

**FARKLI TİPTE GALVANİZ KAPLANMIŞ ÇELİK DONATILARIN
BETON İÇERİSİNDEKİ KOROZYON PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hafız Muhammad Umer AMANAT

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2021

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI TİPTE GALVANİZ KAPLANMIŞ ÇELİK DONATILARIN
BETON İÇERİSİNDEKİ KOROZYON PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI

Hafız Muhammad Umer AMANAT

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Hafız Muhammad Umer AMANAT tarafından hazırlanan “Farklı Tipte Galvaniz Kaplanmış Çelik Donatıların Beton İçerisindeki Korozyon Performanslarının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

Başkan : Doç. Dr. Mehmet CANBAZ
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

..... /..... /..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28/07/2021



Hafız Muhammad Umer AMANAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI TİPTE GALVANİZ KAPLANMIŞ ÇELİK DONATILARIN BETON İÇERİSİNDEKİ KOROZYON PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Hafız Muhammad Umer AMANAT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

Bu tez çalışmasında farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmış donatıların normal ve uçucu küllü betonların içerisindeki korozyon performansları araştırılmıştır. Betonlar donatılı ve donatısız olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiştir. Üretilen numuneler standart kür ortamında 28 gün boyunca küre uğratılmış ve sonrasında ilgili deneyler yapılmıştır. Kür süresi tamamlanmış donatılı numuneler üzerinde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinden sonra donatılar betonların içerisinde çıkarılmış ve gerçek ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Daha sonra bu donatıların akma ve çekme dayanımları çekme deneyleri ile belirlenmiştir. Bu deneylerden sonra hangi tip galvaniz kaplamanın donatı korozyonu için daha iyi olduğu belirlenmiştir. Donatısız beton numunelerinin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, hızlı klorür geçirirliliği, elektriksel özdirenç, görünen porozite ve su emme deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak donatıların galvaniz kaplanması ile birlikte korozyona karşı dayanıklılığın arttığı görülmüştür. Ayrıca uçucu küllü betonların içerisindeki donatıların daha az seviyede korozyona uğradığı sonucuna varılmıştır.

2021, xi + 61 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çelik donatı, Beton, Galvaniz kaplama, Uçucu kül, Hızlandırılmış korozyon.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF CORROSION PERFORMANCE OF DIFFERENT TYPES OF GALVANIZED STEEL REINFORCEMENT IN CONCRETE

Hafız Muhammad Umer AMANAT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Ahmet Raif BOĞA

In this thesis, the corrosion performance of different types of galvanized reinforcements embedded in normal and fly ash concrete was investigated. Concretes were produced in two different ways, with and without reinforcement. Produced specimens were cured in standard curing environment for 28 days and then related experiments were carried out. Accelerated corrosion tests were carried out on the reinforced specimens whose curing period was completed. After the accelerated corrosion tests, the reinforcements were removed from the concrete and the actual weight losses were determined. Then, the yield and tensile strengths of these reinforcements were determined by tensile tests. After these experiments, it was determined which type of galvanized coating is better for reinforcement corrosion. Ultrasonic pulse velocity, compressive strength, splitting and tensile strength, rapid chloride permeability, electrical resistivity, apparent porosity and water absorption tests were carried out to determine the physical, mechanical and durability properties of unreinforced concrete specimens. As a result, it was observed that the resistance to corrosion increased with the galvanization of the reinforcements. In addition, it was concluded that the reinforcements in the fly ash concretes were less corroded.

2021, xi + 61 pages

Keywords: Steel reinforcement, Concrete, Galvanized, Fly ash, Accelerated corrosion.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOğA'ya, donatıların galvanizlenmesi işlemlerinde verdikleri desteklerden dolayı İbrahim SABAN, Tanju TEKELİğLU ve MİTAŞ Endüstri San. ve Tic. A.Ő.'nin tüm çalışanlarına, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme, eşime ve kızım Zeina Rana'ya teşekkür ederim.

Hafız Muhammad Umer AMANAT

Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Beton İçerisindeki Donatı Korozyonu	3
2.1.1 Korozyon Mekanizması.....	4
2.2 Korozyonu Önleme Yöntemleri.....	5
2.3 Galvaniz Kaplama.....	6
2.3.1 Galvaniz Kaplanmış Donatı Çeliğinin Özellikleri	7
2.3.1.1 Demir-Çinko Dengesi ve Kinetiği.....	7
2.3.1.2 Galvaniz Kaplama Bileşimini Etkileyen Faktörler.....	10
2.3.2 Beton İçerisinde Çinko Kaplamanın Korozyon Davranışı.....	10
2.4 Korozyona Karşı Mineral Katkı Maddelerinin Kullanılması	11
2.5 Galvanizli Çeliklerin Korozyonu İle İlgili Daha önce Yapılan Çalışmalar	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	17
3.1 Kullanılan Malzemeler	17
3.1.1 Çimento	17
3.1.2 Uçucu Kül.....	17
3.1.3 Kum ve Kırmataş Agregaları.....	19
3.1.4 Hiper Akışkanlaştırıcı.....	19
3.1.4 Çelik Donatılar	20
3.1.5 Sodyum Klorür Tuzu.....	20
3.2 Beton Karışım Oranları.....	20
3.3 Üretilen Numune Tipleri, Kür Koşulu ve Süreleri	21
3.4 Yapılan Deneyler	22

3.4.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi	22
3.4.2 Basınç Dayanımı Deneyi.....	23
3.4.3 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi	23
3.4.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi	24
3.4.5 Elektriksel Özdirenç Deneyi.....	26
3.4.6 Görünen Porozite ve Ağırlıkça Su Emme Deneyi.....	27
3.4.7 Donatıların Galvanizlenmesi İşlemi	28
3.4.8 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi	30
3.4.9 Donatı Çekme Deneyi	32
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	33
4.1 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	33
4.2 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları	34
4.2.1 Normal Betonlarda Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları	34
4.2.2 Uçucu Küllü Betonlarda Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları	41
4.3 Donatı Çekme Deneyi Sonuçları	46
4.3.1 Normal Betonların İçerisinde Korozyona Uğratılan Donatıların Çekme Deneyi Sonuçları.....	46
4.3.2 Uçucu Küllü Betonların İçerisinde Korozyona Uğratılan Donatıların Çekme Deneyi Sonuçları.....	49
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
6. KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Φ	Çap
%	Yüzde
γ	Gamma
δ	Delta
ζ	Zeta
η	Eta
ρ	Elektriksel özdirenç
σ	Basınç dayanımı
μm	Mikrometre
A_c	Yüzey alanı
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
CaO	Kalsiyum Oksit
$\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2$	Hidroksizinkat
Cl ⁻	Klor
CO_2	Karbondioksit
Cr	Krom
Cu	Bakır
D	Silindir çapı
f_{ctk}	Yarmada çekme dayanımı
Fe	Demir
FeO	Demir Oksit
Fe-Zn	Demir-Çinko
G	Donatı ağırlığı
gr	Gram
H	Hidrojen
H_2O	Su
HCL	Hidroklorik asit
I	Amper
kN	Kilonewton
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum Oksit
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
NaCl	Sodyum Klorür
Ni	Nikel
P	Porozite
Pb	Kurşun
Pk	Numunenin kırılma yükü
Q	Coulomb
R	Direnç
Zn	Çinko

Simgeler (Devamı)

S	Kükürt
Sa	Su emme miktarı
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Dioksit
Sn	Kalay
SO ₃	Sülfat
t	Zaman
V	Hız

Kısaltmalar

C-S-H	Kalsiyum silika hidrat
G1	Birinci galvaniz tipi
G2	İkinci galvaniz tipi
G3	Üçüncü galvaniz tipi
G2+E	Epoksi boyalı ikinci galvaniz tipi
HA	Hiper akışkanlaştırıcı
SDG	Sıcak daldırma galvaniz
UK	Uçucu kül
PÇ	Portland çimentosu
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
W/C	Su / Çimento

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Betonda donatı korozyonu için tasarlanan iki aşamalı korozyon modeli (Tuutti 1982)..	3
Şekil 2.2 Beton içine gömülü çelik donatının elektrokimyasal korozyonu (Ahmad 2003).	4
Şekil 2.3 Galvanizli kaplamanın mikro yapısını gösteren iç yapı resmi (Tan 2007).	8
Şekil 2.4 Donatının çinko açısından zengin bölgesindeki Fe-Zn ikili faz diyagramı (Marder 2000).	8
Şekil 2.5 pH'ın saf çinkonun korozyon hızı üzerindeki etkisi (Tan 2007).	11
Şekil 4.1 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.	35
Şekil 4.2 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.	36
Şekil 4.3 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelерinin galvaniz tipine göre değişimi.	38
Şekil 4.4 Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.	39
Şekil 4.5 Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.	40
Şekil 4.6 Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelерinin galvaniz tipine göre değişimi.	40
Şekil 4.7 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.	41
Şekil 4.8 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.	42
Şekil 4.9 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelерinin galvaniz tipine göre değişimi.	43
Şekil 4.10 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.	44
Şekil 4.11 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.	44
Şekil 4.12 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelерinin galvaniz tipine göre değişimi.	45

Şekil 4.13 Normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları.	46
Şekil 4.14 Normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.....	47
Şekil 4.15 Normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları	48
Şekil 4.16 Normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.....	49
Şekil 4.17 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları.....	50
Şekil 4.18 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.	50
Şekil 4.19 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.	51
Şekil 4.20 Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.	52
Şekil 4.21 Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.	53
Şekil 4.22 Akma dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki.	53
Şekil 4.23 Çekme dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki.....	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Fe-Zn faz bileşimi (Tan 2007)	9
Çizelge 3.1 Çimentonun; kimyasal, fiziksel ve mekanik özellik deney sonuçları.	18
Çizelge 3.2 UK'nin XRF analizi ve fiziksel özellik deney sonuçları.	18
Çizelge 3.3 Agregaların granülometrik analizi ve fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 3.4 Hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.....	20
Çizelge 3.5 Çelik donatıların mekanik özellikleri.....	20
Çizelge 3.6 Üretilen beton serilerine ait karışım oranları, kg/m ³	21
Çizelge 3.7 ASTM C 1202 sınır değerleri.....	26
Çizelge 3.8 Galvaniz Tiplerinin Kimyasal İçerikleri.	28
Çizelge 3.9 Farklı tipte galvaniz ile kaplanmış donatıların kodlanması.	28
Çizelge 4.1 Sertleşmiş beton deney sonuçları	33

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Üretilen numunelere ait görüntüler.....	21
Resim 3.2 Ultrases geçiş süresi deneyinin yapılışı.....	22
Resim 3.3 Basınç dayanımı deneyine ait görüntü.....	23
Resim 3.4 Yarmada-çekme dayanımı deneyinin yapılışı.....	24
Resim 3.5 Vakumlama işlemi ve hızlı klorür geçirimliliği deney düzeneği.....	25
Resim 3.6 Elektriksel özdirenç deney düzeneği.....	26
Resim 3.7 Galvaniz ile kaplanmış 16 mm çapındaki donatıların görünümü.....	29
Resim 3.8 Galvaniz ile kaplanmış 14 mm çapındaki donatıların görünümü.....	29
Resim 3.9 Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği.....	30
Resim 3.10 Galvaniz kaplı donatının korozyon öncesi ve sonrası görünümü.....	31
Resim 3.11 Donatı çekme deneyi düzeneği.....	32
Resim 4.1 Korozyon nedeniyle hasar oluşan numuneler.....	36
Resim 4.2 Betonların içerisinden çıkartılan donatılar ve HCl asit çözeltisi ile temizlenmiş durumları.....	37

1. GİRİŞ

Betonarme, dünyada köprü, yol, ticari ve konut binalarının yapımında kullanılan ana yapı malzemesidir. Ancak, betonarmede bulunan donatı çubukları özellikle denize yakın bulunan kent merkezlerine sahip ülkelerde korozif süreçle birlikte betonarme yapılarda bakım ve onarım için gerekli yüksek maliyetlere neden olmakta, yapıların servis ömrünü kısaltmaktadır (Cedrima 2019).

Betonarme yapılarda görülen hasarların birçok nedeni olabilir; alkali-silika reaksiyonu, don hasarı, asit saldırısı ve sülfat saldırısı gibi durabilite problemleri bu durumlara örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, betonarme yapılarda en sık görülen bozulma mekanizması tartışmasız olarak betondaki donatı çeliğinin korozyonudur. Betondaki çeliğin korozyonu ya karbonatlaşma mekanizmasıyla ya da klorür iyonlarının reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Karbonatlaşmanın oluşması veya klorür iyonlarının donatı çeliğine ulaşması zaman aldığından, korozyonun başlaması aniden olmamakta ve belirli bir süreç içerisinde oluşmaktadır (Tutti 1982).

Bu süre beton kalitesine, beton pas payı kalınlığına ve çevresel parametrelere bağlıdır. Denize yakın kıyı bölgelerde klorür iyonunun varlığı veya karbonatlaşmaya neden olacak çeşitli tuzların varlığı korozyon reaksiyonunun hızını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu bölgelerde korozyon hızına etki eden bir diğer önemli faktörde betondaki nem içeriğidir. Düşük nem içeriğine sahip beton için, yüksek öz direnç nedeniyle korozyon hızı düşüktür. Çok yüksek nem içeriğine sahip betonda ise, oksijenin yavaş taşınması nedeniyle korozyon hızı düşüktür. Orta düzeyde nem içeriğinin ortamda bulunması nispeten düşük öz direnç ve yüksek oksijen taşınması nedeniyle korozyon hızını arttırabilir (Ahlström 2015).

Beton içerisindeki çelik donatılarda oluşan korozyon problemini önlemek için; beton üretimi sırasında çimento yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi mineral katkıları kullanılarak geçirimsiz beton üretilmesi, çelik donatıların ve betonun kaplanması, katodik koruma uygulanması ve çeşitli korozyon inhibitörlerinin kullanılması gibi yöntemler kullanılmaktadır (Gürten vd. 2007, Hossain ve Lachemi 2004).

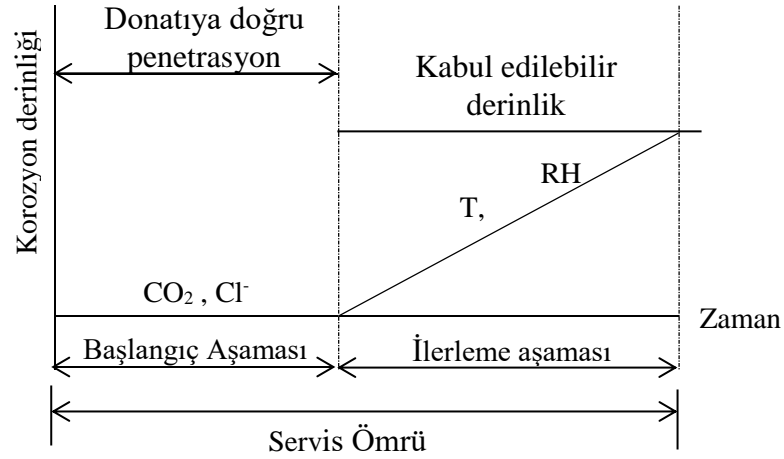
Bu tez çalışmasında beton içerisindeki donatıları korozyondan korumak için donatılar sıcak daldırma galvanizleme (SDG) işlemi ile kaplanmıştır. Ayrıca üretilen betonları daha geçirimsiz olmasını sağlamak için mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmıştır.

Çalışmada, farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmış donatıların normal ve uçucu küllü betonların içerisindeki korozyon performansları araştırılmıştır. Betonlar donatılı ve donatısız olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiştir. Üretilen numuneler standart kür ortamında 28 gün boyunca küre uğratılmış ve sonrasında ilgili deneyler yapılmıştır. Kür süresi dolan donatılı numuneler üzerinde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmış ve zamana bağlı korozyon akımları elde edilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen ortalama korozyon akımı ve korozyon deney süresi kullanılarak donatılarda korozyon nedeniyle oluşan teorik ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneylerinden sonra donatılar betonların içerisinden çıkartılmış ve gerçek ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Daha sonra bu donatılar üzerinde çekme deneyleri yapılarak akma ve çekme dayanımları da belirlenmiştir. Donatısız beton numunelerinin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, hızlı klorür geçirimsizliği, elektriksel özdirenç, görünen porozite ve su emme deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma ile hangi tip galvaniz kaplamanın donatı korozyonu için daha iyi olduğu belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Beton İçerisindeki Donatı Korozyonu

Betondaki donatının korozyonu, beton yapıların bozulmasının en önemli nedenlerinden biridir. Çelik paslandığında, ortaya çıkan pas çelikten daha büyük bir hacim kapladığı için betonda genleşmeler oluşur. Bu genleşmeler betonda çekme gerilmeleri yaratır ve bunun sonucunda beton çatlayıp parçalanabilir. Çelik, doğal olarak oluşan bir malzeme olmadığı için paslanır. Aksine, demir cevheri çelik üretmek için eritilir ve rafine edilir. Demir cevherini çeliğe dönüştüren üretim aşamaları metale enerji katmaktadır. Çelik, altın ve platin dışındaki çoğu metal gibi, normal atmosferik koşullar altında termodinamik olarak kararsızdır ve enerji açığa çıkaracak ve doğal durumuna, demir oksit veya pasa geri dönecektir. Bu işleme korozyon denir (İnt.Kyn.1).



Sekil 2.1 Betonda donatı korozyonu için tasarlanan iki aşamalı korozyon modeli (Tuutti 1982).

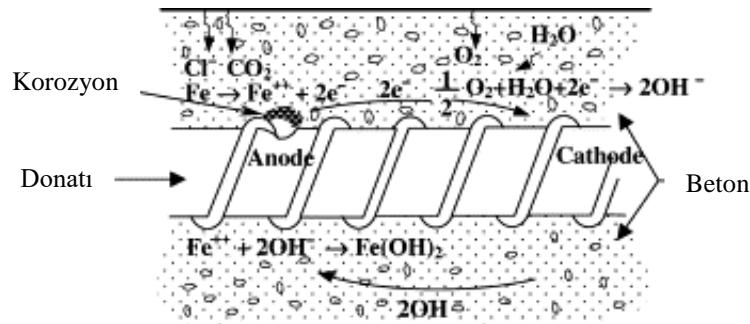
Betonda donatı korozyonu için tasarlanan iki aşamalı korozyon modeli Sekil 2.1’de gösterilmiştir. Modele göre donatı korozyonu açısından bir beton yapının hizmet ömrü, başlama aşaması ve yayılma aşaması olmak üzere ikiye ayrılır. Başlama süresinin uzunluğu, nötrleştirici veya aktive edici maddelerin çeliğe nüfuz etmesi sonucu beton kaplamanın ne kadar hızlı değiştiği ve korozyon sürecinin başlaması için gerekli olan maddelerin konsantrasyonları ile belirlenir. Başlama aşamasındaki korozyon oranı sıfır değildir ancak çok düşüktür. Korozyon hızı, sabit koşullar varsayıldığında yayılma aşaması sırasında sabit değildir, ancak taşınan iyonların bir sonucu olarak artabilir veya

korozyon ürünleri tarafından oluşturulan bir difüzyon bariyerinin oluşumu sonucunda azalabilir (Tuutti 1982).

2.1.1 Korozyon Mekanizması

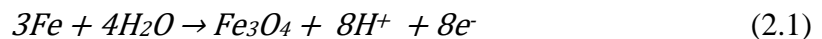
Korozyon, anodik ve katodik yarı hücre reaksiyonlarından oluşan elektrokimyasal bir reaksiyondur. Betondaki bir çelik donatı çubuğu için bu işlem her zaman pratikte gerçekleşir. Korozyona uğrayan donatı çeliğinin yüzeyi, çelik tarafından bağlanan hem anot hem de katot bölgelerini içeren karışık bir elektrot görevi görebilir. Makro hücre korozyonu, beton içinde farklı ortamlara maruz kalan tek bir çubukta veya çubuğun bir kısmının betonun dışına uzandığı yerlerde de oluşabilir. Her iki durumda da beton boşluk çözeltisi elektrolit olarak işlev görür (Poursaei 2016).

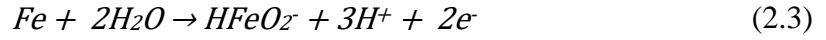
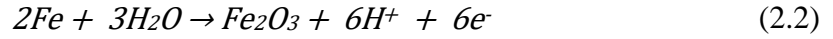
Korozyon, yüklerin (elektronlar ve iyonlar) akışını içeren elektrokimyasal bir süreçtir. Çubuğun anot adı verilen aktif bölgelerinde, demir atomları elektron kaybeder ve çevredeki betona demir iyonları olarak hareket eder. Bu işleme yarı hücre oksidasyon reaksiyonu veya anodik reaksiyon denir. Beton içine gömülü çelik donatının elektrokimyasal korozyonu Sekil 2.2’de gösterilmiştir.



