç, hızlı klorür penetrasyonu ve yüksek bir korozyon hızıyla ilgilidir. Beton yüzeyinin özdirenci, beton yüzeyine elektrotlar yerleştirerek ve bir gerilim uygulayarak ölçülebilir (Polder, 2001). Betonda SD kullanılması yüksek bir elektrik iletkenliği sağlamada yardımcı olur. Priz sonunda, elektronik iletkenlik, iyonik iletkenlikten daha önemlidir. Islak durumda (su doymuş durumda), iyonik iletkenlik baskın olur. Bazı çalışmalar klorür iyonlarının ıslak betonun özdirencini azaltacağını iddia etmiştir (örneğin, betonun iletkenliğini artırır.) (Polder, 1995). Betonun gözenek çözeltilisinin yüksek alkaliliğini, yüksek elektrik özdirencini ve toplu taşıma için bir engel olarak rol alan yapının kendisini içeren birçok özel özellikleri vardır. Bu özellikler, elektriksel özelliklerini ve beton malzemelerindeki iyon transferini ve akımı etkiler (Whittington, et al., 1981).

Betonda akım, gözenekli sıvıda çözülmüş iyonlar tarafından taşınır. Hem daha fazla gözenekli su (ıslak beton) hem de daha fazla ve geniş gözenekler (yüksek s/b oranı) daha düşük bir özdirence neden olur. Sürekli bir nem içeriği için, direnç daha düşük bir s/b tarafından artırılır (Polder, 2001). Elektrik ölçme yöntemleri, suyla birleştirilmiş çimento bazlı malzeme sistemlerinde mikro yapısal değişikliği saptamak için kullanılmıştır. Fakat geleneksel elektrik ölçümünden çıkan sonuçlar, elektrokimyasal tepkiler, rötre aralığından oluşan elektrotlar ve taze çimento arasındaki temastan kaynaklanan problemlerden dolayı sorunludur (McCarter, et al., 2003).

BÖLÜM 3

AMAÇ

Bu tezde çimento pastalarına çimento yerine % 0, % 10 ve % 30 oranlarda SD, YFC ve UK konularak ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastaları hazırlanmıştır. Her karışım için 2 adet numune hazırlanmıştır. Bir numuneye elektrik akımı uygulanmış diğeri kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Bu tezde amaçlanan farklı mineral katkılı çimento pastalarına elektrik akımı uygulandığında elektrik akımının çimento pastası özeliğindeki değişmeleri ve gelişmeleri saptamaktır. Ayrıca çimento pastalarına akım uygulandığında akımın mineral katkılar üzerindeki etkisini saptamak için bu araştırma yapılmıştır.

Farklı mineral katkılı ve farklı s/b oranlarında hazırlanan numunelerde akım uygulaması sonucu porozitenin değişip değişmeyeceği, ne kadar değişeceği araştırılmış ve porozitenin değişmesiyle elektrik iletkenliğinde ne derece artma veya azalma olacağı araştırılmıştır. Çimento pastalarına akım verildiğinde basınç dayanımını arttırıp arttırmayacağı hususta çalışmalar yapıp, hangi mineral katkı için hangi oranda kullanıldığında basınç dayanımı artabileceği amaçlanmıştır.

Mineral katkı tipi ile priz süresi arasında bağlantı kurularak, çimento pastalarına mineral katkı konulmasıyla kür süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu araştırma sonucu elde edilen veriler kullanılarak deney sayısının arttırılması ve deney sonuçlarının bu tezdeki sonuçlarla karşılaştırılmasıyla, bilime katkıda bulunmak amaçlanmıştır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

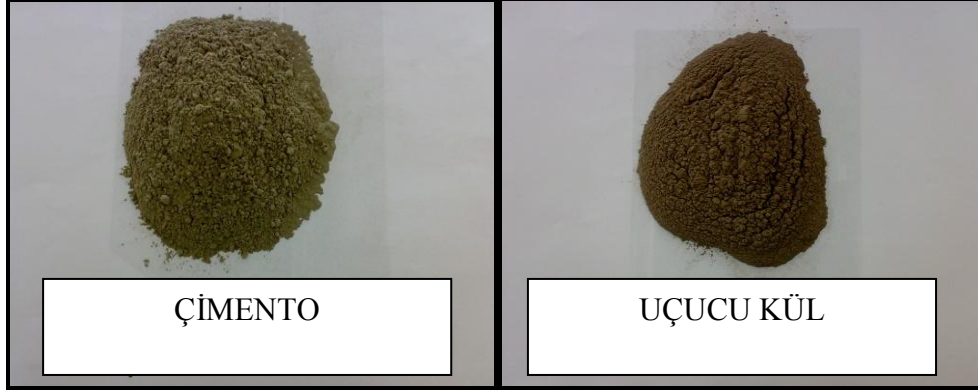
4.1.1. Çimento: Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan CEM I 42.5 R çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

4.1.2. Yüksek Fırın Cürufu: Bursa çimento fabrikasından sağlanmıştır. YFC'nin inceliği 60 μ 'den küçük olacak şekilde öğütülmüştür. YFC'ye ait özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

4.1.3. Silis Dumanı: Deneylerde, Antalya Etibank Elektro Metalurji Sanayi İşletmesi'nden endüstriyel atık olarak bacalarda tutulan ferrosilisyum (FeSi) baca tozları kullanılmıştır. Çimento tozlarından yaklaşık 100 defa daha küçük ortalama çaplara sahiplerdir. Bileşimindeki yüksek silis oranı bu dumanları aktif bir puzolan yapmakta fakat, çok fazla olan incelik belirli bir kıvam için gerekli su miktarını arttırmaktadır. Silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir (Yeğınobalı, 2003).

4.1.4. Uçucu Kül: Bu çalışmada kullanılan uçucu kül, Tunçbilek Termik Santralinden sağlanmıştır. Öğütülmüş uçucu külün bazı fiziksel özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Çimentonun, UK'nın, SD'nin ve YFC'nin görünüşü Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çimento ve UK'nın görüntüsü



Şekil 4.2. SD ve YFC'nin görüntüsü

Tablo 4.1. Çimento ve mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özellikleri

İçerik, %	CEM I 42.5 R	YFC	UK	SD
CaO	63.6	39.8	6.66	1.48
SiO ₂	19.6	32.8	47.4	74.7
Al ₂ O ₃	4.72	11.8	19.8	0.46
Fe ₂ O ₃	3.27	1.45	11.8	0.84
MgO	1.91	4.15	4.76	3.64
Na ₂ O	0.34	0.51	0.57	0.85
K ₂ O	1.06	0.91	2.62	5.05
SO ₃	4.72	2.06	1.86	2.48
Cr ₂ O ₃	0.04	0.02	0.13	2.83
TiO ₂	0.41	0.63	0.88	0.63
KK	2.69	2.2	2.76	5.97
Özgül ağırlık	3.07	2.8	1.99	2.44
İncelik, cm ² /g	3312	4982	3126	14000

4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

S/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 ve sırasıyla % 0, % 10, % 20 ve % 30 oranında UK, SD ve YFC konularak karışımlar oluşturulmuştur. Karışımda kullanılan her madde için 2 kalıp kullanılmıştır. Önce kabın darası alınmıştır. Oluşturulacak karışımda öngörülen miktar kadar çimento katılmıştır. Daha sonra farklı bir kalıpta karışımdaki su miktarı tartılarak bir kenara konulmuştur. Eğer karışımda katkı maddesi varsa farklı bir kalıpta tartılmıştır. Örnek olarak s/b oranı 0.50 ve % 10 oranında YFC içeren karışım için 900 g çimento, 500 g su ve 100 g YFC kullanılmıştır. Aynı şekilde diğer karışım oranları da belirlenmiştir. Numuneler karıştırılırken homojen bir karışım oluşturmaya dikkat edilmiştir. Önce karışım kabına çimento konulmuştur, sonra hazırladığımız karışımda mineral katkı varsa, gerekli miktarda mineral katkı konulmuş, yeteri kadar karıştırıldıktan sonra su ilavesi yapılarak homojen çimento pastaları oluşturulmuştur. Deneyde 4 x 4 x16 ebatlarında ahşap kalıplar kullanılmıştır. Kullanılan kalıplar Şekil 4.3'deki gibidir.



Şekil 4.3. Deneyde kullanılan ahşap kalıp

4.3. Deneylerin Yapılması

Yapılan deneylerde ASTM C150, TS EN 197 Standartları kullanılmıştır. Ayrıca EN 196-3 kodlu standarttan da yararlanılmıştır. Çimento pastası karışımları mineral katkısız ve 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında hazırlanmış olup, ayrıca; % 10, 20 ve 30 oranlarında çimento yerine sırasıyla UK, SD ve YFC katılmıştır. Her bir karışım için iki adet numune hazırlanmış, bir karışıma elektrik verilmiş, diğer kontrol numunesine elektrik verilmemiş olup 1 gün oda sıcaklığında (yaklaşık 20 °C'de) bekletilmiştir. Bir gün sonra numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra 28 gün süreyle suda kür edilmiştir. Kontrol numuneleride elektriksel iletkenlik olmadan üretilmiştir. Basınç dayanımı, su emme oranı, porozitesi ve priz süresi deneyleri numunelere uygulanmıştır. Basınç presi otomatik basınç makinesi tarafından TS EN 196 standardına göre yapılmıştır. Birim ağırlık ve görünen porozite deneylerinde her bir test için (110 °C'de etüvde) kuru ağırlıkları ve sudaki ağırlıkları sırasıyla ölçülmüştür.

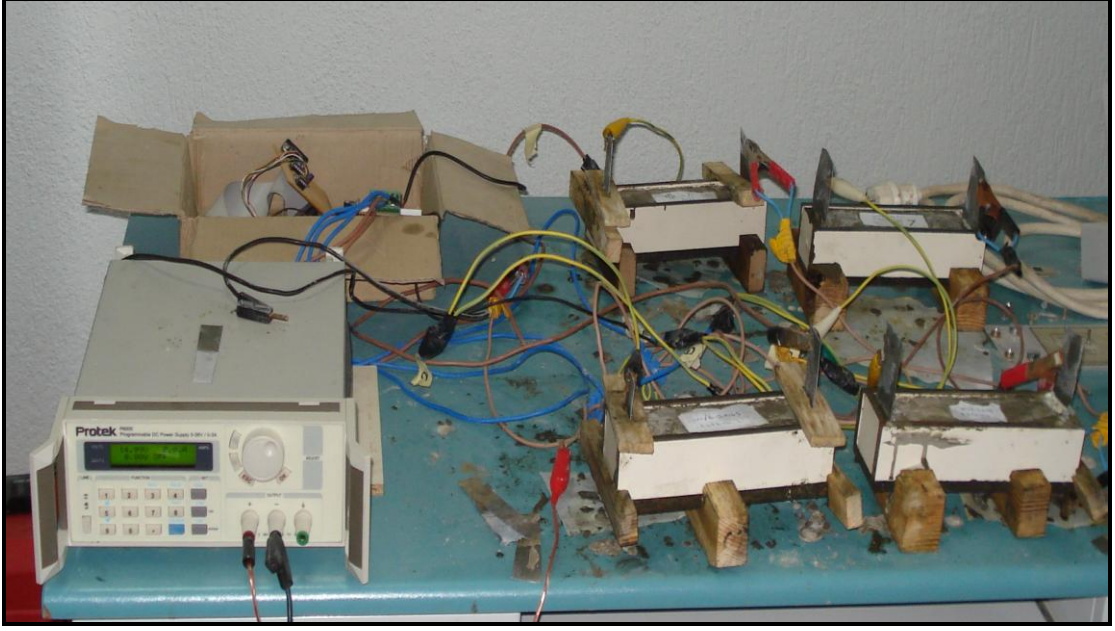
4.4. Çimento Pastalarının Elektrik İletkenliği

Elektriksel iletkenlik ölçümleri numuneye gömülen bakır elektrotlarla yapılmıştır. Numunelerin yüksüz durumdaki elektrik iletkenliğini ölçmek için (DC) akım uygulanmıştır. Elektrik verilen bütün karışımlara 15 Volt verilmiş olup, her 2 dakikada bir geçen akımların değerleri ölçülerek, veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Numunelere elektrik vermek için Protek marka DC güç kaynağı kullanılmıştır. Kullanılan DC güç kaynağı ile 60 Volt'a kadar doğru akım verilebilmektedir. Herhangi bir elektrik kesintisinde deneylerin devam etmesi açısından jeneratör kullanılmıştır. Elektrik verilen numunelere 15 Volt akım verilmesinin nedeni, 15 Volttan daha fazla akım verildiğinde bazı karışımların prizini daha kısa sürede alma olasılığı düşünülmüş, dolayısıyla deneylerin daha kısa sürede bitmesi olasılığı önlenmiştir. Kullanılan (DC) güç kaynağı Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Deneyde kullanılan DC güç kaynağı

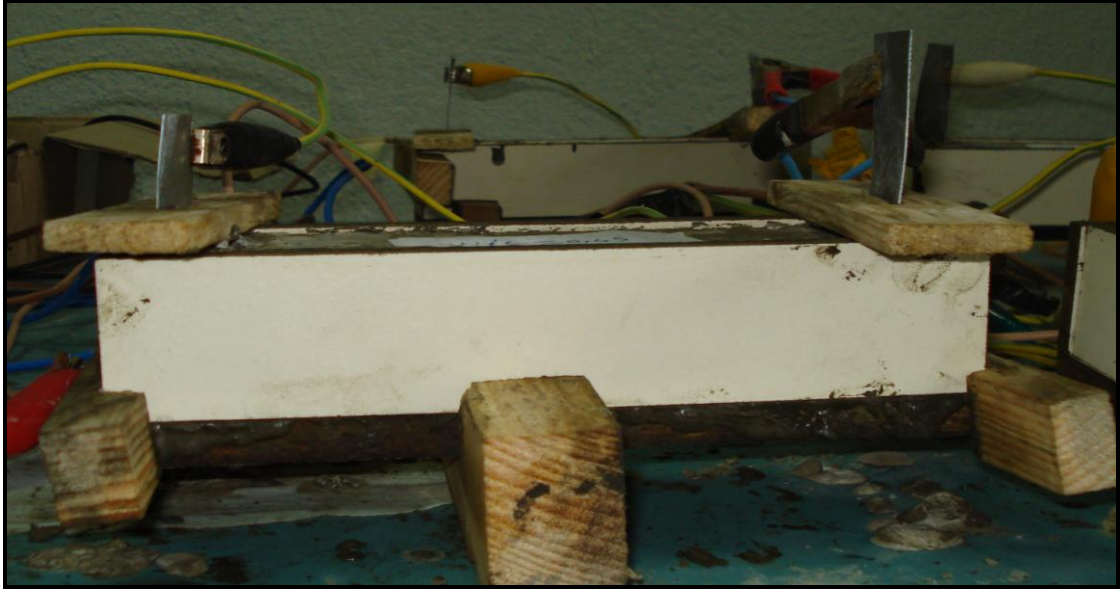
Ayrıca numunelerden zamana göre ne kadar akım geçtiğini kaydetmek için başka bir alete gerek duyulmuş, bu yüzden data logger kullanılmıştır. Numunelere verilecek elektrik DC güç kaynağından alınmıştır. Bunun için bir ucu soketli bir ucu kısaç şeklinde aparatlar yaptırılmıştır. DC güç kaynağının eksi (-) ucunda bağlı olan kablo numunelere elektrik vermek için kısaç şeklinde aparatlar yaptırılıp numunelere bağlanmıştır. DC güç kaynağının artı (+) kutbundaki kablo data loggere bağlanmıştır. Ayrıca; data logger'ın uçlarına da kısaç şeklinde aparatlar bağlanmıştır. Böylelikle numunelere elektrik vermek için artı (+) ve eksi (-) kutuplar olmak üzere aynı anda 6 numune bağlayabileceğimiz bir sistem oluşturulmuştur. Numuneler için (+) kutup data loggerdan gelen kablo ile, (-) kutup ise direkt olarak DC güç kaynağından gelmektedir. Standart bir deney olması için, her deneyde bakır levhaların aralarındaki uzaklıkların eşit olmasına özen gösterilmiştir. Oluşturulan düzenek Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü

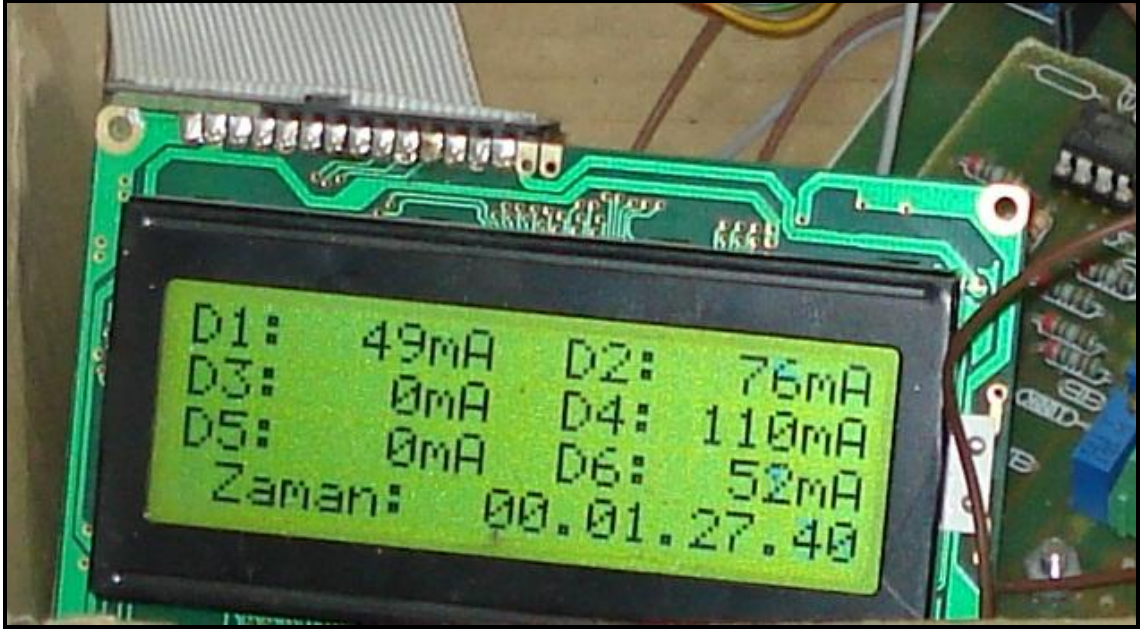


Şekil 4.6. Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü



Şekil 4.7. Çimento pastalarına elektrik uygulandığındaki görünümü

Elektriğin çimento pastası içinde iletilmesi için iletken bakır levhalar kullanılmıştır. Standart bir deney olması için bütün numunelerde aynı bakır levhalar kullanılmış olup, bakır levhalar arasındaki uzaklıklar eşit tutulmuştur. Ayrıca kullanılan kalıpların, elektriksel açıdan iletken olmaması gerekmektedir. Bu yüzden ilk önce camdan kalıplar yaptırılmış, deneyler camdan kalıplarla yapılmıştır; ancak numunelerin kalıplardan çıkartılması çok zor olduğu anlaşılmış, bu yüzden standart ahşap kalıplar yaptırılmış ve cam kalıplarla yapılan bütün deneyler tekrarlanmıştır. Numunelere 24 saat oda koşullarında elektrik verilmiş olup, numunelerin elektrik iletkenlikleri her 2 dakikada bir ortalaması alınarak data loggere kaydedilmiştir. Daha sonra data loggerda kayıtlı veriler, deney sonucunda bilgisayara kaydedilip, data loggerdaki mevcut veriler bir sonraki deney için silinmiştir. Bu deney için özel olarak yaptırılan data logger Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Deneyde kullanılan data logger

Ölçümler oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney düzeneği, 6 farklı kalıp kullanılarak, veri toplama ve veri kayıt cihazı yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde her bir ayar çimento hamurunun elektriksel iletkenlik değeri (E) hesaplanmıştır.

$$E = \frac{L}{A \times U} \quad (1)$$

Burada; L: elektrotlar arasındaki mesafeyi; A: numunenin kesit alanını ve U: elektrotlar üzerindeki gerilim iz düşümünü göstermektedir.

Yapılan çalışmanın daha kapsamlı olması için numunelerin porozite ve su emme yüzdelerinin hesaplanması düşünülmüştür, bunun için numuneler kür havuzundan çıkartılarak sudaki ağırlığı ölçülmüş, daha sonra numuneler kuru bezle silinerek tartılmıştır. Sonra numuneler 110 °C’de etüvde 1 gün süreyle kurutulmuştur. Daha sonra etüvden çıkartılan numuneler soğuması için yaklaşık 30 dakika süreyle oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kurutulan numuneler tartılarak değerleri kaydedilmiştir.

Her numune için ayrı ayrı bu işlemler uygulanmıştır. Son olarak elektrik verilen numunelere ve elektriksiz numunelere basınç testi yapılmıştır. Değerler kaydedilmiştir. Numunelerin porozitesi ve su emme (%)’si değerleri aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$Porozite = \left(\frac{W_2 - W_0}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$Su Emme (\%) = \left(\frac{W_2 - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

Burada;

W_2 = Doygun havadaki ağırlık

W_1 = Su içindeki ağırlık

W_0 = Etüv kurusu ağırlığı

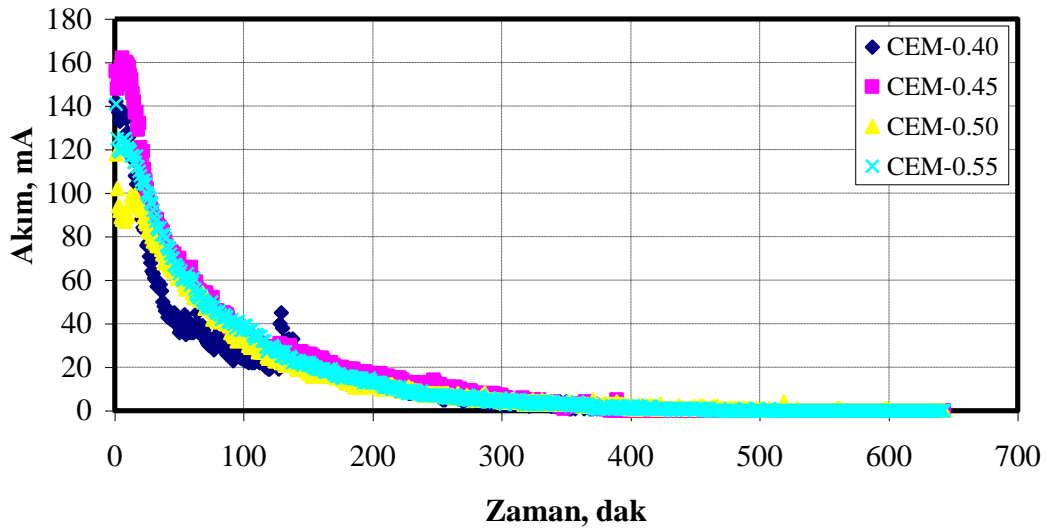
Son olarak mineral katkıların priz süresine etkisini saptamak için diğer deneyler için hazırlanmış oranlarda tekrar karışımlar yapılmıştır. Normal kıvamda hazırlanan çimento pastaları Vicat halkasının içine yerleştirildikten sonra aletin iğnesi halka içindeki çimento pastasının üst yüzeyine indirilerek ayarlanmıştır. Daha sonra da hareket edebilir çubuk serbest bırakılarak kendi ağırlığının etkisiyle iğnenin çimento pastasının içerisine dalması sağlanmıştır. Vicat iğnesinin ucu camın üzerine kadar indirilerek aletin göstergesi sıfıra getirilmiştir. Daha sonra, iğnenin ucu çimento pastasının üst yüzeyine dokunacak kadar indirilerek serbest bırakılmıştır. Çimento pastasına batan iğne, cam levhaya 3–5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamıştır. İğnenin ucu çimento pastasının içerisine giremediği veya en çok 1 mm girebildiğinde priz sona ermiştir. Her numune için bu deney ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu deney ASTM C 191 standartına göre yapılmıştır. Böylelikle laboratuvar ortamında yapılan deneyler tamamlanmıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

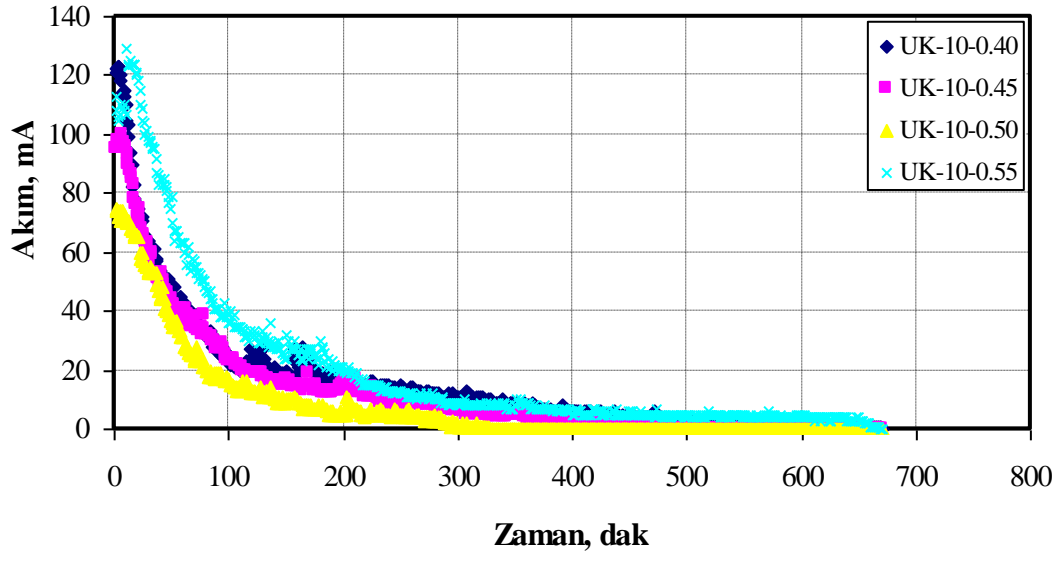
Çimento pastasının farklı su/bağlayıcı oranlarında katkısız olarak ve farklı mineral katkı oranlarıyla çimento pastasının prizini alıncaya kadar geçen sürede (laboratuvar koşullarında) elektrik iletkenlikleri incelenmiştir.

Mineral katkısız çimento pastasının elektrik iletkenliği karışımdaki su/bağlayıcı oranıyla doğrudan ilişkilidir. Yapılan deneyde farklı s/b oranlarında çimento pastasının başlangıçtaki ilettikleri akımlar hemen hemen aynıken zamanla s/b oranı fazla olan karışımın daha fazla akım ilettiği Şekil 5.1’de görülmektedir.

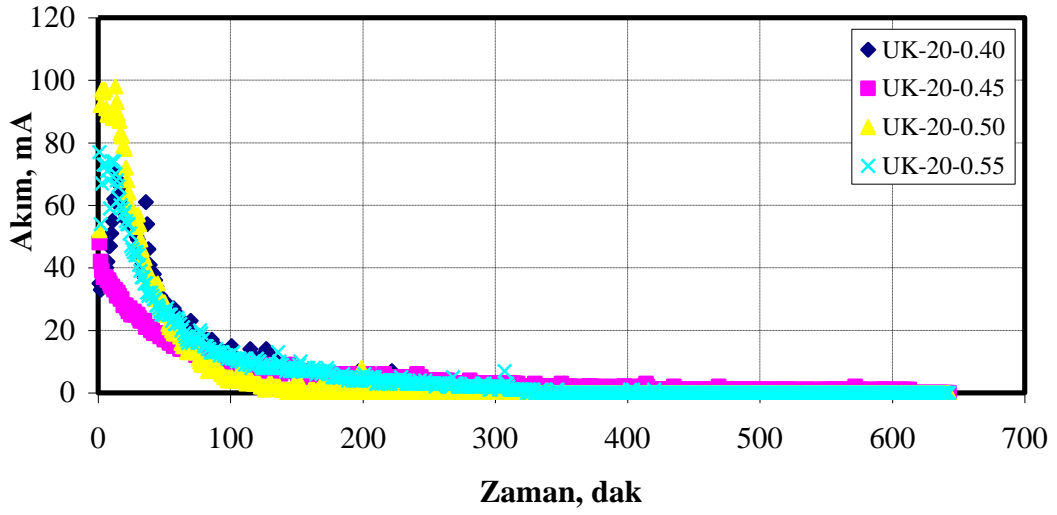


Şekil 5.1. Mineral katkısız numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

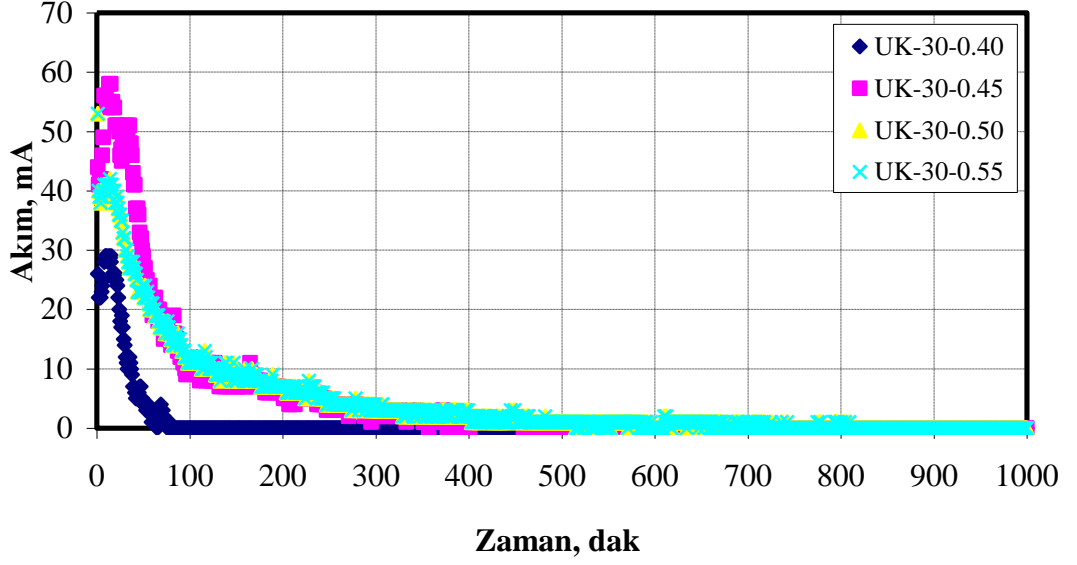
Çimento pastasına mineral katkı olarak UK katıldığında elektriksel iletkenlik oranı katkısız çimentoya göre daha azdır (Şekil 5.2). Karışımdaki çimento yerine konulan UK oranının arttırılması çimento pastasının daha az akım iletmesine neden olmaktadır. Bu sonuca Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'ten ulaşılabilir.



Şekil 5.2. % 10 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

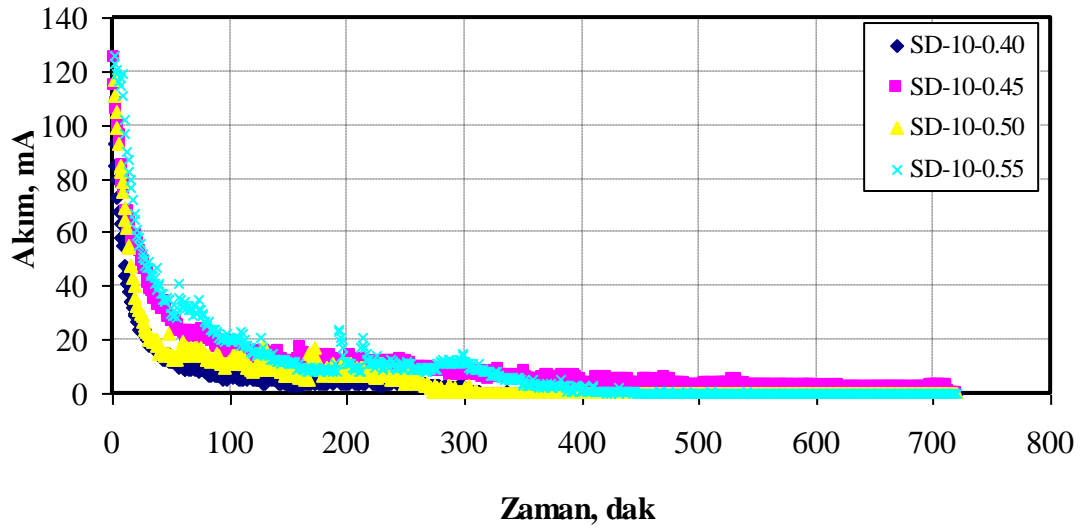


Şekil 5.3. % 20 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

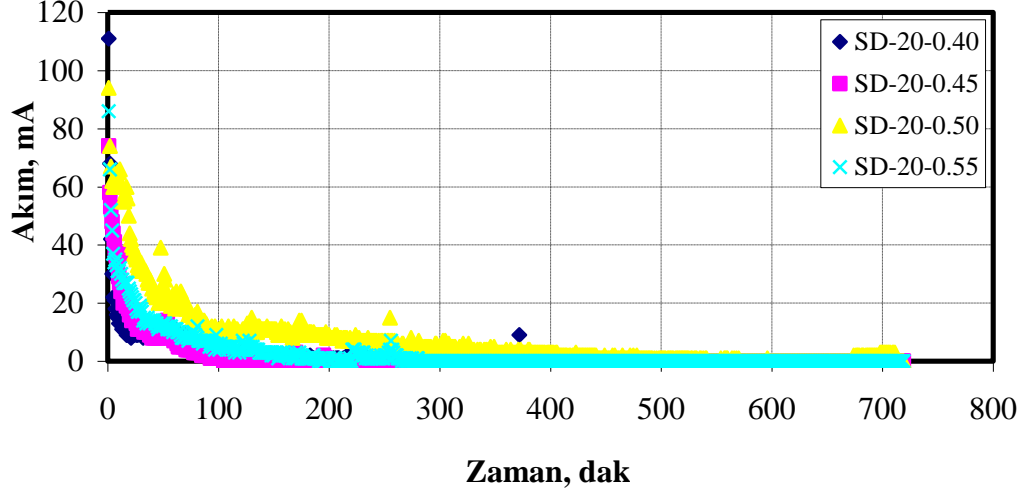


Şekil 5.4. % 30 UK'lı çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

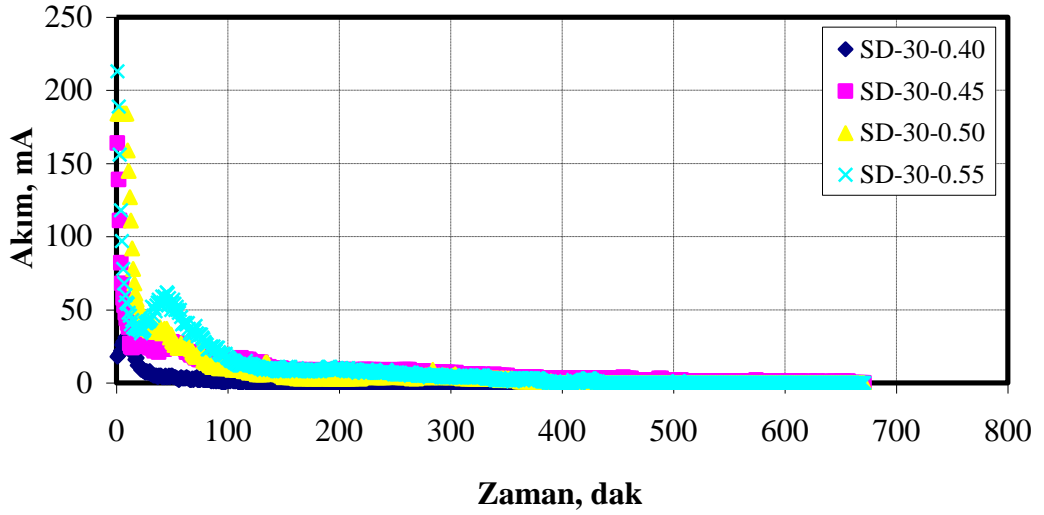
Çimento pastasında çimento yerine SD konulduğunda mineral katkısız karışıma göre daha az akım ilettiği net bir şekilde gözükmemektedir. Karışımdaki SD kullanım oranı arttıkça iletkenlik genel olarak azalır (Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7).



