

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARDA DONATI KOROZYONU DURUMUNUN
ALETSEL DEĞERLENDİRİLMESİ

CEM KILIÇOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. AZER A. KASIMZADE

SAMSUN - 2007

ÖZET

1950' li yıllara kadar betonarme yapılardaki çeliğin korozyona maruz kalması konusu üzerinde durulmamıştır. Betonda donatı korozyonu uluslar arası ilgi duyulan bir sorun olma özelliğini sürdürmektedir. Köprülerde, viyadüklerde, yollarda, park alanlarında ve deniz ortamına maruz betonarme yapılarında sıkça karşılaştığımız donatı korozyonu, sadece maddi değil sebebiyet verdiği yapısal risk sebebiyle aynı zamanda ciddi bir durabilite sorunudur. Türkiye bir deprem ülkesidir. 17 Ağustos 1999 Marmara depreminde betonarme yapılardaki yıkıcı etkisinde korozyonun varlığı önemli bir etkidir. Bu gerçeklerden yola çıkarak çalışmalarda, öncelikle yapıların deprem özelliklerinin tahribatsız tayini yöntemine ağırlık verilmelidir.

Bu çalışmada, yapının korozyon potansiyeline tahribatsız yöntemle; donatıların kütle kaybı elektrot potansiyelleri arasında karşılaştırılmaya gidilmiştir. Beş adet numunenin elektrot potansiyelleri: nemli ve nemsiz olmak üzere iki farklı ortamda ölçülmüştür. Korozyon ölçüm cihazı ile betonarme içindeki Donatıların üzerine temas edilerek her numune ayrı ayrı ölçülmüştür. Fiziksel gerçeklik nedeniyle kütle azalımı arttıkça negatif elektrot potansiyel değerleri, kütle değişimi olmamışsa elektrot potansiyel değerlerinin ASTM C 876 ya göre -200mV yaklaşması gerekmektedir. Bu gerçeklik nedeniyle ölçüm sonuçlarının regresyon analizinde doğrusal fonksiyon kullanılmıştır.

Bu çalışmada, donatıların kütle azalımı elektrot potansiyel değişiminin ölçülmesi sonucunda, bu iki parametrenin birlikte değişimi incelenmiş ve bu değişimin korozyonla ilişkisi bulunduğu yönünde güçlü bulgular ortaya konmuştur. Nemli ortamda, B7 donatısında yapılan ölçümde kütle kaybının -14 e karşılık elektrot potansiyeli -443 mV. D4 donatısında -1 kütle kaybına karşılık -368 mV olduğu ve nemsiz ortamda da aynı donatılarda aynı kütle kaybına karşılık -411 ve -352 mV ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Beton, betonarme korozyonu, elektrot potansiyeli

ABSTRACT

By the early 1950s, the problem of corrosion of steel used within reinforced concrete buildings was not studied. The subject of corrosion of steel in the concrete is still a hot topic to be studied on. The problem of corrosion in the reinforced concrete structures used for buildings, viaducts, roads, parking areas as well as buildings under the effect of sea on the coastal regions is not only a financial risk but also a durability problem. Turkey is located at an earthquake region. In the Marmara earthquake occurred in 17th August 1999 destructive effects seen in the reinforced concrete buildings had been the results of the corrosions. By taking into account these facts, the determination of the earthquake features of the buildings is the main idea by using non-destructive test methods in this study.

This study has been carried out with non-destructive electrical potential measurements; we have compared the weight loss and their corresponding electrical potential with the corrosion measurements, by touching the steels in the concrete structures, each sample's electrical potential has been measured separately. Five different specimens with/without moisture have been measured two different working conditions. Due to the physical reality when the weight loss increases, in case of no weight changing, negative electro potential values must approach to the value of -200mV according to the ASTM C 876 standard. Due to this assumption a linear trend function with a regression analysis is used for evaluation of the proposed technique. In this study, first the mass differences and electro potential change of the reinforcing steels have been measured and then these two parameters are examined. Finally, it is strongly concluded that there is a relationship between corrosion and these two parameters. In the moist environment mass loss is measured as -14 with an electro potential -443mV by using B7 equipment. The mass loss for the D4 equipment is measured as -1 with an electro potential -368mV and same measurements yields to -411 and -352 mV in the environment without moist.

Keywords: Concrete, corrosion of reinforcing steel, electrode potential

TEŐEKKÖR

Yapmıő olduėum yűksek lisans çalıőmasında; MF-046 nolu projeden aletsel ekipman saėlaması ve deėerli katkılarından dolayı Prof. Dr. Azer A. Kasımzade' ye teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

1	GİRİŞ	1
2	GENEL BİLGİLER	5
2.1	Elektrokimyasal Korozyon Teorisi	5
2.2	Termodinamik Açından Korozyon	7
2.3	Korozyon Hızı	10
2.4	Beton ve Betonarme Donatıların Korozyonu	11
2.4.1	Suyun Beton Üzerine Zararlı Etkileri	13
2.4.2	Suyun Çözücü Etkisi	14
2.4.3	Karbonik Asitli Suların Etkisi	14
2.4.4	Klorürlerin Etkisi	14
2.4.5	Betonlarda Sülfat Korozyonu	14
2.4.6	Deniz Suyunun Beton Üzerine Etkisi	15
2.4.7	Yeraltı Suyunun Etkisi	15
2.4.8	Alkali–Agrega Reaksiyonu	16
2.4.9	Sertleşmiş Beton Üzerine Don Etkisi	16
2.4.10	Pasifleşme ve Pasifliğin Bozuluşu	17
2.4.11	Pasifliğin Karbonasyon Etkisi İle Bozulması	17
2.4.12	Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi İle Bozulması	19
2.5	Beton Hasarlarını Belirleyen Deneyler	20
2.5.1	Donatı Üzerinde Bulunan Beton Kalınlığının (Pas Payı) Ölçülmesi	21
2.5.2	Karbonasyon Derinliğinin Ölçülmesi	21
2.5.3	Beton Klorür Yüzdesinin Tayini	22
2.5.4	Beton Rezivitesinin Ölçülmesi	24
2.5.5	Beton İçindeki Çatlak ve Boşlukların Belirlenmesi	26
2.6	Korozyonun Ölçülmesi	27
2.6.1	Potansiyel Ölçümü	27
2.6.2	Lineer Polarizasyon Rezistans	28
2.6.2.1	Potansiyostatik Olarak Polarizasyon Ölçümü	28

2.6.2.2	Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri (I)Üç Elektrot Yöntemi (II) İki Elektrot Yöntemi	29
2.6.3	AC Empedans Tekniği	31
3.	MATERYAL VE METOD	32
3.1	Donatı Çubukların Hazırlanışı ve Ağırlık Farklarının Hesaplanması	33
3.2	Donatıların Beton İçine Yerleştirilmesi ve Betonun Özellikleri	34
3.3	Korozyon Ölçüm Cihazı İle Numunelerin Ölçülmesi	37
3.4	Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	39
4.	BULGULAR	40
4.1	Donatı Çubukların Ağırlık Neticeleri	40
4.1.1	Numunelerdeki Donatı Çubukların M_5 Değişimi	41
4.2	Korozyon Ölçüm Cihazı İle Numunelerin Değerlendirilmesi	44
4.2.1	Numunelerde ki Korozyon Ölçüm Cihazı Sonuçları	44
4.2.1.1	Numunelerin Nemli ve Nemsiz Ortam Şartlarına Göre Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri	45
4.2.1.2	Her Bir Numunenin Nemli ve Nemsiz Şartlarda ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri ile M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişkiler	50
4.2.1.3	Tüm Numunelerin Nemli ve Nemsiz Şartlarda ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri ile M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişkiler	55
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	57
6.	KAYNAKLAR	59
7.	EKLER	61
EK-1	Donatı Çubukların Ağırlık Neticeleri	62
EK-2	Betonun Özellikleri	63
Özgeçmiş		64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Betonarme Donatı Üzerinde Oluşan Bir Korozyon Hücresi	6
Şekil 2.2	Betonarme Donatılarının Üniform Korozyonu	6
Şekil 2.3	Standart Elektromotor Kuvvet Serisi	7
Şekil 2.4	Donatı + Su Sistemi İçin Pourbaix Diyagramı	8
Şekil 2.5	Klorlu ve Klorsuz Ortamda Çeliğin Pasifleşme Eğrisi	10
Şekil 2.6	Karbonasyon Olayının Betonarme Donatılarına Etkisi	18
Şekil 2.7	Pasifliğin Karbonasyon Etkisi İle Bozulması	19
Şekil 2.8	Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi İle Bozulması	20
Şekil 2.9	Wenner Dört Elektrot Yöntemi İle Beton Rezistivitesinin Ölçülmesi	25
Şekil 2.10	Potansiyostatik Olarak Polarizasyon Ölçümü	29
Şekil 2.11	Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri	30
Şekil 3.1	Betonarme Yapılar Üzerinde Deprem Etkisi Avcılar 1999	32
Şekil 3.2	Deney Öncesi ve Sonrası Donatı Çubuklar	34
Şekil 3.3	Donatıların Beton Numuneye Yerleştirilmesi	35
Şekil 3.4	Donatıların Beton Numune İçindeki 3 Boyutlu Görünümü	36
Şekil 3.5	Donatıların Beton Numune İçindeki Görünümü	36
Şekil 3.6	Donatıların ölçüm yönleri	37
Şekil 3.7	Betonarme Donatıları Potansiyelinin Ölçülmesi	38
Şekil 3.8	Betonarme Numune Donatıların Potansiyelin Ölçülmesi	38
Şekil 4.1	Donatı Çubukların A Numunesindeki M_5 Değişimi	41
Şekil 4.2	Donatı Çubukların B Numunesindeki M_5 Değişimi	42
Şekil 4.3	Donatı Çubukların C Numunesindeki M_5 Değişimi	42
Şekil 4.4	Donatı Çubukların D Numunesindeki M_5 Değişimi	43
Şekil 4.5	Donatı Çubukların E Numunesindeki M_5 Değişimi	43
Şekil 4.6	A Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi	45
Şekil 4.7	A Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi	45
Şekil 4.8	B Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi	46
Şekil 4.9	B Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi	46

Şekil 4.10	C Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi	47
Şekil 4.11	C Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi	47
Şekil 4.12	D Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi	48
Şekil 4.13	D Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi	48
Şekil 4.14	E Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi	49
Şekil 4.15	E Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi	49
Şekil 4.16	A Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	50
Şekil 4.17	A Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	50
Şekil 4.18	B Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	51
Şekil 4.19	B Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	51
Şekil 4.20	C Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	52
Şekil 4.21	C Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	52
Şekil 4.22	D Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	53
Şekil 4.23	D Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki	53

VIII

- Şekil 4.24 E Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki 54
- Şekil 4.25 E Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki 54
- Şekil 4.26 Tüm Numunelerdeki Nemli Şartlarda Ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki 55
- Şekil 4.27 Tüm Numunelerdeki Nemli Şartlarda Ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki 56