Sekil 2.2 Beton içine gömülü çelik donatının elektrokimyasal korozyonu (Ahmad 2003).

Betona gömülü çelik için, elektrolitin pH'ına, agresif anyonların varlığına ve çelik yüzeyinde uygun bir elektrokimyasal potansiyelin varlığına bağlı olarak olası anodik reaksiyonlar şunlardır:





Olası katodik reaksiyonlar, O₂'nin mevcudiyetine ve çelik yüzeyinin çevresindeki pH'a bağlıdır. En olası reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Korozyon ürünleri çeliğin kendisinden daha büyük bir hacim kaplar ve bu da iç genleşmelere ve gerilmelere neden olur. Beton içerisinde oluşan gerilmeler betonu tahrip edebilir ve çeliğin daha şiddetli bir şekilde bozulmasına neden olabilir (Ahmad 2003).

2.2 Korozyonu Önleme Yöntemleri

Beton, içerisindeki donatı çeliğini korozyona karşı pasif olarak koruyan oldukça alkali bir ortamdır. Bu yüzden beton, içerisindeki çelik donatıyı uzun yıllar boyunca koruyabilir. Ancak çeşitli fiziksel ve çevresel koşullar nedeniyle klorür iyonları, su, karbondioksit ve diğer kimyasallar betonun içerisine girebilir. Buz çözücü kimyasallar, özellikle klorür tuzları, betona yayılan ve donatı çeliğine ulaşan klorür konsantrasyonları oluşturarak alkali betonun pasif korumasını yok eder. Zararlı klorür konsantrasyonlarına maruz kalma süresinin arttırılması, betonun geçirgenlik ve difüzyon özelliklerinin azaltılması, çatlakların boyutunun ve dağılımının kontrol edilmesi ve betonda belirli kimyasal katkıların kullanılmasıyla sağlanabilir (Beh 2013).

Donatı korozyonunu önlemeye yardım etmek için ve betonarme yapıların servis ömürlerini uzatmak için çeşitli korozyon önleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi; klorür iyonları, karbondioksit ve su girişini en aza indirmek için betonun yüzeyini yalıtımdır. Diğer bir yöntem olarak; silis dumanı, uçucu kül ve yüksek

fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanarak betonun geçirimsizliğini azaltmaktır. Başka bir yöntem ise çelik yüzeyine ulaşacak klorürlerin ve karbondioksitin etkilerini azaltmak için donatı çubuklarını kaplamaktır (Poursaei 2016). Donatı çubukları epoksi veya galvanizleme işlemleri ile kaplanabilir.

Bu çalışmada ise farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmış donatıların normal ve uçucu küllü betonların içerisindeki korozyon performansları araştırılmıştır. Beton geçirimsizliği azaltmak ve zararlı iyonların beton içerisini girmesini engellemek için mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Ayrıca donatı çeliklerinin korozyona karşı dayanıklılığını arttırmak için donatı çelikleri farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmıştır. Tez çalışmasında donatı çeliklerinin korozyonunu önlemek için kullanılan galvanizleme işlemleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

2.3 Galvaniz Kaplama

Galvanizleme işlemi donatıların büyük oranda çinko ile kaplanması işlemidir. Donatıların çinko ile kaplanması durumunda çinko kaplama çeliği iki farklı şekilde korumaktadır. Bunlar; donatı üzerinde fiziksel bir bariyer oluşturarak koruma işlemi ve donatıyı saran kaplamadaki yerel bozulmalar için katodik koruma işlemi olarak sayılabilir. Bu kaplamadaki katodik koruma sayesinde donatı çeliğinin korozyonu, çinko kaplamanın geniş bir alanının tamamen çözünmesine kadar başlamaz. Buna karşılık çinko kaplamanın, klorürlerin varlığı veya karbonatlaşma olmaksızın betonda stabil olduğu bilinmektedir. Ayrıca, klorür kaynaklı korozyona karşı dört ila beş kat daha yüksek toleransa sahiptir. Çıplak çeliğe kıyasla galvaniz ile kaplanmış çeliğin korozyona karşı dayanıklı olmasına rağmen, betona gömüldüğünde korozyonun başlangıcıyla ilgili belirsizlikler olduğu belirtilmektedir.

Taze betonda çinko kaplama termodinamik olarak kararsızdır ve boşluk çözeltisinin yüksek pH'ı nedeniyle ilk birkaç gün içinde şiddetli bir şekilde korozyona uğrar. Bu işlem, koruyucu bir çinko korozyon ürünü tabakasının oluşması sonucunda pasivasyon gerçekleşene kadar devam eder. Çinko kaplama tarafından sağlanan korumanın kapsamı kalınlığının bir fonksiyonu olduğundan, bu ilk korozyon sırasında çinko kaybının derinliğini belirlemek çok önemlidir (Tan 2007).

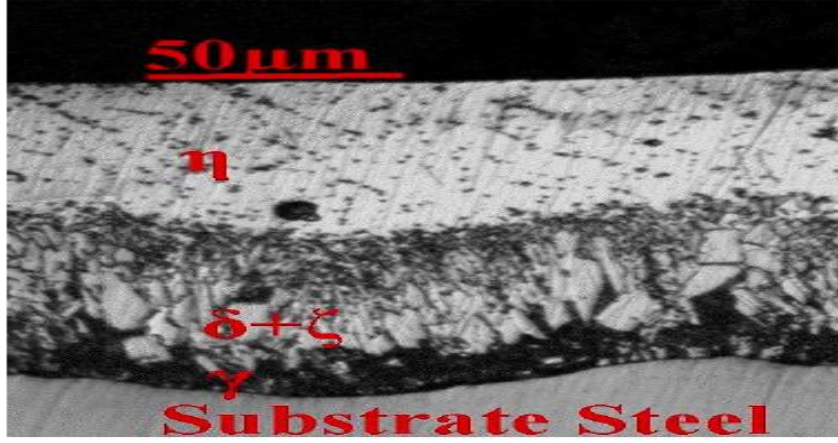
Sıcak daldırma galvanizleme çeliği, betonarme yapıların hizmet ömrünü uzatmak için başarılı bir şekilde kullanılmış olsa da, galvaniz kaplamanın betona gömüldüğünde ilk korozyon davranışına ve bu davranışın kaplama yüzeyi bileşiminden nasıl etkilendiğine ilişkin belirsizlikler devam etmektedir. Galvanizli çelik, oldukça alkali bir gözenek sıvısı olan taze betona gömüldüğünde, pasivasyon meydana gelene ve beton sertleşene kadar çinko kaplama şiddetli bir şekilde paslanır. Bu, iki endişeye yol açar: (i) başlangıçtaki yüksek korozyon hızı, uzun vadede alttaki çeliğe yeterli galvanik koruma sağlayamayacak kadar çok çinkoyu kaldırabilir ve (ii) katodik yarı hücre reaksiyonunda üretilen hidrojen, çimento hamurunun gözenekliliğini artıracak ve böylece donatı ile beton arasındaki aderans dayanımını azaltacaktır. (Tan ve Hansson 2008).

2.3.1 Galvaniz Kaplanmış Donatı Çeliğinin Özellikleri

Sıcak daldırma galvanizlemede çelik donatı, yaklaşık 450 ila 490 °C sıcaklıklarda erimiş çinko banyosuna daldırılarak kaplanır. Daldırma işlemi sonrasında, demir ile erimiş çinko arasında metalürjik reaksiyonlar meydana gelir ve bu da aşındırıcı maddelere karşı mükemmel bir bariyer sağlayan yapışkan bir kaplamanın oluşmasına neden olur. Çelik/sıvı çinko ara yüzeyinde meydana gelen başlıca reaksiyonlar (1) demirin çözünmesi (2) Çekirdeklenme ve intermetalik bileşiklerin büyümesidir (Giorgi vd. 2004, Tan 2007).

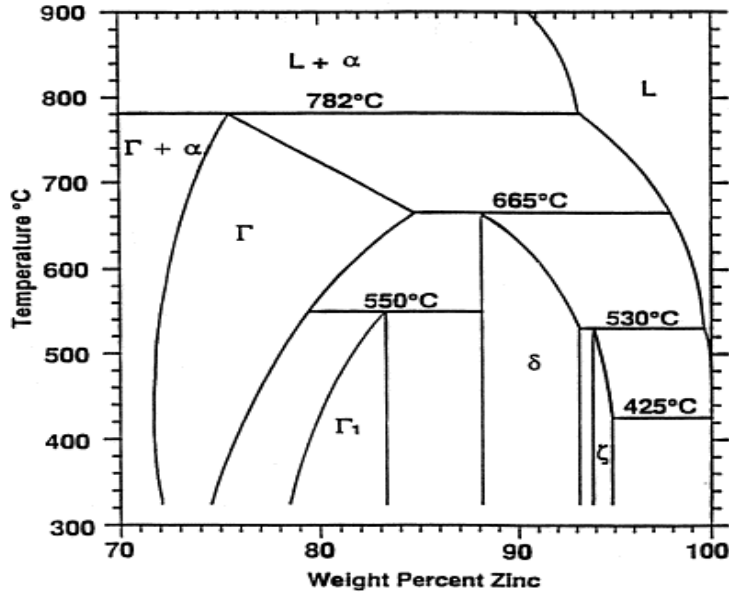
2.3.1.1 Demir-Çinko Dengesi ve Kinetiği

Alt tabaka çeliği (substrate steel) sıvı çinko banyosuna daldırıldığında, banyo içerisindeki bileşime ve çelikte bulunan çözünen maddelere bağlı olarak bir takım reaksiyonlar meydana gelir. Meydana gelen metalürjik reaksiyonlar, alt tabaka çeliğinden azalan Fe içeriği ile çeşitli intermetalik fazlara yol açar. Bu intermetalik fazlar, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi gama (γ) fazı, gamma₁ (γ_1) fazı, delta (δ) fazı, zeta (ζ) fazı ve bir eta (η) fazını içerir (Marder 2000).



Şekil 2.3 Galvanizli kaplamanın mikro yapısını gösteren iç yapı resmi (Tan 2007)

Her fazın belirli bölümü, galvanizleme prosedürlerine ve alt tabaka çeliğinin, çinko banyosunun kimyasına büyük ölçüde bağlıdır. Fe-Zn ikili faz diyagramının çinko açısından zengin bölgesinden (Şekil 2.4) her fazın denge bileşimi belirlenebilir ve Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.



Şekil 2.4 Donatının çinko açısından zengin bölgesindeki Fe-Zn ikili faz diyagramı (Marder 2000).

Çeşitli fazlardan önce zeta (ζ) fazı (ağırlıkça yaklaşık % 5-6 Fe ile) oluşur, bunu herhangi bir belirgin gecikme olmaksızın delta (δ) fazı takip eder. Ancak gama (γ) fazlarının çekirdeklenmesi, belirli bir kuluçka süresinden sonra gerçekleşir. Hem zeta hem de delta fazlarının oluşumu 5 saniye sonra gerçekleşirken gama fazlarının oluşumu 30 saniyelik

bir kuluçka süresi gerektirir. Eta fazı, Fe-Zn faz diyagramında gösterilmemesine rağmen, ağırlıkça yaklaşık %0.03 Fe içeren nispeten saf bir çinko fazıdır ve söndürme üzerine oluşur (Tan 2007).

Mevcut diyagramda bulunan fazlar Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Uzun süreli daldırma galvanizleme (veya daldırma sonrası tavlama) sırasında oluşan birincil fazlar zeta(ζ), delta(δ), gama(γ) ve gama₁(γ_1)’den oluşmaktadır (Marder 2000).

Çizelge 2.1 Fe-Zn faz bileşimi (Tan 2007)

Faz	Formül	% Demir
α Fe	Fe(Zn)	96.1
Γ	FeZn ₃	23.5-28.0
Γ_1	Fe ₂₀ Zn ₈₀	17.0-19.9
δ	Fe ₁₀ Zn ₉₀	7.0-11.5
ζ	Fe ₅ Zn ₉₅	5.6-6.0
η	Zn(Fe)	0.03

Galvaniz kaplamanın büyüme kinetiği, hem daldırma süresine hem de farklı fazların bireysel büyüme kinetiğine bağlıdır. Sıcak daldırma galvanizlemede daldırma süresi kısadır (genel olarak beş dakikaya kadar), bu durumdan dolayı çeşitli fazların büyümesi difüzyon kontrollüdür. Bu nedenle, intermetalik fazlar arasında, en düşük demir içeriğine sahip olan zeta, çinko çözeltisi ile alt tabaka çeliğinin ara yüzeyinde ilk çekirdeklenendir. Zeta, zamanla azalan hızlı bir başlangıç büyümesi sergilerken, delta fazı zamanla artan yavaş bir başlangıç büyümesi sergiler. Buna karşılık gama fazı bir kuluçka süresi gerektirir ve bunların birleşik kalınlıkları 1 μ m’den azdır. Bunlar, delta fazının her iki yönde de fakat genellikle çinkoya doğru büyüdüğü ve zeta fazının çinkoyu veya eta fazını tüketmesine neden olan demir alt tabakanın içine doğru bir büyüme sergilerler. Delta fazı büyüdükçe gama fazlarını tüketir ve zeta fazına doğru genişler. Sonuç olarak, iki faz arasındaki arayüz iyi tanımlanmamıştır, daha ziyade iki fazın bir karışımıdır. Zeta fazının morfolojisi çinko çözeltisindeki demir içeriğine bağlıdır. Zeta, delta fazına bitişik sütunlu veya iğne benzeri bir morfolojide büyür ve yeni kristallerin oluşumundan ziyade büyümeye devam eder. Bununla birlikte, çinko çözeltisi demir ile aşırı doyduğunda, zeta izole kristaller olarak oluşabilir (Tan 2007).

2.3.1.2 Galvaniz Kaplama Bileşimini Etkileyen Faktörler

Donatı galvanizlemesinde çalışma parametreleri, çinko yapısı ve çinko tabakası kalınlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Donatı çeliğinin kendisinden kaynaklanan etkiler göz ardı edilemez. Çelikteki silisyum, fosfor, alüminyum ve kükürt içeriği, yığın halindeki kaplamanın kalınlığı ve bileşimi üzerinde önemli bir olumsuz etkiye sahiptir. Çeşitli mekanizmalar yoluyla, çelikte bu elementlerin uygun olmayan bir miktarı, mekanik özellikler ve nihai görünüm açısından zayıf kaplama riskini artırır (Pokorny vd. 2016).

Hem silisyum hem de fosfor içerikleri, galvaniz kaplamaların yapısı, görünümü ve özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Çeliklerdeki silisyum ve fosfor içeriğinin galvanizleme üzerindeki etkisine ilişkin bir kılavuz olarak aşağıdaki kriterler uygulanmalıdır:

$$\% Si < \% 0.04 \text{ ve } \% P < \% 0.025 \quad (2.7)$$

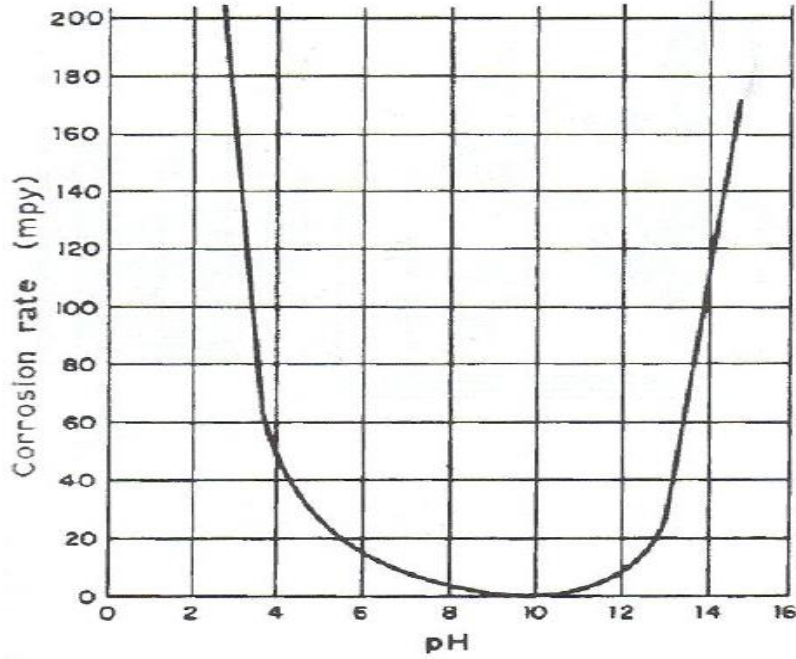
$$\% Si + (2.5 \times \% P) < \% 0.09 \quad (2.8)$$

Galvanizli kaplamalar, mat gri veya pürüzlü yüzeyli yamalı gri renkte olabilir ve aşırı büyüme varsa kırılabilir. Kaplamanın hizmet ömrü kaplama kalınlığı ile orantılıdır (İnt.Kyn.2).

2.3.2 Beton İçerisinde Çinko Kaplamanın Korozyon Davranışı

Taze haldeki beton sıcak daldırma galvanizli kaplamalarla etkileşime girdiğinde, genellikle kaplamanın dış tabakasından yaklaşık 10 µm çinko pasivasyon reaksiyonu sonucu tüketilmektedir. Bu işlem, betonun ilk prizlenmesi (yaklaşık 1-2 saat) boyunca gerçekleşir ve çinko ile gözenek çözültüsü arasındaki ilk reaksiyon oldukça kuvvetliken, beton sertleşmeye başladığında ve karışım içindeki hareketlilik kısıtlandığında, reaksiyon pasif film oluştuğu ve çinko yüzeyi kapladıkça yüzeyde azalır. Pasif film bir kez oluştuğunda, pH yaklaşık 13.6'ya yükselse bile bozulmadan kalacaktır (Yeomans 2016).

Betonda, kalsiyum, sodyum ve potasyum hidroksitlerin etkisiyle boşluk çözeltisi oldukça alkalidir. Betonun pH'ı ilk birkaç saat içinde 13'ün üzerine ve hidrasyon devam ettikçe yaklaşık olarak 13.7'ye kadar yükselebilir. Bu koşullarda çinko termodinamik olarak kararsızdır ve şiddetli bir şekilde çözünmeye uğrar. Bu davranış, pH 12'den 14'ün üzerine çıktıkça korozyon hızındaki hızlı artışı gösteren Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Tan 2007).



Şekil 2.5 pH'nın saf çinkonun korozyon hızı üzerindeki etkisi (Tan 2007).

Betonun gözenek sıvısında çinko korozyon ürünleri kalsiyum ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksizinkat (CHZ), $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2$ olarak bilinen ve çinkoyu daha fazla korozyondan pasifleştirebilen kristalli bir malzeme oluşturabilir. CHZ oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonlar karmaşıktır ve iyi anlaşılmamıştır (Tan 2007).

2.4 Korozyona Karşı Mineral Katkı Maddelerinin Kullanılması

Betonun tasarlandığı süreden daha erken bir zamanda bozulmaya başlaması maruz kaldığı çevresel faktörlerden veya çeşitli iç sebeplerden kaynaklanabilir. Portland çimentosuna ilave mineral katkı malzemelerinin eklenmesi, betonun mikro yapısını iyileştirmekte ve ayrıca betonun çevresel faktörlere karşı direncini arttırmaktadır. Mineral katkı malzemesi olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin, uçucu kül vb. farklı mineral katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

Mineral katkı malzemelerinin kullanılması durumunda betonlar daha düşük hidratasyon ısısına, daha düşük geçirimsiliğe, sülfatlara ve deniz suyuna karşı daha fazla dirence sahip olmaktadır. Bu mineral katkı malzemelerinin kullanılması, yüksek performanslı betonların dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir (Mejia 2003). Bu amaçla yapılan çalışmada betonların korozyon dayanıklılıklarını geliştirmek için mineral katkı malzemesi olarak uçucu kül kullanılmıştır.

2.5 Galvanizli Çeliklerin Korozyonu İle İlgili Daha önce Yapılan Çalışmalar

Ortolan (2015) tarafından yapılan çalışmada; kaplamasız ve sıcak daldırma galvaniz ile kaplanmış çelik donatılar farklı su/çimento oranına sahip dört tip beton içerisinde hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulmuştur. Korozyonun tüm beton türleri için azaldığı, en zengin karışım için %70.5'lik azalmaya ulaşıldığı gözlemlenmiştir; bu, sıcak daldırma galvanizlemenin, özellikle daha dayanıklı karışımlarla birlikte kullanıldığında, kablolu beton yapılara önemli bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

Tittarelli vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada; kalsiyum hidroksite doymuş çözeltilere daldırılan çinko levhaların sırasıyla oksijen, hava ve azot varlığındaki korozyon davranışı incelenmiştir. Potansiyel ve korozyon hızı ölçümleri ile korozyon dirençleri izlenmiştir. Sonuç olarak çinko kaplama üzerinde etkili bir pasivasyon tabakasının hızlı oluşumu için oksijenin ana oksitleyici ajan olduğunu ve aslında su olmadığını açıkça göstermiştir.