Şekil 5.5 % 10 SD'li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

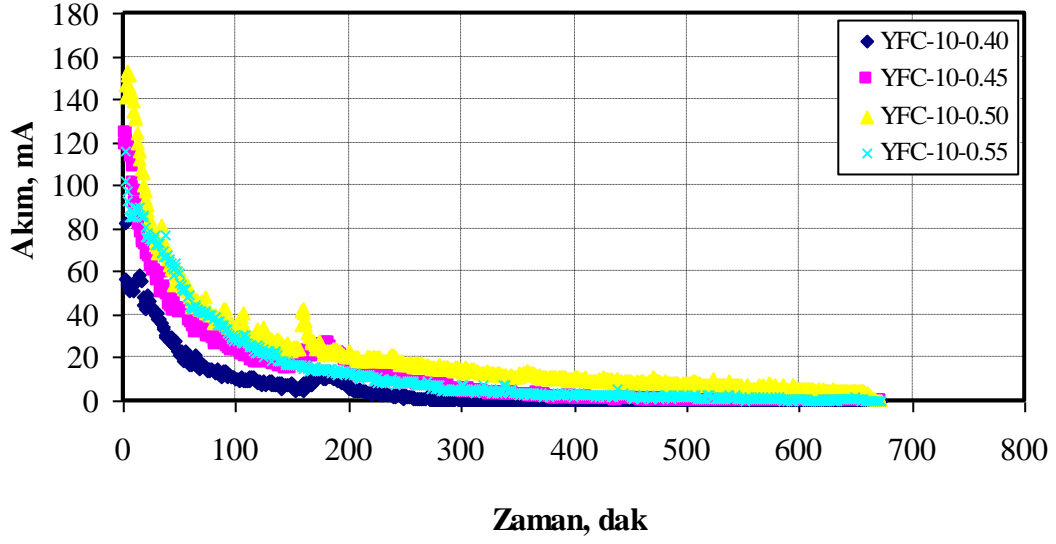


Şekil 5.6. % 20 SD’li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

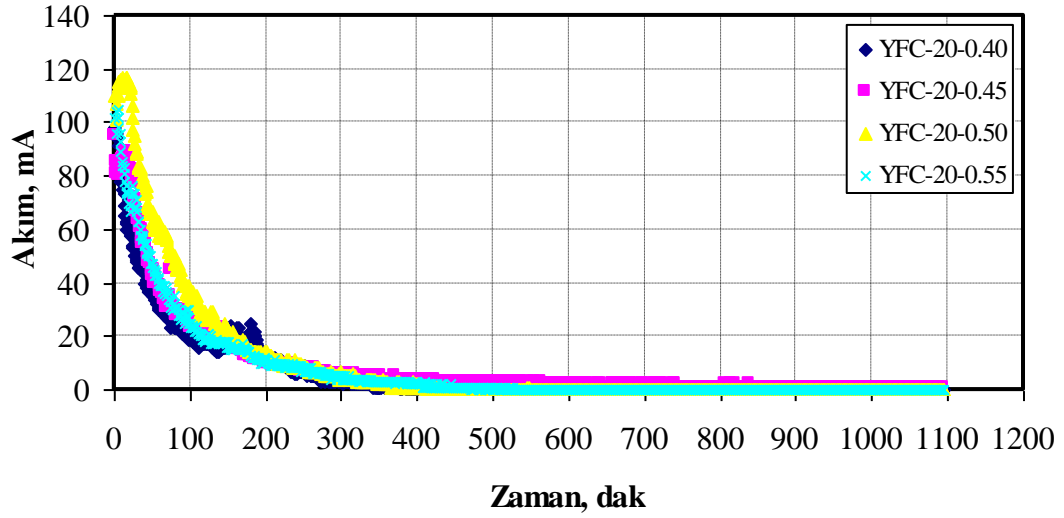


Şekil 5.7. % 30 SD’li çimento pastasının elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

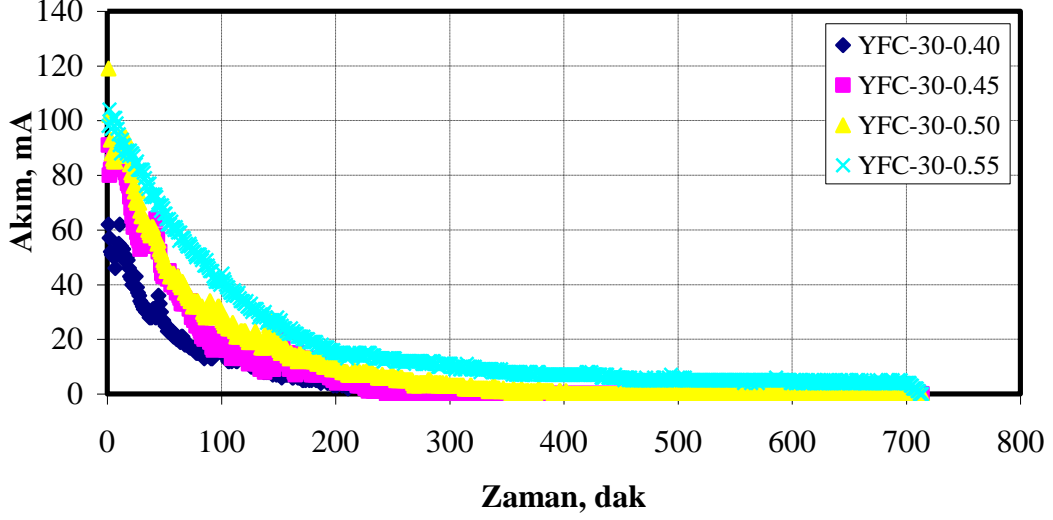
Çimento pastasına YFC katılması diğer elektriksel iletkenliği arttırmıştır. Bu sonuçlara Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10’den ulaşılabilir.



Şekil 5.8. % 10 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi



Şekil 5.9. % 20 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi



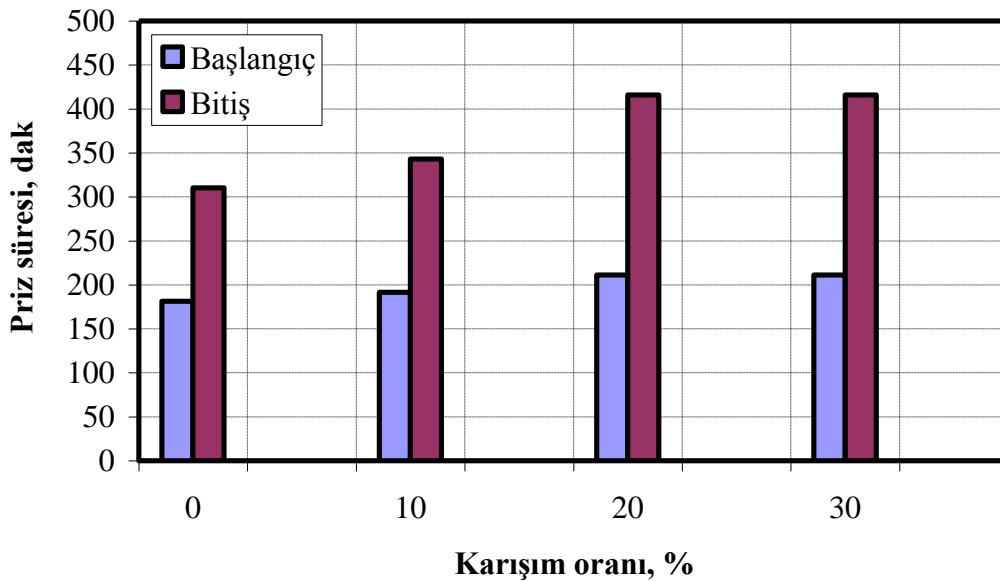
Şekil 5.10. % 30 YFC'li numunelerin elektrik iletkenliğinin zamanla değişimi

Genel olarak çimento pastasına çimento yerine mineral katkı konulması, çimento pastalarının daha az akım iletmesine neden olmuştur. Bunun nedeni karışımdaki su içeriğinin azalmasıdır. Aynı orandaki mineral katkılı çimento pastaları karşılaştırıldığında UK, SD'ye göre, SD'de YFC'ye göre daha fazla akım iletir. Dolayısıyla YFC'li çimento pastasındaki su, daha çabuk tepkimeye girer. Buradan içerik olarak aynı oranda mineral katkı katılmış çimento pastalarında YFC'li çimento pastası en çabuk priz alır sonucuna ulaşılabilir. Ancak; mineral katksız çimento pastalarının priz süreleriyle, mineral katkılı çimento pastalarının priz süreleri karşılaştırıldığında, mineral katkılı çimentolar daha geç priz almıştır.

5.1. Mineral katkının priz süresine etkisi

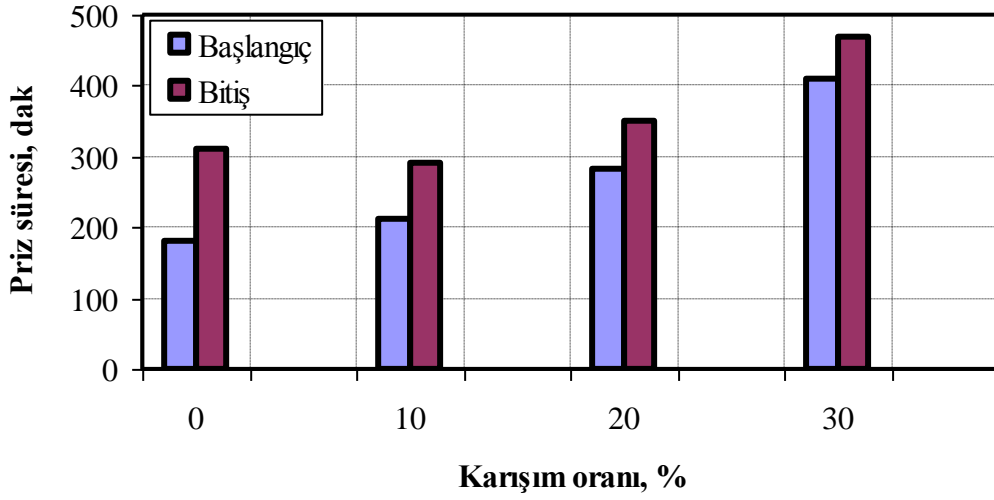
Çimento pastası karışımı içerisinde bulunan iki elektrot arasındaki elektriği ileten madde, başlangıçta sıvı fazda bulunan karışım içerisindeki sudur. Başlangıçta, karışım içerisindeki tüm boşluklar birbiriyle bağlantılıdır. Bundan dolayı elektrotlar

arasındaki elektroliz olayı bu boşluklardaki serbest su tarafından gerçekleştirilmektedir. Ancak zaman geçtikçe çimento pastası içerisindeki ana bileşenlerin su ile reaksiyonu sonucunda hidrate ürünler oluşur ve başlangıçta birbiriyle bağlantılı olan boşluklar birbirinden ayrılırlar. Bu yüzden çimento pastalarının elektriksel iletkenliği zamanla azalır ve çimento prizini tamamladığında en küçük değere ulaşır. Dolayısıyla çimentonun elektriksel iletkenliği çimento pastasının priz süresiyle doğrudan ilişkilidir.

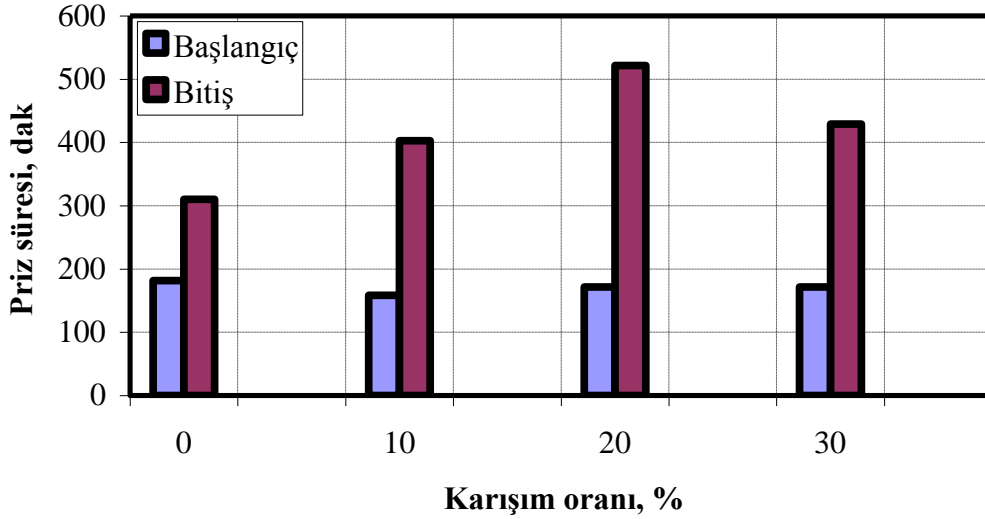


Şekil 5.11. UK katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi

Mineral katkıların kullanılmasıyla çimento pastasının priz sürelerindeki değişimi Şekil 5.11, 5.12 ve 5.13'te verilmiştir (s/b oranları normal kıvama göre tayin edilmiştir). Kontrol numunesi olan mineral katısız çimento pastasının priz süresi incelendiğinde, priz başlangıç ve bitiş süreleri sırasıyla 180 ve 310 dak'dır. Genel olarak, çimentonun belirli oranlarda mineral katkılarla yer değiştirilmesi sonucunda priz başlangıç sürelerinde az bir değişiklik görülürken (silis dumanı hariç), priz bitiş sürelerinin kontrol çimento pastasına göre genel olarak arttığı gözlenmiştir. Priz bitiş sürelerindeki bu artışın başlıca nedeni, karışım içerisinde çimentodan gelen ve ilk saatlerdeki hidratasyon olayının gelişmesinde önemli bir etkiye sahip olan C_3A 'nın azalmasıdır.



Şekil 5.12. SD katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi



Şekil 5.13. YFC katılmış çimento pastasının priz süresine etkisi

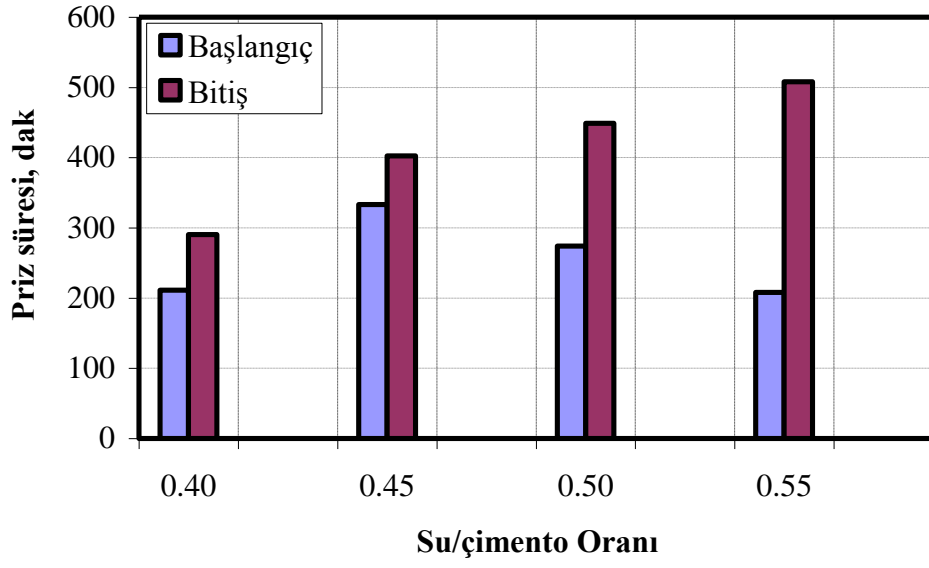
Çimentonun UK ile belirli oranlarda yer değiştirilmesi sonucunda, çimentonun priz süresi % 10 ile % 30 UK içeriklerinde sırasıyla, % 6 ile % 17 oranlarında artmıştır (Şekil 5.11). Aynı uçucu kül içerikleri için bitiş sürelerinin de kontrol çimento pastasına göre sırasıyla, % 10 ile % 36 arasında arttığı görülmüştür.