TABLULAR LİSTESİ

Çizelge 1	Karbonik Asitli Suların Etkisi	14
Çizelge 2	Çeşitli Betonlarda Korozyonun Başlaması İçin Geçen Süreler	17
Çizelge 3	Beton Klorür Yüzdesinin Tayini	23
Çizelge 4	Karbonasyon ve Klorür Etkileri Altında Bulunan Beton Yapılarda Betonarme Donatılarının Korozyon Riski	23
Çizelge 5	Beton İçinde Bulunan Klorür Konsantrasyonuna Göre Betonarme Donatılarının Korozyon Riski	24
Çizelge 6	Karbonasyon ve Klorür Etkileri Altında Bulunan Beton Yapılarda Betonarme Donatılarının Korozyon Riski	26
Çizelge 7	LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri	30
Çizelge 8	Potansiyel ölçümlerine ilişkin ASTM C 876 kriterleri	38

1. GİRİŞ

1950' li yıllara kadar betonarme yapılardaki donatının korozyona maruz kalması konusu üzerinde durulmamıştır. Betonda donatı korozyonu uluslararası ilgi duyulan bir sorun olma özelliğini sürdürmektedir. Köprülerde, viyadüklerde, yollarda, park alanlarında ve deniz ortamına maruz betonarme yapılarında sıkça karşılaştığımız donatı korozyonu, sadece maddi değil sebebiyet verdiği yapısal risk sebebiyle aynı zamanda ciddi bir durabilite sorunudur [1]. Türkiye bir deprem ülkesidir. 17 Ağustos 1999 Marmara depreminde betonarme yapılardaki yıkıcı etkisinde korozyonun varlığı önemli bir etkidir. Alınan karot numunelerde ve saha gözlemlerinde beton yapımında denizel kökenli malzemeler klor iyonlarının varlığını hızlandırmıştır [2]. 1999 yılı içindeki depremler, 20.000'den fazla can kaybına neden olurken, yaklaşık 100.000 civarında binada ağır ve orta hasara yol açmış, bunun yanı sıra sanayi tesislerinde çok önemli maddi kayıplara yol açmıştır. Deprem sonrasında, Sakarya'da yapılan beton dayanımlarının test sonuçlarında beton kalitesinin çok düşük olduğu, ilgili numunelerin %55' den fazlasının en düşük beton sınıfı C 14 dayanımını dahi sağlamadığı ve kalitesiz olduğu görülmüştür. Bu kalitesiz beton sınıflarının ise su/çimento oranının yüksekliği ve geçirimsizliğinin yüksek olması nedeniyle korozyona maruz kalma riski artmaktadır [3]. Bu gerçeklerden yola çıkarak ülkemizde tüm yönetmeliklere ve denetimlere rağmen kalitesiz malzeme kullanımı yaygındır. Düşük kalitedeki malzemelerin korozyonu hızlandıracaktır. Yapısal yalıtım ve drenaj eksikliği de, binalarda her ne kadar ciddi hasarlara yol açmasa da, binanın kullanım ömrünü kısaltan rutubet ve korozyona neden olmuş, bu nedenle donatılarda paslanmalar, örtü betonda çatlamlar meydana gelmiştir. İnsan yaşamını da olumsuz etkileyen rutubet ve korozyon, binada kullanılan donatıları da etkilemiş, donatıların paslanmasıyla birlikte yapısal elemanların taşıma kapasitesi olumsuz yönde etkilenmiştir [4].

Betonda donatı üzerinde oluşan oksit tabakasını bozmak suretiyle donatı korozyonuna sebebiyet veren temel iki unsur klor iyonlarının mevcudiyeti ve betonun karbonasyonudur [1]. Özellikle klor iyonlarının yoğun olarak mevcut

olduğu ortamlara maruz betonarme yapılar için bu riskin çok daha ciddi olduğu teknik literatür de aynı araştırmacılar tarafından rapor edilmektedir. Öyle ki, hizmet ömürleri 50 ile 100 yıl olarak projelendirilen bu yapıların 10 yıldan daha kısa bir süre sonunda onarılarak iyileştirmelerinde gereksinim duyulduğu ve çoğu zaman 15 ile 20 yılsonunda yenileri ile değiştirildiği belirtilmektedir [15]. Sahile yakın köprülerde yapılan çalışmalarda korozyon hasarların daha fazla olduğu ve bakım onarım masraflarının yapının maliyetine yaklaştığı ve koruma yöntemleriyle sorunlar giderilmeye başlanmıştır [6].

Betonda donatı korozyonunun tespitinde yöntemlerin yapıya etkisi açısından tahribatlı ve tahribatsız olarak değerlendirmek gerekmektedir. Hasarlı tespitler betonda karot yardımıyla alınan numunelerdir. Bu yöntem sonunda yapıda kalıcı hasarlar oluşmaktadır. Hasarsız tespitler ise; bu konu için yapılan çalışmalar laboratuvar ve yerinde deneyler olarak ana iki yöntem olarak ayrılmaktadır. Betonda ki donatı korozyonu hasarlarını belirlemede yapının özelliğine göre yerinde deneyler çok önemli yer tutmaktadır. Ayrıca deneylerde yapılan küçük deney örnekleri ile sahada yapılan yerinde deneyler arasında yapının büyüklüğu nedeniyle güçlükler çıkmaktadır [7]. Bunun nedeni yapıların özelliğine göre köprü, büyük yapılar gibi çeşitlilik göstermesi ve korozyon durumunu yapının taşıyıcılığına ve fonksiyonelliliğini tehdit eden ve tehlikeye iten en önemli etkinin donatı korozyonlu orijinli olduğu açıktır [6].

Bu konuda sorunun çözüme katkı mühendislik yapısının özelliklerine göre çeşitli teknikler ve metotlar geliştirilmektedir. Bu konuda ölçülen değerlerin hesaplanmasında çok çeşitli metotlar uygulanmaktadır. Genel olarak alınan sonuçlar istatistiksel korelasyona gidilmiştir. Betonda donatı korozyonu elektrot korozyon tekniği ile hızlandırılan beton içindeki donatıların aderansı üzerinde yapılan çalışmalarda hem klasik rijitlik hem de sonlu elemanlar metoduyla karşılaştırılarak sonuca varılmıştır [8]. Korozyon hasarlarını belirleyen yöntemler içinde yapay sinir ağları da kullanılmaktadır. Bu yöntemle yapılan çalışmada tespitte %5 kadar yaklaşılmıştır [9].

Uluslararası ilgi duyulan betonda donatı korozyonu ile ilgili elektrokimyasal teknikler, betonda donatı korozyonu aktivitesi ile ölçüm yapıldığı anda korozyon hakkında fikir veren tekniklerdir. Ölçülen korozyon hızı kesin bir değer olmaktan ziyade korozyon hızının mertebesi ile ilgili bir büyüklüktür [1]. Bu konuda en yaygın yöntemler; harmonik analiz, tekrarlı voltmetre, elektrokimyasal gürültü potansiyel ölçümü, lineer polarizasyon rezistans, ultrasonik ve AC empedans tekniğidir [1, 10].

Bu yöntemler arasında son yıllarda en yaygın olanları, AC empedans, lineer polarizasyon rezistans ve potansiyel ölçümüdür. AC empedans tekniği özellikle empedansın yüksek olduğu veya iletkenliğin çok düşük olduğu ortamlarda donatı/beton ara yüzeyine ilişkin polarizasyon rezistansı ile kapasitans karakteristikleri hakkında sağlar [1]. Bu teknik laboratuvar tekniği olması, empedans ölçümünde kullanılan cihazın oldukça kompleks ve pahalı olması ve arazi için uygun olmaması yöntemin dezavantajıdır. Lineer polarizasyon rezistans tekniği ise daha basit, hızlı, ölçümün birkaç dakikada alınabilirliği, hasarsız olması, yerinde kullanılabilirliği ve AC empedansa göre daha ekonomik olması önemli avantajıdır. Bu tekniğin bir kısmı kendine özgü ve bir kısmı deneysel koşullarla ilgili bazı dezavantajları vardır. Potansiyel ölçümü sayesinde beton yüzeyinde pas lekeleri, çatlama ve parçalanma gözle görülür hale gelmeden önce donatının korozyonun aktivitesini gözlemlemek mümkündür. Bu yöntem son derece basit, diğer yöntemlere çok ekonomik, hasarsız ve yerinde uygulanabilen bir yöntemdir. Yöntemin bilimsel olarak doğrulanması oldukça güçtür ve yorumu dikkat ister [7, 8, 9, 11, 12, 13].

Ülkemizin depremselliği yapıların denetimsizliği ve kötü malzeme kullanımı sonucunda betondaki donatı korozyonunun ölçülmesinin yerinde, hızlı ve uzman kontrolünde olması gerekmektedir. Betonda donatı korozyonu ile donatının kütle kaybı arasında ilişkiyi ise yeterli araştırılmamış, bu konudaki araştırmalar yöntem olarak; hazırlanan donatılara klorit, karbonasyon ve nitrojen ortamlarında ölçüm yapılmış ve metot olarak da lineer polarizasyon rezistans seçilmiştir [11]. Betonda ki donatıların korozyon nedeniyle kütle kaybetmesi

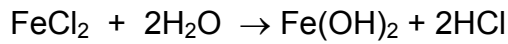
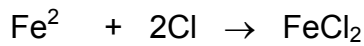
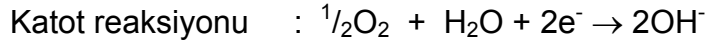
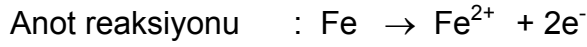
deprem sırasında yapıda kalıcı hasarlar bırakır. Kütleye kaybının ve bunun göstergesi olarak korozyon potansiyellerindeki beklenen düşme arasında bir korelasyona gidilmesinin hızlı, yerinde ve ülkemizin ekonomik gerçekleri de göz önüne alındığında kullanılan cihazın taşınabilir ve ucuz olması bu yöntemin tercih edilmesinde etkindir. Bu konuda ise Prof. Dr. Azer A. Kasımcı'nın sorumluluğundaki OMÜ' de ki MF-046 nolu proje kapsamında çalışmalar yapılmıştır.