Shafei vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada; korozif maddelerin betona nüfuz etmesinin bir takım iç ve dış parametrelerden etkilendiği kanıtlanmıştır. Beton özellikleri ve difüzyon özellikleri ile ilgili etkili parametreler iç parametreler olarak kategorize edilirken, ortam sıcaklığı, bağıl nem ve karbondioksit ve klorür iyonlarının konsantrasyonu dış parametreler olarak kabul edilmiştir. Bu parametrelerin daha fazla araştırılması, çoğunun doğrusal olmayan zamana bağlı özelliklere sahip olduğunun ve korozyon sürecinde karşılıklı etkileşimlerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Bellezze vd. (2006) yaptıkları çalışmada üç farklı galvanizli çelik çubuğun betondaki korozyon davranışını araştırmışlardır. Sırasıyla Zn-Ni-Bi ve Zn-Ni-Sn-Bi modifiye

edilmiş banyolarıyla elde edilen iki farklı galvanizli çubuğun korozyon direnci, geleneksel Zn–Pb banyosuyla galvanizlenmiş bir çubuğun korozyon direnciyle karşılaştırılarak incelenmiştir. Ayrıca bu çubuklar saf çinko çubuğun korozyon davranışı ile karşılaştırılmışlardır. Bu çalışma, farklı alkalilikteki iki çimento ile elde edilen beton numunelerinde, hem musluk suyunda hem de %5’lik NaCl çözeltisindeki korozyon performansları belirlenmiştir. Sonuç olarak çinko kaplamalar üzerindeki alaşım elementlerinin varlığı nedeniyle, tüm galvanizli çubuklar, saf çinko çubuğa göre her zaman daha yüksek korozyon oranları göstermiştir. Zn–Ni–Sn–Bi banyosunda galvanizlenen çubuklar, yüksek alkali beton matrisi için uygun değildir, ancak baskın korozyon faktörü klorürlerin varlığı olduğunda iyi bir korozyon davranışı göstermiştir. Düşük alkali beton matrisinde, lokal korozyon başlangıcı sadece beton kaplamada çimento ağırlığına göre %4.02 Cl⁻ değerine ulaşıldığında gözlemlenmiştir.

Bellezze vd. (2018) yaptıkları çalışmada taze betonda galvanizli çeliğin korozyon davranışına çözümler inhibitörlerin etkisini araştırmışlardır. Araştırma, korozyon potansiyeli izleme, taramalı elektron mikroskopu, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ve X-ışını kırınım analizi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kromat içeren betonlarda galvanizli çeliğin pasivasyonunun farklı mekanizmalarla üç aşamada gerçekleşmekte ve pasivasyon işleminin başlaması için çözümler oksijen gerekmektedir. Cr VI’ya alternatif olarak çalışılan inhibitörler arasında nitrit, kromattan daha az etkili olsa da kullanılabilir potansiyeli bulunmaktadır. Taze betondaki galvanizli çeliğin pasivasyon süresi üzerinde dietanolamin ve molibdat iyonlarının önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır.

Pokorny vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; sıcak daldırma galvanizli donatının korozyonunun beton ile aderans dayanımı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi araştırılmıştır. Galvanizli donatının betonla aderansı farklı yönlerden etkilendiği ve taze betondaki ilk korozyon hasarı ile ilgili yönlerin en baskın olduğu belirlenmiştir. Bu alandaki araştırmaların hiçbir durumda kesin ve eksiksiz olarak kabul edilemeyeceği, galvanizli çeliğin taze betondaki korozyon davranışının, donatının betonla aderansında bir azalmaya neden olabileceği belirlenmiştir. Bu sorunun göz ardı edilemeyeceğini ve uygun şekilde çözülmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Pernicova vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; beton elemanlarda sıcak daldırma galvanizli donatı kullanımıyla ilgili sorunlar araştırılmıştır. Daha önce elde edilen verilere dayanarak, yapılan çalışma ile çinko kaplamanın baz çelik üzerindeki bariyer etkisi ispatlanmıştır. Bunun nedeninin, taze betonda çinko kaplamanın hidrojen üreten ilk korozyon reaksiyonu olduğu belirtilmiştir. Diğer veriler, hidrojen oluşturmanın, donatı-beton ara yüzeyinde çimentonun gözenekliliğini geri döndürülemez bir şekilde arttırdığını ve bu da aderans dayanımını önemli ölçüde azaltabileceğini kanıtlamıştır. Çinko korozyon ürünü ile gözeneklerin yeterince doldurulduğu doğrulanamamıştır.

Cedrim vd. (2019) yaptıkları çalışmada çinko ve çinko-nikel alaşımları ile elektroliz edilmiş betonarme demirlerin aşınabilirliği ve aderansı üzerine araştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, üç grup çelik çubuğun (referans olarak kullanılan siyah çelik ve Çinko ve Çinko-Nikel alaşımları ile elektrolizle kaplanmış inşaat demiri) korozyona ve beton matrisine yapışma performanslarını araştırmışlardır. Korozyon analizi için numuneler tuz püskürtme yöntemi ve ıslak-kuru yarı döngüler olmak üzere iki farklı hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulmuştur. Korozyon sürecinin kalitatif olarak izlenmesi için korozyon potansiyeli ölçülmüş ve korozyon hızı tahmin edilmiştir. Çelik-beton aderansını değerlendirmek için çekip çıkarma testleri yapılmıştır. Sonuç olarak Çinko ve Çinko-Nikel kaplamaların, donatı çubuklarının dayanıklılığını arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca ıslatma ve kurutma döngülerinin betonarme numunelerdeki korozyon sürecini değerlendirmek için tuz püskürtme yöntemine kıyasla daha agresif olduğunu kanıtlamışlardır. Buna ek olarak, galvanizli donatı ile beton matris arasındaki aderansın azaldığını da belirlemişlerdir.

Wang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; alkali aktif cüruf (AAS) sistemindeki çelik çubukların korozyon davranışını incelemek için, çalışmada ilk olarak AAS harcının simüle edilmiş gözenek çözeltileri uygulanmıştır. AAS gözenek çözeltilerindeki üç ana türün, yani kükürt içeren türler, alüminat ve silikatın etkileri araştırılmıştır. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve potansiyodinamik polarizasyon sonuçları, AAS harcının simüle edilmiş gözenek çözeltisinin daha güçlü bir pasifleştirme kapasitesine sahip olduğunu göstermiş ve esas olarak daha yüksek silikat konsantrasyonu nedeniyle, Portland çimentosu (PC) harcının simüle edilmiş gözenek çözeltisinden daha fazla koruduğunu tespit etmişlerdir.

Tittarellia vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada; geopolimerik ve çimentolu harçlardaki çıplak ve galvanizli çelik donatıların korozyon davranışı, üç mukavemet sınıfında, kür süresi boyunca ve %3.5 NaCl çözeltisi içinde ıslak-kuru döngülere maruz bırakılarak incelenmiştir. Kütleme sırasında, geopolimerlerin yüksek alkalinitesi, hem çıplak hem de galvanizli çeliğin aktif durumunu uzatmıştır. Klorürlerin etkisinde, uçucu kül geopolimerlerinin, donatılara en yüksek korumayı sağladığı belirlenmiştir.

Negheimish vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada; sıcak daldırma galvanizli çinko-alüminyum kaplı çelik donatıların beton ortamında geleneksel saf çinko kaplı donatılara kıyasla korozyon performansı araştırılmıştır. Klorürlü betonla temas halindeki sıcak daldırma galvaniz kaplı çelik donatıların korozyon direncini artırmak için çinko-alüminyum ile alaşımlandırılmıştır. Alüminyum alaşımlarının çinkodaki rolünü hızlı bir şekilde değerlendirmek için, çinkoda %10, %15, %20 ve %30 alüminyum içeren levha formundaki test panelleri hazırlanmış ve tuz püskürtme testleri ile korozyon dirençleri açısından değerlendirilmiştir. %10Al-90Zn (10AZ) bileşimli bir kaplama ile sıcak daldırma galvanizli çelik donatı, %100 Zn (100Z) ile sıcak daldırma galvanizli çelik donatıya kıyasla çok daha iyi korozyon direnci göstermiştir.

Molina vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; %100 portland çimentosu (PÇ) ve üçlü çimento (%64 PÇ + %30 Yüksek Fırın Cürufu + %6 Kireçtaşı tozu) ile klorür penetrasyonu ile etkileşen betonda galvaniz donatı, betonarme yapıların hizmet ömrünü uzatmak için bir önlem olarak düşünülmüştür. Bu çalışmada önerilen üçlü çimentonun kullanılması, aynı maruz kalma süresinden sonra galvanizli inşaat demiri seviyesinde biriken klorür miktarı PÇ kullanılması durumundan daha düşük olmasına rağmen, daha yüksek akım yoğunluklarına ve daha yüksek kaplama kalınlığı kaybına neden olmuştur.

Singh ve Ghosh (2008) tarafından yapılan çalışmada; molibdat, fosfat, nitrat ve florür iyonlarından oluşan bir formülasyonda işlenmiş sıcak daldırma galvaniz kaplı çelik donatıların çok kararlı bir pasif film oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bu film, %1 klorür iyonlarına sahip simüle edilmiş beton boşluk çözeltisine maruz kalan SDG kaplamanın korozyonuna direnmektedir. Asidik pasivasyon banyosunda işlem gören SDG yüzeyinde

molifosfit, çinko moli-oksit vb. içeren kompozit bir pasif filmin oluştuğu tespit edilmiştir. Pasif filmin asidik bileşenlerinin sızmasının, aşındırıcı arayüzün pH'ını çinkonun daha güvenli pH bölgesinde getirdiği tespit edilmiştir.

Hamad ve Mike (2005) tarafından yapılan çalışmada; normal dayanımlı beton yapılarda sıcak daldırma galvanizli donatının aderans dayanımı araştırılmıştır. Test sonuçları, galvanizli donatı kullanımının, normal dayanımlı betonda donatının aderans dayanımı üzerinde ihmal edilebilir bir olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Hegya vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada; betona gömülü sıcak daldırma galvanizli donatının normal çelik donatı ile karşılaştırıldığında, korozyon direncini hem termodinamik hem de kinetik olarak artırılması araştırılmıştır. Deneysel araştırmalar beton kürü sırasında yapılmıştır. Sonuçlar, galvanizleme yoluyla elde edilen korozyon korumasının etkinliğini göstermiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan tez çalışmasında farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmış donatıların beton içerisindeki korozyon performansları araştırılmıştır. Çelik donatılar farklı tiplerde galvaniz ile kaplandıktan sonra iki farklı beton içerisinde korozyona uğratılmış ve zamana bağlı korozyon akımları elde edilerek ve hangi tip galvaniz kaplamanın donatı korozyonu için daha iyi olduğu belirlenmiştir. Çalışmada üretilen betonların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Ayrıca korozyona uğratılan donatılarda oluşan teorik ve gerçek ağırlık kayıpları belirlenmiş ve donatılar üzerinde çekme deneyleri yapılmıştır. Kullanılan malzemeler ve yapılan deneyler ile ilgili ayrıntılı bilgiler bu bölümde verilmiştir.

3.1 Kullanılan Malzemeler

Beton üretimlerinde kullanılan çimento, uçucu kül, kalker esaslı kırmataş agregaları, kum ve hiper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.1.1 Çimento

Beton üretimlerinde ÇİMSA Afyon Çimento Fabrikası'nın ürettiği TS EN 197-1 (2012)'e uygun CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Beton üretimlerinde kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerine ait sonuçlar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

3.1.2 Uçucu Kül

Beton üretimlerinde Seyitömer Termik Santraline ait uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu kül Afyon Kolsan Hazır Beton tesisinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait XRF analizi ve fiziksel özellik deney sonuçları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Beton üretimlerinde kullanılan uçucu kül TS EN 450-1 (2013)'de istenen $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ün % 70'in üzerinde olması şartına uymaktadır.

Çizelge 3.1 Çimentonun; kimyasal, fiziksel ve mekanik özellik deney sonuçları.

	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42.5 R
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO ₂	19.11
	Al ₂ O ₃	5.38
	Fe ₂ O ₃	2.69
	CaO	63.33
	MgO	1.81
	Eşdeğer Alkali (Na eşdeğeri)	0.91
	SO ₃	2.92
	Cl ⁻	0.011
	Kızdırma kaybı	3.35
	Çözünmeyen Kalıntı	0.33
Fiziksel Özellikler	Özgül ağırlık	3.10
	Özgül yüzey, cm ² /gr	3917
	Priz Başlama Süresi, dk	152
	Priz Sona Erme Süresi, dk	234
	Hacim Genleşmesi, mm	0.5
Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı, MPa (2 Günlük)	35.9
	Basınç Dayanımı, MPa (7 Günlük)	45.5
	Basınç Dayanımı, MPa (28 Günlük)	54.3

Çizelge 3.2 UK'nin XRF analizi ve fiziksel özellik deney sonuçları.

	Kimyasal Bileşim, %	UK
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO ₂	58.30
	Al ₂ O ₃	19.80
	Fe ₂ O ₃	11.00
	CaO	2.26
	MgO	3.54
	Na ₂ O	0.199
	K ₂ O	1.82
	SO ₃	0.644
	Cl ⁻	0.0105
	Kızdırma Kaybı	1.95
Fiziksel Özellikler	Özgül ağırlık	2.25
	Özgül yüzey, cm ² /gr	2935

3.1.3 Kum ve Kırmataş Agregaları

Beton üretimlerinde Afyon KOLSAN hazır beton tesisinin taş ocaklarından elde edilen kalker esaslı kırma kum (0-4 mm), kırmataş I (4-11.2 mm) ve kırmataş II (11.2-22.4 mm) agregaları kullanılmıştır. Beton üretimlerinde kullanılan kum, kırmataş I ve kırmataş II agregalarına ait fiziksel özellik deney sonuçları ve elek analizi sonuçları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Kum, Kırmataş I ve Kırmataş II agregaları beton üretimlerinde hacimce sırasıyla %50, 15 ve 35 oranlarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Agregaların granülometrik analizi ve fiziksel özellikleri.

Elek boyutları (mm)	Elekten geçen malzeme miktarı, %		
	Kırma Kum (0-4 mm)	Kırma Taş I (4-11.2 mm)	Kırma Taş II (11.2-22.4 mm)
31.5	100	100	100
22.4	100	100	100
16	100	100	50
8	100	54	2
4	95	7	0
2	61	2	0
1	39	0	0
0.5	27	0	0
0.25	19	0	0
0.125	15	0	0
0.063	12	0	0
Fiziksel Özellikler			
Özgül ağırlık	2.668	2.696	2.705
Su emme, %	0.949	0.546	0.422

3.1.4 Hiper Akışkanlaştırıcı

Beton üretimlerinde hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı olarak Sika ViscoCrete Hi-Tech 30 kullanılmıştır. Bu katkının kimyasal yapısı modifiye polikarboksilat esaslı polimer olarak belirtilmiştir. Beton üretimlerinde kullanılan Sika ViscoCrete Hi-Tech 30 katkısının özellikleri Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Hiper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin özellikleri.

Özellik	Değerler
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.07
pH Değeri	4.98
Klorür içeriği	< 0.1
Alkali miktarı (%)	<10
Donma noktası	-9°C

3.1.4 Çelik Donatılar

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde, $\Phi 14$ ve $\Phi 16$ mm çaplarında nervürlü B420C donatıları kullanılmıştır. Kullanılan donatıların akma ve çekme dayanımlarını belirlemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Çelik donatılardan elde edilen akma ve çekme dayanımları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. Donatıların TS-708'de verilen sınır değerleri sağladıkları görülmüştür (TS708 2016).

Çizelge 3.5 Çelik donatıların mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	TS 708	Çekme deneyi sonuçları	
	B420C sınır değerler	$\Phi 14$	$\Phi 16$
Akma dayanımı (en az) R_e (N/mm ²)	420	497	454
Çekme dayanımı (en az) R_m (N/mm ²)	-	633	563
Çekme dayanımı/akma dayanımı oranı R_m/R_e	≥ 1.15 <1.35	1.27	1.24

3.1.5 Sodyum Klorür Tuzu

Donatıların korozyon performanslarının belirlenmesi amacı ile yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinde, sanayi tipi sodyum klorür tuzu kullanılmıştır.

3.2 Beton Karışım Oranları

Yapılan tez çalışmasında iki farklı beton üretilmiştir. Bu betonlar uçucu külün kullanılmadığı ve uçucu külün çimento yerine ağırlıkça %15 oranında kullanıldığı serilerden oluşmaktadır. Farklı beton türlerinin korozyon performansına etkileri de bu

şekilde incelenmiştir. Beton üretimlerinde su/bağlayıcı oranı 0.60 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen beton serilerine ait karışım oranları Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Çizelge 3.6'da verilen kontrol serileri uçucu külsüz serileri gösterirken UK15 serileri uçucu külün çimento yerine ağırlıkça %15 oranında uçucu külün kullanıldığı serileri göstermektedir.

Çizelge 3.6 Üretilen beton serilerine ait karışım oranları, kg/m³.

Karışım Kodu	Su	Çimento	UK	Kum	K.Taş I 4-11.2mm	K.Taş II 11.2-22.4 mm	HA
Kontrol	168	280	-	960	291	682	1.96
UK15	168	238	42	953	289	677	1.96

3.3 Üretilen Numune Tipleri, Kür Koşulu ve Süreleri

Üretilen numuneler beton ve donatılı beton numuneleri olmak üzere iki ayrı tipe üretilmiştir. Donatısız olarak üretilen numuneler Φ 100x200 mm boyutlarındaki silindir, 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numunelerden oluşmaktadır. Donatılı olarak üretilen numuneler, Φ 14 ve 16 mm çapındaki donatının yerleştirildiği Φ 100x350 mm boyutlarındaki silindir numunelerden oluşmaktadır. Donatılı olarak üretilen numuneler hızlandırılmış korozyon deneylerinde kullanılmıştır. Donatılar silindir numunelerin içerisine tamamen gömülmüştür. Üretilen numunelere ait görüntüler Resim 3.1'de gösterilmiştir.



Resim 3.1 Üretilen numunelere ait görüntüler.

Üretilen beton ve donatılı beton numuneleri 24 saat boyunca laboratuvar ortamında kalıplarında bekletilmiş ve sonrasında kalıplarından çıkartılmıştır. Tüm numunelere 28

gün boyunca 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip kirece doymun su havuzlarında standart kür uygulanmış ve sonrasında ilgili deneyler yapılmıştır.

3.4 Yapılan Deneyler

Üretilen betonlar ve korozyona uğratan donatılar üzerinde yapılan fiziksel, mekanik ve dayanıklılık deneylerine ait ayrıntılı bilgiler aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

3.4.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi

Basınç dayanımlarında kullanılan 150x150x150 mm boyutlarındaki beton numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. Ultrases geçiş süresi deneyinin yapılışına ait görüntüler Resim 3.2’de gösterilmiştir. Üretilen beton serileri üzerinde 28. günde ultrases geçiş süresi deneyleri yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyleri TS EN 12504-4’ye göre gerçekleştirilmiştir (TS EN 12504-4, 2012).

Ultrases geçiş hızının hesaplanmasında denklem 3.1’den yararlanılmıştır. Denklem 3.1’deki, V ; Ultrases geçiş hızını, (km/sn), L ; Alıcı ve verici problar arasındaki mesafeyi (km), t ; Ses dalgalarının geçiş süresini (sn) ifade etmektedir.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.1)$$



Resim 3.2 Ultrases geçiş süresi deneyinin yapılışı.

3.4.2 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, 28. güne kadar 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip kirece doymun su havuzlarında standart kür uygulanan 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyinin yapılışına ait görüntüler Resim 3.3'te verilmiştir. Deneylerde 2000 kN kapasiteli beton presi kullanılmıştır. Yükleme hızı 0.3 MPa/sn olarak uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır (TS-EN12390-3 2019).

Basınç dayanımının hesaplanmasında denklem 3.2'den yararlanılmıştır. Denklem 3.2'deki, σ ; Basınç dayanımını (MPa), P_k ; Numunenin kırılma yükünü (N), A_c ; yüzey alanını (mm^2) ifade etmektedir.

$$\sigma = P_k / A_c \quad (3.2)$$



Resim 3.3 Basınç dayanımı deneyine ait görüntü.