Silis dumanı kullanılması durumunda, çimentonun priz başlangıç ve bitiş süreleri kontrol çimento pastasına göre genel olarak artış eğilimindedir (Şekil 5.12). Priz

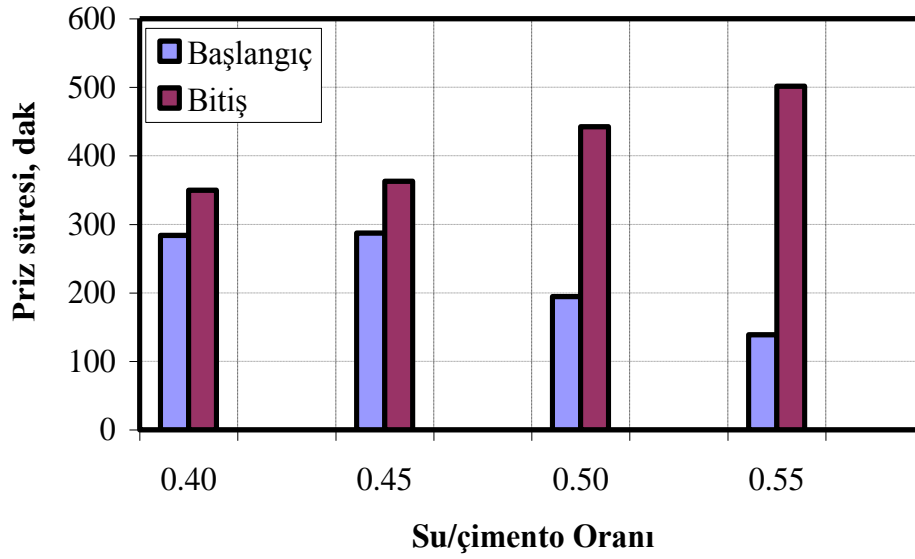
başlangıç süreleri, % 10, 20 ve 30 SD kullanılması durumunda kontrol çimento pastasına göre % 11, % 53 ve % 116 oranında artmıştır. Sadece % 10 SD içeriğinde çimento pastasının priz sona erme süresinde % 5 oranında bir azalma görülürken, diğer % 20 ve % 30 SD içeriklerinde priz sona erme sürelerindeki artışlar sırasıyla % 13 ve % 52 oranlarındadır.

Yüksek fırın cürufu (YFC) içeren karışımların priz başlangıç süreleri, % 10 YFC içeriğinde referans karışıma göre % 11 oranında bir azalma görülürken, % 20 ve % 30 YFC içeriğinde bu azalmalar benzer olup yaklaşık % 6 oranındadır (Şekil 5.13). Priz bitiş sürelerinde en fazla artış % 20 YFC içeriğinde görülmüştür.

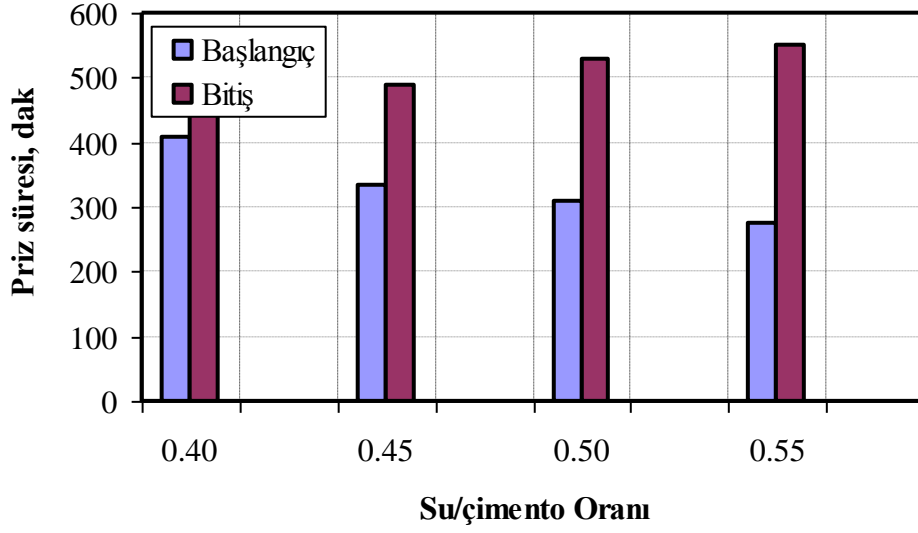
S/b oranı 0.45 olan mineral katkısız çimento pastalarının priz başlangıç süresi 270.6 dakika iken priz bitiş süresi 422.2 dak'dır (Tablo 5.1). S/b oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UCK, SD ve YFC konulan çimento pastalarına akım uygulandığında priz başlangıç süreleri sırasıyla 280, 333.3 ve 224.4 dak'dır (Tablo 5.1). S/b oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UCK, SD ve YFC konulan çimento pastalarına akım uygulandığında priz bitiş süreleri sırasıyla 363, 402.6 ve 396 dak'dır (Tablo 5.1). Sonuç olarak mineral katkılı çimento pastalarının priz başlangıç süreleri mineral katkısız çimento pastalarına göre daha geç iken; priz bitiş süreleri karşılaştırıldığında mineral katkılı çimento pastalarının priz alma süreleri mineral katkısız çimento pastalarına göre daha erken olmuştur. Priz süresini en fazla kısaltan mineral katkı UK'dır (Tablo 5.1). Çimento pastalarına hem çimento yerine mineral katkı konulması hem de elektrik akımı uygulanması sonucu çimento pastalarının priz süreleri kısalmıştır. Akım uygulanan numunelerin priz başlangıç ve priz bitiş sürelerinin mineral katkı tipine ve s/b oranına göre değişimi Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



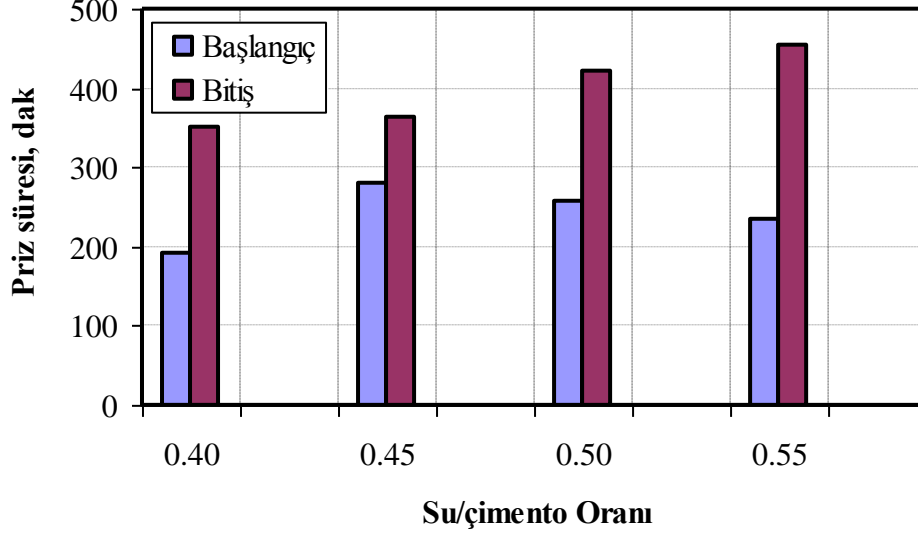
Şekil 5.14 % 10 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



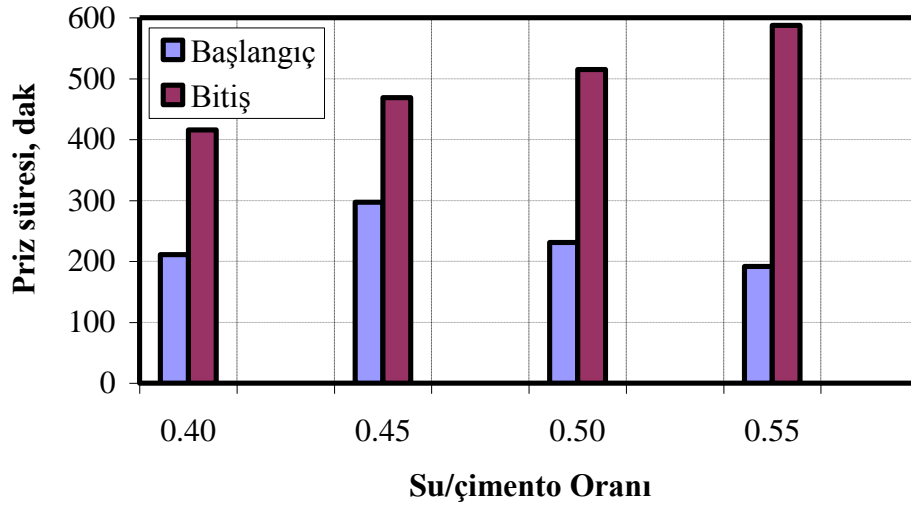
Şekil 5.15 % 20 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



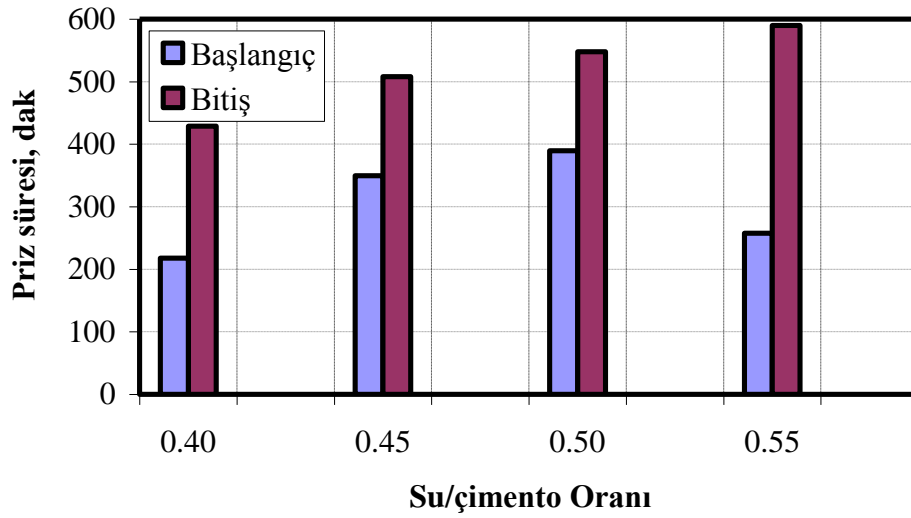
Şekil 5.16 % 30 SD'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



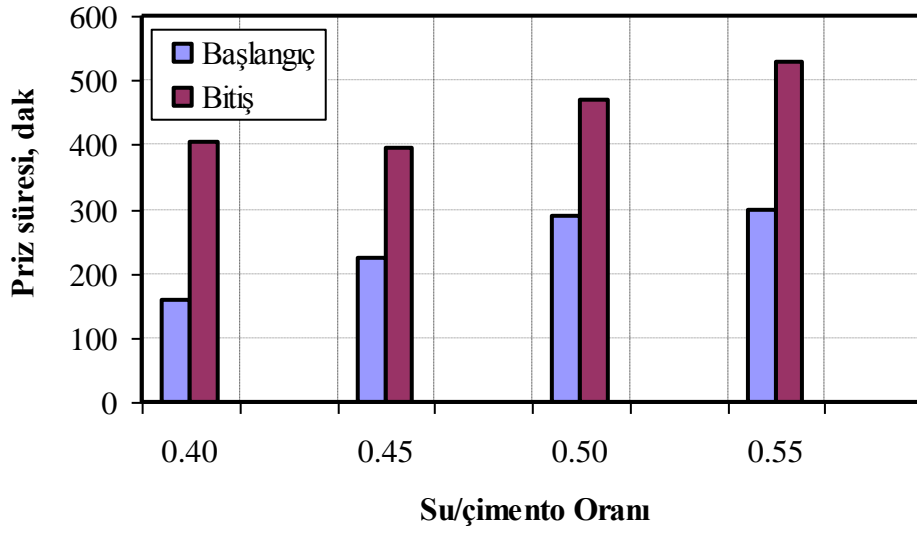
Şekil 5.17 % 10 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



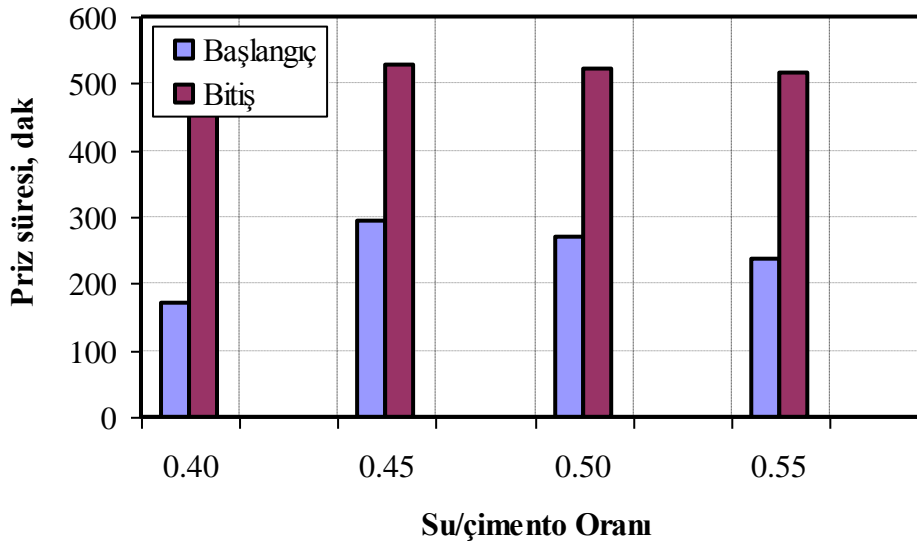
Şekil 5.18 % 20 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



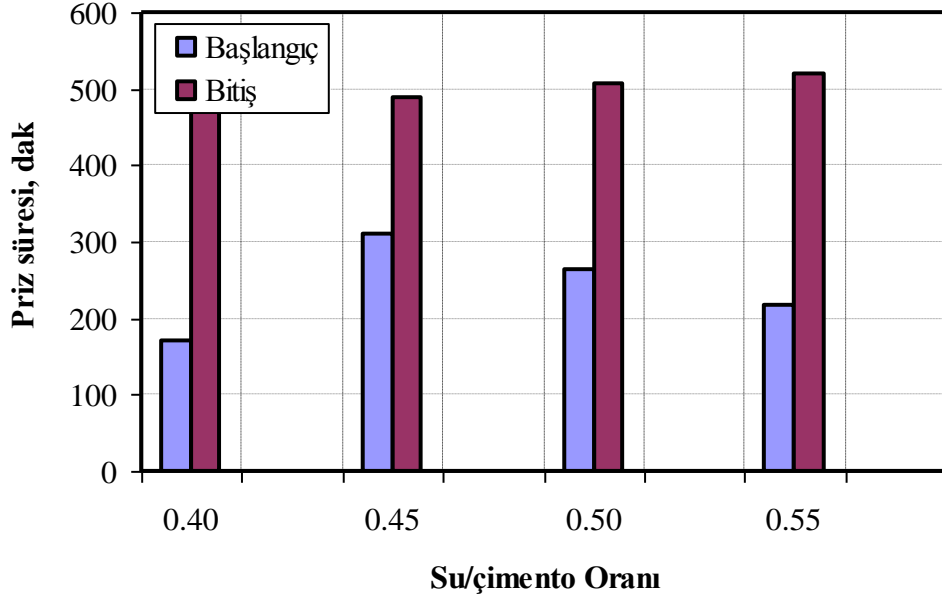
Şekil 5.19 % 30 UK'lı çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



Şekil 5.20 % 10 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



Şekil 5.21 % 20 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi



Şekil 5.22 % 30 YFC'li çimento pastalarının priz sürelerinin s/b ile değişimi

Çimento yerine ağırlıkça % 10 oranında SD katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 211.2, 333.3, 273.9 ve 207.9 dakika iken priz bitiş süreleri 290.4, 402.6, 448.8 ve 508.2 dak'dır (Şekil 5.14). Çimento yerine ağırlıkça % 20 oranında SD katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 283.8, 287.1, 194.7 ve 138.6 dakika iken priz bitiş süreleri 349.8, 363, 442.2 ve 501.6 dak'dır (Şekil 5.15). Çimento yerine ağırlıkça % 30 oranında SD katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 409.2, 333.3, 310.2 ve 275 dakika iken priz bitiş süreleri 468.6, 488.4, 528 ve 550 dak'dır (Şekil 5.16).