2-GENEL BİLGİLER

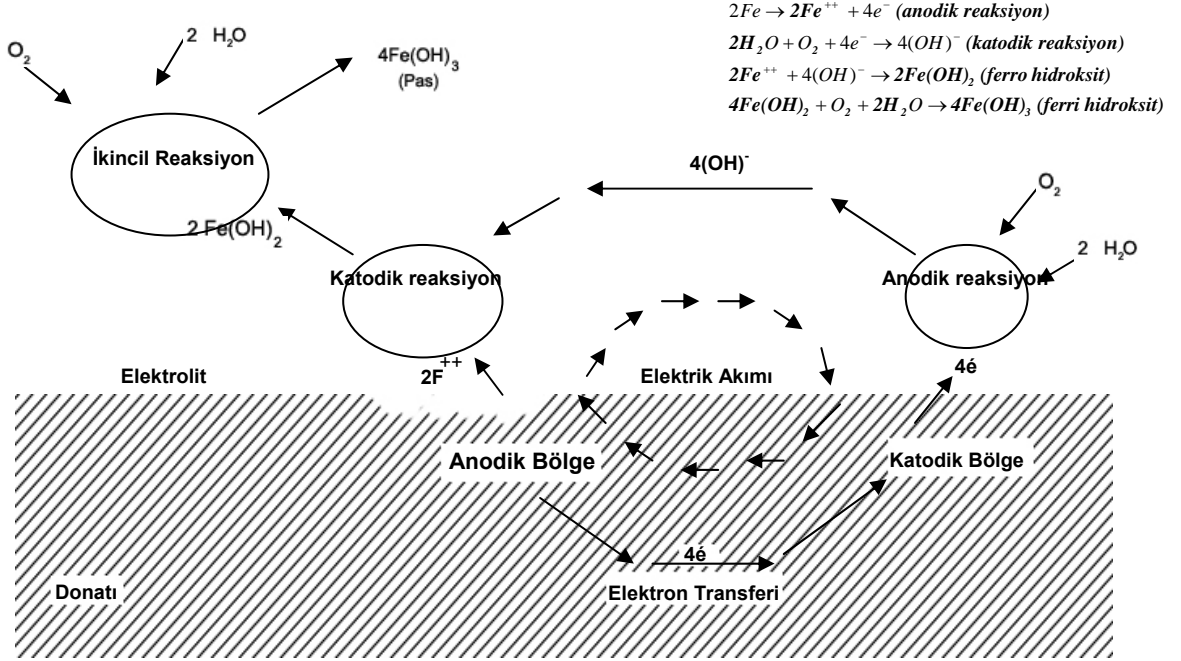
2.1 Elektrokimyasal Korozyon Teorisi

Korozyon reaksiyonları yukarıda açıklandığı üzere korozyon olayları korozyon hücrelerinin anot ve katodunda aynı anda meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile yürür. Beton gibi alkali özellikte olan elektrolitler içinde donatı korozyonu sonucu aşağıdaki reaksiyonlar ile pas oluşur [14].

Korozyon olayı biri anotta oksidasyon, diğeri katotta redüksiyon şeklinde aynı anda yürüyen iki elektrokimyasal reaksiyondan oluşur. Korozyonun yürümesi için mutlaka iki ayrı metalin bulunması şart değildir. Korozyon, bir metal yalnız başına elektrolit içinde bulunurken de meydana gelebilir. Korozyon reaksiyonları altta verilmiştir [15, 16].

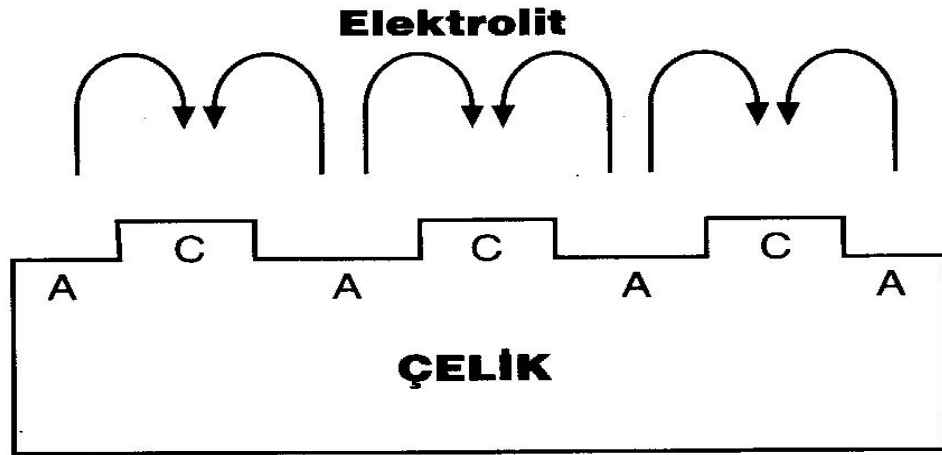


Şekil 2.1' de korozyon teorisi hücre detayında verilmiştir.



Şekil 2.1 Betonarme donatı üzerinde oluşan bir korozyon hücresi [14]

Betonarme donatılarının üniform korozyonu Şekil 2.2' de (A): anodik bölgeleri (C): katodik bölgeleri, oklar akım yönünü göstermektedir.



Şekil 2.2 Betonarme donatılarının üniform korozyonu [15]

Bu tür korozyon sonucu metal kalınlığı her kesitte aynı büyüklükte azalacağı için üniform yapıdaki korozyon en az tehlike yaratan bir korozyon türüdür. Ne var ki, elektrolit içinde yürüyen korozyon olaylarında, klorür konsantrasyonunun artması ve oksit filminin kırılması gibi beklenmeyen etkiler, yüzeyin bazı bölgelerinin makro büyüklükte anot olması ve bu bölgelerde şiddetli korozyon olayının meydana gelmesine sebep olabilir. Betonarme donatılarının korozyon hızı olarak donatı yüzeyinde oluşan pasif oksit tabakasının kararlılığına bağlıdır. Eğer bu tabaka geçirimsiz koruyucu bir yüzey oluşturursa reaksiyon hızı çok yavaş olacaktır. Bununla birlikte eğer oksit tabakası geçirimli bir yapıda ise pasif tabakanın bozulmuş olduğu bölgelerde çukur tipi şiddetli korozyon olayı meydana gelir [14].

2.2 Termodinamik Açından Korozyon

Korozyon olayının ve genelde her kimyasal reaksiyonun kendiliğinden yürüyüp yürüyemeyeceği termodinamik yöntemlerle kesin olarak belirlenebilir. Standart elektromotor kuvvet serisi Şekil 2.3' de verilmiştir.

Elektrot Reaksiyonu	Standart elektrot potansiyeli, (oksidasyon) 25°C, Volt
$K \rightarrow K^+ + e^-$	+2,92
$Ca \rightarrow Ca^{2+} + e^-$	+2,87
$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	+2,71
$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2 e^-$	+2,34
$Al \rightarrow Al^{3+} + 3 e^-$	+1,67
$Ti \rightarrow Ti^{3+} + 3 e^-$	+1,37
$Mn \rightarrow Mn^{2+} + 2 e^-$	+1,05
$Cr \rightarrow Cr^{2+} + 2 e^-$	+0,91
$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2 e^-$	+0,76
$Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3 e^-$	+0,71
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2 e^-$	+0,44
$Cd \rightarrow Cd^{2+} + 2 e^-$	+0,40
$Co \rightarrow Co^{2+} + 2 e^-$	+0,28
$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2 e^-$	+0,25
$Sn \rightarrow Sn^{2+} + 2 e^-$	+0,14
$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2 e^-$	+0,13
$Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3 e^-$	+0,037
$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2 e^-$	0,00
$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2 e^-$	- 0,337
$2Hg \rightarrow Hg_2^{2+} + 2 e^-$	- 0,780
$Hg \rightarrow Hg^{2+} + 2 e^-$	- 0,851
$Ag \rightarrow Ag^+ + e^-$	- 0,799
$2Cl^- \rightarrow Cl_{2(g)} + 2 e^-$	- 1,360
$Au \rightarrow Au_3^{2+} + 3 e^-$	- 1,500

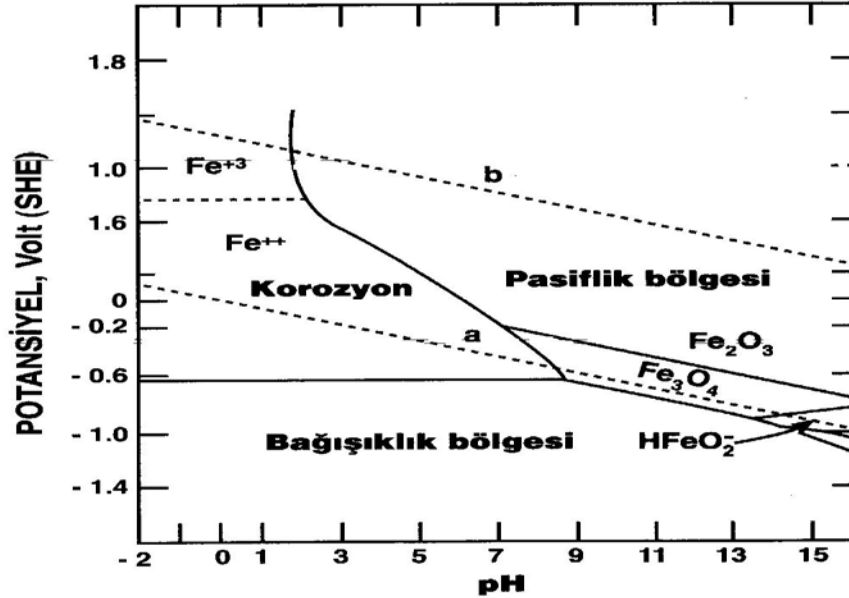
Şekil 2.3 Standart elektromotor kuvvet serisi [15]

Potansiyel-pH diyagramları yukarıda açıklanmış olan termodinamik yöntemlerle bir metalin sulu çözeltiler içinde korozyon bakımından aktif veya pasif halde olduğu çözeltinin pH derecesi ve metalin çözelti içindeki elektrot potansiyeli grafiğe geçirilerek kesin şekilde belirlenebilir. İlk olarak Marcel Pourbaix tarafından ortaya koyulan bu (E-pH) diyagramları "Pourbaix diyagramları" olarak bilinir. Bütün metaller için özel Pourbaix diyagramları hazırlanmıştır. Bu diyagramlar olası kimyasal reaksiyonlar göz önüne alınarak, her bir bileşenin kararlı halde olduğu bölgeler termodinamik yöntemlerle belirlenerek hazırlanır. Bölgeler arasındaki sınır çizgileri Nernst Denklemi yardımı ile belirlenir [14].

Donatı + Su sistemi için Pourbaix Diyagramı Şekil 2.4' de görülmektedir. Donatı su içinde çözünen olası iyonları ve katı haldeki korozyon ürünleri şunlardır;

İyonlar : Fe^{2+} , Fe^{3+} , $HFeO_2^-$

Katı ürünler : FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ [15]



Şekil 2.4 Donatı + Su Sistemi İçin Pourbaix Diyagramı [15]

Diyagramda donatının sulu çözeltiler içinde korozyon durumunu belirleyen üç bölge vardır.

1-Korozyon bölgeleri:

Potansiyelin -0, 62 Volt' dan (SHE) daha pozitif ve pH' ın 9' dan küçük olduğu bölge donatı, Fe^{2+} ve Fe^{3+} iyonları oluşturarak korozyona uğrar. Bölgenin alt kısımlarında donatı-2, üst kısımlarında donatı-3 iyonları stabildir. Diğer korozyon bölgesi, potansiyelin -0, 80 Volt ile -1, 2 Volt arasında ve pH' ın 13'den büyük olduğu dar bir aralıktır. Bu bölgede donatı ferrit iyonu halinde korozyona uğrar.