3.4.3 Yarmada-Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada-çekme dayanımı deneyleri $\Phi 100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde, 28 günlük standart kür sonrasında TS EN 12390-6'ya uygun olarak yapılmıştır

(TS-EN12390-6, 2010). Yarmada-çekme dayanımı deneyine ait görüntüler Resim 3.4'te gösterilmiştir. Yarmada-çekme dayanımı değerlerinin hesaplanmasında denklem 3.3 kullanılmıştır.

$$f_{ctk} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te ki, f_{ctk} ; Yarmada çekme dayanımını (MPa), P; Silindire uygulanan basınç yükünü (N), D; Silindirin çapını (mm) ve L; Silindirin uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.



Resim 3.4 Yarmada-çekme dayanımı deneyinin yapılışı.

3.4.4 Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi

Hızlı klorür geçirimsizliği deneyleri $\Phi 100 \times 50$ mm boyutlarındaki disk numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Disk numuneler silindir numunelerden kesilerek elde edilmiştir. Silindir numunelere kirece doymun su havuzlarında 28 gün boyunca standart kür uygulanmıştır. Disk numuneler üzerinde vakumlama işlemleri ve hızlı klorür geçirimsizliği deneyleri ASTM C 1202 (1997) deney yöntemine göre yapılmıştır. Disk numunelerin vakumlama işleminde kullanılan düzenek ve hızlı klorür geçirimsizliği deney düzeneği Resim 3.5'te gösterilmiştir.



Resim 3.5 Vakumlama işlemi ve hızlı klorür geçirimsizliği deney düzeneği.

Numuneler vakumlama işleminden sonra hızlı klorür geçirimsizliği deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney düzeneğindeki hücrelerden bir tanesine % 3'lük NaCl çözeltisi, diğerine ise 0.3 N NaOH çözeltisi doldurulmuştur. Bu iki hücre arasında 60 V'luk potansiyel fark oluşturmak için, güç kaynağının (–) kutbu NaCl hücresine, (+) kutbu ise NaOH hücresine bağlanmış ve güç kaynağı çalıştırılmıştır. Deneyin başlangıcından, bitimine kadar, geçen 6 saat boyunca her 30 dakikada bir deney düzeneğinden geçen akım ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Denklem 3.4 yardımı ile devreden geçen toplam yük miktarı hesaplanmıştır.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.4)$$

Bu denklemde Q (Coulomb) toplam geçen yükü, I_0 (amper) düzeneğe gerilim uygulandığı anda ölçülen akımı ve I_t (amper) düzeneğe gerilim uygulanmasından t dakika sonra ölçülen akımı göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen toplam geçen yük değerleri ile Çizelge 3.7'de verilen sınır değerleri karşılaştırılarak üretilen betonların klorür geçirimsizlik seviyeleri belirlenmiştir.

Çizelge 3.7 ASTM C 1202 sınır değerleri.

YÜK (COULUMB)	GEÇİRGENLİK SINIFI
>4000	Yüksek
4000-2000	Orta
2000-1000	Düşük
1000-100	Çok düşük
<100	İhmal edilebilir

3.4.5 Elektriksel Özdirenç Deneyi

Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği Resim 3.6’da gösterilmiştir. Elektriksel özdirenç ölçümleri $\Phi 100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Elektriksel özdirenç ölçümleri 28 gün boyunca kirece doymun su havuzlarında standart kür yapıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.6 Elektriksel özdirenç deney düzeneği.

Elektriksel özdirenç ölçümlerinden önce numuneler suya doymun hale getirilmiştir. Deney düzeneği elektrot görevi gören iki adet bakır levha, mekanik kelepçe, iletkenliği arttırmak için kullanılan iletken jel, akımı ve voltajı gösteren bir güç kaynağından oluşmaktadır. Beton numunelerinin karşılıklı iki yüzeyine iletken jel sürüldükten sonra bu yüzeylere yerleştirilen bakır levhalar mekanik kelepçe vasıtasıyla sabitlenmiştir. Güç kaynağının artı kutbu bir bakır elektroda eksi kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır. Bu işlemlerden sonra güç kaynağından sabit 60 V verilerek her bir beton numunesinin çektiği akım değerleri kaydedilmiştir.

Denklem 3.5 yardımı ile beton numunelerinin özdirenç (ρ) değerleri hesaplanmıştır.

$$\rho = Rx \frac{S}{L} \quad (3.5)$$

Denklemdaki ρ = elektriksel özdirenci (Ωcm); L, bakır elektrotlar arası mesafe (cm); R ölçülen direnç (Ω); ve S, elektrot iletken alanı (cm^2)'dir (Boğa 2017).

3.4.6 Görünen Porozite ve Ağırlıkça Su Emme Deneyi

Görünen porozite ve ağırlıkça su emme deneylerinde $\Phi 100 \times 200$ mm boyutlarındaki silindir numuneler kullanılmıştır. Deneyler öncesinde silindir numunelere 28. güne kadar 20 ± 2 °C sıcaklığa sahip kirece doymun su havuzlarında standart kür uygulanmıştır. Su içerisindeki ağırlıkları belirlemek için Arşimet terazisinden yararlanılmıştır.

Betonların ağırlıkça su emme ve görünen porozite değerleri sırasıyla Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Sa = \frac{w_3 - w_1}{w_1} \times 100 \quad (3.6)$$

$$P = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (3.7)$$

Denklemlerdeki W_1 : Numunenin etüvde 105°C 'de 24 saat boyunca bekletildikten sonraki ağırlığını (gr), W_2 : Suyu doymun numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr), W_3 : Suyu doymun numunenin havadaki ağırlığı (gr), Sa: Ağırlıkça su emme miktarı (%) ve P: Porozite (%) değerlerini göstermektedir.

3.4.7 Donatıların Galvanizlenmesi İşlemi

Çalışmada kullanılan donatılar MİTAŞ Endüstri San. ve Tic. A.Ş.'nin Ankara ASO-2 ve İzmit'teki galvaniz tesislerinde sıcak daldırma galvaniz olarak kaplanmıştır. Çalışmada iki farklı çaptaki donatı üç farklı tipte galvaniz ile kaplanmıştır. Galvaniz tiplerinin kimyasal içerikleri Çizelge 3.8'de gösterilmiştir. Farklı tipte galvaniz ile kaplanmış donatıların kodlanması Çizelge 3.9'da verilmiştir. G2(14) kodu 14 mm çaplı donatının G2 galvanizi ile kaplandığını göstermektedir. G2+E(14) kodu ise 14 mm çaplı donatının G2 ile galvanizi ile kaplandıktan sonra ayrıca ilave olarak galvaniz üzerine epoksi boya yapıldığını göstermektedir. G1(16) kodu da 16 mm çaplı donatının G1 galvanizi ile kaplandığını ifade etmektedir.

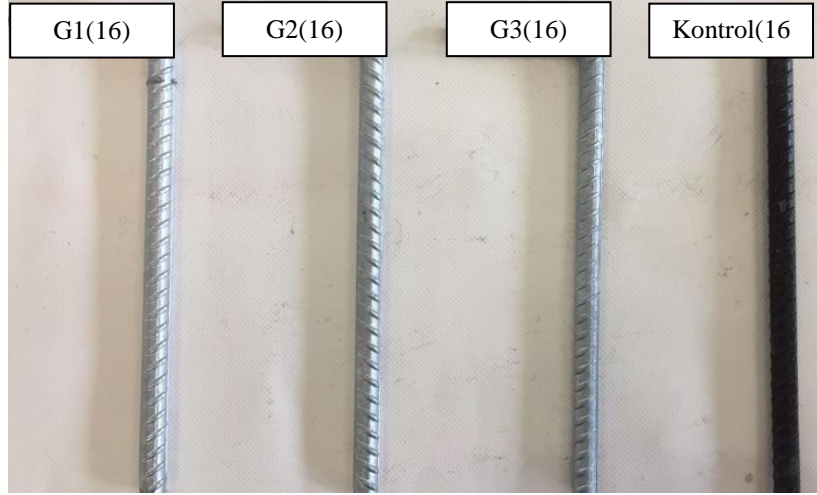
Çizelge 3.8 Galvaniz Tiplerinin Kimyasal İçerikleri.

%	Galvaniz Tipi		
	G1	G2	G3
Al	0.0168	<0.0001	< 0.0001
Cu	0.0147	0.0133	0.0083
Pb	0.0162	0.2813	0.0784
Sn	0.0012	0.0044	0.0017
Cd	0.0017	0.0016	0.0027
Fe	0.0369	0.0292	0.0331
Mg	0.0001	0.0001	0.0001
Mn	0.0028	0.0014	0.0012
Ni	<0.0004	~0.0585	<0.0004
Sb	<0.0004	< 0.0004	< 0.0004
Ti	<0.0004	< 0.0004	< 0.0004
As	0.0016	0.0019	0.0016
Bi	>0.0216	> 0.0216	0.0161
Cr	<0.0003	< 0.0003	< 0.0003
Zn	99.8849	99.5855	99.8553

Çizelge 3.9 Farklı tipte galvaniz ile kaplanmış donatıların kodlanması.

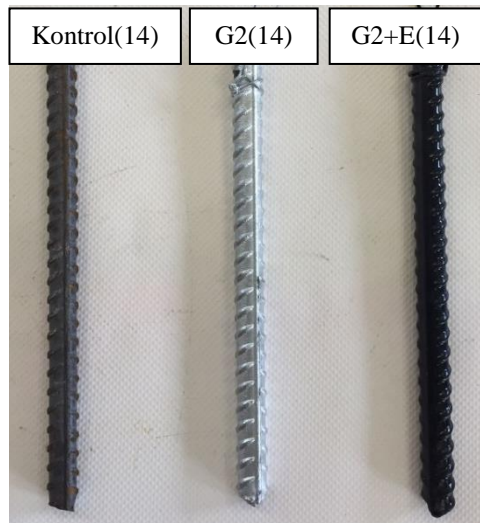
Kod	Donatı Çapı, mm	Galvaniz Tipi
G2(14)	14	G2
G2+E(14)	14	G2+E
G1(16)	16	G1
G2(16)	16	G2
G3(16)	16	G3

Galvaniz ile kaplanmış 16 mm çapındaki donatıların görünümü Resim 3.7’de gösterilmiştir. Resim 3.7’den de görüldüğü üzere hiç kaplamayan donatılara Kontrol(16) ismi verilmiştir. Bu donatılar G1, G2 ve G3 olmak üzere üç farklı galvaniz ile 90-95 µm kalınlığında kaplanmıştır.



Resim 3.7 Galvaniz ile kaplanmış 16 mm çapındaki donatıların görünümü

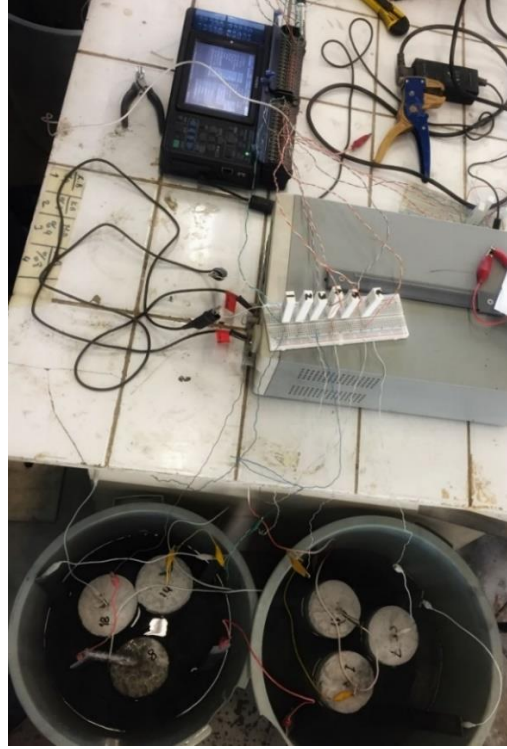
Galvaniz ile kaplanmış 14 mm çapındaki donatıların görünümü Resim 3.8’de gösterilmiştir. Kaplama yapılmayan donatılara Kontrol (14) ismi verilmiştir. G2(14) kodu ile gösterilen donatı G2 galvanizi ile 90-95 µm kalınlığında kaplanmıştır. G2+E(14) kodu ile gösterilen donatılar ise G2 galvanizi ile 90-95 µm kalınlığında kaplandıktan sonra epoksi boya (TIGER Drylac® Series 38) ile yaklaşık olarak 200 µm kalınlığında kaplanmıştır.



Resim 3.8 Galvaniz ile kaplanmış 14 mm çapındaki donatıların görünümü

3.4.8 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

Korozyon deney düzeneği Resim 3.9’da gösterilmiştir. Deney düzeneği doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, veri toplama cihazı, Breadboard, taş dirençler, içerisinde ağırlıkça % 4 NaCl çözeltisi ve iki adet paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik hazne ve deney numunesinden oluşmaktadır. Deney numunesi, $\Phi 100 \times 350$ mm boyutlarındaki silindir numunenin içerisine 16 mm çapındaki donatının tamamı gömülerek üretilmiştir. Sisteme 20 V sabit gerilim uygulayan doğru akım kaynağının pozitif kutbuna donatı çubuğu (çalışan elektrot) ve negatif kutbuna plakalar (karşıt elektrot) olacak şekilde bağlanmıştır. Bu devrede donatı çubuğu anot, plakalar katod ve NaCl çözeltisi de elektrolit görevini görmektedir. Ayrıca bu sisteme 6 adet numune paralel olarak bağlanmış ve oluşturulan deney düzeneği ile 6 adet numune üzerinde aynı anda deney yapılmıştır. Ayrıca hızlandırılmış korozyon düzeneğinde her bir hazneden geçen korozyon akımı değerleri her 1 dakikada bir veri toplama cihazı tarafından toplanmış ve zamana bağlı korozyon akımı grafikleri çizilmiştir. Üretilen betonlar üzerinde 28 günlük standart külden sonra hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır.



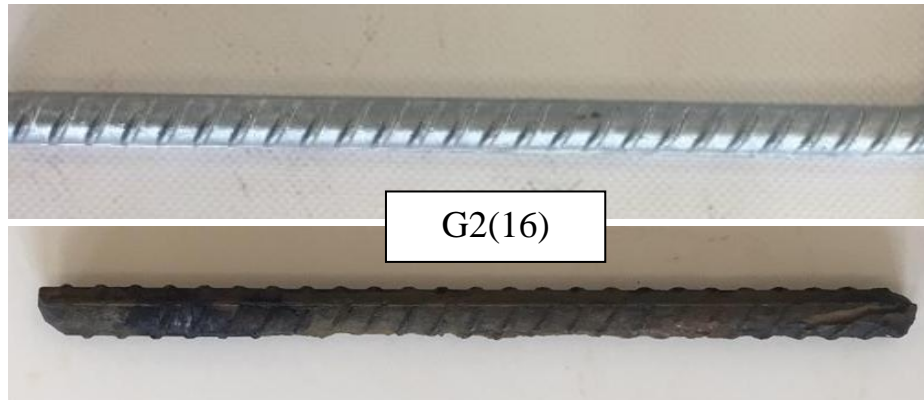
Resim 3.9 Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği

Öncelikle numunelerin içerisindeki donatıların ağırlıkları hassas terazi ile tartılmış ve donatıların korozyona uğramadan önceki ilk ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra numuneler yaklaşık olarak 18 gün boyunca korozyona uğratılmıştır. Teorik ağırlık kayıplarının belirlenmesinde Denklem 3.8’de verilen Faraday denkleminden yararlanılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde devreden geçen akım veri toplama cihazı ile her 1 dakikada bir toplandığından dolayı hem uygulanan süre hem de ortalama korozyon akımı değerleri bilinmektedir. Böylece teorik olarak ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Deneysel düzenek betonarme bir elemandaki donatıyı temsil ettiği için korozyon prosesi makro düzeyde gözlemlenip, çelik donatı ve üzerindeki galvaniz kaplama hesaplamalarda bir arada dikkate alınmıştır. Bu sebeple Faraday formülünde demirin atomik ağırlığı kullanılmıştır. Resim 3.10’dan da görüldüğü gibi donatı üzerindeki galvaniz kaplama tamamen korozyona uğrayarak kaybolmuştur.

$$Ağırlık\ kaybı = \frac{t(s) \times I(A) \times 55,847(g/mol)}{2 \times 96487(coulomb)} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’deki t’nin birimi saniye, I’nın birimi amper, 55,847 g/mol demirin atomik ağırlığı, (2) demirin değerliği, (96487) faraday sabitidir.

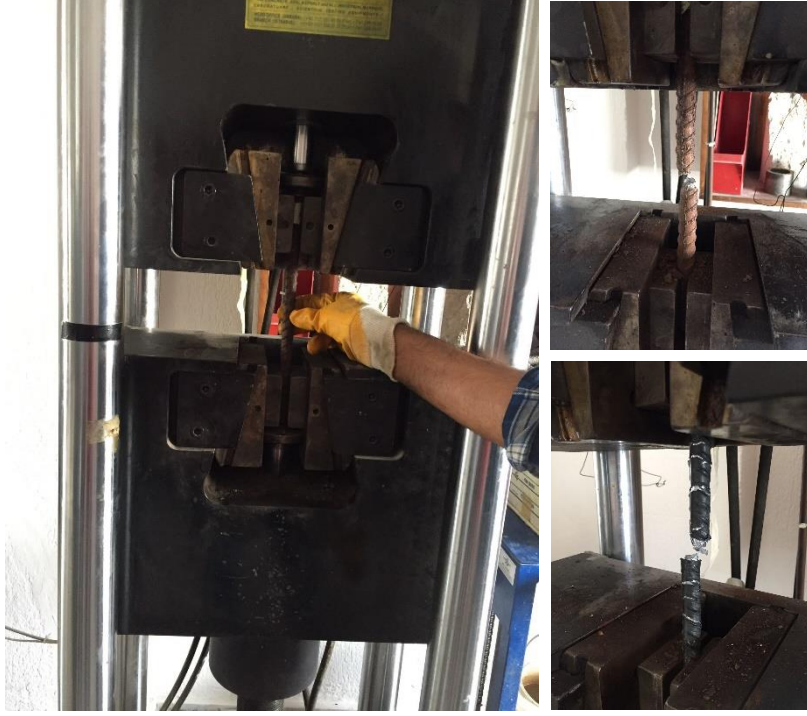
Hızlandırılmış korozyon deneylerinden sonra donatılar numunelerin içerisinden çıkartılmış ve pas ürünleri HCl asit çözeltisi ile temizlenmiştir. Daha sonra donatılar hassas terazi ile tartılarak donatılarda oluşan gerçek ağırlık kayıpları bulunmuştur.



Resim 3.10 Galvaniz kaplı donatının korozyon öncesi ve sonrası görünümü

3.4.9 Donatı Çekme Deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyleri sonrasında HCl asit çözeltisi ile temizlenen donatılar üzerinde ayrıca çekme deneyleri de yapılmıştır. Korozyona uğratılmayan $\Phi 14$ ve $\Phi 16$ mm çaplarındaki donatılara da çekme deneyi uygulanmıştır. Böylece korozyona uğratılmayan ve korozyona uğratılan donatıların akma ve çekme dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Çekme deneyinin yapılışı Resim 3.11’de gösterilmiştir.