Çimento yerine ağırlıkça % 10 oranında UK katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 191.4, 280, 257.4 ve 234.3 dakika iken priz bitiş süreleri 350, 363, 422.4 ve 455 dak'dır (Şekil 5.17). Çimento yerine ağırlıkça % 20 oranında UK katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve

0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 211.2, 297, 231 ve 191.4 dakika iken priz bitiş süreleri 415.8, 468.6, 514.8 ve 587.4 dak'dır (Şekil 5.18). Çimento yerine ağırlıkça % 30 oranında UK katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 217.9, 349.8, 389.4 ve 257.4 dakika iken priz bitiş süreleri 429, 508, 547.8 ve 590 dak'dır (Şekil 5.19).

Çimento yerine ağırlıkça % 10 oranında YFC katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 158.4, 224.4, 290.4 ve 297 dakika iken priz bitiş süreleri 402.6, 396, 468.6 ve 528 dak'dır (Şekil 5.20). Çimento yerine ağırlıkça % 20 oranında YFC katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 171.6, 293.7, 270 ve 237.6 dakika iken priz bitiş süreleri 521.4, 528, 521 ve 514.8 dak'dır (Şekil 5.21). Çimento yerine ağırlıkça % 30 oranında YFC katılan ve s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının priz başlangıç süreleri sırasıyla 171.6, 310.2, 264 ve 217 dakika iken priz bitiş süreleri 534.6, 488, 508 ve 521 dak'dır (Şekil 5.22).

Sonuç olarak bütün çimento pastaları için s/b oranı arttıkça priz süreleri de artmıştır. Genel olarak çimento pastalarında çimento yerine ağırlıkça SD, UK ve YFC konulması çimento pastalarının priz başlangıç sürelerinde fazla değişikliğe neden olmazken priz bitiş sürelerini arttırmıştır.

Tablo 5.1. Priz başlangıç ve priz bitiş süresinin katkı ve s/b oranını ile değişimi

Katkı miktarı	S/b oranı	Priz başlangıç			Priz bitiş		
		UK	SD	YFC	UK	SD	YFC
% 0	0.40	181.5	181.5	181.5	310.2	310.2	310.2
	0.45	270.6	270.6	270.6	442.2	442.2	442.2
	0.50	198	198	198	409	409	409
	0.55	159	159	159	389.4	389.4	389.4
% 10	0.40	191.4	211.2	158.4	350	290.4	402.6
	0.45	280	333.3	224.4	363	402.6	396
	0.50	257.4	273.9	290.4	422.4	448.8	468.6
	0.55	234.3	207.9	297	495	508.2	528
% 20	0.40	211.2	283.8	171.6	415.8	349.8	521.4
	0.45	297	287.1	293.7	468.6	363	528
	0.50	231	194.7	270	514.8	442.2	521
	0.55	191.4	138.6	237.6	587.4	501.6	514.8
% 30	0.40	217.9	409.2	171.6	429	468.6	534.6
	0.45	349.8	333.3	310.2	508	488.4	488
	0.50	389.4	310.2	264	547.8	528	508
	0.55	257.4	275	217	600	550	521

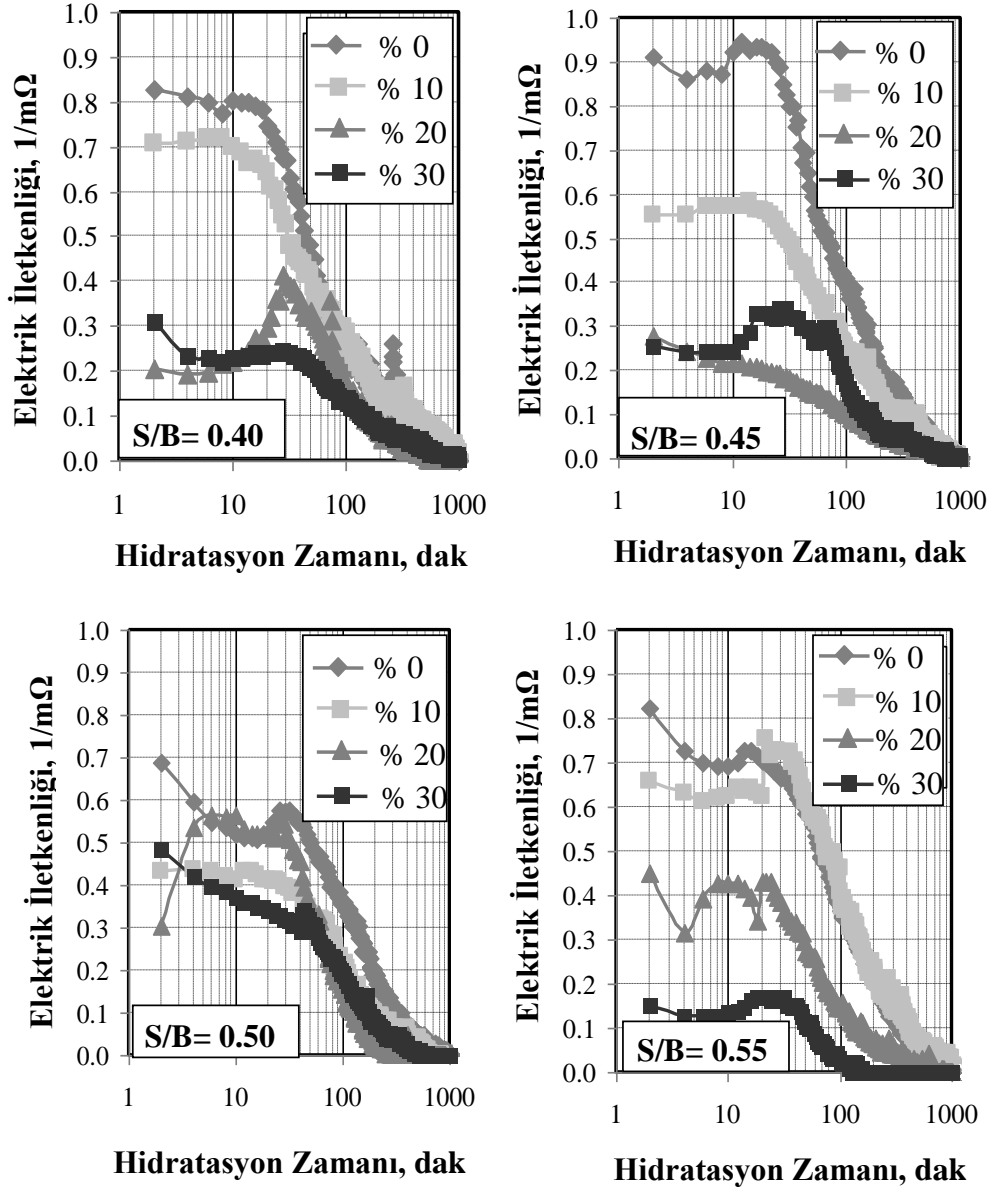
5.2. Mineral Katkılı Çimento Pastasının Elektriksel İletkenliği

Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'da sırasıyla, UK, SD ve YFC'nin çimento ile belirli oranlarda ağırlıkça yer değiştirilmesi sonucunda taze haldeki bağlayıcı hamurun hidrasyon süresine bağlı olarak elektriksel iletkenliği görülmektedir. Ayrıca; karışımlar farklı su-bağlayıcı içerikleriyle üretilmişlerdir. Hidrasyonun ilk aşamasında her su miktarı oranı için karışımdaki yüksek çimento içeriğiyle, yüksek iletkenlik değerlerine ulaşılmıştır. Genel olarak çimento pastalarında 10 ila 30 dakika arasında en büyük değerlerde olan iletkenlikte hızlı düşüş olur. Hidrasyon zamanı süresince portland çimentosunun hidrolizi sonucunda iletkenlik en yüksek değerlerdedir. İletkenlik Ca^{+2} , OH^- , SO_4^{-2} ve alkali iyonlarının hareketleri sayesinde (Xiao, et al., 2007). Çimento pastasındaki bu iyonik konsantrasyonlar, yüksek iyonik ilişkiyi başlatır. Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'da çimento pastasına sırasıyla SD, UK ve YFC katılarak elektrik iletkenlik değerleri gösterilmiştir. Herhangi bir hidrasyon süresi için, mineral katkı oranının % 0'dan % 30'a kadar artırılmasıyla birlikte karışımların elektriksel iletkenlik değeri azalmıştır. Elektriksel iletkenliğin azalması daha önce de açıklandığı gibi çimento pastasının sertleştiğinin bir göstergesidir. Oysa çimento ile mineral katkı belirli oranlarda yer değiştirildiğinde, çimentodan gelen C_3A miktarı azaldığından, genel olarak çimento pastasının priz bitiş süreleri artmaktadır. Ancak karışımlardan elektrik akımı geçirildiğinde mineral katkı miktarının artmasıyla kontrol karışımına göre daha kısa sürede sertleşmeye başladığı, elektriksel iletkenliğin azalmasından açıkça görülebilmektedir. Bu sonuç çimento'nun hidrasyon sırasında iyon sayısındaki azalması ile açıklanabilir (Xiao, et al., 2007).

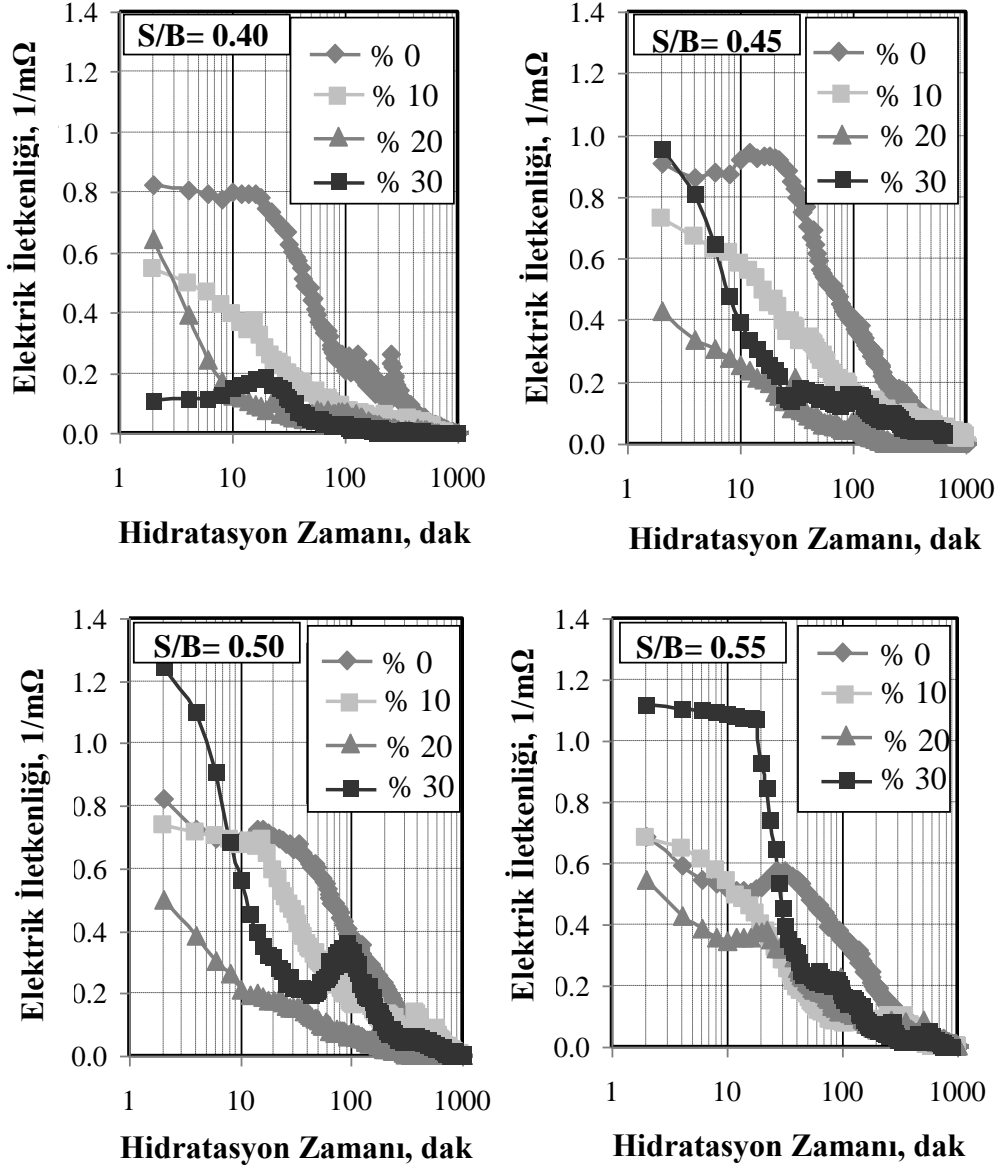
Uçucu külün özgül ağırlığının çimentodan daha az olmasından dolayı aynı ağırlıktaki UK daha az hacimden oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da çimentoya göre aynı ağırlıktaki UK daha az yüzey alanına sahiptir. Karışım içerisinde bağlayıcı bileşenlerin yüzey alanının azalmasıyla birlikte karışım içerisindeki serbest su bu yüzeyler tarafından tutularak azaltılmaktadır. Bu durum da aynı su içeriğinde hazırlanan karışımlar için kontrol karışımlara göre su miktarının azalmasına neden

olmuştur. Böylece boşluk suyu azalan mineral katkılı karışımların elektriksel iletkenliği de kontrol karışıma göre azalmıştır. Mineral katkı tipinin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisi incelendiğinde, elektriksel iletkenliğin azalmasında en etkili olan mineral katkı UK'dır. Krom iyonları elektrik akımının iletilmesinde diğer bileşenler kadar etkilidir. Silis dumanı diğer mineral katkılara göre daha fazla krom içermektedir. SD'nin, UK'nın ve YFC'nin krom içerikleri sırasıyla % 2.83, % 0.13 ve % 0.02'dir. Dolayısıyla; en yüksek iletkenlik değerleri SD katkılı çimento pastalarında elde edilmiştir. Puzolanik mineral karışımları (yüksek $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeren) ve C-S-H oluşturmak için serbest kalmış $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasındaki hidrasyon etkileşimi çimento pastasının serbest su içeriğinde bir azalmayla sonuçlanır ve bu, etrenjit-monosülfatta bir çeşit hızlanmaya yol açar (Billberg, 1997; Abo-El-Enein, et al., 1996). Mineral katkılar içerisinde puzolanik aktivitesi en fazla olan mineraller SD ve UK'dır. Bundan dolayı bu mineral katkıların kullanıldığı karışımlardaki elektriksel iletkenlik değeri YFC katkılı karışımlara göre daha hızlı azalmıştır. Daha önceden oluşturulmuş hidratlar ve mineral karışımların taneciklerinin hidrat olmayan parçaları arasındaki hidrasyon etkileşimi sonucuyla C-S-H üretilir. Bu nedenden dolayı, SD ve UK, yüksek puzolanik etkinlikle birlikte daha önceden oluşturulmuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin tüketiminde YFC'den daha etkilidir. Bu 2 saatlik hidrasyondan sonra, araştırma sonucunda, YFC'li numunelere göre UK ve SD içeren numunelerin daha az elektrik iletkenlik değerlerini yansıtır (Xiao, et al., 2007). Çimento pastalarında UK ve YFC gibi mineral katkı kullanılması, çimento pastalarının elektrik iletkenliklerini arttırmaktadır. Ancak; SD kullanılan çimento pastalarında elektrik iletkenlik değerleri azaltmaktadır. Çimento yerine SD koyulan çimento pastalarında elektrik iletkenlik sadece hidrasyonun ilk dakikalarında arttırmaktadır (Salem and Ragai, 2000).