2-Bağışıklık bölgesi:

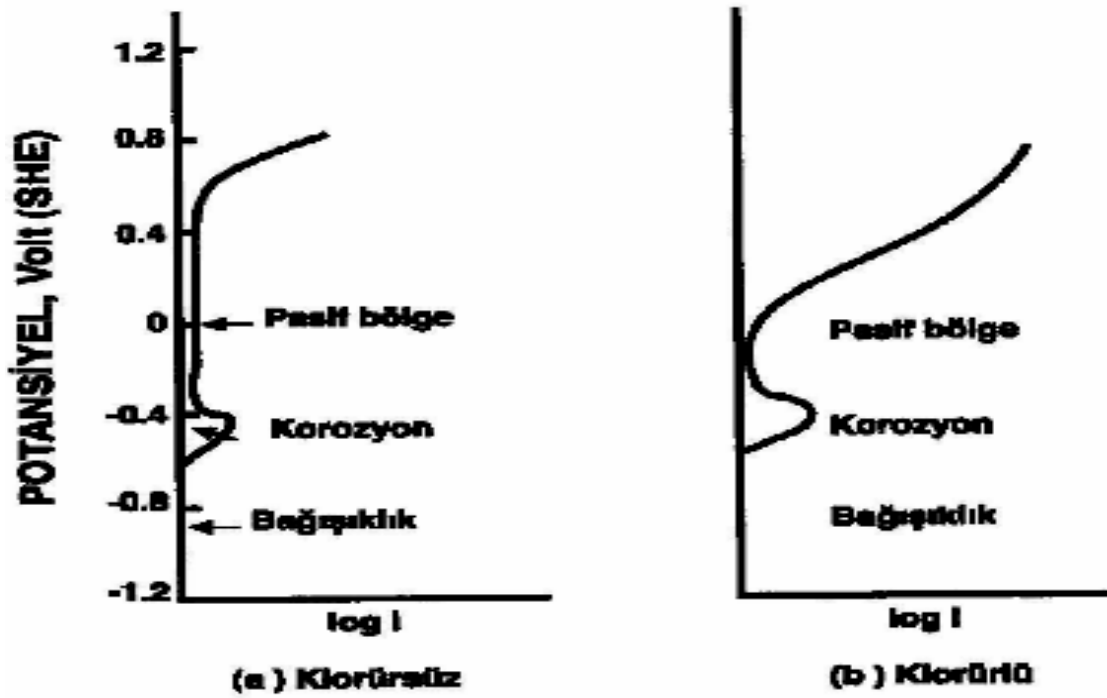
Donatı -0, 62 Volt' dan daha negatif potansiyelde iken termodinamik olarak stabil haldedir. Bu bölgede donatı korozyona uğramaz. Potansiyel bu bölgede tutunabilirse donatı katotik olarak korunmuş olur. Hidrojen elektroda göre -0, 62 olan bu potansiyel değeri doymuş bakır/bakır sülfat referans elektrodu ile -0, 850 volt'a karşı gelir, bu değer donatı ve çeliğin katotik korunmasında kriter olarak kullanılır.

3-Pasiflik bölgesi:

Bu bölgede donatı yüzeyinde Fe_3O_4 veya Fe_2O_3 oksitleri oluşur. Bunlar metalin pasif halde kalmasına neden olur. Oluşan oksit tabakasının bileşimi ve yapısı ortam koşullarına bağlıdır. Pourbaix diyagramları yardımı ile hangi reaksiyonların gerekçeleşeceğini önceden belirlemek mümkün olmakla beraber, ayrıca korozyon hızının belirlenmesi reaksiyon kinetiği ile ilgili ek bilgilere de ihtiyaç duyulur. Örneğin çözünmeyen korozyon ürünlerini stabil olduğu bölge, pasiflik bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede, pratik olarak korozyonun etkili

olarak yürüyüp yürümeyeceği hakkında kesin bir karar verilemez. Korozyon ürünlerinin yüzeye yapışması ve sağlamlığı pasifliğin oluşmasında rol oynar. Buna karşılık metalin stabil olduğu “bağışıklık” bölgesinde korozyonun olmayacağı kesin olarak söylenir [16].

Klorlu ve klorsuz ortamda çeliğin pasifleşme eğrisi Şekil 2.5’ de verilmiştir.



Şekil 2.5 Klorlu ve Klorsuz Ortamda Çeliğin Pasifleşme Eğrisi [15]

2.3 Korozyon Hızı

Bir metalin değişik ortamlarda korozyon hızı farklı olduğu gibi, değişik metallerin aynı ortamda ki korozyon hızları da birbirinden farklıdır. Belli bir ortam içindeki üniform korozyon hızlarını göz önüne alarak metalleri 3 grup altında toplamak mümkündür [14].

A) Korozyona dayanıklı metaller

Korozyon Hızı $\geq 0,15$ mm/yıl

B)Orta derecede korozyona dayanıklı metaller

Korozyon Hızı $0,15$ mm/yıl \leftrightarrow $1,5$ mm/yıl

C) Korozyona dayanıksız metaller

Korozyon Hızı $\leq 0,15$ mm/yıl

Korozyon hız birimleri de: Akım yoğunluğu (mA/m^2), kütle kaybı (gmd), penetrasyondur (mpy) [14].

2.4 Beton ve Betonarme Donatıların Korozyonu

Beton elemanın çekme ve eğilme gerilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için, çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerine (örneğin, beton kirişlerin tabanına yakın bir konuma) donatı çubuklar yerleştirilmiştir. Donatı ve beton arasında iyi bir aderans olduğu takdirde, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Çekme dayanımı yüksek olan donatı çubuklar çekme dayanımı düşük olan betonu takviye eder. Korozyona uğrayan donatının kesitine küçülme olduğu için, belirli bir çekme yükü, daha küçük kesitli bir çubuk üzerine binmiş olmaktadır. Yani, donatı çubukların üzerindeki çekme gerilmesi artmış olmaktadır. Donatı çubuk, yük taşıyamaz bir duruma gelmekte, beton elemanda çatlamlar, kırılmalar olmaktadır [17].

Donatı, hava ve su içinde hızla korozyona uğradığı halde, beton içinde bulunan donatı pasif haldedir veya korozyon hızı son derece düşüktür. Beton rutubetli ve gözenekli bir yapıda olmasına rağmen, beton içinde bulunan çeliğin korozyona uğramamasının başlıca nedeni, betonun alkali özellikte olması ile açıklanmaktadır. Betonun alkali özelliği, çimento hidrasyonu sırasında ortaya çıkan kalsiyum hidroksitten ileri gelmektedir. Diğer taraftan klinker içinde az miktarda bulunan alkali oksitler de suda kolayca çözünerek potasyum ve sodyum hidroksitleri oluşturur. Bu hidroksitler beton boşluk suyunun doygun

kalsiyum hidroksit çözeltisi haline gelmesini sağlar. Böylece beton boşluklarında bulunan pH derecesi 12–13 arasında bir değere erişir. Bu çözelti ile temas halinde olan betonarme donatıları kısa sürede pasifleşir. Sulu çözeltiler içinde donatının korozyonu büyük ölçüde pH derecesine ve oluşan pasif filmin geçirimsizliğine bağlıdır. Eğer pasifleşme filmi metal yüzeyine iyi yapışan, geçirimsiz özellikte ise, çeliği korozyondan koruyabilir. Ancak çevreden beton bünyesine giren klorür gibi aktif iyonlar pasif tabakayı bozarak yeniden başlamasına neden olur [14].

Betonda donatı korozyonu uluslararası ilgi duyulan bir sorun olma özelliğini sürdürmektedir. Köprülerde, viyadüklerde, yollarda, park alanlarında ve deniz ortamına maruz betonarme yapılarında sıkça karşılaştığımız donatı korozyonu, sadece maddi değil sebebiyet verdiği yapısal risk sebebiyle aynı zamanda ciddi bir durabilite sorunudur. Donatı betona gömülür gömülmez yüzeyinde çok ince bir oksit tabakası oluşur. Bu tabaka korozyonun daha fazla ilerlemesine engel olur. Yani bir bakıma beton donatı korozyonun karşı koruyucu bir tabaka oluşturur. Beton, bu özelliğini gözenek suyunda mevcut hidroksil iyonları sayesinde sahip olduğu yüksek alkali özelliğine borçludur. Alkali ortam donatıyı pasifleştirmekte ve böylece korozyona maruz kalmasını engellemektedir. Oksit tabakası bozulmadığı sürece, donatının var olan doğal korozyon eğilimi bu şekilde bastırılmış olmaktadır. Betonda donatı üzerinde oluşan oksit tabakasını bozmak suretiyle donatı korozyonuna sebebiyet veren temel iki unsur klor iyonlarının mevcudiyeti ve betonun karbonasyonudur. Havada mevcut karbondioksitin betona difüzyonu sonucu betonun pH değeri azalır. Bu olay “karbonasyon” olarak bilinir. Karbonasyon sonucu azalan pH değerine bağlı olarak donatı-beton ara yüzünde alkalilik düşer ve ortamın pasivite koşulları değişir. Diğer taraftan beton örneğin priz hızlandırıcı katkı maddelerinden, denizden çıkarılan agregadan, buz eritici kimyasallardan, rüzgar ile taşınan deniz suyundan olmak üzere farklı kaynaklı klor iyonlarına maruz kalabilir. Betonda donatı yüzeyindeki oksit tabakasını bozacak miktarda klor iyonun birikmesi sonucu pasivite kırılır. Pasiviteyi kıran, daha doğrusu korozyonu tetikleyen bu klor iyonu konsantrasyonu “kritik değer” veya “eşik

değer olarak bilinir. Donatı üzerindeki oksit tabakası klor iyonları ile reaksiyona girerek donatı-klorür bileşiminde suda çözülebilen gayet boşluklu bir yapıya sahip korozyon ürünlerine dönüşür. İster karbonasyona bağlı olarak alkaliliğin azalması biçiminde olsun, ister eksik klor iyonu konsantrasyonunun aşılması sonucu olsun, pasivite bir sefer kırılınca donatının aktif korozyonu için gerekli koşullar oluşur ve neticesinde korozyon süreci başlar. Korozyon sonucu, donatı-beton ara yüzeyinde hüküm süren şartlara bağlı olarak, donatı orijinal hacminin birkaç katı kadar hacim artışı yaratan donatı oksit ürünleri oluşur. Bu ürünler donatı-beton ara yüzeyinde donatının betondan ayrılmasına neden olacak büyüklükte çekme kuvvetlerinin gelmesine sebebiyet verir; neticede beton çatlar ve parçalanır. Sonuçta donatı dış ortama açık hale geldiği için korozyon süreci daha da şiddetlenir. Betonarme donatıların korozyona karşı dayanıklı olması için her şeyden önce içinde bulunduğu beton yapının çevresel koşullara dayanabilecek kadar yüksek bir mekanik mukavemete sahip olması gerekir. Ne var ki, beton heterojen yapıda bir malzeme olup, beton içinde daima boşluklar bulunur. Çevreden beton bünyesine giren gazlar ve çözeltiler betonu veya beton içinde donatıları zamanla yıpratır [1].