Resim 3.11 Donatı çekme deneyi düzeneği

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Sertleşmiş beton deneyi sonuçları Çizelge 4.1 de verilmiştir. Kontrol serileri uçucu külün kullanılmadığı serileri gösterirken UK15 serileri uçucu külün çimento ağırlığının %15 oranında kullanıldığı serileri göstermektedir. Ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde UK15 serilerinden daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçtan uçucu kül kullanımı ile betonların daha boşluksuz bir yapıya sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Basınç ve yarmada-çekme dayanımları incelendiğinde de UK15 serilerinden daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Uçucu kül kullanımı ile betonlarda ilave CSH jellerinin oluşumu ile birlikte beton basınç ve yarmada-çekme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. Klorür geçirimsizliği sonuçları incelendiğinde UK15 serilerinden daha düşük klorür geçirimsizliği sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı seriler daha boşluksuz olması nedeniyle Cl⁻ iyonlarının geçişi bu betonlarda daha zor olmuştur. Elektriksel özdirenç değerleri yine UK15 serilerinde daha yüksek olarak elde edilmiştir. Elektriksel özdirenç değerlerinin artması ile klorür geçirimsizliğinin azalması arasında bir ilişki vardır. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere elektriksel özdirenç değeri yüksek yani iletkenliği daha düşük olan UK15 serilerinden daha düşük klorür geçirimsizliği sonucu elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı betonların içerisinde donatıların korozyona uğrama olasılıklarının daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Porozite ve su emme değeri sonuçları incelendiğinde de ultrases geçiş hızı sonuçlarında da olduğu gibi uçucu kül katkılı serilerden daha düşük porozite ve su emme sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılması ile birlikte betonların daha boşluksuz ve geçirimsiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.1 Sertleşmiş beton deney sonuçları

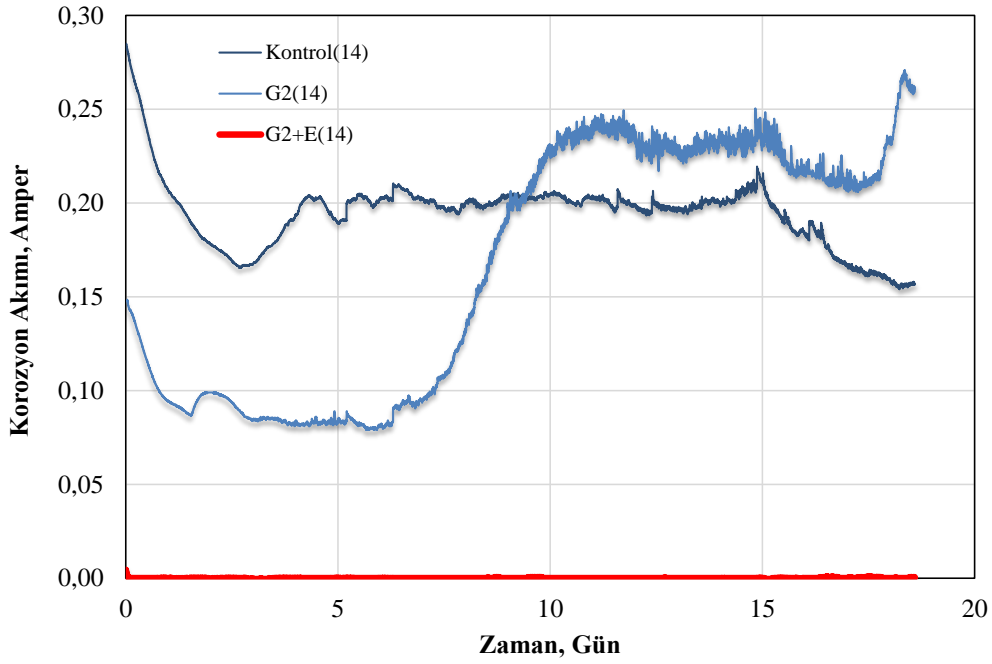
Beton Serileri	Ultrases Geç. Hız. km/sn	Basınç Day. MPa	Yarmada-Çek. Day. MPa	Klorür Geç. Coulomb	Elektriksel Özdirenç kΩcm	Porozite %	Su Emme %
Kontrol	4.41	35.91	2.99	6155	3.82	7.20	3.98
UK15	4.75	38.34	3.26	2930	6.74	3.64	2.06

4.2 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Hızlandırılmış korozyon deneyleri normal ve uçucu küllü betonların içerisindeki 14 ve 16 mm çapındaki galvaniz kaplamalı ve kaplamasız donatılar üzerinde yapılmıştır. Numunelerden elde edilen zaman bağlı korozyon akımı grafikleri kullanılarak ortalama korozyon akımı ve teorik ağırlık kaybı sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra teorik ve gerçek ağırlık kayıpları sonuçları karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki değerlendirilmiştir. Normal ve uçucu küllü beton numuneler üzerinde hızlandırılmış korozyon deneyleri 28 günlük standart kür süresinin sonrasında yapılmıştır. Her iki beton tipinde de numuneler yaklaşık olarak 18 gün boyunca korozyona uğratılmıştır. Bu sürenin sonunda donatılarda oluşan teorik ağırlık kayıplarının belirlenmesinde Bölüm 3.4.8’de verilen Faraday denkleminden yararlanılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde her bir numunenin çektiği korozyon akımı veri toplama cihazı ile her 1 dakikada bir toplanmış ve aşağıdaki grafikler çizilmiştir. Teorik ağırlık kayıplarının hesaplanabilmesi için her bir numunenin çektiği ortalama korozyon akımına ve geçen süreye ihtiyaç vardır. Deneyler sırasında ortalama korozyon akımları ve geçen süreler bilindiği için teorik ağırlık kayıpları hesaplanmıştır.

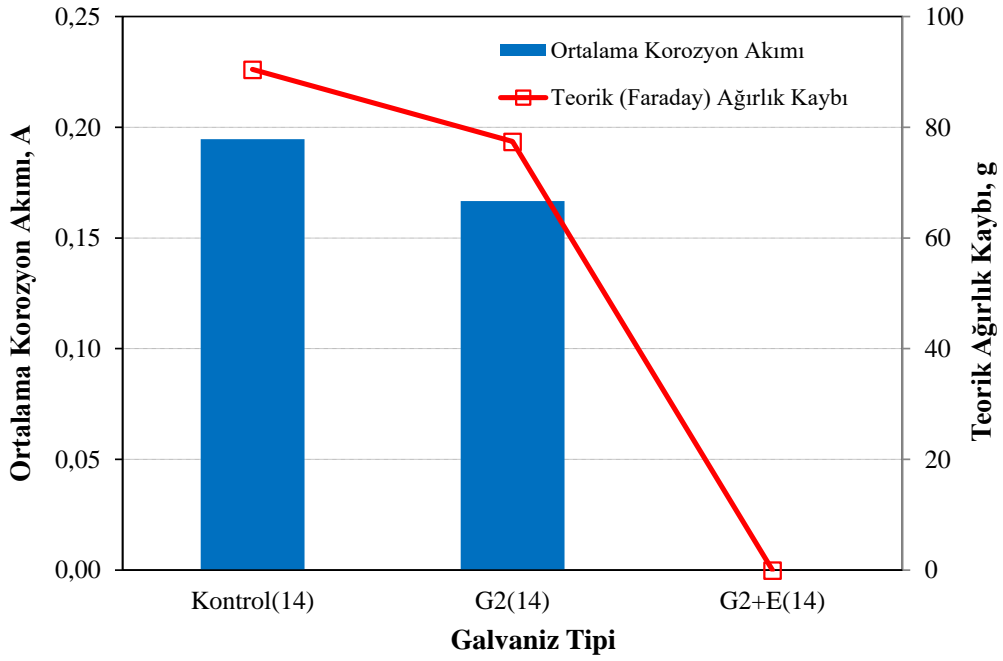
4.2.1 Normal Betonlarda Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Normal betondaki $\Phi 14$ mm’lik donatıların korozyon akımlarının zaman göre değişimi Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde galvaniz ile kaplanmayan Kontrol(14) serilerinden başlangıçta daha yüksek korozyon akımları elde edilmiştir. Galvaniz kaplı G2(14) serilerinden ise başlangıçta daha düşük korozyon akımları elde edilirken daha sonraki zamanlarda akım değerlerinde artışlar oluşmuştur. Numunelerde hasar oluştuğu anda Şekil 4.1’de görülen ani akım artışları oluşmaktadır. Ani akım artışının olmasının nedeni numunenin çatlaması ile NaCl çözeltisi direkt olarak donatıya ulaşmakta bu sebepten dolayı sistem çok yüksek akım çekmeye başlamaktadır. Galvaniz ve epoksi boya kaplı G2+E(14) serilerinden korozyon akımı elde edilememiştir. Bu numunelerde korozyon oluşmamıştır.



Şekil 4.1 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.

Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Ortalama korozyon akımı değerleri Şekil 4.1'de verilen zamana bağlı korozyon akımı grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama korozyon akımı değerleri Faraday denklemi ile teorik ağırlık kayıplarının bulunmasında kullanılmıştır. Ortalama korozyon akımı değerleri incelendiğinde en yüksek korozyon akımı değeri 0.195 A ile galvaniz kaplamanın yapılmadığı Kontrol(14) serilerinden elde edilmiştir. G2+E(14) serilerinden korozyon akımı değerleri elde edilememiştir. Faraday denklemi ile teorik ağırlık kayıpları hesaplandığında ise yine korozyon nedeniyle en yüksek ağırlık kaybı değerleri galvaniz kaplamanın yapılmadığı Kontrol(14) serilerinden elde edilmiştir. Galvaniz kaplı G2(14) serilerinden daha düşük teorik ağırlık kaybı değerleri elde edilmiştir. Galvaniz kaplamanın korozyona karşı dayanıklılığı bir miktar arttırdığı sonucuna varılmıştır. Galvaniz ve epoksi boyamanın beraber kullanılması durumunda ise korozyona karşı tamamen korunmanın gerçekleştiği görülmüştür.



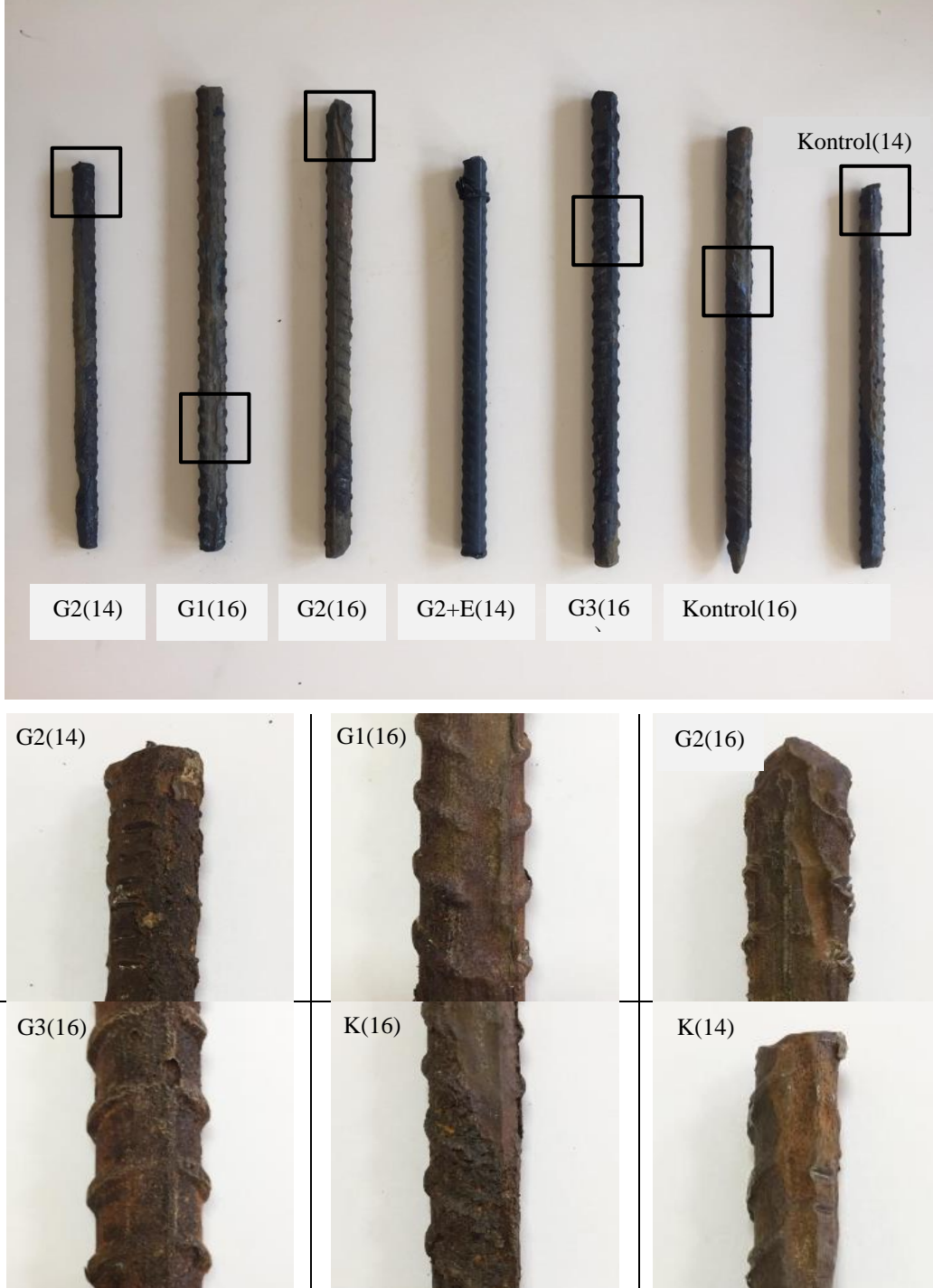
Şekil 4.2 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.



Resim 4.1 Korozyon nedeniyle hasar oluşan numuneler

Korozyon deneylerine başlamadan önce numunelerin içerisinde kullanılan donatıların ağırlıkları hassas terazi ile tartılmış ve donatıların korozyona uğramadan önceki ilk ağırlıkları belirlenmiştir. Donatılar betonların içerisine tamamen gömüldüğü için korozyon donatıların bütününde oluşmuştur. Korozyon nedeniyle hasar oluşan numunelerin görüntüleri Resim 4.1'de gösterilmiştir. Korozyon deneyleri sonrasında

numunelerin içerisindeki korozyona uğramış donatılar çıkartılmış ve pas ürünleri HCl asit çözeltisi ile temizlenmiştir. Uçucu küllü betonların içerisindenden çıkartılan donatılar ve HCl asit çözeltisi ile temizlenmiş durumları örnek olarak Resim 4.2’de gösterilmiştir.

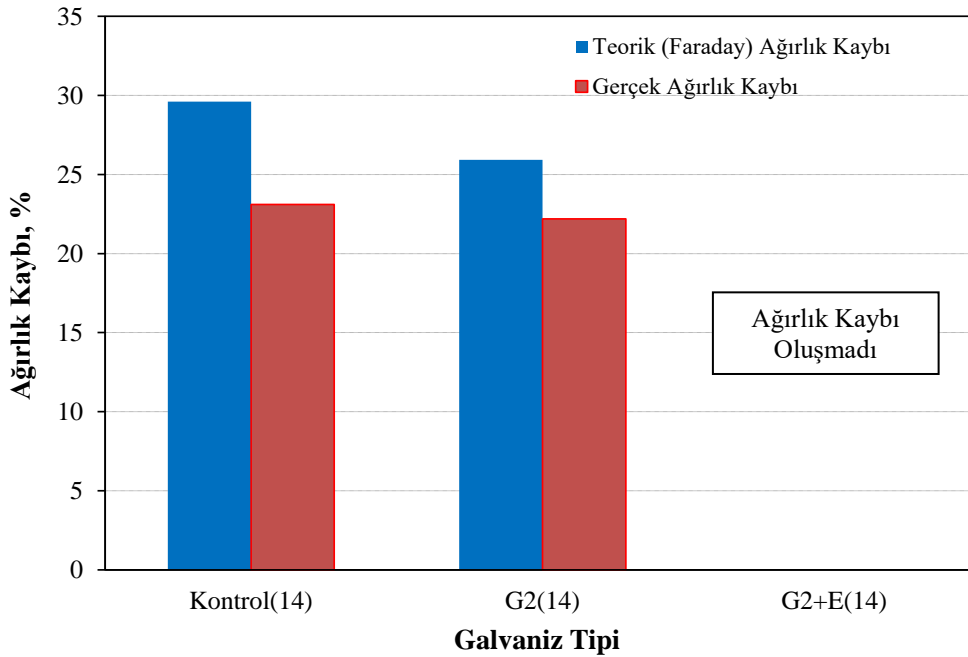


Resim 4.2 Uçucu küllü betonların içerisindenden çıkartılan donatılar ve HCl asit çözeltisi ile temizlenmiş durumları

Daha sonra temizlenmiş donatılar hassa terazi ile tartılarak korozyon nedeniyle oluşan gerçek ağırlık belirlenmiştir. Korozyon nedeniyle oluşan ağırlık kayıp yüzdeleri hesaplamada Denklem 4.1'den yararlanılmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı, \%} = \frac{G_0 - G}{G_0} \times 100 \quad (4.1)$$

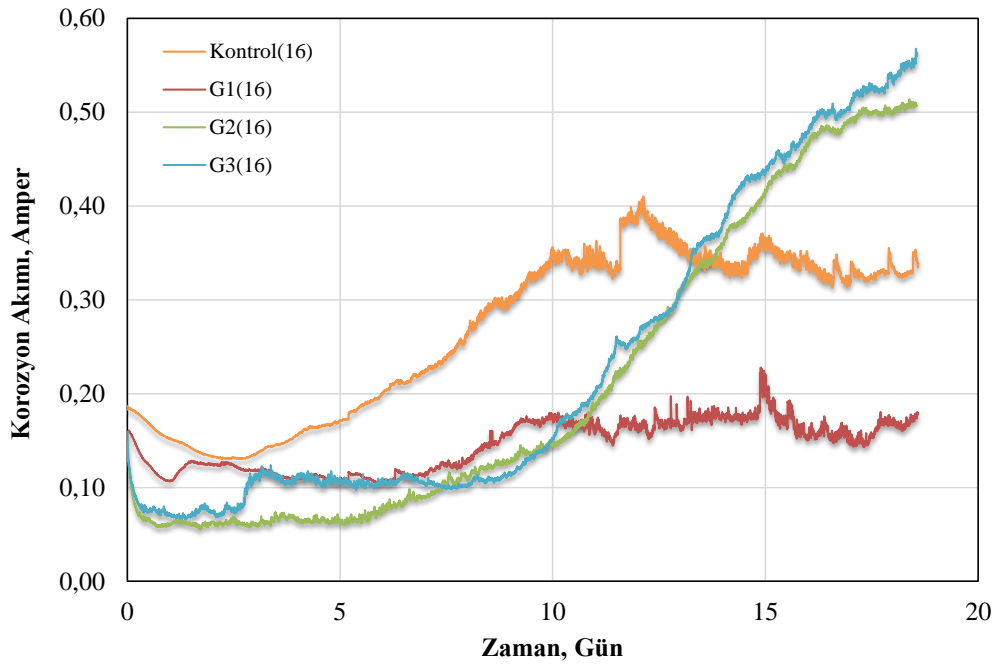
Denklemdaki G_0 ; korozyon oluşmadan önceki donatı ağırlığını, G ; korozyon oluşumundan sonra donatının HCl asit çözeltisi ile korozyon ürünlerinden temizlendikten sonraki ağırlığını göstermektedir. Denklem kullanılarak gerçek ağırlık kaybı yüzdeleri hesaplanmıştır. Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin değişimleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde teorik ağırlık kaybı yüzdelerinin gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak teorik ağırlık kaybı yüzdeleri ile teorik ağırlık kaybı yüzdelerinin birbirine oldukça yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.3 Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi.