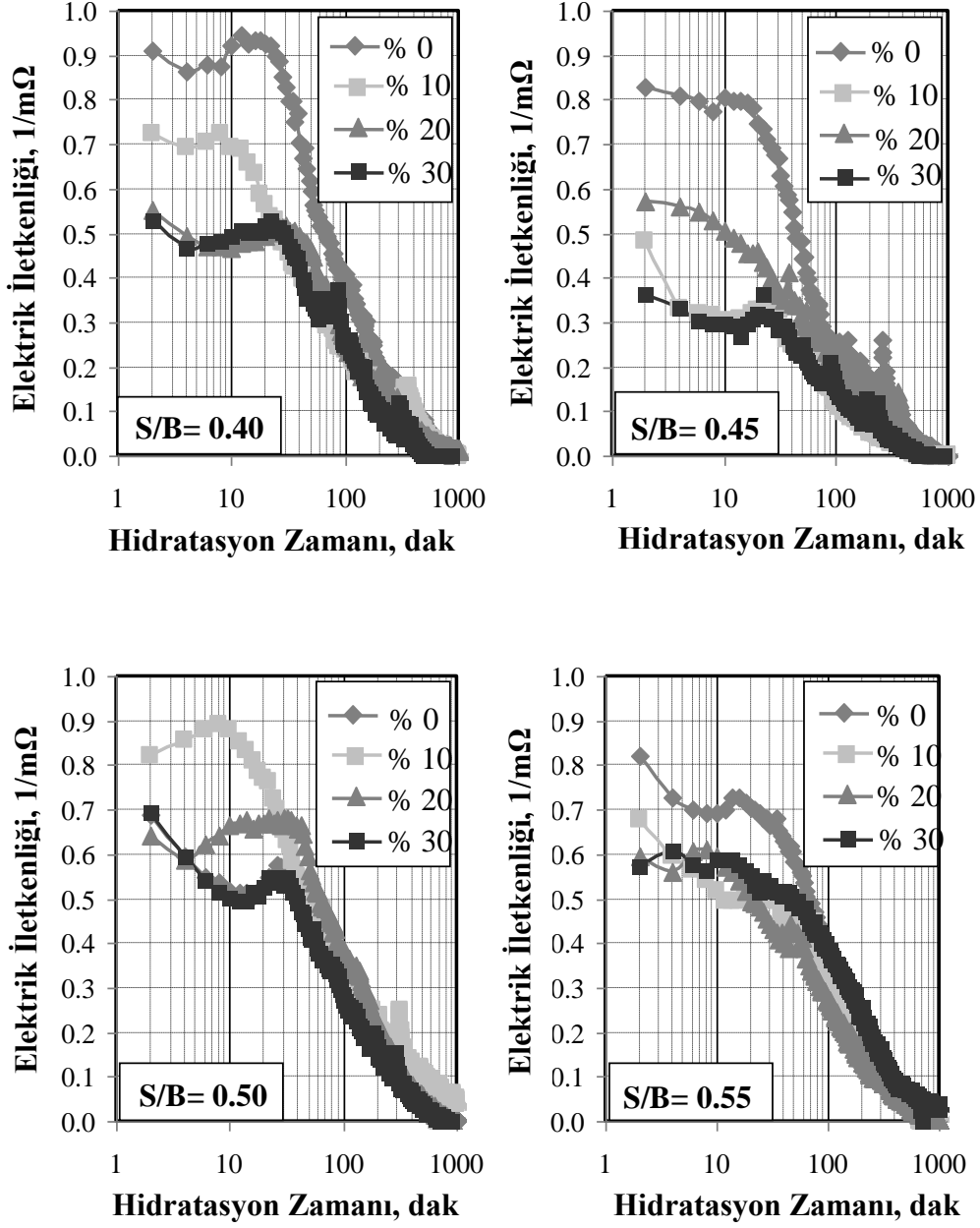
Bu çalışmada elde edilen sonuç; çimento pastalarına hem mineral katkı kullanımı, hem de elektrik akımı uygulanmasıyla çimento yerine konulan mineral katkı miktarının artmasıyla hidrasyon süresinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.23, 5.24 ve 5.25).



Şekil 5.23. UK'lı çimento pastasında elektrik iletkenliğinin zamanına göre değişimi



Şekil 5.24. SD'li çimento pastasında elektrik iletkenliğin zamanına göre değişimi

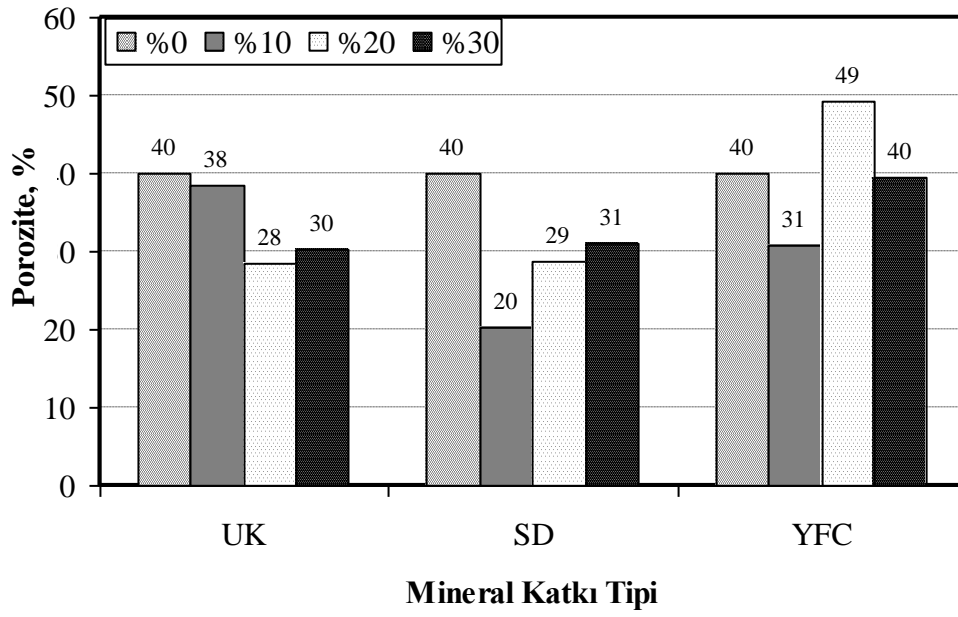


Şekil 5.25. YFC'li çimento pastasında elektrik iletkenliğin zamanına göre değişimi

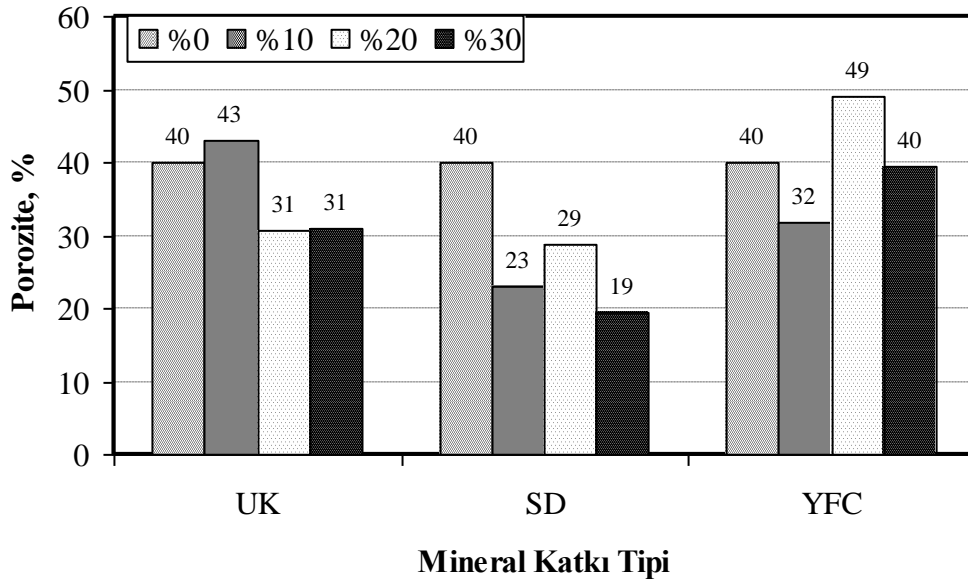
Herhangi bir mineral katkı içeriği için, çimento pastası sıvı fazda iken, diğer bir ifadeyle elektrik akımının kolaylıkla iletildiği hidrasyon süresinde, su-bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte elektriksel iletkenlik değeri de artmıştır. Karışım içerisindeki boşluklarda yer alan serbest su, hem hidrasyon ürünlerinin gelişimi için hem kimyasal reaksiyonda kullanılmakta hem de elektrik akımını iletmek amacıyla hidroliz aşamasında kullanılmaktadır, dolayısıyla su-bağlayıcı oranının artmasıyla birlikte daha fazla hidroliz olayı gerçekleşmiştir. Çimento pastası karışımlarında yüksek oranda bağlayıcı su içermesi, elektrik iletkenliği artırır (Heikal, et al., 2005). Bu durum tüm mineral katkı tipleri için de aynıdır.

5.3. Mineral Katkının Poroziteye Etkisi

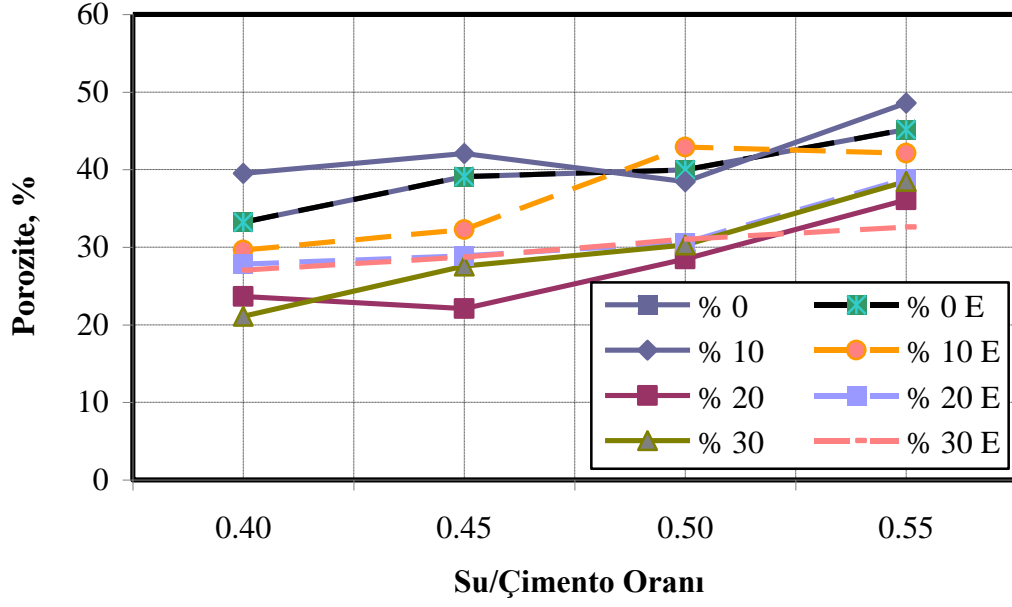
Şekil 5.17’de su/bağlayıcı oranları 0.50 alınarak ve sırasıyla katkısız, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında çimento yerine UK, SD ve YFC koyulduğunda görünen porozitenin değişim oranları gösterilmiştir. Şekil 5.17’den anlaşılacağı üzere çimento pastasına mineral katkı katılması karışımın görünen porozitesini azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak mineral katkı kullanılması iyonların geçişini kolaylaştıran boşlukları doldurmaktadır. Sadece YFC katılan karışımda görünen poroziteyi arttırdığı gözlemlenmiştir. YFC katılan numunelerde genel olarak görünen poroziteyi artmaktadır. Dolayısıyla YFC elektrik iletkenliğini arttırabilmektedir. Bu çalışmada elektrik iletkenliğin görünen poroziteye etkisi araştırılmış, ancak görünen porozitenin elektrik verilmeyen numunelerle benzer özellikler gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Elektrik verilen numunelerin poroziteleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve çimento yerine % 20 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyularak görünen poroziteleri sırasıyla 30.56, 28.66 ve 49.13 ölçülmüştür. YFC katılan numunelerde genel olarak görünen porozite arttırmıştır. Dolayısıyla YFC elektrik iletkenliğini arttırabilmektedir. %20 YFC’li elektrik akımı uygulanmış ve akım uygulanmamış numunelerin poroziteleri karşılaştırıldığında porozitenin % 9 oranında arttırmıştır.



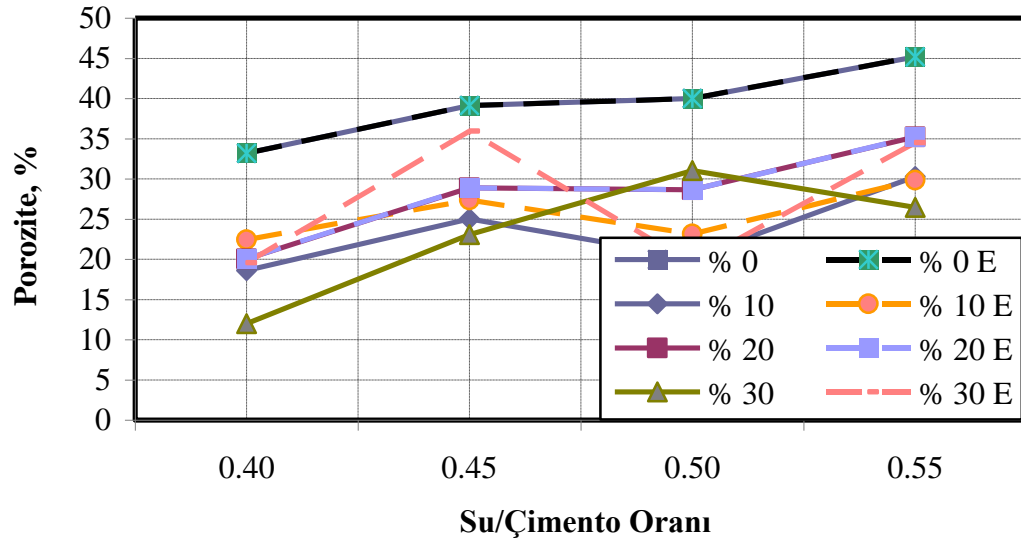
Şekil 5.26. Akımsız çimento pastalarında mineral katkı tipinin poroziteye etkisi



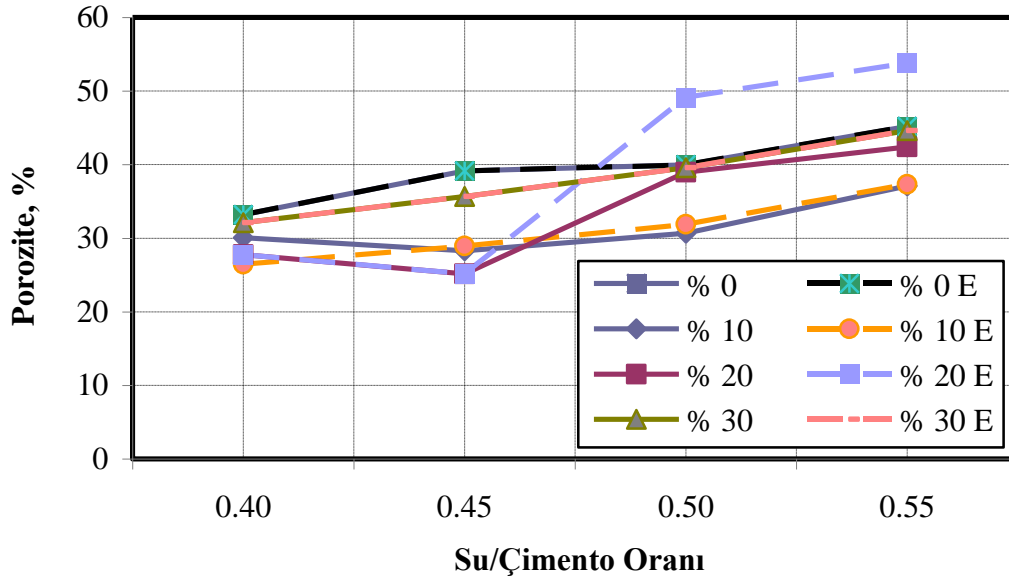
Şekil 5.27. Akımlı çimento pastalarında mineral katkı tipinin poroziteye etkisi