2.4.1 Suyun Beton Üzerine Zararlı Etkileri

Korozyon için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Poröz yapıda olan bütün malzemelerde olduğu gibi, su beton bünyesine de girer ve donatı korozyonu dışında başka zararlı etkiler de yaratabilir.

Bu etkiler üç grup altında toplanabilir:

- 1) Suyun çözücü etkisi ve efloresans olayı
- 2) Suyun donması ile oluşan genleşme etkili
- 3) Su ile birlikte beton bünyesine giren tuzların kristalleşmesi [14].

2.4.2 Suyun Çözücü Etkisi

Su doğada sıvı veya buhar halinde her yerde bulunur. Hava içinde bulunan su buharı poröz bir yapı gösteren betonun boşluklarına girerek normal sıcaklıklarda bile kapiler içinde yoğunlaşır. Doğada bulunan sular saf olmayıp içinde daima çözülmüş tuzlar ve gazlar bulunur. Betonun çatlaklarından hareket ederek veya kapiler boşluklarına difüze olarak, beton boşluklarını dolduran bu sular birçok çözülmüş maddeyi beraberinde getirir [14].

2.4.3 Karbonik Asitli Suların Etkisi

Atmosferde yaklaşık %0,03 oranında bulunan karbondioksit temas etmiş olduğu sular içinde çözünür ve su ile reaksiyona girerek karbonik asite dönüşür. Alkali özellikte olan beton, karbonikli sulara karşı dayanıksızdır [14]. Karbonik asitli suların etkisi Çizelge 1’ de verilmiştir.

Çizelge 1 Karbonik Asitli Suların Etkisi [14]

Korozif Etki	pH Derecesi	CO ₂ Konsantrasyonu Ppm
Az korozif	6,5 - 5,5	15 -30
Korozif	5,5 - 4,5	30 - 60
Şiddetli korozif	< 4,5	> 60

2.4.4 Klorürlerin Etkisi

Klorürler beton yapılar için sülfatlar kadar tehlikeli olmamakla beraber, bazı hallerde beton ve betonarme yapılar üzerinde zararlı etki yapabilir. Betona zarar veren başlıca klorürler şunlardır: kalsiyum klorür, sodyum klorür, potasyum klorür ve magnezyum klorür [14].

2.4.5 Betonlarda Sülfat Korozyonu

Doğal sular ve zeminler içinde daima bir miktar sülfat iyonu bulunur. Az miktarda bulunan sülfat iyonu beton için zararlı değildir. Normal sıcaklıkta

alçının çözünürlüğü 1400 mg/litre civarındadır ve bu değer beton için zararlıdır. Su içinde çözünmüş olarak beton bünyesine giren sülfat iyonlarının iki şekilde etkisi görülür. Birincisi, sülfat tuzları (özellikle magnezyum sülfat) ile beton boşluklarında doygun çözelti halinde bulunan kalsiyum hidroksit ile birleşmesi sonucu oluşan kalsiyum sülfattan ileri gelir [14].

2.4.6 Deniz Suyunun Beton Üzerine Etkisi

Denizlerde köprü, iskele, rıhtım, mendirek, fener gibi birçok beton yapı yapılmaktadır. Bu yapılar deniz suyunda bulunan ve beton için zararlı olan çeşitli tuzların etkisi altındadır. Bu yapıları meydana getiren betonlarda kimyasal dayanıklılık bakımından gerekli önlemlerin alınmaması halinde yapı çok kısa sürede tahrip olarak işlevini göremez hale gelir [14]. Çeşitli denizlerde farklı olmakla beraber deniz suları içinde yaklaşık %3, 5 oranında (ortalama 36g/l) çözünmüş tuz bulunur. Bu tuzun büyük bir bölümü (yaklaşık %70' ini) sodyum ve klorür oluşturur. Deniz suları içinde bulunan en önemli tuzlara ait konsantrasyonlar ortalama olarak [14].

2.4.7 Yeraltı Suyunun Etkisi

Betonla temas eden yer altı suyunun agresif özellikte olup olmadığı betonarme donatılarının korozyonu açısından büyük önem taşır. Bir suyun koroziflik derecesi pratik olarak pH derecesi başta olmak üzere, içinde çözünmüş olarak bulunan tuz yüzdesi ve karbon dioksit konsantrasyonuna bağlıdır. Su içinde çözünmüş olarak serbest karbon dioksit, beton boşluk suyu içinde bulunan kalsiyum hidroksit ile birleşerek kalsiyum karbonat halinde çökler. Bu reaksiyonun beton pH derecesini düşürmesi dışında bir sakıncası yoktur. Ancak suda fazla miktarda karbon dioksit bulunması kalsiyum karbonat ile reaksiyona girerek suda kolay çözülebilen kalsiyum bikarbonat haline dönüşür. Böyle kalsiyum karbonat çözebilen sulara agresif su denir. Bir suyun agresif karakterde olup olmadığı Langeller İndeksi ile belirlenir [14].

2.4.8 Alkali–Agrega Reaksiyonu

Agrega içinde bulunan bazı aktif silisli minareler ile çimento içinde bulunan alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) reaksiyona girerek viskoz yapıda alkali silikat hidratları oluştururlar. Bunlar hacim genişmesine ve betonun şişerek çatlamasına neden olurlar. Çimento üretiminde kullanılan kil ve kalker gibi hammaddeler içinde bulunan sodyum ve potasyum bileşikleri, klinkerin pişirilmesi sırasında Na_2O ve K_2O haline dönüşür. Bu bileşikler çimentonun hidratasyonu ile açığa çıkan kalsiyum hidroksit ve alkali hidroksitler çimento hamuru pH derecesinin 12–13 değerine kadar yükselmesine neden olurlar eğer beton içinde aktif silis içeren agregalar varsa bu yüksek alkali ortamda alkali agregada reaksiyonu için uygun bir ortam oluşur. Reaksiyon sonunda agregada yüzeylerinde alkali silika jeli meydana gelir. Oluşan jel başlangıçta viskoz yapıdadır, fakat hidratasyon ilerlemesi ile zamanla su absorbe ederek büyük bir hacim genişlemesine neden olur [14].

2.4.9 Sertleşmiş Beton Üzerine Don Etkisi

Sertleşmiş bir betonun don etkisine dayanıklılığı başta mukavemeti olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlardan en önemlisi beton içinde bulunan boşlukların boyutları ve dağılımlarıdır. Ayrıca betonun suyla doygunluk derecesi, yani donabilen su miktarı da önemli rol oynar. Betonun don etkisine dayanıklılığını artırmak için aşağıdaki önlemler alınabilir [14].

- 1) Su/Çimento oranı düşük kompakt bir beton yapılması
- 2) Hava katkı maddesi katılarak permeabilitesinin azaltılması
- 3) Uygun koşullarda yeterli sürede kür yapılması

Beton içinde bulunan 0, 1 mm – 0, 2 mm boyutlarında olan bu boşluklar betonun don etkisine dayanıklılığını azaltıcı rol oynar. Bu nedenle beton karşımı içine az miktarda (yaklaşık olarak çimento ağırlığının %0, 05' i kadar) hava katkı maddesi katılmak sureti ile boşluk çapları 0, 5 mm ile 0, 10 mm arasına

düşürülebilir. Normal olarak, beton içine verilen %5–6 miktarında hava katkısı, 1 m³ beton içinde bulunan boşluk sayısını 24.000' e çıkarabilir. Beton boşlukları su/çimento oranı ile de ilgilidir. Daha önce açıklanmış olduğu gibi, su/çimento oranı arttıkça boşluk yüzdesinde de artış olur. Diğer taraftan büyük boşluklar içinde bulunan suyun donma noktası, kapiler boşluklar içinde bulunan suyun donma noktasında daha yüksektir. Dolayısıyla büyük boşluklar içinde bulunan su daha çabuk donar [14].

2.4.10-Pasifleşme ve Pasifliğin Bozuluşu

Portland çimentosu ile yapımlı bir betonun boşluklarında bulunan su doygun kireç çözeltisi halinde olup, içinde bulunan az miktardaki sodyum ve potasyum hidroksitlerinin de etkisi ile yüksek alkali özelliindedir. Taze betonun pH değeri genellikle 12, 5 – 13, 2 arasındadır. Bu pH ortamında betonarme donatıları pasif halde bulunur. Sulu çözeltiler içinde çeliğin aktif veya pasif halde bulunduğu donatı-su Portland diyagramlarından anlaşılabilir [14]. Çeşitli Betonlarda korozyonun başlaması için geçen süreler Çizelge 2' de verilmiştir.

Çizelge 2 Çeşitli Betonlarda Korozyonun Başlaması İçin Geçen Süreler [15]

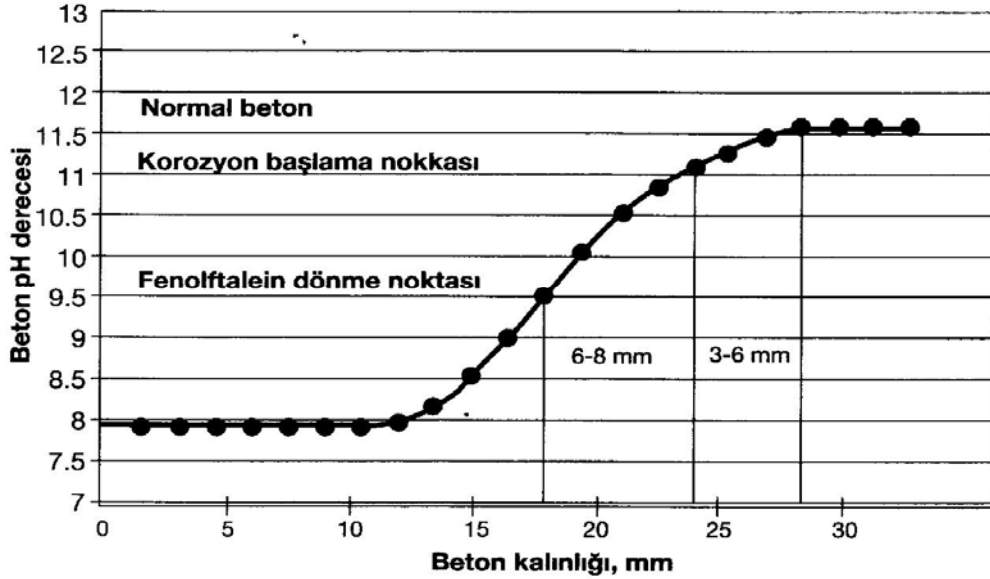
Beton	Pas Payı (mm)	Korozyonun Başlama süresi yıl	
		Klorür % 0,4	Klorür % 1,0
Normal Beton	50	5,5	12,4
Köprü betonu	65	9,2	20,9
Deniz suyu etkisinde kalan beton	75	12,5	27,9

2.4.11 Pasifliğin Karbonasyon Ekisi İle Bozulması

Yukarıda açıklamış olduğu üzere, yüksek alkali özelliği nedeni ile normal betonlar içinde betonarme donatıları pasif halde bulunur. Fakat herhangi bir nedenle beton pH derecesi düşerse pasiflik bozulur. Beton pH derecesinin

düşmesine neden olan en önemli olay karbonasyon olayıdır. Atmosferde normal koşullar altında hacimce %0,03 oranında karbon dioksit, beton boşluklar içine girerek orda bulunan suda çözünür ve çimentonun hidratasyonu sonucu meydana gelen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonatı oluşturur. Böylece betonun pH derecesinde azalma meydana gelir. pH derecesi beton yüzeyinde 8'e kadar düşebilir. Eğer beton yüzeyinde koruyucu bir önlem alınmamış ise yüzeyden itibaren ilk 15-30mm'lik kısımda $\text{pH}=9-10$ civarı kadar düşer. Bu durum fenol ftalein indikatörü ile basit şekilde belirlenebilir. Düşük pH derecesinde renksiz olan bu indikatör $\text{pH}>9,0$ olması halinde pembe-mor bir renk alır. Normal halde betonlarda $\text{pH}>11$ 'dir. pH derecesinin karbonasyon nedeni ile düşmesi korozyon için uygun bir ortam yaratır. Karbonasyon etkisinde kalan bir biten yüzeyden itibaren pH derecesi değişimi Şekil 2.6' da görülmektedir [15].