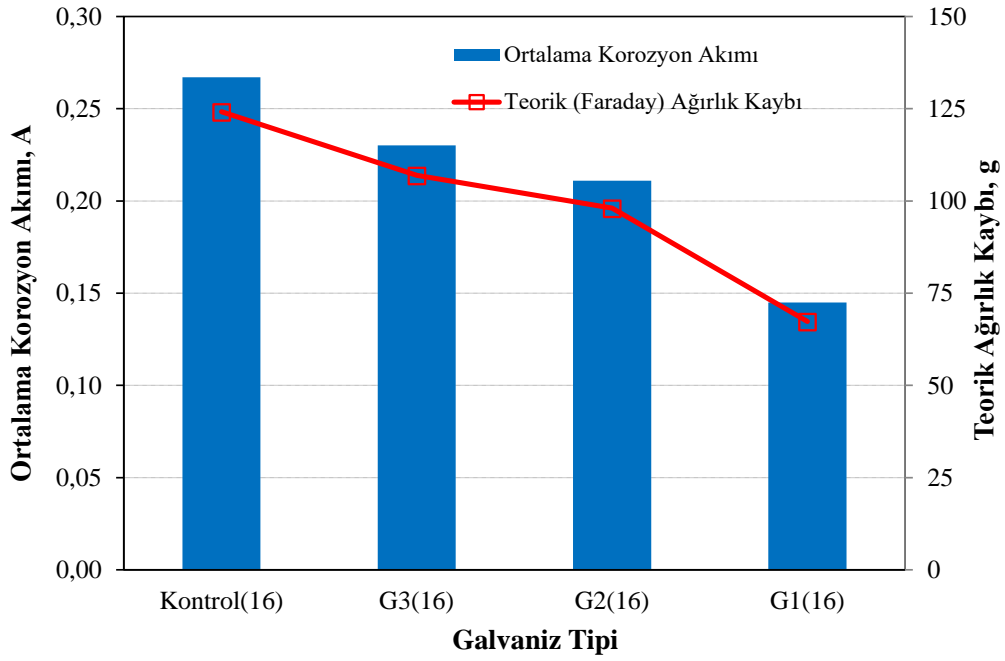
Şekil 4.3 incelendiğinde G2 galvanizi kaplanan donatılardan galvaniz kaplanmayan kontrol donatılarına göre daha az teorik gerçek ağırlık kayıpları elde edilmiştir. G2+E serilerinde ağırlık kayıpları oluşmamıştır. G2+E serilerinin korozyona karşı oldukça dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zaman göre değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4 genel olarak incelendiğinde en yüksek korozyon akımları galvaniz kaplanmayan Kontrol(16) serilerinden elde edilmiştir. Galvaniz kaplı G2(16) ve G3(16) serilerinin korozyon akımları ise deney süresine bağlı olarak zamanla artmıştır. En düşük korozyon akımları ise G1(16) serilerinden elde edilmiştir. G1(16) serilerinden daha düşük korozyon akımının elde edilmesinin nedeni olarak, bu galvaniz tipinin Çizelge 3.8'te de gösterildiği üzere diğer galvaniz tiplerine göre daha yüksek oranda Alüminyum (Al) içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

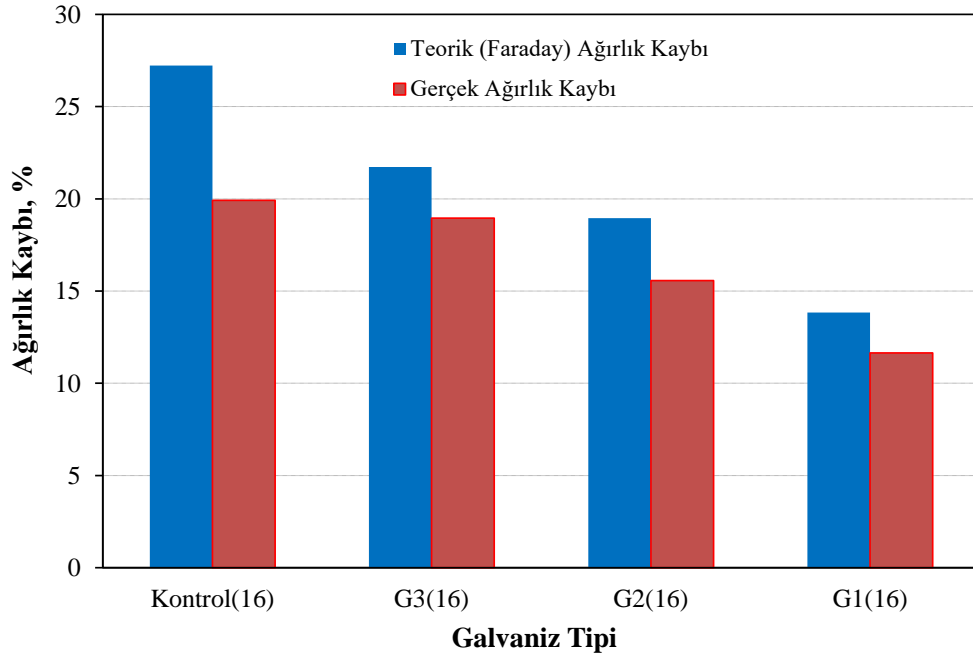


Şekil 4.4 Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.

Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde en yüksek ortalama korozyon akımı 0.267 A ile Kontrol(16) serilerinden elde edilirken, en düşük ortalama korozyon akımları 0.145 A ile G1(16) serilerinden elde edilmiştir. Teorik ağırlık kayıpları incelendiğinde de korozyon nedeniyle oluşan en düşük ağırlık kayıpları G1(16) serilerinden elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Normal betondaki Φ16 mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.

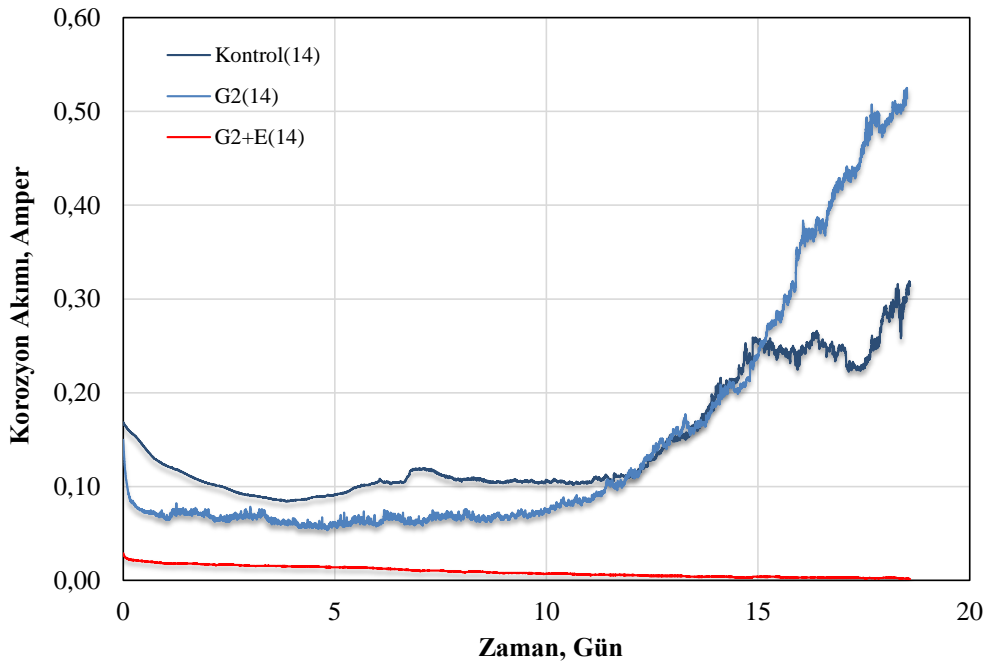


Şekil 4.6 Normal betondaki Φ16 mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi.

Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin teorik ağırlık kaybı yüzdelerine göre daha düşük olarak elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ancak iki ağırlık kaybı arasındaki fark çok yüksek değildir. Gerçek ağırlık kaybı yüzdeleri incelendiğinde % 19.92 ile en yüksek ağırlık kaybı galvaniz kaplı olmayan Kontrol(16) serilerinden elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı %11.645 ile galvaniz kaplı G1(16) serilerinden elde edilmiştir. Aynı süre boyunca korozyona uğratan galvaniz kaplı ve kaplı olmayan donatılarda oluşan ağırlık kayıpları arasındaki fark yaklaşık olarak %8 oranında gerçekleşmiştir.

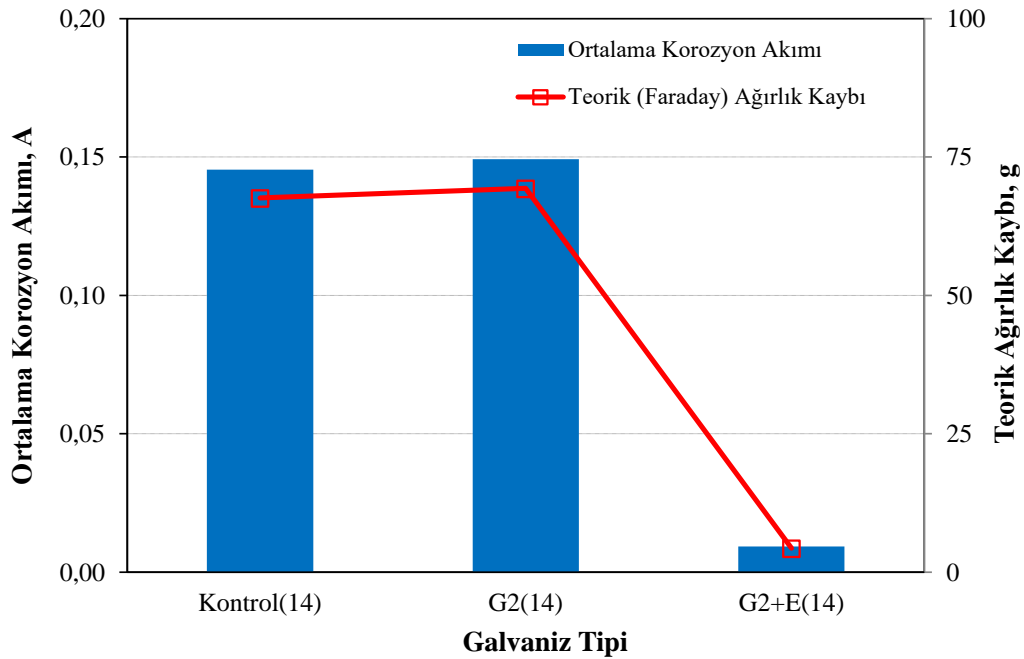
4.2.2 Uçucu Küllü Betonlarda Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zaman göre değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde normal betonlardan elde edilen davranışlara benzer davranışlar elde edilmiştir. En düşük korozyona akımları galvaniz kaplamalı ve epoksi boyalı G2+E(14) serilerinden elde edilmiştir. En yüksek korozyon akımları ise genel olarak Kontrol(14) serilerinden elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.

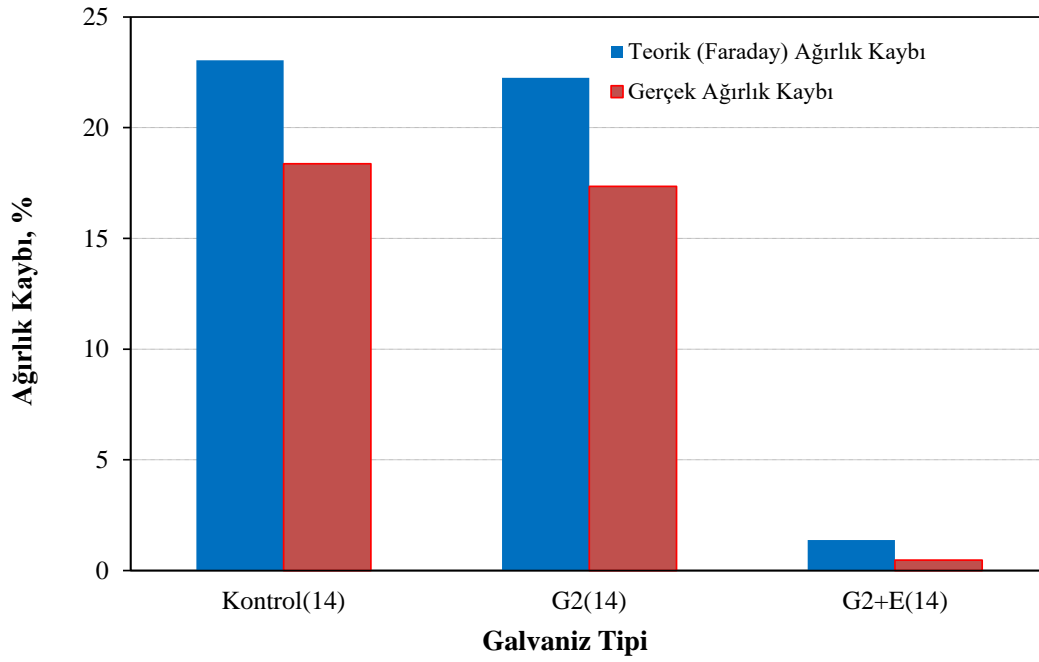
Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde G2(14) serilerinden 0.149 A ortalama korozyon akımı elde edilirken Kontrol(14) serilerinden 0.145 A ortalama korozyon akımı elde edilmiştir. Elde edilen değerler birbirine oldukça yakındır. Aslında galvaniz kaplı serilerden daha az korozyon akımlarının elde edilmesi gerekmektedir. Burada G2(14) serilerinin daha çok ortalama korozyon akımı çekmesinin nedeni bu donatının boyunun Kontrol(14) donatısının boyundan daha uzun olmasından kaynaklanmaktadır. G2(14) donatısının boyu 25.8 cm olarak ölçülürken Kontrol(14) donatısının boyu 24.5 cm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.8 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.

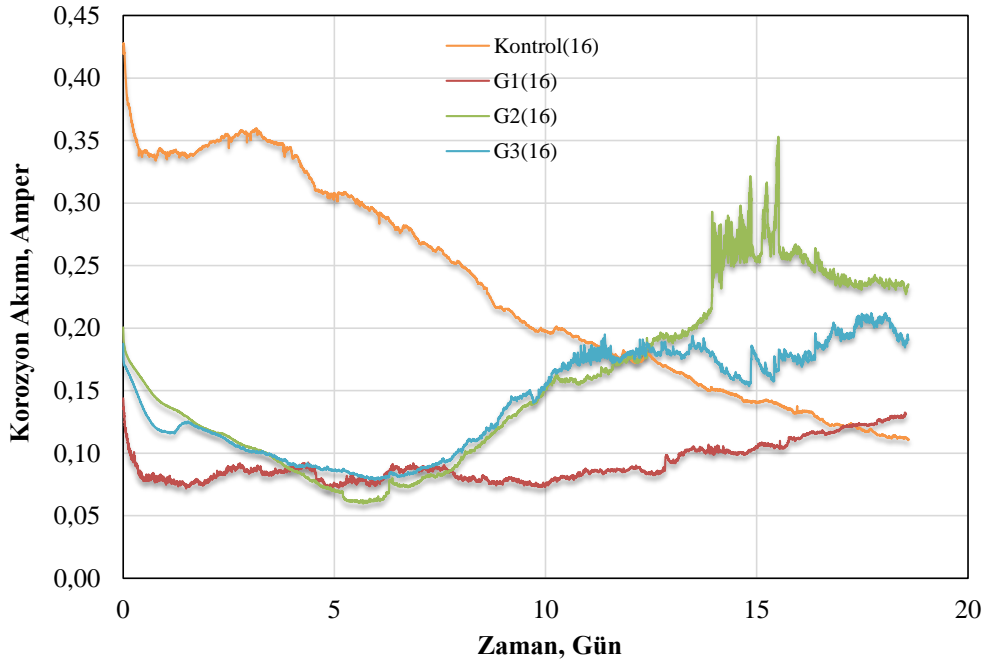
Normal betonlar ile uçucu küllü betonlar karşılaştırıldığında uçucu küllü betonlardan daha az ortalama korozyon akımı değerleri elde edilmiştir. Örneğin Kontrol(14) serileri incelendiğinde normal betonlarda 0.195 A ortalama korozyon akımı elde edilirken, uçucu küllü betonlarda 0.145 A ortalama korozyon akımı elde edilmiştir. Bu değerlerden de uçucu küllü betonların korozyona karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır.

Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9'daki gerçek ağırlık kayıpları incelendiğinde Kontrol(14) serilerinde oluşan ağırlık kayıpları %18.365 olarak bulunurken G2(14) serilerinde %17.347 olarak bulunmuştur. Bu ağırlık kayıpları normal betonlarda %23.110 ve %22.196 olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere uçucu küllü betonların içerisindeki donatılardan korozyon nedeniyle daha düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

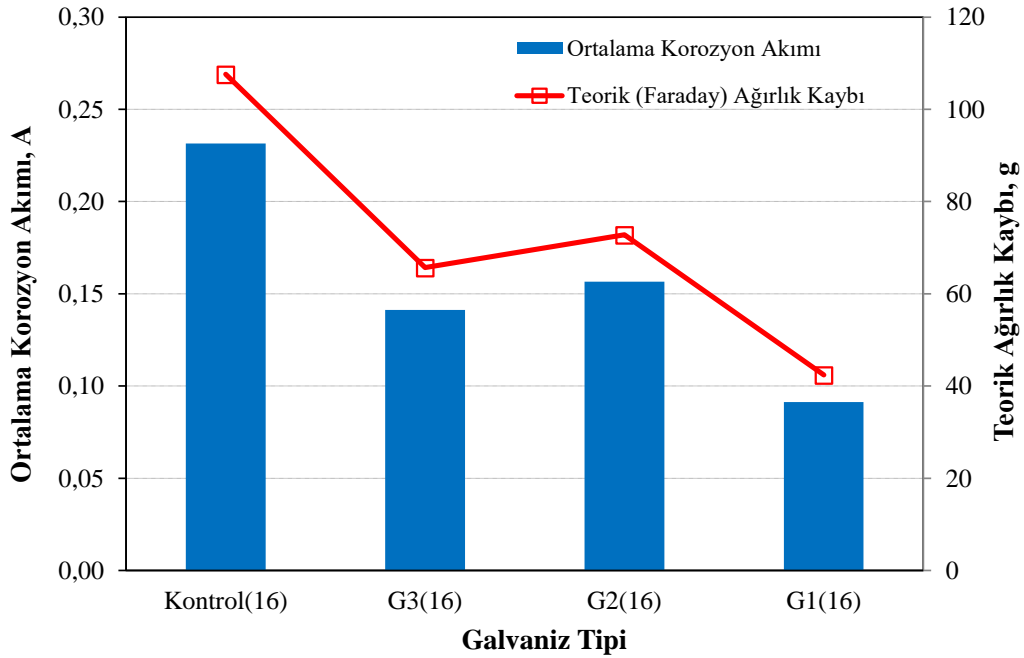


Şekil 4.9 Uçucu küllü betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi.

Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde en düşük akımlar G1(16) serilerinden elde edilirken en yüksek akımlar Kontrol(16) serilerinden elde edilmiştir. Korozyon akımı grafiklerinden görüldüğü üzere korozyona karşı en dayanıklı galvaniz kaplamanın G1(16) serilerinin olduğu sonucuna varılmıştır. Yine bu serilerin diğer galvaniz kaplama tiplerine göre daha yüksek oranda Alüminyum (Al) içermesinden dolayı korozyona karşı dayanıklılığının arttığı düşünülmektedir.

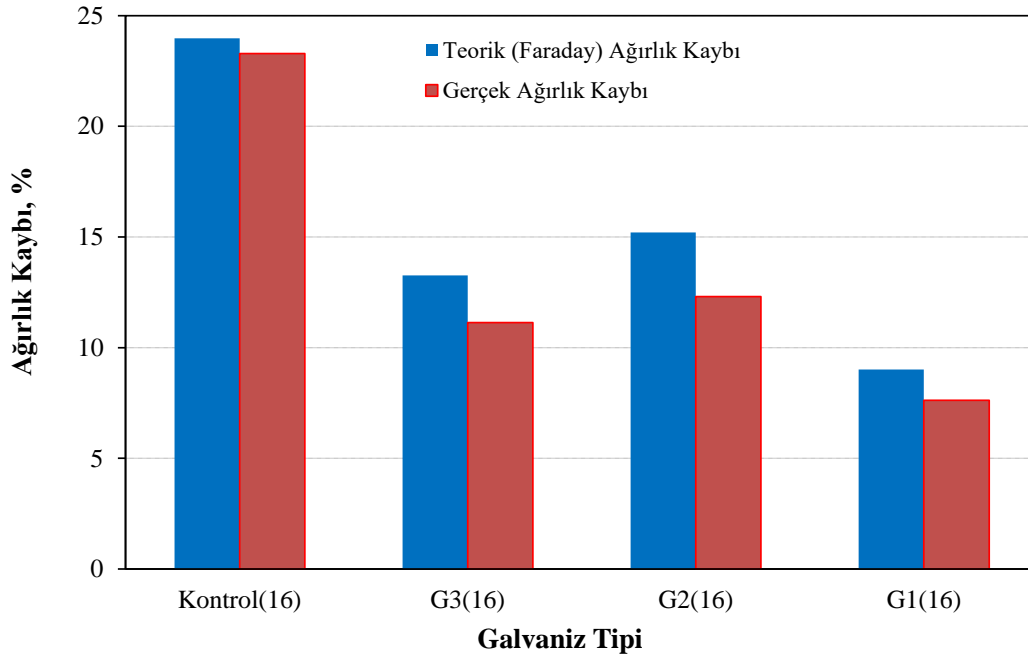


Şekil 4.10 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların korozyon akımlarının zamana göre değişimi.



Şekil 4.11 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi.

Şekil 4.11’de uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm’lik donatıların ortalama korozyon akımları ve teorik ağırlık kayıplarının galvaniz tipine göre değişimi verilmiştir. Normal betonlarda olduğu gibi uçucu küllü betonlarda da en düşük ortalama korozyon akımları G1(16) serilerinden elde edilmiştir. G1 tipi galvaniz kaplamanın korozyona karşı oldukça yararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Yine aynı şekilde G1(16) serilerinden en düşük teorik ağırlık kaybı değerleri elde edilmiştir. Normal betonlar ile uçucu küllü betonların çektikleri ortalama korozyon akımlarına göre karşılaştırıldığında, normal betonlarda Kontrol(16), G3(16), G2(16) ve G1(16) serileri sırasıyla 0.267, 0.230, 0.211 ve 0.145 A akım çekerken uçucu küllü betonlarda Kontrol(16), G3(16), G2(16) ve G1(16) serileri sırasıyla 0.231, 0.141, 0.157 ve 0.091 A akım çekmiştir.



Şekil 4.12 Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm’lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi.