Şekil 5.28. UK katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi



Şekil 5.29. SD katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi

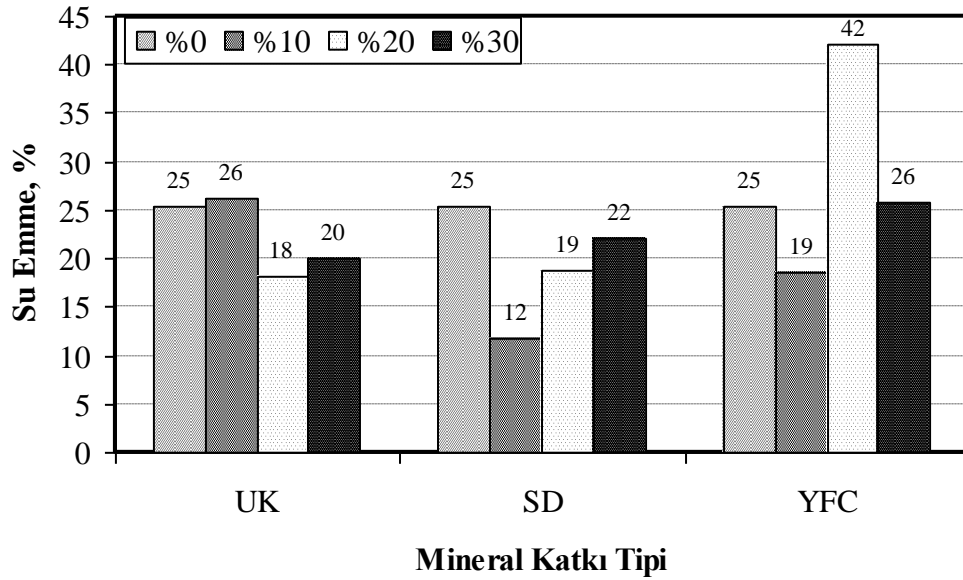


Şekil 5.30. YFC katılmış çimento pastalarının porozitesinin s/b ile değişimi

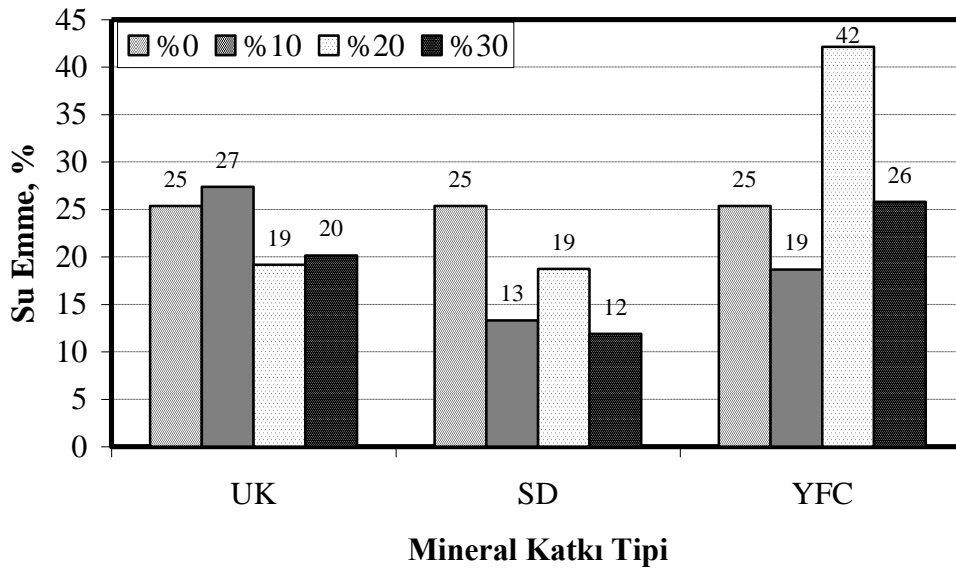
S/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan mineral katkısız çimento pastalarının görünen poroziteleri sırasıyla 33.19, 39.13, 39.98 ve 45.16'dır (Tablo 5.3). Çimento pastalarında s/b oranının artması görünen poroziteyi artırır. UK ve YFC'li çimento pastalarının görünen poroziteleri s/b oranı 0.50 olan numunelerde en yüksek çıkmıştır (Şekil 5.28 ve 5.30). S/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 30 oranında SD konulan ve elektrik uygulanmayan numunelerin görünen poroziteleri sırasıyla 11.98, 23.06, 31.02 ve 26.47'dir. S/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 30 oranında SD konulan ve elektrik akımı uygulanan numunelerin görünen poroziteleri sırasıyla 19.55, 35.95, 19.39 ve 34.50'dir (Şekil 5.29). Yine aynı şekilde s/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında SD konulan ve elektrik uygulanmayan numunelerin görünen poroziteleri sırasıyla 18.59, 25.02, 20.19 ve 30.30'dur. S/b oranları 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında SD konulan ve elektrik akımı uygulanan numunelerin görünen poroziteleri sırasıyla 22.45, 27.35, 23.14 ve 29.85'dir (Tablo 5.3). Sonuç olarak çimento pastalarına hem SD konulması hem akım uygulanması görünen poroziteyi artırır.

5.4. Mineral Katkının Su Emme Oranına Etkisi

Şekil 5.19’da su/bağlayıcı oranları 0.50 alınarak ve sırasıyla katkısız, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında çimento yerine UK, SD ve YFC koyulduğunda su emme yüzdelerinin değişim oranları gösterilmiştir. Mineral katkısız karışımlarda su emme oranı % 25 iken, çimento yerine % 10 oranında SD koyulduğunda % 12’ye kadar düştüğü görülmüştür. Çimento yerine % 10 oranında YFC koyulması durumunda ise su emme oranı % 19’dur. Çimento yerine % 20 ve % 30 oranlarında UK koyulduğunda su emme oranları sırasıyla % 26 ve % 18’dir. Şekil 5.19’dan anlaşılacağı üzere çimento pastasına mineral katkı konulması karışımın su emme yüzdesini genel olarak azaltmaktadır. Su emme oranındaki en fazla azalma çimento yerine % 10 oranında SD koyulmuş numunelerde görülmüştür. Bu azalma mineral katkısız numunelere göre % 13’tür. Bu arada çimento yerine % 20 oranında YFC koyulduğunda su emme oranı mineral katkısız karışıma göre % 17 oranında artmıştır. (Şekil 5.20).



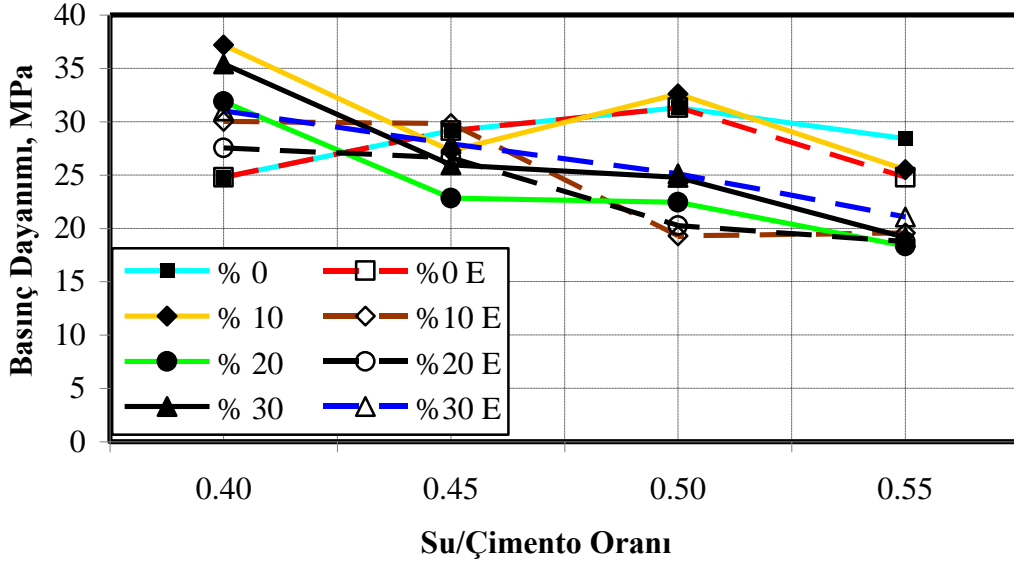
Şekil 5.31. Akımsız numunelerde mineral katkı tipinin su emmeye etkisi



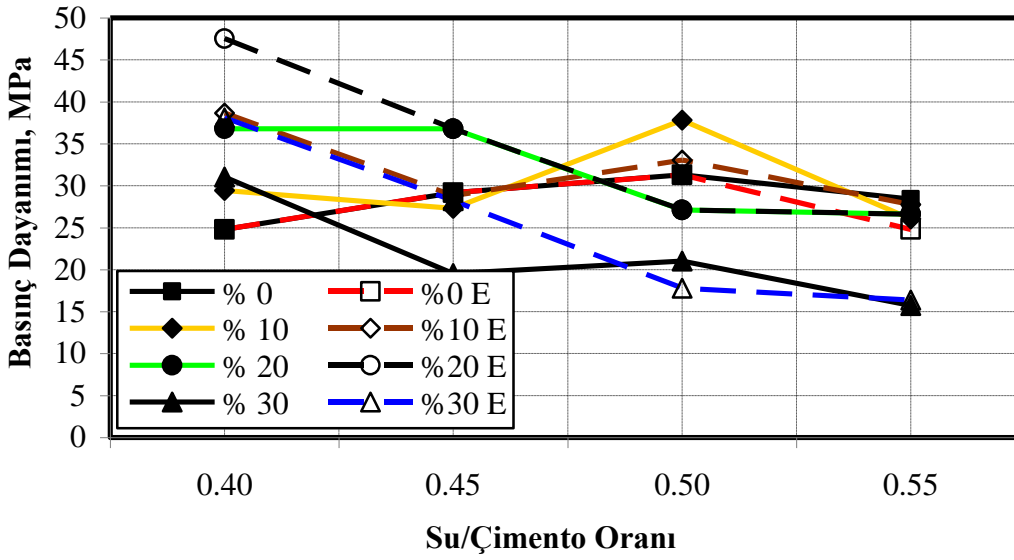
Şekil 5.32. Akımlı numunelerde mineral katkı tipinin su emmeye etkisi

5.5. Basınç Dayanımı

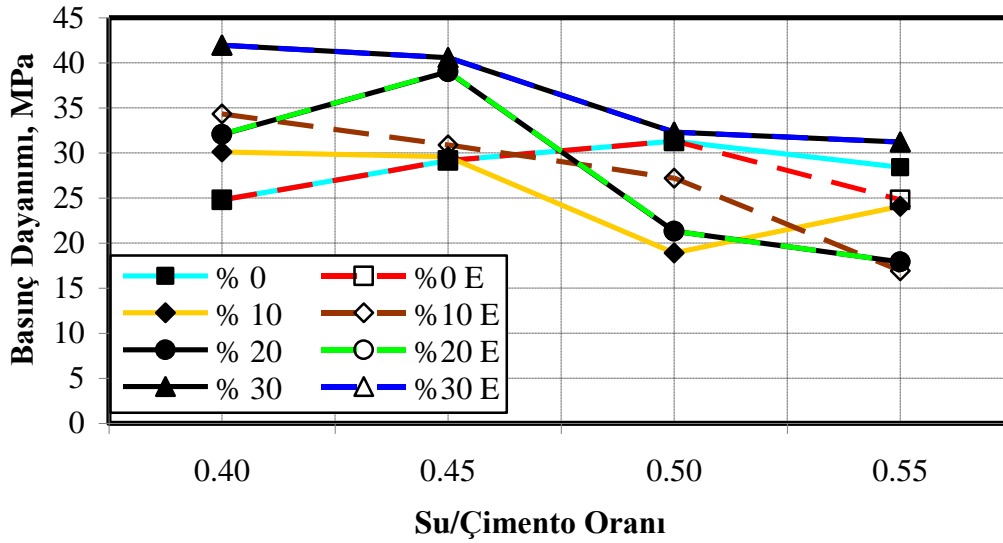
Elektrik akımı uygulanmış ve uygulanmamış olan mineral katkılı çimento pastalarının basınç dayanımları mineral katkı içeriğine göre sırasıyla Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'te gösterilmiştir. Genel olarak, tüm mineral katkılı numunelerin basınç dayanımları su-çimento oranının artmasıyla birlikte azalmaktadır (Tablo 5.2). Örnek olarak çimento yerine % 20 oranında UK koyularak hazırlanan ve su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastalarının basınç dayanımları 36.77, 36.77, 27.11 ve 26.61 MPa'dır. Mineral katkı olarak UK kullanılması durumunda (Şekil 5.21), düşük UK içeriğinde (% 20), elektrik akımı uygulanmış numunelerin basınç dayanımları, elektrik akımı uygulanmamış numunelere göre biraz daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Benzer karışımlara elektrik akımı uygulandığında basınç dayanımları sırasıyla 27.52, 26.60, 20.24 ve 18.76 MPa ölçülmüştür (Tablo 5.2).



Şekil 5.33. UK'lı çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi



Şekil 5.34. SD'li çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi



Şekil 5.35. YFC'li çimento pastasının basınç dayanımlarının s/b ile değişimi

Çimento pastasında, özellikle düşük su-çimento oranında, % 10 ve % 20 SD kullanıldığında, elektrik uygulanmış numunelerin basınç dayanımlarında fark edilir artışlar gözlenmiştir (Şekil 5.34). Örneğin, 0.40 su-çimento oranında, % 10 ve % 20 SD içeriğinde elektrik uygulanması durumunda uygulanmamış numunelere göre dayanımlardaki artışlar sırasıyla % 23.7 ve % 22.6'dır (Tablo 5.2). SD kullanımı % 30 olduğunda elektrik uygulanmış numunelerin dayanımları, uygulanmamış olanlara göre % 18.4 daha yüksek değerler almıştır. YFC kullanıldığında ise elektrik uygulanması durumunda en etkili oran özellikle düşük su-bağlayıcı oranları için % 10'dur. Su-çimento oranı 0.50 iken, % 10 YFC'li numunelere elektrik uygulanması sonucunda uygulanmamış numunelere göre % 30.5 oranında dayanım artışı elde edilmiştir (Tablo 5.2). Diğer YFC oranlarındaki numunelerin dayanımlarında önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Dayanımlardaki artışların en önemli nedeni (i) karışımlar içerisindeki serbest suyun elektrik akımıyla birlikte hidrolize edilerek azaltılması; Puzolanik karışımlar ve serbest haldeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin tepkimesi sonucu C-S-H iyonlarının açığa çıkmasıdır. Mineral katkıli çimento pastasına elektrik akımı uygulanması sonucunda, hem bazı serilerin dayanımlarının artması hem de hidrasyon sürelerinin kısalması nedeniyle hızlandırılmış kür gerçekleştirilebilir (Topçu, et al., 2012).

Tablo 5.2. Akımlı ve akımsız numunelerde SD, UK ve YFC'nin basınç dayanımına etkisi

MİKTAR	S/B	Basınç Dayanımı, MPa					
		Mineral Katkı Tipi					
		SD		UK		YFC	
		Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız	Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız	Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız
% 0	0.40	24.78	24.58	24.63	24.28	24.13	24.26
	0.45	23.16	23.96	23.28	23.60	23.14	23.34
	0.50	22.31	22.36	22.21	22.41	22.53	22.11
	0.55	21.78	21.76	21.54	21.58	21.73	21.77
% 10	0.40	38.63	29.44	30.02	29.44	34.31	30.10
	0.45	28.83	27.29	29.82	27.29	30.90	29.57
	0.50	33.06	37.80	19.29	37.80	27.20	18.89
	0.55	27.76	26.05	19.55	26.05	16.90	24.07
% 20	0.40	47.52	36.77	27.52	36.77	32.06	32.06
	0.45	36.77	36.77	26.60	36.77	39.00	39.00
	0.50	27.11	27.11	20.24	27.11	21.30	21.30
	0.55	26.61	26.61	18.76	26.61	17.92	17.92
% 30	0.40	38.06	31.02	31.02	31.02	41.68	41.68
	0.45	28.22	19.52	27.93	19.52	40.57	40.57
	0.50	17.79	21.03	25.11	21.03	32.30	32.30
	0.55	16.38	15.73	21.05	15.73	31.21	31.21

Tablo 5.3. Akımlı ve akımsız numunelerde SD, UK ve YFC'nin poroziteye etkisi

MİKTAR	S/B	GÖRÜNEN POROZİTE					
		Mineral Katkı Tipi					
		SD		UK		YFC	
		Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız	Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız	Elektrik Akımlı	Elektrik Akımsız
% 0	0.40	33.16	33.19	33.24	33.21	33.11	33.09
	0.45	39.14	39.10	39.26	39.25	39.13	39.13
	0.50	39.98	39.96	39.94	39.91	39.94	39.99
	0.55	45.16	45.10	45.08	45.16	45.24	45.28
% 10	0.40	22.45	18.59	29.63	39.53	26.47	30.07
	0.45	27.35	25.02	32.29	42.08	28.93	28.28
	0.50	23.14	20.19	42.88	38.44	31.87	30.67
	0.55	29.85	30.30	42.10	48.59	37.32	37.11
% 20	0.40	20.05	20.05	27.84	23.66	27.76	27.76
	0.45	28.89	28.89	28.88	22.09	25.18	25.18
	0.50	28.66	28.66	30.56	28.46	49.13	38.98
	0.55	35.21	35.21	38.82	36.11	53.82	42.41
% 30	0.40	19.55	11.98	27.03	21.11	32.12	32.12
	0.45	35.95	23.06	28.72	27.55	35.66	35.66
	0.50	19.39	31.02	31.03	30.27	39.58	39.58
	0.55	34.50	26.47	32.61	38.48	44.62	44.62

Tablo 5.4. 20. Dakikada farklı mineral katkılı çimento pastasının elektrik iletkenliği

MİKTAR	S/B	MİNERAL KATKI TİPİ		
		SD	UK	YFC
% 0	0.40	76	76	76
	0.45	77	77	77
	0.50	86	86	86
	0.55	100	100	100
% 10	0.40	48	105	56
	0.45	80	95	92
	0.50	69	70	131
	0.55	102	129	90
% 20	0.40	13	55	75
	0.45	29	34	86
	0.50	65	88	117
	0.55	31	74	84
% 30	0.40	32	41	62
	0.45	41	55	91
	0.50	54	58	94
	0.55	159	29	91

BÖLÜM 6

TARTIŞMA

Bu çalışmada çimento pastasının elektrik iletkenliğine farklı mineral katkı tiplerinin etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda elde edilen sonuçlar bir önceki bölümde geniş şekilde ele alınmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde tartışılmıştır.

i. Su-bağlayıcı oranının arttırılmasıyla karışımların elektriksel iletkenlik değeri de artmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.55 olan çimento pastasıyla su/bağlayıcı oranı 0.40 olan çimento pastası 20. dakikada karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranı 0.55 olan çimento pastasının elektrik iletkenliği su/bağlayıcı oranı 0.40 olan çimento pastasına göre % 24 daha fazladır (Tablo 5.4). Aynı şekilde aynı dakikada su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0.45 ve 0.50 olan çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımın, s/b oranı 0.45 olan karışıma göre elektrik iletkenliği % 10.46 daha fazladır (Tablo 5.4). Eğer su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0.45 ve 0.40 olan çimento pastaları karşılaştırılır ise, yüksek su/bağlayıcı içeriğine sahip karışım diğerine göre elektriksel olarak % 1.29 daha iletkendir (Tablo 5.4). Deney sonuçları (Salem and Ragai, 2000) tarafından yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında elektrik iletkenliğin su/bağlayıcı oranına etkisindeki benzerlik dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalarda su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 olan çimento pastalarının elektriksel dirençleri araştırılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan karışımın elektrik iletkenliği su/bağlayıcı oranı 0.40 olan çimento karışıma göre % 55.54 daha yüksektir. Sonuçlardan anlaşılmıştır ki yüksek s/b içeriğine sahip çimento pastasının elektrik iletkenliği daha yüksektir (Liao, et al., 2011). 20. dakikada su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan karışımların elektrik iletkenlikleri sırasıyla 76, 77, 86, 100 mA'dır. Bütün çimento pastalarının elektriksel dirençleri 315. dakikada en yüksek değerdedir (Şekil 5.7).