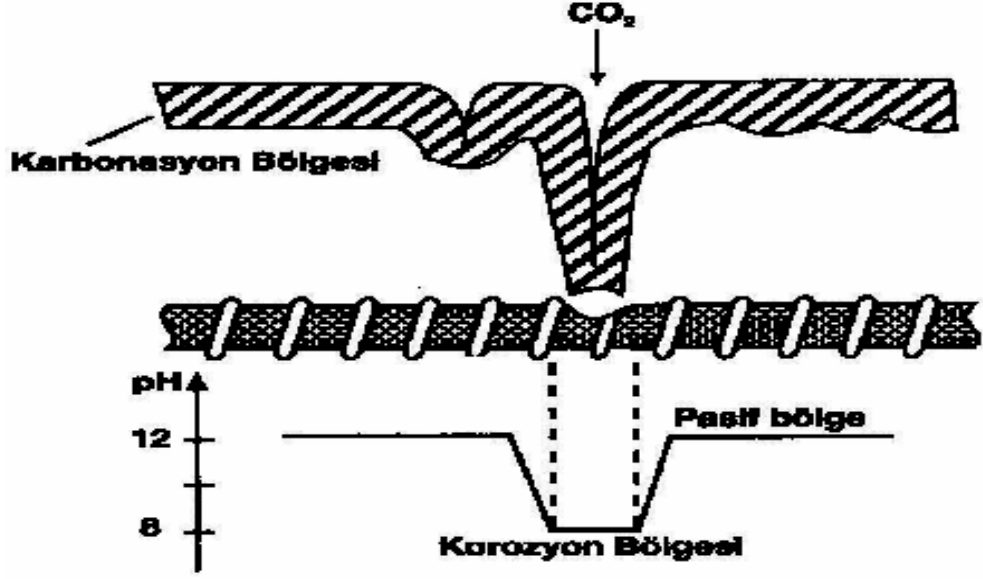
Karbonasyon olayının betonarme donatılarına etkisi Şekil 2.13' de verilmiştir.



Şekil 2.6 Karbonasyon Olayının Betonarme Donatılarına Etkisi [14]

Atmosferden beton bünyesine karbon dioksit difüzyonu yüzeyin her noktasında aynı olmayabilir. Betonarme donatıya kadar uzayan bir makro çatlak

bulunması halinde o bölgede beton pH derecesi büyük ölçüde düşer ve betonarme donatılarına kadar ulaşması olayı Şekil 2.7' de verilmiştir [14].



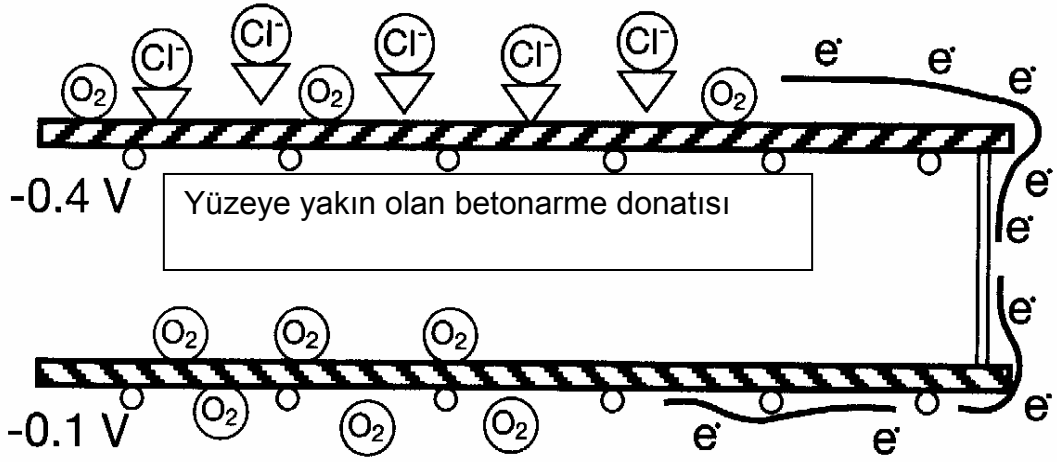
Şekil 2.7 Pasifliğin Karbonasyon Etkisi İle Bozulması [14]

2.4.12 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi ile Bozulması

Pasifliğin bozulmasında en çok klorür iyonunun etkisi olur. Beton içine klorür başlıca iki yoldan girebilir. Bunlardan birincisi beton karışımı hazırlanırken kullanılan agrega, çimento karışım suyu ve çeşitli katkı maddeleri ile giren klorür bileşikleridir. İkinci ve pratik de daha çok rastlanana, beton sertleşirken sonra çevreden beton içine difüzlendi klorür iyonlarıdır. Klorür iyonlarının beton bünyesine girmesi olayı da karbon dioksit girişine benzer şekilde gerçekleşir. Ancak klorür iyonları suda çözülmüş olarak girer dolayısıyla beton boşluk suyu içinde difüzyon hızı daha yavaştır. Eğer betonda çatlak varsa, klorürlü sular donatılara kolayca ulaşabilir. Betonun çatlaklarından giren suların taşıdığı klorür iyonu betonarme donatılarına ulaştığında, donatıların pasifliği bozulur ve korozyon olayı çukurlaşma şeklinde başlar. Beton içinde başlangıç da karışım hazırlanırken giren veya sertleşmiş beton içinde sonradan giren klorürlerin betonarme donatılarının korozyonu üzerine etkisi farklıdır. Başlangıç da beton içine giren klorür iyonlarının bir kısmı, çimento hidratasyon reaksiyonu sırasında

çimento klinker bileşiklerinden trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek suda çözünmeyen bir bileşik olan Friedel tuzunu ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşturur. Böylece klorür iyonlarının bir kısmı kimyasal olarak bağlanmış olur. Bu bağlı klorürün donatı pasifliğini bozucu etkisi yoktur. Korozyona beton boşluk suyu içinde çözülmüş halde bulunan serbest klorür iyonları etkili olur [14].

Pasifliğin klorür iyonu etkisi ile bozulması Şekil 2.8' de verilmiştir.



Şekil 2.8 Pasifliğin Klorür İyonu Etkisi İle Bozulması [14].

2.5 BETON HASARLARINI BELİRLEYEN DENEYLER

Beton hasarları onarılmadan önce ne sebeple olursa oluştuğunun kesin olarak belirlenmesi gerekir. Aksi halde ya gereksiz bir onarım yapılır, ya da yapılmış olan onarımın uzun süre dayanması mümkün olmaz. Beton birçok nedenle hasar görebilir. Bütün hasarlarda kabarma, çatlama ve sökülme meydana gelebilir. Hasarın neden iler geldiği belirlenerek öncelikle sebebin ortadan kaldırılması yoluna gidilmelidir. Gözle yapılan muayenelerde ancak çatlama veya dökülmeler belirlenebilir. Beton tabancası kullanılarak mukavemet kaybı olan bölgeler hakkında da fikir edinilebilir. Bu gözlemler sonucu gerekli

görülen bölgelerde daha ileri kontrollerin yapılmasına karar verilebilir. Korozyon zararlarını belirlemek için beton üzerinde genellikle deneyler yapılır [1].

Beton hasarlarını belirleyen deneyler altta verilmiştir [1].

2.5.1 Donatı üzerinde bulunan beton kalınlığının (pas payı) ölçülmesi

2.5.2 Karbonasyon derinliğinin ölçülmesi

2.5.3 Beton klorür yüzdesinin tayini

2.5.4 Beton rezivitesinin ölçülmesi

2.5.5 Beton içindeki çatlak ve boşlukların belirlenmesi

2.5.1 Donatı Üzerinde Bulunan Beton Kalınlığının (Pas Payı) Ölçülmesi

Betonarme donatılarının üzerinde bulunan beton kalınlığı, korozyon açısından büyük önem taşır. Bu kalınlığın az oluşu, beton içine çevreden su ve oksijen girişini kolaylaştırır. Böylece klorür iyonlarının donatılara daha çabuk ulaşması mümkün olur. Ayrıca betonarme donatıları çevresinde karbonasyon etkisi de daha şiddetli olarak kendini gösterir. Donatıların üzerindeki beton tabakası kalınlığı ölçülerek korozyon olayı hakkında fikir edinilebilir. Kabuk kalınlığı pratik olarak manyetik ölçüm tekniğine dayanan özel cihazlar ile ölçülür. Bu cihaz ile aynı zamanda betonarme donatıların kalınlığı da ölçülebilir. Ölçüm sonuçları mühendislik hesaplarında kullanılacak ölçüde duyarlıdır. Ancak, agregada manyetik özellik gösteren minerallerin bulunması halinde yanıltıcı sonuçlar alınabilir. Bir başka sorun da, farklı donatıların farklı derecede manyetik özellik göstermesidir. Örneğin austenitik donatılar manyetik özellik göstermezler. Bu sakıncayı gidermek için, kullanılan cihaz betonarme donatılarına göre kalibre edilmiş olmalıdır [14].