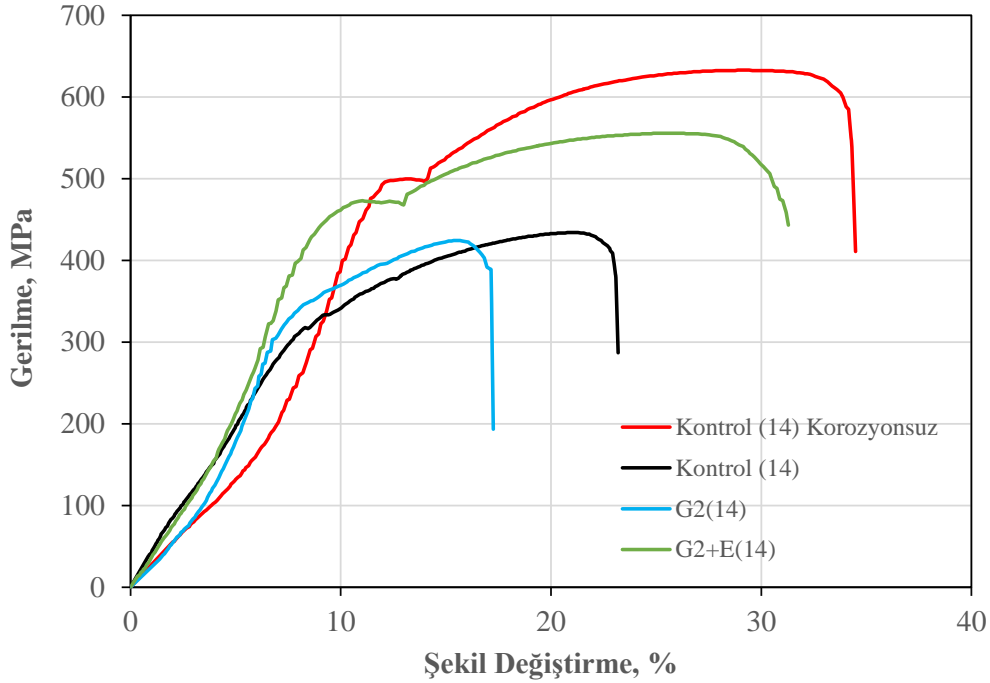
Uçucu küllü betondaki $\Phi 16$ mm’lik donatıların teorik ve gerçek ağırlık kaybı yüzdelerinin galvaniz tipine göre değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde normal betonlarda olduğu gibi gerçek ağırlık kayıpları teorik ağırlık kayıplarından daha az olarak elde edilmiştir. Kontrol(16) serilerinden gerçek ağırlık kayıpları %23.290 olarak elde edilirken G1(16) serilerinden % 7.622 olarak elde edilmiştir. Normal betonlar ile uçucu küllü betonlarda oluşan teorik ve gerçek ağırlık kayıpları incelendiğinde genel olarak uçucu küllü betonlardan daha düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

4.3 Donatı Çekme Deneyi Sonuçları

Hızlandırılmış korozyon deneyleri sonrasında HCl asit çözeltisi ile temizlenen donatılar üzerinde çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Normal ve uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratılan donatılardan elde edilen çekme dayanımı sonuçları aşağıdaki bölümde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4.3.1 Normal Betonların İçerisinde Korozyona Uğratılan Donatıların Çekme Deneyi Sonuçları

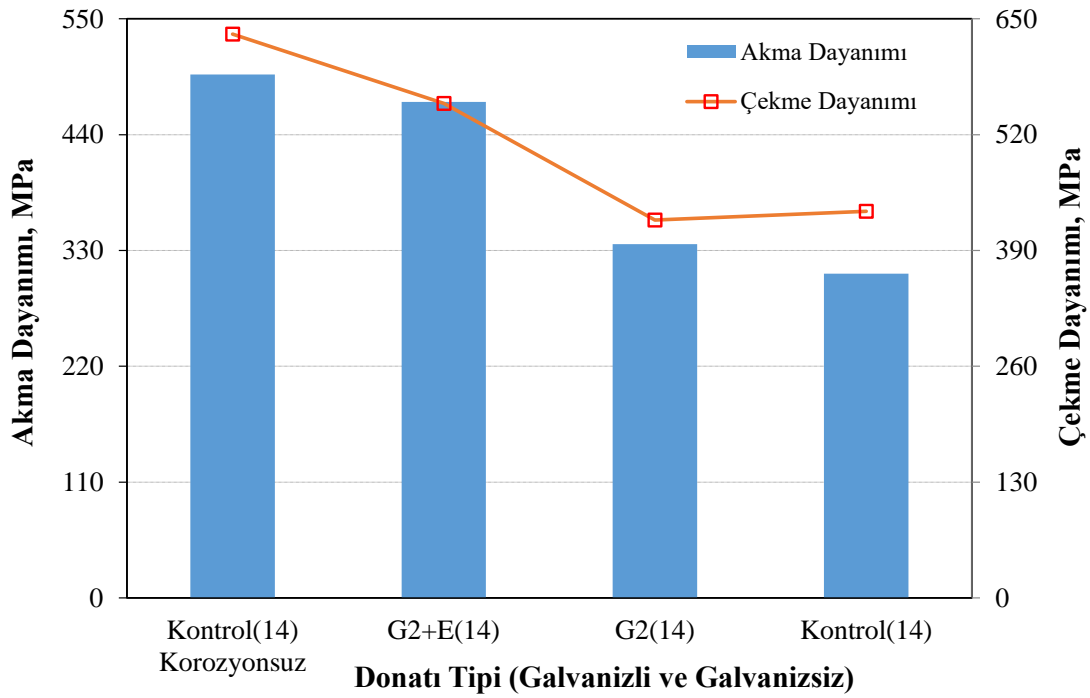
Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde korozyonlu donatıların akma dayanımlarının korozyonsuz donatıya göre azaldığı görülmektedir. Ancak çeliğin akma dayanımı karakteristik bir özellik olduğu için korozyon sonrası akma dayanımı değişmemelidir. Bu değişikliğin nedeni, korozyon çukurları sebebiyle korozyon sonrası donatı çapının belirlenememesi ve akma dayanımının orijinal çapa göre belirlenmesidir.



Şekil 4.13 Normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları.

Bu yüzden, korozyon nedeniyle ağırlık kaybı oluşan ve donatı çaplarının değiştiği serilerden elde edilen akma ve çekme dayanımları, korozyona uğratılmayan $\Phi 14$ mm'lik B420C donatısının akma ve çekme dayanımına göre daha az olarak elde edilmiştir. Bu azalma miktarları, donatının sabit akma dayanımı nedeniyle korozyona uğramış donatının çaplarındaki azalmalarla doğrudan ilişkilidir.

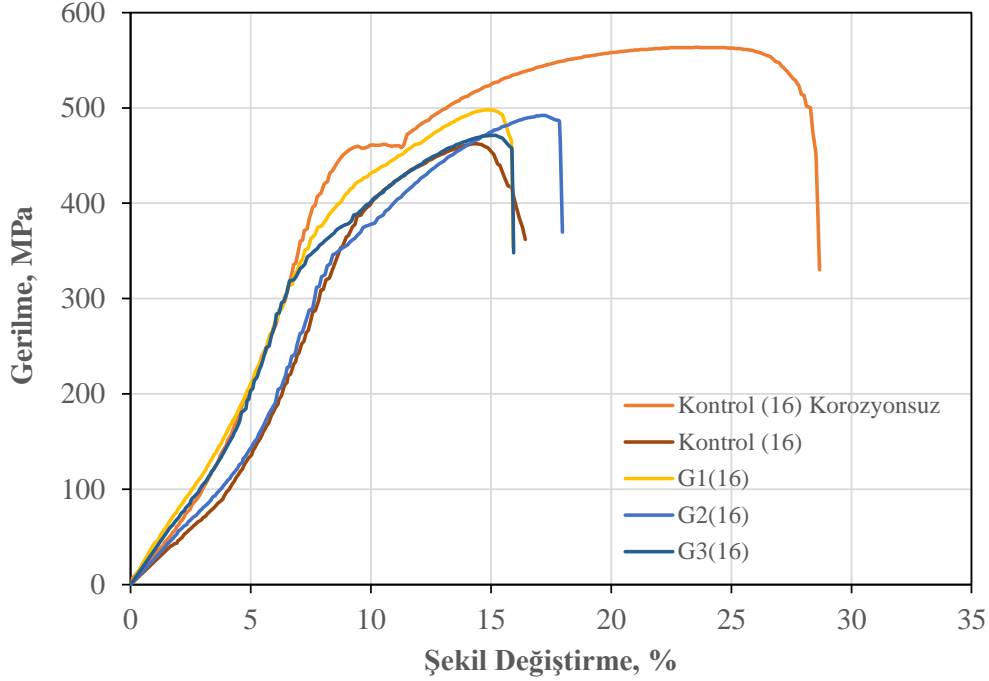
Şekil 4.13'den görüldüğü üzere galvaniz ve epoksi boya kaplı G2+E(14) serilerinden korozyona uğratılmayan serilere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Korozyona uğratılan Kontrol(14) ve G2(14) serilerinden daha düşük değerler elde edilmiş ve bu serilerde akma sahanlığının oluşmadığı görülmüştür. Ayrıca yine bu serilerden daha düşük şekil değiştirme değerleri de elde edilmiştir.



Şekil 4.14 Normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.

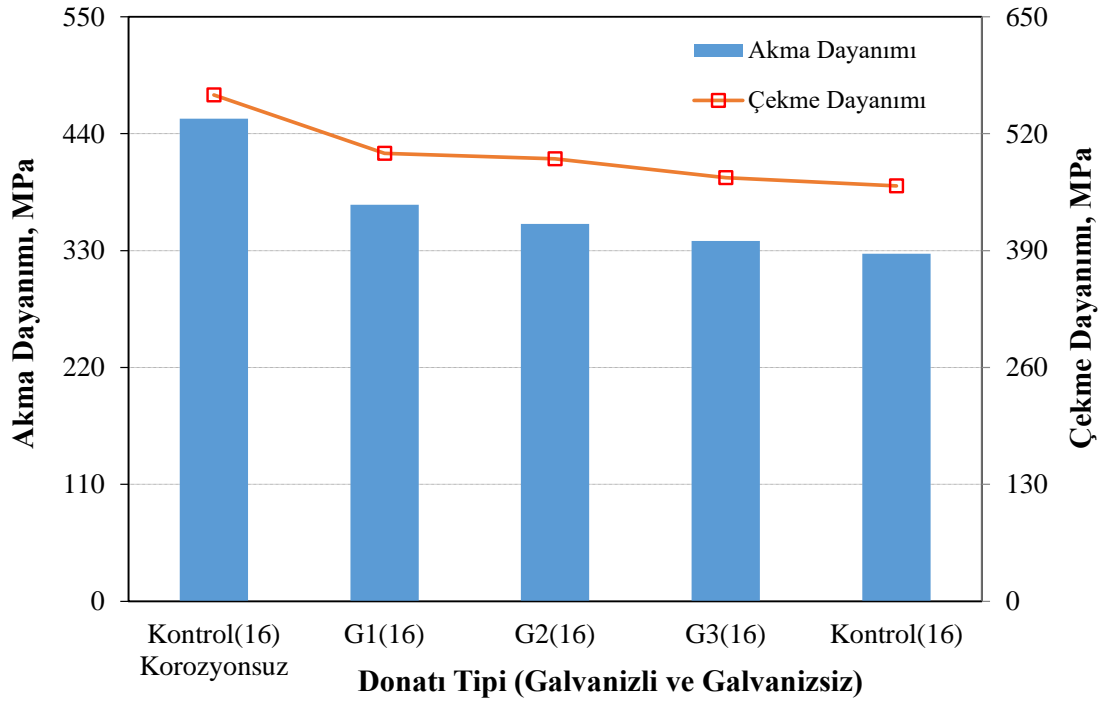
Normal betondaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14 incelendiğinde en yüksek akma ve çekme dayanımları korozyona uğratılmayan serilerden elde edilirken en düşük değerler galvaniz kaplama yapılmayan Kontrol(14) serilerinden elde edilmiştir.

Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Şekil 4.15 incelendiğinde korozyona uğratılan tüm donatıların şekil değiştirme değerlerinin azaldığı ve akma sahanlıklarının oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 4.15 Normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları

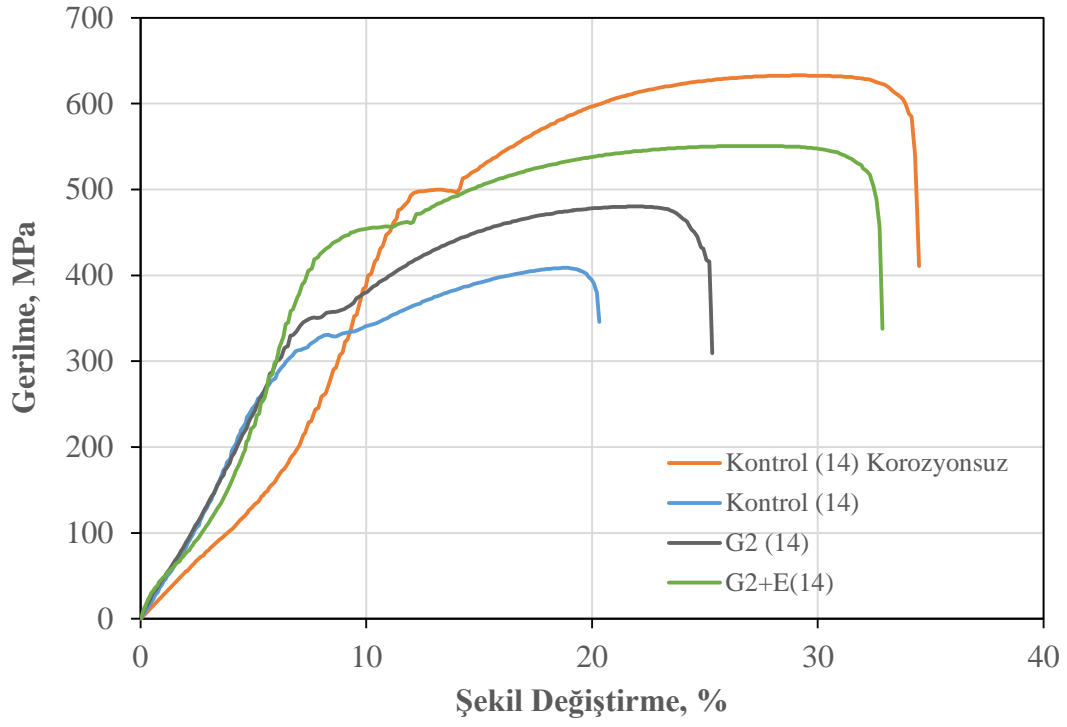
Normal betondaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde korozyona uğratılmayan Kontrol(16) serilerine göre diğer donatıların akma ve çekme dayanımlarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Korozyona uğratılan seriler içerisinde en yüksek akma ve çekme dayanımları galvaniz kaplı G1(16) serilerinden elde edilmiştir. Bu serilerden elde edilen akma ve çekme dayanımları sırasıyla 373 ve 498 MPa olarak bulunmuştur. En düşük akma ve çekme dayanımları ise Kontrol(16) serilerinden sırasıyla 327 ve 462 MPa olarak elde edilmiştir.



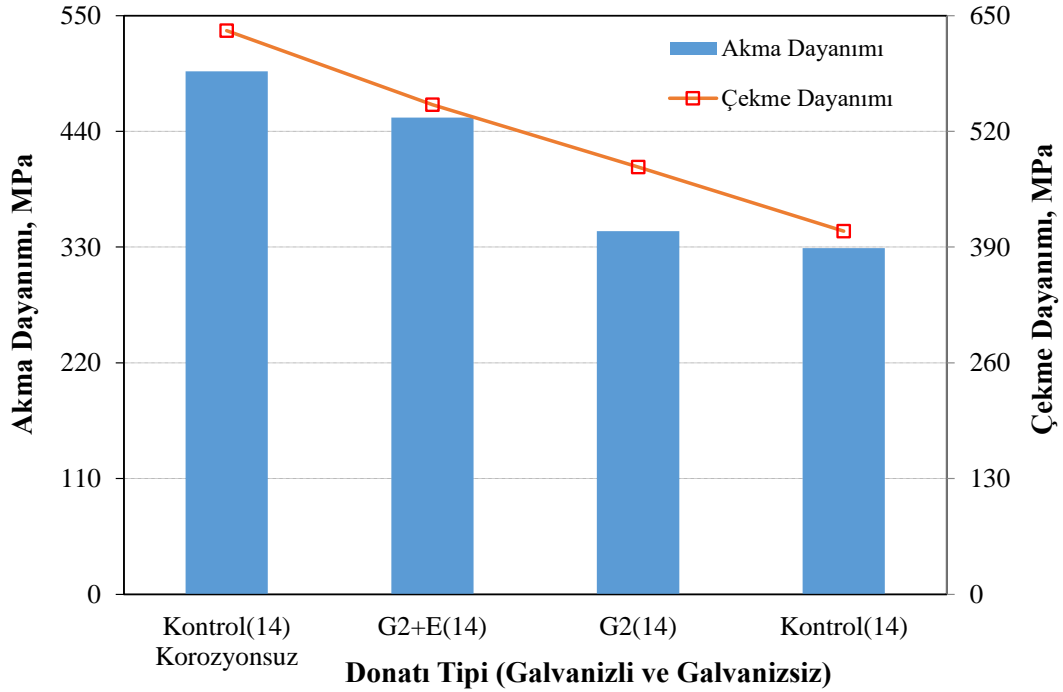
Şekil 4.16 Normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.

4.3.2 Uçucu Küllü Betonların İçerisinde Korozyona Uğratılan Donatıların Çekme Deneyi Sonuçları

Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratılan donatılardan korozyona uğratılmayan donatılara göre daha düşük akma ve çekme dayanımları elde edilmiştir. Kontrol(14) serilerinden en düşük akma ve çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Şekil 4.17'den de görüldüğü üzere korozyona uğrayan serilerden daha düşük şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Yani donatıların süneklik özelliklerinin azaldığı anlaşılmıştır. Korozyona uğratılan donatılardan en iyi sonuçlar G2+E(14) serilerinden elde edilirken bu seriyi G2(14) serileri takip etmiştir.

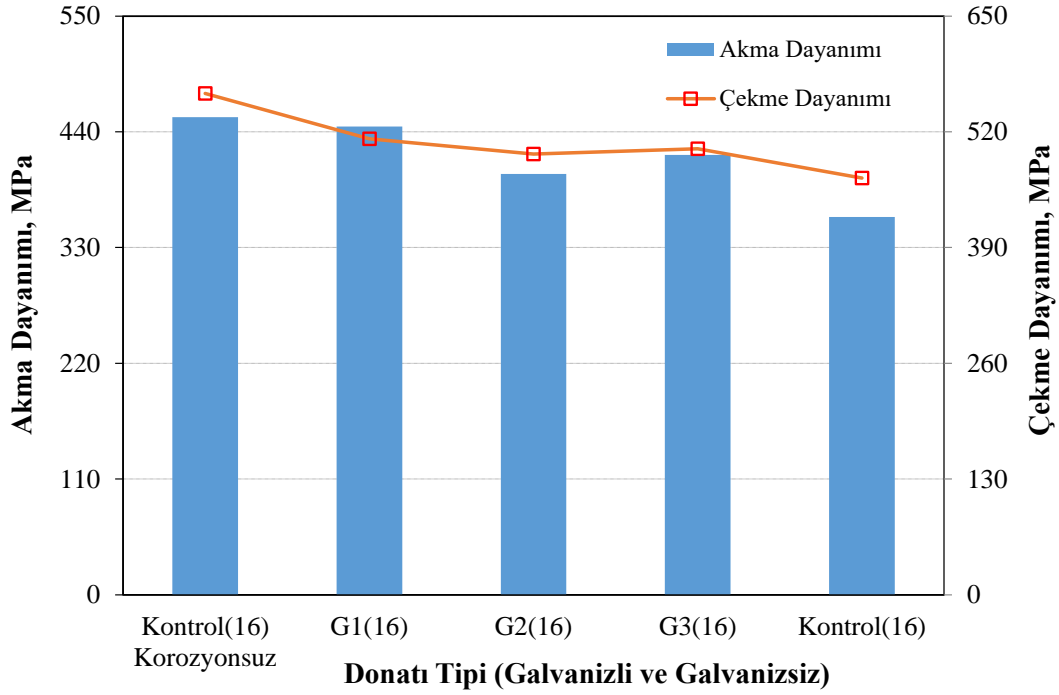


Şekil 4.17 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların gerime-şekil değişirme diyagramları.



Şekil 4.18 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.