ii. Su/bağlayıcı oranları 0.40 olan ve sırasıyla mineral katkısız, % 30 UK katılmış ve % 30 SD katılmış çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri karşılaştırıldığında mineral katkısız çimento pastasının elektrik iletkenliği 76 mA iken (Tablo 5.4); UK'lı ve SD'li karışımların elektrik iletkenlikleri sırasıyla 41 mA ve 31 mA'dır (Tablo 5.4). UK'lı ve SD'li çimento pastalarının düşük s/b oranlarında elektrik akımını mineral katkısız çimento pastasına göre daha az iletmesinin nedeni mineral katkıların düşük s/b oranlarında boşlukları çabuk doldurması ve suyla tepkimeye girerek çimento pastasındaki su miktarını azaltmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

iii. Hidratasyonun ilk aşamasında s/b oranları 0.55 olan ve mineral katkısız ve çimento yerine sırasıyla % 30 UK, % 30 SD ve % 30 YFC katılmış çimento pastaları karşılaştırıldığında elektrik iletkenlikleri sırasıyla 100, 29, 159 ve 91 mA'dır (Tablo 5.4). Mineral katkılı çimento pastalarında en fazla iletkenlik değeri SD kullanılan çimento pastalarında görülmüştür. SD, UK ve YFC mineral katkılarının içerdikleri krom iyonları karşılaştırıldığında, Cr_2O_3 içerikleri açısından sırasıyla % 2.83, % 0.13 ve % 0.02'dir (Tablo 4.1). Dolayısıyla; krom iyonuna en fazla sahip mineral katkı SD'dir. Krom elektrik akımını iyi iletir. Bu nedenden SD'li numuneler diğer numunelere göre daha iletkendir.

iv. 20. dakikada s/b oranı 0.50 olan ve çimento yerine sırasıyla % 10, % 20 ve % 30 oranlarda UK koyulmasıyla elde edilen çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri sırasıyla 70, 88 ve 58 mA olarak ölçülmüştür (Tablo 5.4). S/b oranı 0.50 olan ve % 20 oranında UK konulan karışımda elektrik iletkenliği artmıştır.

v. 10. dakikada s/b oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda UK koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 26 mA iken; 100. dakikada su/bağlayıcı oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda UK koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 20 mA'dır. 10. dakikada su/bağlayıcı oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda SD koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 40 mA iken; 100. dakikada su/bağlayıcı oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda SD koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 30 mA'dır. 10. dakikada s/b oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda YFC koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 30

mA iken; 100. dakikada su/bağlayıcı oranı 0.45 olan ve çimento yerine % 30 oranda YFC koyulmuş çimento pastasının elektrik iletkenliği 15 mA'dir. Buradan; elektriksel iletkenlik değeri hidrasyonun bir göstergesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen diğer bir sonuç ise; mineral katkıli harçlardan elektrik akımı geçirilmesiyle daha kısa sürede hidrasyon olayı gerçekleştirilmiştir.

vi. Elektrik akımı uygulanmamış, mineral katkısız ve s/b oranlar 0.40, 0.45, 0.50 ve 0.55 olan çimento pastasının basınç dayanımlar sırasıyla 24.78, 29.16, 31.31 ve 24.78 MPa ölçülmüştür (Tablo 5.2). Elektrik akımı uygulanmış, mineral katkısız ve aynı su/bağlayıcı oranlarındaki çimento pastasının basınç dayanımları elektrik akımı uygulanmayan numunelere göre kıyas edildiğinde, aynı değerler çıkmıştır. Buradan elektrik akımı geçirilen mineral katkısız numunelerin basınç dayanımları, su-bağlayıcı oranlarının değiştirilmesiyle elektrik uygulanmayan numunelere göre benzer özellikler gösterir sonucuna ulaşılabilir. Ancak; (Liao, et al., 2011) yaptığı araştırma sonucunda elektriksel dirençle basınç dayanımı arasında ters orantı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Yaptıkları çalışmada (Liao, et al., 2011) su/bağlayıcı oranı 0.40 olan ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerin basınç dayanımı 23 MPa iken, elektrik akımı uygulanmış numunelerin basınç dayanımlarını 31 MPa ölçmüşlerdir. Yani basınç dayanımıyla ilgili bulunan sonuçlar önceki yapılan çalışmalarla ters düşmektedir.

vii. Su/bağlayıcı oranları 0.40 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyulmuş ve elektrik akımı uygulanmış numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 30.02, 38.63 ve 34.10 MPa'dır (Tablo 5.2). S/b oranları 0.40 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyulmuş ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 29.44, 29.44 ve 30.10 MPa'dır (Tablo 5.2). S/b oranları 0.45 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyulmuş ve elektrik akımı uygulanmış numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 29.82, 28.83 ve 30.90 MPa'dır (Tablo 5.2). S/b oranları 0.45 olan ve mineral katkı olarak çimento yerine % 10 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyulmuş ve elektrik akımı uygulanmamış numunelerin basınç dayanımları sırasıyla 27.29, 29.57 ve 29.57 MPa'dır (Tablo 5.2). Sonuç olarak, elektrik akımı geçirilen mineral katkıli numunelerin basınç

dayanımları, düşük su-bağlayıcı oranlarında elektrik uygulanmayan numunelere göre daha yüksek değerler almıştır. Yapılan çalışmalarda (Liao, et al., 2011) düşük s/b içeriğine sahip çimento pastalarında elektrik iletkenlikle basınç dayanımı arasındaki bulunan ilişki dikkat çekmektedir.

viii. Elektrik uygulanması sonucu basınç dayanımının artışında etkili olan mineral katkı içeriği, UK için % 30'dur. S/b oranı 0.45 olan ve çimento yerine UK kullanılmış ve elektrik uygulanmayan bu değer 19.52 MPa iken; elektrik akımı uygulanmış numunelerde 27.93 MPa ölçülmüştür. Çimento pastası yerine sırasıyla % 10, 20 ve 30 UK koyularak hazırlanmış ve elektrik akımı uygulanmış numunelerin elektrik akımı uygulanmayan numunelere göre basınç dayanım artış oranları sırasıyla % 8.45, % 38.25 ve % 30.10'dur. Su/bağlayıcı oranı 0.40 olan ve çimento yerine % 10, % 20 ve % 30 SD koyularak elektrik akımı uygulandığında ve elektrik uygulanmayan numunelere göre basınç dayanım artışları karşılaştırıldığında; çimento yerine % 10 ve % 20 SD koyulmuş çimento pastalarındaki basınç dayanım artış oranı % 30 SD içeren çimento pastasının basınç dayanım artış oranından yüksektir. Bu oranlar sırasıyla % 23.78, 22.61 ve 18.91'dir. YFC için en fazla basınç dayanım artışı % 10 YFC içeren ve su/bağlayıcı oranı 0.50 olan çimento pastasında görülmüştür. Bu oran elektrik akımı uygulanmayan numunelere göre % 30.53 daha fazladır. S/b oranı 0.40 olan ve çimento yerine % 10, 20 ve 30 YFC koyularak hazırlanmış ve elektrik akımı uygulanmış çimento pastalarının elektrik uygulanmayan numunelere göre basınç artış oranları sırasıyla % 12.27, 1.2 ve 1.3'tür. Yapılan çalışmalarda elektrik iletkenlik ve basınç dayanımı arasında önemli ilişkiler olduğu ortaya çıkmıştır (Princigallo, et al., 2002). Elde edilen bu sonuçlar bu tezi desteklemektedir.

ix. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve mineral katkısız çimento pastasının elektrik iletkenliği 170 mA ölçülmüştür. S/b oranı 0.50 olan ve çimento yerine sırasıyla % 10, 20 ve 30 oranlarda UK koyulduğunda çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri sırasıyla 210, 165 ve 116 mA'dir. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve çimento yerine sırasıyla % 10, % 20 ve % 30 oranlarda SD koyulduğunda çimento pastalarının elektrik iletkenlikleri sırasıyla 110, 80 ve 85 mA'dir. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve çimento yerine sırasıyla % 10, 20 ve 30 oranlarda YFC koyulduğunda çimento pastalarının

elektrik iletkenlikleri sırasıyla 205, 240 ve 230 mA'dir. Çimento pastalarında UK ve YFC gibi mineral katkı kullanılması, çimento pastalarının elektrik iletkenliklerini arttırmıştır. Ancak; SD kullanılan çimento pastalarında elektrik iletkenlik değerleri azalmıştır. Çimento yerine SD koyulan çimento pastalarında elektrik iletkenlik sadece hidrasyonun ilk dakikalarında artmıştır.

x. Yapılan çalışmalarda (Liao, et al., 2011) çimento pastasının boşlukta iyon konsantrasyonları ve poroziteleri ile elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde etkili olduğu sonucuna ulaşmıştır. Liao (2011) ulaştığı bir diğer sonuçta priz sonlarında düşük s/b oranına sahip çimento pastalarında düşük görünen porozite ve düşük elektriksel direnç gözükmesi olmuştur. Bu çalışmada da benzer şekilde, su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve çimento yerine % 20 oranında sırasıyla UK, SD ve YFC koyulup ve elektrik akımı uygulandığında görünen poroziteleri sırasıyla 28.88, 28.89 ve 27.76 ölçülmüştür (Tablo 5.3). Aynı numunelerin elektrik akımsız görünen poroziteleri 22.09, 28.89 ve 27.76'dır (Tablo 5.3). YFC katılan numunelerde genel olarak görünen porozite oranını arttırmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.50 olan ve çimento yerine sırasıyla % 20 UK, SD ve YFC koyulan çimento pastalarına elektrik akımı uygulanan çimento pastalarının görünen poroziteleri elektrik akımı uygulanmayan çimento pastalarına göre % 6.87, % 0 ve % 20.65 daha fazladır. Dolayısıyla YFC elektrik iletkenliğini arttırabilmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çimento pastasının elektrik iletkenliğine farklı mineral katkı tiplerinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

i. Su-bağlayıcı oranının artırılmasıyla karışımların elektriksel iletkenlik değeri de artmıştır. Hidratasyon süresine bağlı olarak, düşük su-bağlayıcı oranında elektriksel iletkenlik aniden azalırken, yüksek su-bağlayıcı oranındaki azalma hızı daha yavaştır.

ii. Mineral katkılı çimento pastalarında en fazla iletkenlik değeri silis dumanı kullanılan çimento pastalarında görülmüştür.

iii. Mineral katkı içeriğinin artmasıyla elektriksel iletkenlik azalmıştır. Mineral katkı içeriğinin artmasıyla birlikte elektriksel iletkenliğin azalması, daha kısa hidratasyon süresinde gerçekleşmiştir.

iv. Elektrik akımı geçirilen mineral katkılı numunelerin basınç dayanımları, düşük su-bağlayıcı oranlarında elektrik uygulanmayan numunelere göre daha yüksek değerler almıştır. Elektrik uygulanması sonucu basınç dayanımının artışında etkili olan mineral katkı içeriği, UK için % 30, SD için % 10-% 20 ve YFC için de % 10'dur.

v. Çimento pastalarında SD, UK kullanılması elektrik iletkenliği azaltırken, YFC kullanılması, çimento pastasının elektrik iletkenliklerini arttırmıştır.

vi. YFC katılan numunelerde genel olarak görünen porozite artar. Dolayısıyla numunelere YFC katılması numunelerin elektrik iletkenliklerini arttırabilmektedir.

vii. Sonuç olarak çimento pastasına elektrik akımı uygulanması çimento pastası üzerinde olumsuz etki yapmamıştır. Aksine çimento pastasının fiziksel ve kimyasal olarak birçok özelliğini olumlu yönde etkileyerek birçok avantaj sağladığı görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalarda mineral katkı oranları değiştirilerek aynı deneyler yapılabilir. Bu tezde 15 Volt akım uygulanmıştı. Aynı deneyler farklı Akımlarda uygulanarak akımın mineral katkıları üzerindeki etkileri araştırılabilir. SD'nin neden UK ve YFC'den farklı özellikler gösterdiği araştırılmalıdır. Ayrıca SD, YFC ve UK'dan farklı mineral katkıları kullanılarak yeni deneylerin yapılması önerilir. Aynı deneyler beton üzerinde yapılarak, akımın priz süresine etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abo-El-Enein, S.A., Abou-Gamra, Z.M., El-Hosiny, F.I., El-Gamal, S.M.A., 1996, Characteristics of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ –silica fume mixtures, *J Therm Anal* 46, 275.
- Backe, K.R., Lile, O.B., Lyomov, S.K., 2001, Characterizing curing cement slurries by electrical conductivity, *SPE Drilling and Completion*, 16. 201-207.
- Billberg, P., 1997, Effect of mineral and chemical admixtures on fine mortar rheology, *Am Concr Inst SP-173*, 301.
- Caijun, S., Shunfu Hu., 2003, Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions, *Cement and Concrete Research*, 33, 1851-1856.
- Deng, M., Tang, M., 1994 Formation and expansion of ettringite crystals, *Cement and Concrete Research* 24, 119 p.
- Halamicova, P., Detwiler, R.J., Bentz, D.P., Garbockzi, E.J., 1995, Water permeability and chloride ion diffusion in portland cement mortars: relationship to sand mortar and critical pore diameter, *Cement and Concrete Research*, 25, 790-802.
- Heikal, M., Morsy, M.S., Radwan, M.M, 2005, Electrical conductivity and phase composition of calcium aluminate cement containing air-cooled and water-cooled slag at 20, 40 and 60 °C, *Cement and Concrete Research*, 35, 1438-1446.
- Karen, L. S., Karman, M. N., 1996, The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete, *Cement and Concrete Research*, 26, 35-40.
- Koleva, D.A., Copuroglu, O., Vanbreugel, K., Ye, G., Wit, J.H.W, 2008, Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow, *Cement and Concrete Composites*, 30, 731-744, 14 p.
- Leivo, M., 1996, Radio wave heating of concrete, *Cement and Concrete Research* 26, 677-682.
- Levita, G., Marchetti, A., Gallone, G., Princigallo, A., Guerrini, GL., 2000, Electrical properties of fluidified portland cement mixes in the early stage of hydration, *Cement and Concrete Research* 30, 923-930.
- Liao, Y., Wei, X., Li, G., 2011, Early hydration of sulfoaluminate cement through electrical resistivity measurement and microstructure investigations, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 1572-1579.

KAYNAKLAR (devam)

- McCarter, W.J., Chrisp, T. M., Starrs. G. and Blewett, J., 2003, Characterization and monitoring of cement-based systems using intrinsic electrical property measurements, *Cement and Concrete Research*, 33, 197-206.
- Morsy, M. S., 1998, effect of temperature on electrical conductivity of blended cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, 29, 603-606.
- Ping, M., 1991, Flat aggregate-portland cement paste interfaces, I. electrical conductivity models, *Cement and Concrete Research*, 21, 515-522.
- Polder, R.B., 1995, Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment, proceedings of RILEM, international workshop on chloride penetration into concrete, St-Remy-les-Chevreuses.
- Polder, R.B., 2001, Test Methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, 15, 125-131.
- Principallo, A., Lura, P., Breguel, K., Levita, G., 2002, Early development of properties in a cement paste: A numerical and experimental study, *Cement and Concrete Research*, 33, 1013-1020.
- Principallo, A., van Breugel, K. and Levita, G., 2003, Influence of the aggregate on the electrical conductivity of portland cement concretes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1755-1763.
- Salem, M., Ragai, M., 2000, Electrical conductivity of slag cement kiln dust-silica fume pastes at different porosities, *Cement and Concrete Research*, 781-787.
- Schwarz, N., DuBois, M. and Neithalath, N, 2007, Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 29, 656-666.
- Tamas, F., Farkas, E., Voros, M., Roy, D., 1987, Low-frequency electrical conductivity of cement, *Cement and Concrete Research*, 17, 340-350.
- Topcu, I.B., Uygunoğlu, T., Hocaoğlu, I., 2012, Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, 28, 414-420.

KAYNAKLAR (devam)

- Wei, X., Li, Z., 2006. Early hydration process of portland cement paste by electrical measurement, *J Mater Civ Eng* 18 (1) 99-105.
- Whittington, H.W., McCart, J., Forde, M.C., 1981, The conduction of electricity through concrete, *Magazine of Concrete Research* 33 (114), 48-60.
- Xiao, L., Li, Z., Wei, X., 2007, Selection of superplasticizer in concrete mix design by measuring the early electrical resistivities of pastes, *Cement Concrete Composites*, 29, 350-356.
- Yeğınobalı, A., 2003, Silis dumanının betonda katkı malzemesi olarak değerlendirilmesi, *Endüstriyel atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiri Kitabı*, Ankara, ss.149-167.