2.5.2 Karbonasyon Derinliğinin Ölçülmesi

Karbonasyon derinliği fenolftalein indikatörü kullanılarak kolayca ölçülebilir. Bu deneyi yapmak için beton yaklaşık 5 cm derinliğinde kırılır. Kırık olan bölgeye fazla vakit geçirilmeden fenolftalein indikatör çözeltisi damlatılır. Bu indikatör pH>9 olan bölgelerde mor bir renk oluşturur. Eğer pH<9 ise

indikatör renksizdir. Normal betonlarda pH=11–12 olmalıdır. Böylece renk oluşmayan bölgelerin karbonasyona uğramış olduğu anlaşılır. Karbonasyon ölçümlerinde kullanılacak olan fenolftalein indikatör çözeltisi 1 g fenol ftaleinin 100 ml alkol içinde çözülmesi ve içine 100 ml su katılması ile elde edilir. Deney yapılmadan önce kırılmış olan beton yüzeyi üzerinde bulunan tozlar bir fırça ile temizlenir veya hava üflenerek uzaklaştırılır. Renk oluşumunun başlamış olduğu nokta belirlenerek yüzeye olan uzaklığı ölçülür. Değişik noktalarda yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak karbonasyon derinliği bulunur. Bu deneyin arazide yapılması gerekir. Kırılmış olan beton yüzeyinin atmosfere açık olarak uzun süre bekletilmesi halinde havadan gelen karbondioksit etkisi ile pH değişebilir. Diğer taraftan beton içinde bulunan bazı agregaların koyu renkli olması halinde indikatör renginin gözlenmesi güçleşir. Bu deney ile pH değerinin yalnızca 9.0' dan yüksek ve düşük olan bölgeler belirlenebilir [14].

2.5.3 Beton Klorür Yüzdesinin Tayini

Klor iyonları, betonun içerisindeki donatı çubukların üzerindeki pasif oksit filminin kırılmasına, korozyonun daha kısa sürede başlamasına yol açmaktadır. Betonun içerisindeki yer alan klorürler, değişik kaynaklardan gelebilmektedir:

- 1-CaCl₂ gibi priz hızlandırıcılardan,
- 2-Beton yapımında kullanılan deniz kumundan. veya tuzlu ortamdan elde edilmiş olan agregalardan,
- 3-Kışın, betonun üzerindeki buzlanmanın çözülmesi için kullanılan sodyum klorür veya kalsiyum klorür gibi tuzlardan,
- 4-Deniz suyundan,
- 5-Denize yakın bölgelerdeki sisten [16]

Beton içinde klorür iki şekilde bulunur. Toplam klorür miktarı beton asitte çözülerek tayin edilir. Beton içinde bulunan klorürün bir kısmı trikalsiyum alimüno klorür bileşiği asitte çözünür fakat suda çözülmez. Bu nedenle korozyona etkisi yoktur. Betonarme donatılarının pasifliğini bozarak

korozyonuna neden olan klorür boşluk suyu içinde çözünmüş olan klorür iyonudur. Buna rağmen pratikte daha kolay olması nedeniyle asitte çözünen toplam klorürün tayini yoluna gidilmektedir. Beton klorür yüzdesinin tayini için kullanılan kriterler Çizelge 3' de verilmiştir.

Çizelge 3 Beton Klorür Yüzdesinin Tayini [14]

Beton içinde bulunan klorür % çimento ağırlığına göre	Betonarme donatıları Korozyon riski
< % 0,2	İhmal edilecek kadar az
% 0,2 ile % 0,4 arası	Orta derecede korozyon
> % 0,4	Şiddetli korozyon

Beton klorür yüzdesinin tayininin karbonasyon ve klorür etkileri altında bulunan beton yapılarda betonarme donatılarının korozyon riski Çizelge 2.4' de verilmiştir. Çizelge 4 Karbonasyon ve Klorür Etkileri Altında Bulunan Betonarme Yapılarda Betonarme Donatılarının Korozyon Riski [15]

%Klorür (Çimento ağırlığına göre)	Beton Durumu	Betonarme Donatıları Korozyon riski
< 0, 4	1) Karbonasyon var	Yüksek
	2) Karbonasyon yok Çimento da C3<%8	Orta
	3) Karbonasyon yok Çimento da C3>%8	Düşük
0, 4–1, 0	1) Karbonasyon var	Yüksek
	2) Karbonasyon yok Çimento da C3<%8	Yüksek
	3) Karbonasyon yok Çimento da C3>%8	Orta
> %1, 0	1) Bütün hallerde	Yüksek

Çizelgede “>%1, 0” tüm hallerde donatının korozyon riskinin yüksek çıkması korozyonla yapılan mücadelede önemli bir kısıtlayıcı olmaktadır [14].

2.5.4 Beton Rezistivitesinin Ölçülmesi

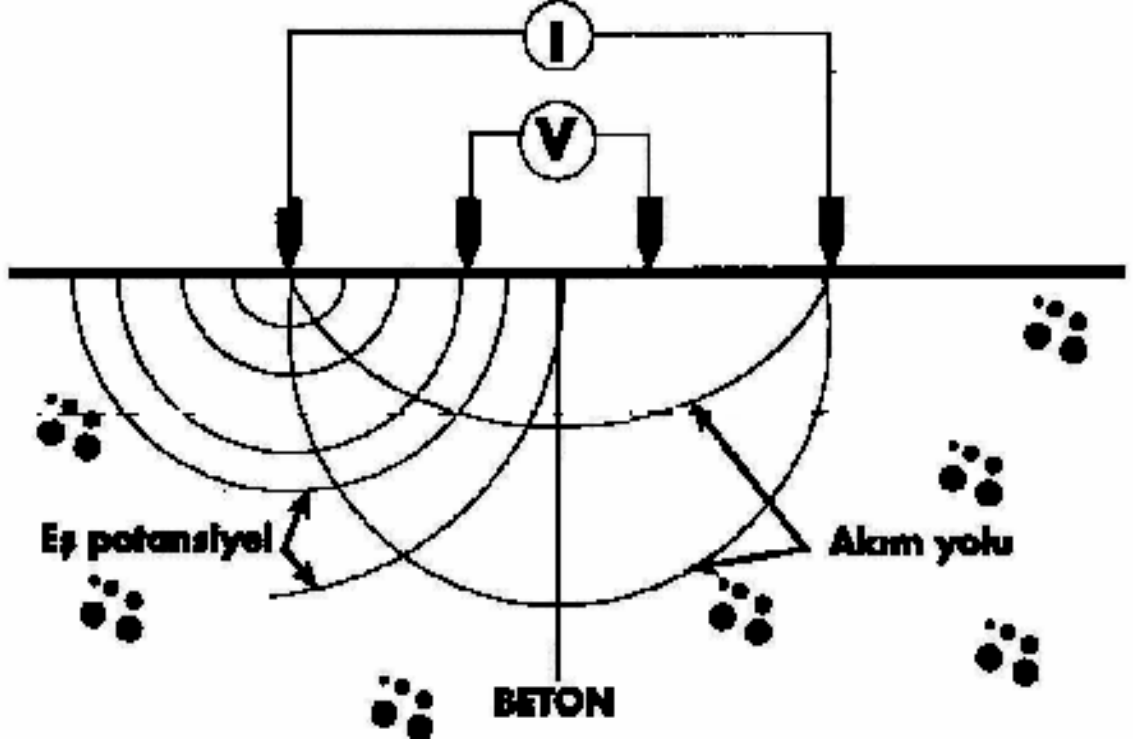
Aynen zemin içindeki korozyon olayında olduğu gibi, beton içindeki korozyon hızı da beton rezistivitesine büyük ölçüde bağlıdır. Düşük rezistiviteli betonlarda makro korozyon hücrelerinin etkili olarak çalışması nedeniyle korozyon hızı daha yüksektir. Bu durum göz önüne alınarak beton rezistivitesi ile betonarme donatıların korozyonu arasında pratik olarak kullanılan listeler hazırlanmıştır. Çizelge 2.5' de beton rezistivitesi ile betonarme donatıları korozyonu arasındaki bağıntı verilmektedir.

Çizelge 5- Beton İçinde Bulunan Klorür Konsantrasyonuna Göre Betonarme Donatılarının Korozyon Riski [14]

Beton Rezistivitesi	Betonarme donatıları korozyonu
$P > 20000 \text{ Ohm. Cm}$	Korozyon ihmal edilebilir.
100000 – 200000 Ohm. Cm	Orta derecede korozyon
5000 – 10000 Ohm. Cm	Yüksek hızda korozyon
$P < 5000 \text{ Ohm. Cm}$	Şiddetli Korozyon

Rezistivite ölçümleri: Beton rezistivitesi Wenner dört elektrot yöntemi ile ölçülür. Bu cihazda beton yüzeyine eşit aralıklarla uygulanan dört elektrot vardır. Akım iki dış elektrottan uygulanır ve iki iç elektrot arasındaki potansiyel farkı ölçülür. Rezistivite ölçümlerinin donatıların durumu göz önüne alınmadan yapılması halinde uygulanan akımın beton yerine donatılardan geçmesi nedeniyle yanıltıcı sonuçlar elde edilebilir. Bunun için cihazın betonarme donatılarının dışında kalacak şekilde kullanılması uygundur. Daha derin bir ölçüm gerekli olduğunda Wenner cihazı donatıların etkisinin olmadığı dik pozisyonda uygulanmaktadır [14].

Wenner dört elektrot yöntemi ile beton rezistivitesinin ölçülmesi Şekil 2.9' de verilmiştir.



Şekil 2.9 Wenner Dört Elektrot Yöntemi İle Beton Rezistivitesinin Ölçülmesi [14]

Elektrokimyasal metotlarda beton içinde bulunan metale bir dış akım uygulanarak polarizasyon eğrileri elde edilir. Bu eğriler kullanılarak korozyon direnci veya doğrudan ekstrapolasyon yoluyla korozyon akımı elde edilir. Son zamanlarda geliştirilen lineer polarizasyon bölgesindeki polarizasyon doğrusunun eğimi yöntemi ile kısa süre içinde korozyon hızı ölçülebilmektedir. Elektrokimyasal tekniklerin ve modern cihazların gelişmesi ile birlikte korozyon hızı tayininde lineer polarizasyon direnci yöntemi önem kazanmıştır. Bu deney galvano statik veya potansiyostatik olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Galvanostatik yöntemde, uygulanan akım yoğunluğu sabit tutularak potansiyel düzgün aralıklarla değiştirilir. Potansiyometrik yöntemde ise, elektrot potansiyeli bir potansiyostat yardımı ile sabit tutularak bu potansiyele karşılık gelen uygulanan akım yoğunlukları ölçülür [14].

Galvanostatik yöntem biri üç elektrot, diğeri iki elektrot yöntemi olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Üç elektrot yönteminde biri çalışma elektrodu, biri yardımcı elektrot ve biride referans elektrot olmak üzere üç elektrot tür. İncelenmekte olan elektroda inert bir yardımcı elektrot ile anodik veya katodik yönde sabit bir dış akım uygulanır Beton rezistivitesinin ölçülmesi: Beton içinde bulunan klorür konsantrasyonuna göre betonarme donatılarının korozyon riski arasında ki ilişki Çizelge 2.6' da verilmiştir.