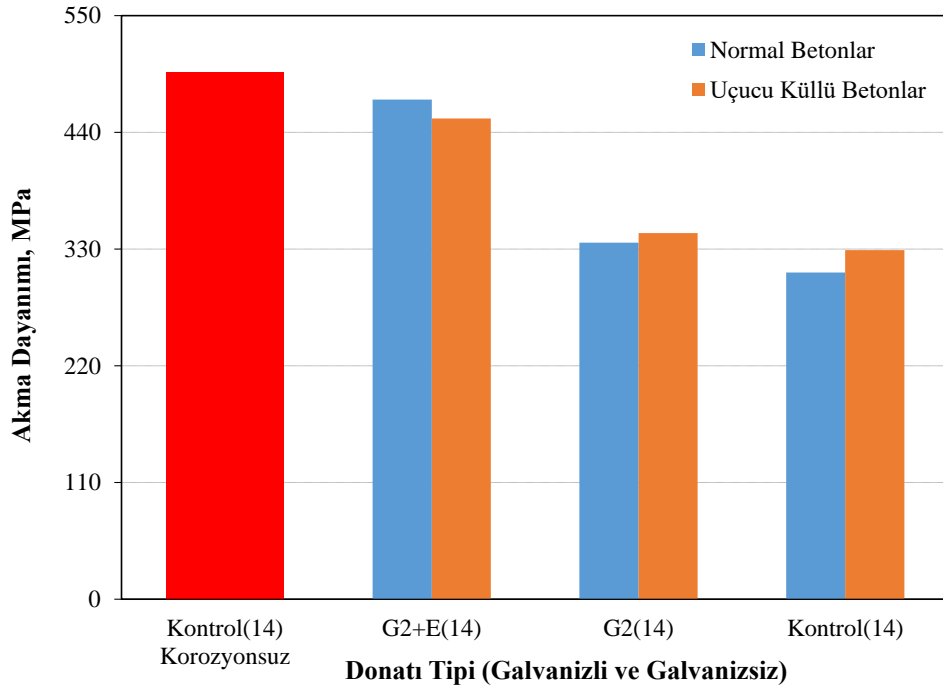
Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Korozyon uğratılan donatılar incelendiğinde G2+E(14) serilerinden 453 MPa'lık akma dayanımları elde edilirken galvaniz kaplı olmayan Kontrol(14) serilerinden 329 MPa'lık akma dayanımları elde edilmiştir. Kontrol(14) serilerinin akma dayanımları G2+E(14) serilerinin akma dayanımlarına göre % 27.37 oranında azalmıştır. G2(14) ve Kontrol (14) serilerinin akma dayanımları korozyona uğratılmayan Kontrol (14) serilerinin akma dayanımlarına göre sırasıyla % 30.58 ve 33.80 oranlarında azalmıştır. G2+E(14) serilerinde korozyon nedeniyle ağırlık kaybı oluşmadığından akma değerleri TS-708'de verilen sınır 420 MPa değerinden yüksek olarak elde edilmiştir. Diğer serilerden elde akma dayanımı sonuçları bu sınır değerinin altında kalmıştır.



Şekil 4.19 Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.

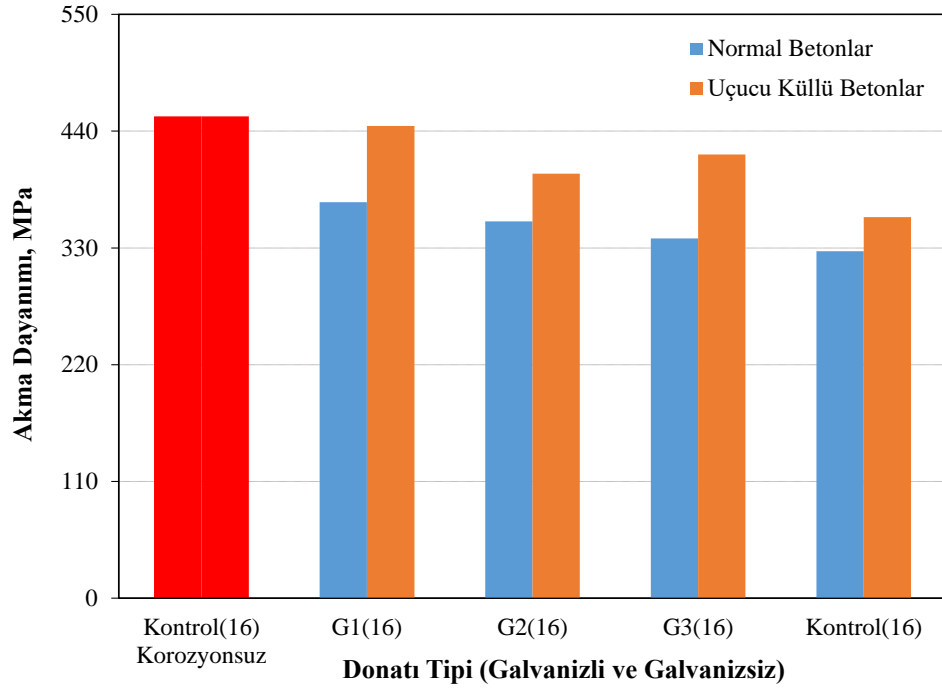
Uçucu küllü betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma ve çekme dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Şekil 4.19 incelendiğinde galvaniz kaplanmayan Kontrol(16) serilerinden en düşük akma ve çekme dayanımları elde edilmiştir. G2(16), G3(16) ve Kontrol(16) serilerinden elde edilen akma dayanımları TS708'de verilen sınır değerinin altında kalmıştır.

Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.20 genel olarak incelendiğinde uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratılan donatılardan daha yüksek akma dayanımları elde edilmiştir. Bu durum, uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratılan donatılardan korozyon nedeniyle daha düşük ağırlık kayıplarının elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.

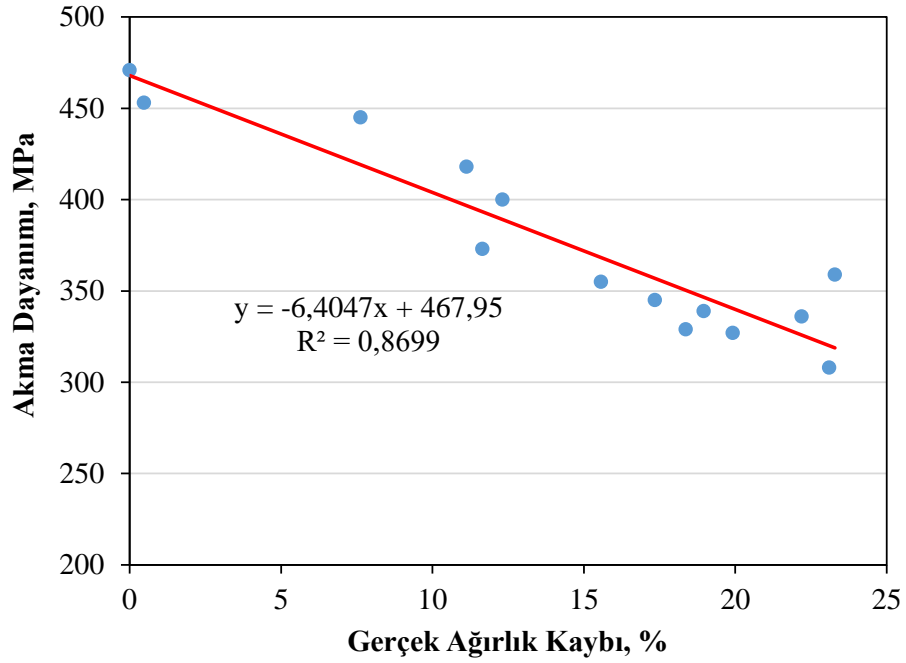


Şekil 4.20 Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 14$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.

Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekil 4.21'den görüldüğü üzere uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratılan donatılardan daha yüksek akma dayanımları elde edilmiştir. Uçucu küllü betonların klorür geçirimsizlikleri daha düşük olduğu için bu betonların içerisindeki donatılar daha az korozyona uğramıştır. Bunun sonucu olarak korozyon nedeniyle daha düşük ağırlık kayıpları elde edilmiş ve normal betonlara göre daha yüksek akma dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

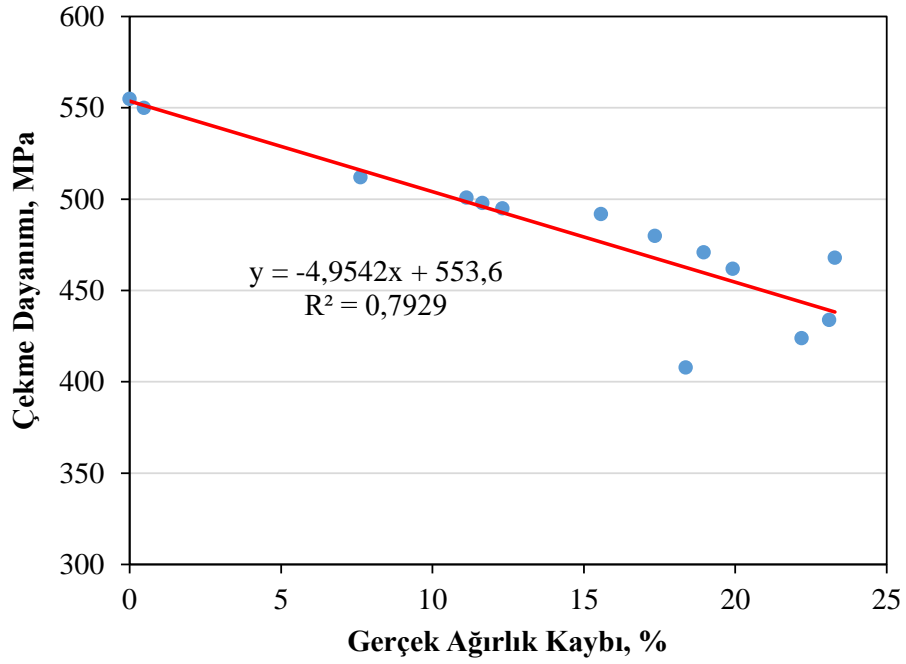


Şekil 4.21 Uçucu küllü ve normal betonlardaki $\Phi 16$ mm'lik donatıların akma dayanımlarının donatı tipine göre değişimi.



Şekil 4.22 Akma dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki.

Akma dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde gerçek ağırlık kayıplarının artışı ile birlikte akma dayanımı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Elde edilen korelasyon katsayısı değerinden de görüldüğü üzere gerçek ağırlık kayıpları ile akma dayanımları arasında kuvvetli bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.23 Çekme dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki.

Şekil 4.23’te çekme dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 4.23’ten görüldüğü üzere gerçek ağırlık kayıplarının artması ile akma dayanımlarında olduğu gibi çekme dayanımları da azalmıştır. Elde edilen korelasyon katsayısı değerinden de anlaşıldığı üzere çekme dayanımları ile gerçek ağırlık kayıpları arasında iyi bir ilişki vardır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı tiplerde galvaniz ile kaplanmış donatıların normal ve uçucu küllü betonların içerisindeki korozyon performansları ile ilgili yapılan tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler haline verilmiştir.

- Ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde UK15 serilerinden daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçtan uçucu kül kullanımı ile betonların daha boşluksuz bir yapıya sahip oldukları sonucuna varılmıştır.
- Basınç ve yarmada-çekme dayanımları incelendiğinde de UK15 serilerinden daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Uçucu kül kullanımı ile betonlarda ilave CSH jellerinin oluşumu ile birlikte beton basınç ve yarmada-çekme dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür.
- Klorür geçirimsizliği sonuçları incelendiğinde UK15 serilerinden daha düşük klorür geçirimsizliği sonuçları elde edilmiştir.
- Elektriksel özdirenç değerleri UK15 serilerinde daha yüksek olarak elde edilmiştir.
- Porozite ve su emme değeri sonuçları incelendiğinde uçucu kül katkılı serilerden daha düşük porozite ve su emme sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül kullanılması ile birlikte betonların daha boşluksuz ve geçirimsiz olduğu sonucuna varılmıştır.
- Galvaniz ve epoksi boya kaplı G2+E(14) serilerinden korozyon akımı elde edilememiştir. Bu numunelerde korozyon oluşmamıştır.
- Normal ve uçucu küllü betonlarda gerçek ağırlık kaybı sonuçlarına göre en yüksek ağırlık kaybı galvaniz kaplı olmayan Kontrol(16) serilerinden elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı galvaniz kaplı G1(16) serilerinden elde edilmiştir. G1 tipi galvaniz kaplamanın korozyona karşı oldukça yararlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu serilerin diğer galvaniz kaplama tiplerine göre daha yüksek oranda Alüminyum (Al) içermesinden dolayı korozyona karşı dayanıklılığı arttırdığı düşünülmektedir.
- Normal betonlar ile uçucu küllü betonlarda oluşan teorik ve gerçek ağırlık kayıpları incelendiğinde genel olarak uçucu küllü betonlardan daha düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir.

- Normal betonların içerisinde korozyona uğratan donatılarda genel olarak akma sahanlıklarının oluşmadığı görülmüştür.
- Normal ve uçucu küllü betonlarda en yüksek akma ve çekme dayanımları korozyona uğratılmayan serilerden elde edilirken en düşük değerler galvaniz kaplama yapılmayan Kontrol(14) ve Kontrol(16) serilerinden elde edilmiştir. Galvaniz kaplı serilerden ise en iyi akma ve çekme dayanımı sonuçları G1(16) serilerinden elde edilmiştir.
- Uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratan donatılardan genel olarak daha yüksek akma ve çekme dayanımları elde edilmiştir. Bu durum, uçucu küllü betonların içerisinde korozyona uğratan donatılardan korozyon nedeniyle daha düşük ağırlık kayıplarının elde edilmesinden kaynaklanmaktadır.
- Gerçek ağırlık kaybı değerlerinin artışı ile birlikte akma ve çekme dayanımlarının azaldığı sonucuna varılmıştır ve bu iki değer arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak donatıların galvaniz kaplanması ile birlikte korozyona karşı dayanıklılığın arttığı görülmüştür. Ayrıca uçucu küllü betonların içerisindeki donatıların daha az seviyede korozyona uğradıkları sonucuna varılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı kimyasal yapıdaki galvanizlerin korozyona karşı performanslarının araştırılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ahlström J, 2015, Corrosion of Steel in Concrete at Various Moisture and Chloride Levels, Rapport No:133, 78p.
- Ahmed S, 2003, Reinforcement corrosion in concrete structure, its monitoring and service life prediction-a review, Cement and Concrete Composite, 30, 459-471.
- Al-Negheimish A, Hussain R R, Alhozaimy A, Singh D D N, 2021, Corrosion performance of hot-dip galvanized zinc-aluminum coated steel rebars in comparison to the conventional pure zinc coated rebars in concrete environment, Construction and Building Materials, 274, Article number 121921.
- Andrade C, Macias A, 1987, Corrosion of galvanized steel reinforcement in alkaline Solutions, British Corrosion Journal, 22, 133-138.
- ASTM C 1202, 1997, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, ASTM, USA.
- Beh D, 2013, Corrosion Resistant Concrete using Corrosion Resistant Steel, The University of Utah, M.Sc. Thesis, 84p, Utah.
- Bellezze T, Malavolta M, Quaranta A, Ruffini N, Roventi G, 2006, Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars, Cement & Concrete Composites, 28, 246-255.
- Bellezze T, Timofeeva D, Giuliani G, Roventi G, 2018, Effect of soluble inhibitors on the corrosion behaviour of galvanized steel in fresh concrete, Cement and Concrete Research, 107, 1-10.
- Boğa A R, 2017, Harçların Mekanik ve Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Karbon Lifi ve Çelikhane Cürufu Kullanımının Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 1066-1075.
- Cedrim F A, Almeida V L S, Souzaa C A C, Limab P R L, Jesusa M D, Ribeiro D V, 2019, Corrodibility and Adherence of Reinforced Concrete Rebars Electroplated with Zinc and Zinc-Nickel Alloys, Materials Research, 22, Article number 20180915.
- Giorgi M L, Durighello P, Nicolle R, Guillot J B, 2004, Dissolution kinetics of iron in liquid zinc, Journal of Materials Science, 39, 5803-5808.

- Hamad B S, John A. Mike J A, 2005, Bond strength of hot-dip galvanized reinforcement in normal strength concrete structures, *Construction and Building Materials*, 19, 275-283.
- He J, Long G, Ma K, Xie Y, 2021, Influence of fly ash or slag on nucleation and growth of early hydration of cement, *Thermochimica Acta*, 701, Article number 178964.
- Hegyí A, Dicoa C, Constantinescu H, Baera C, 2017, Influence of Hot-dip Galvanizing of Reinforcement on the Kinetics and Thermodynamics of Corrosion Process in Concrete, *Procedia Engineering*, 181, 226-233.
- Hossain, K.M.A. and Lachemi, M., 2004, Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. *Cement and Concrete Res.*, 34, 695-702.
- Gürten, A.A., Kayakırılmaz, K. and Erbil, M., 2007, The effect of thiosemicarbazide on corrosion resistance of steel reinforcement in concrete, *Construction and Building Materials*, 21, 669–676.
- Marder A, 2000, The metallurgy of zinc-coated steel, *Progress in Materials Science*, 45, 191-271.
- Mejia G, 2003, Effect of supplementary cementing materials on the concrete corrosion control, *Revista de Metalurgia*, 39, 250-255.
- Molina F J L, Alonso M C A, Moreno M S, Centenero R J, 2017, Corrosion protection of galvanized rebars in ternary binder concrete exposed to chloride penetration, *Construction and Building Materials*, 156, 468-475.
- Ortolan V K, 2015, Comparative assessment of corrosion of concrete reinforced with unprotected steel and hot-dip galvanized steel, 16, 238-248.
- Pernicova R, Dobiasa D, Pokornya P, 2017, Problems connected with use of hot-dip galvanized reinforcement in concrete elements, *Procedia Engineering*, 172, 859-866.
- Pokorny P, Kolisko J, Balik L, Novak P, 2016, Effect of chemical composition of steel on the structure of hot – dip galvanized coating, *Metalurgija*, 55, 115-118.

- Pokorny P, Tej P, Kouril M, 2017, Evaluation of the impact of corrosion of hot-dip galvanized reinforcement on bond strength with concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 132, 271-289.
- Poursaee A, 2016, *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, Woodhead Publishing, 288P, Cambridge
- Shafei B, Alipour A, Shinozuka M, 2012, Prediction of corrosion initiation in reinforced concrete members subjected to environmental stressors: A finite-element framework, *Cement and Concrete Research*, 42, 365-376.
- Singh D D N, Ghosh R, 2008, Molybdenum-phosphorus compounds based passivator to control corrosion of hot dip galvanized coated rebars exposed in simulated concrete pore solution, *Surface & Coatings Technology*, 202, 4687-4701.
- Tan Z Q, 2007, *The Effect of Galvanized Steel Corrosion on the Integrity of Concrete*, The University of Waterloo, M.Sc. Thesis, 82p, Canada.
- Tan Z Q, Hansson C, 2008, Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete, *Corrosion Science*, 50, 2512-2522.
- Tittarelli F, Bellezze T, 2010, Investigation of the major reduction reaction occurring during the passivation of galvanized steel rebars, *Corrosion Science*, 52, 978-983.
- Tittarellia F, Mobilia A, Giosuea C, Bellia A, Bellezze T, 2018, Corrosion behaviour of bare and galvanized steel in geopolymer and Ordinary Portland Cement based mortars with the same strength class exposed to chlorides, *Corrosion Science*, 134, 64-77.
- TS 708, 2016, Çelik - Betonarme için-Donatı çeliği, Türk Standardı.
- TS EN 12390-3, 2019, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin, Türk Standardı.
- TS EN 12390-6, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standardı.
- TS EN 12504-4, 2004, Beton deneyleri: Ultrases geçiş hızının tayini, Türk Standardı.

TS EN 197-1, 2012, imento: Genel imentolar-Bileşim, zellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standardı.

TS EN 450-1, 2013, Uçucu kül-Betonda kullanılan: Tarif, zellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standardı.

Tuutti K, 1982, Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 469p, Stockholm.

Wang W, Chen H, Li X, Zhu Z, 2017, Corrosion behavior of steel bars immersed in simulated pore solutions of alkali-activated slag mortar, Construction and Building Materials, 143, 289-297.

Yeomans S R, 2016, Galvanized steel reinforcement, Poursae A (Ed.), Corrosion of Steel in Concrete Structures (111-129), Woodhead Publishing, 19P, Cambridge.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/corrosion-of-embedded-materials>, 17.06.2021
- 2- <https://gaa.com.au/coating-thickness-and-factors-influencing-thickness/>, 08.3.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hafız Muhammad Umer AMANAT
Doğum Yeri ve Tarihi : Pakistan, 17.01.1991
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : hm_umer76@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Sanwyk Grammer School
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, (2012-2018)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
(2018-2021)