Çizelge 6 Karbonasyon ve Klorür Etkileri Altında Bulunan Beton Yapılarda Betonarme Donatılarının Korozyon Riski [14]

Beton Rezisvitesi	Betonarme Donatıları Korozyonu
$\rho > 20000$ Ohm.cm	Korozyon ihmal edilebilir
10000 - 20000 Ohm.cm	Orta derecede korozyon
5000 - 10000 Ohm.cm	Yüksek hızla korozyon
$\rho < 5000$ Ohm.cm	Şiddetli korozyon

2.5.5 Beton İçindeki Çatlak ve Boşlukların Belirlenmesi

Beton içindeki çatlak ve boşlukların belirlenmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden a) Beton Tabancası b) Ultrason c) Görüntü segmentasyonu en çok kullanılanlarıdır. Görüntü segmentasyonu; betonda bulunan sınıfların belirlenmesidir. Bunun için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan bir kaçısı isodata, maximum likelihood, vb. Beton tabancası yönteminde; test çekicinin kalibrasyonunun iyi olduğundan emin olunmalıdır [14].

Ultrason yönteminde; ASTM C 597 nolu standart'ta, ultrasonik test yönteminin uygulanmasında kullanılan cihazın özellikleri ve kullanım tekniği belirtilmektedir [16].

2.6 Korozyonun Ölçülmesi

Elektro-kimyasal teknikler, betonda donatı korozyonu aktivitesi ile ölçüm yapıldığı anda korozyon hızı hakkında fikir veren tekniklerdir. Ölçülen korozyon hızı kesin bir değer olmaktan ziyade korozyon hızının mertebesi ile ilgili bir büyüklüktür. Bu anlamda günümüzde kullanılan yöntem ve teknikler arasında potansiyel ölçümü, harmonik analiz, tekrarlı polarizasyon, lineer polarizasyon, elektro-kimyasal gürültü ve AC empedans tekniği en yaygın biçimde kullanılanlardır [1].

2.6.1 Potansiyel Ölçümü

Betonarme donatılarının potansiyeli ölçülerek, korozyonun varlığı hakkında fikir edinilebilir. Beton içinde bulunan bir çeliğin potansiyeli nemst denklemine göre çözünmüş donatı iyonu konsantrasyonuna bağlıdır. Bu denkleme göre, çözünmüş iyon konsantrasyonu arttıkça elektrot potansiyeli negatif yöne kayar. Ancak elektrot potansiyelinin atması yalnızca iyon konsantrasyonuna bağlı değildir. Bu nedenle potansiyel değerinin diğer etkenler de göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekir. Deney ASTM C 876–91 metoduna göre aşağıdaki şekilde yapılır. Deneyden önce potansiyel ölçülecek olan bölgede, beton kalınlığını ölçen cihaz ile betonarme donatıların yeri belirlenir. Betonarme donatılarına uygun bir noktadan kablo bağlantısı yapılır. Bu bağlantı kaynak, lehim veya klamp ile yapılabilir. Klamp ile tutturulması halinde betonarme donatı yüzeyi bir tel fırça ile iyice kazınarak üst kısımdaki oksit tabakası kaldırılmalıdır. Donatılardan gelen kablo voltmetrorenin pozitif ucuna referans elektrot voltmetrorenin negatif ucuna bağlanır. Referans elektrot tam betonarme donatı üzerinde olacak şekilde beton yüzeyine konulur. Referans elektrot tabanının beton yüzeyine tam olarak temas edebilmesi için sünger ile kaplanır. Ölçüm sırasında bu sünger özel bir deterjan çözeltisi ile ıslatılır. Bu çözelti 100 ml bulaşık deterjanı 20 litre su içine dökülerek ve içine %15 oranında alkol karıştırılarak hazırlanır. Beton yüzeyi ve referans elektrot

tabanında bulunan sünger bu çözelti ile ıslatılarak referans elektrot ile beton arasındaki elektrolitik temas kolaylaştırılır [14].

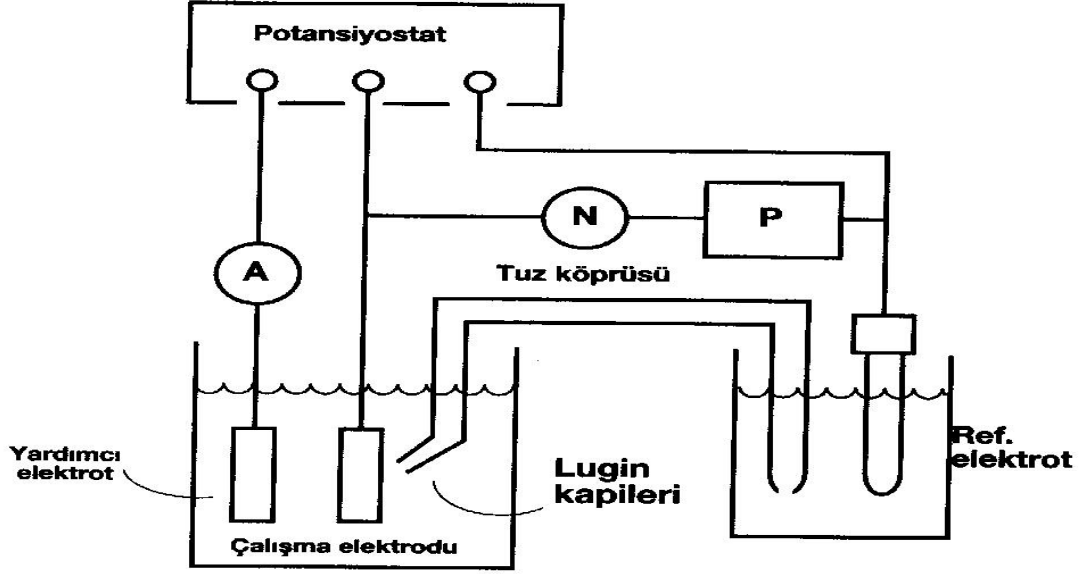
2.6.2 Lineer Polarizasyon Rezistans

Lineer polarizasyon rezistans (LPR) tekniğine ilişkin prensipler ilk kez 1950 yıllarında Stern ve Geary tarafından geliştirilmiştir. Teknik, 1970' li yıllardan itibaren betonda donatı korozyonu hızını belirlemede yaygın kullanım alanı bulmuştur [1].

2.6.2.1 Potansiyostatik Olarak Polarizasyon Ölçümü

Korozyon hızının ölçümü için fiziksel veya elektrokimyasal metotlar vardır. Fiziksel metotlar ağırlık kaybı ölçümlerine dayanır. Belli bir süre korozif ortamda tutulan metal parçasının birim yüzeyinde meydana gelen ağırlık kaybı ölçülür. Bu ölçümlerle uzun bir zaman dilimi içindeki ortalama korozyon hızı tayin edilebilir. Beton içindeki korozyon hızının ağırlık kaybı yöntemi ile tayini hem uzun zamanı hem de belirli sürelerle betonun kırılarak içindeki numunenin çıkarılmasını gerektirir. Elektrokimyasal metotlarla beton içinde bulunan metale bir dış akım uygulanarak polarizasyon eğrileri elde edilir. Bu eğriler kullanılarak korozyon direnci veya doğrudan ekstrapolasyon yoluyla korozyon akımı (I_{cor}) elde edilebilir. Son zamanlarda geliştirilen Lineer polarizasyon bölgesindeki polarizasyon doğrusunun eğimi (polarizasyon direnci) yöntemi ile kısa süre içinde korozyon hızı ölçülebilmektedir. Elektrokimyasal tekniklerin ve modern cihazların gelişmesiyle birlikte korozyon hızı tayininde lineer polarizasyon direnci yöntemi önem kazanmıştır. Bu deney galvanostatik veya potansiyostatik olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Galvanostatik yöntemde uygulanan akım yoğunluğu sabit tutularak potansiyel düzgün aralıklarla değiştirilir. Potansiyometrik yöntemde ise elektrot potansiyeli bir potansiyostat yardımıyla sabit tutularak bu potansiyele karşılık gelen uygulanan akım yoğunlukları ölçülür [14].

Potansiyostatik olarak polarizasyon ölçümü Şekil 2.10'da verilmiştir [1].



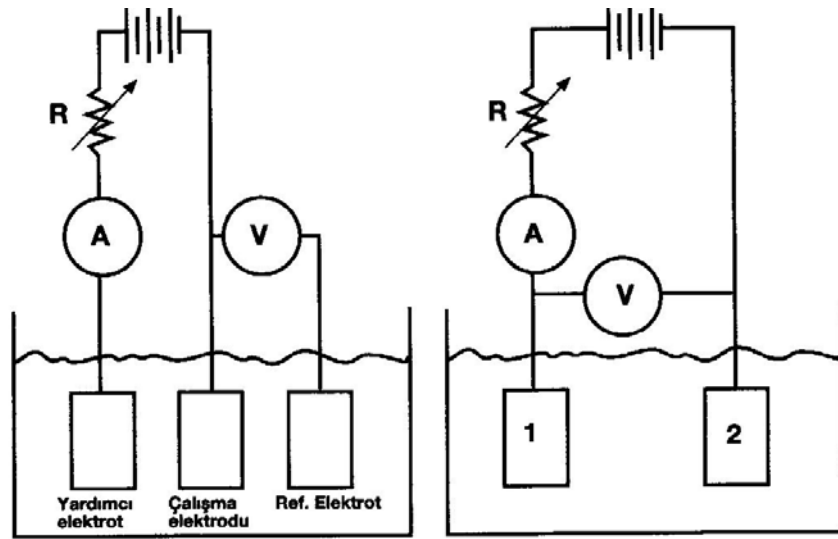
Şekil 2.10 Potansiyostatik Olarak Polarizasyon Ölçümü

2.6.2.2 Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri (I)Üç Elektrot Yöntemi (II) İki Elektrot Yöntemi

Galvanostatik yöntem biri 3 elektrot diğeri iki elektrot yöntemi olmak üzere iki şekilde uygulanır. 3 elektrot yönteminde biri çalışma elektrotu, biri yardımcı elektrot ve biri de referans elektrodu olmak üzere 3 elektrot bulunur. İncelenmekte olan elektroda inert bir yardımcı elektrot ile anodik veya katodik yönde sabit bir dış akım uygulanır Bu akım altında belli bir süre beklenerek elektrot potansiyeli referans elektroda karşı ölçülür. Daha sonra değişen bir reosta ile uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek elektrot potansiyeli yeniden ölçülür. 2 elektrot yönteminde birinin aynı olan iki çalışma elektrotu kullanılır. Bu yöntemde referans elektrotu bulunmaz. Galvanostatik yöntem ile deney şöyle yapılır. Başlangıçta devreye dış akım uygulanmadan önce iki elektrot arasındaki korozyon potansiyeller farkı okunur. Daha sonra anodik ve katodik yönde bir dış akım uygulanarak her iki elektrot arasındaki potansiyel farkı yeniden ölçülür. Bu işleme $\pm 20\text{mV}$ potansiyel farkı elde edilinceye kadar dış akım yoğunluğu

arttırılarak devam edilir. Böylece lineer polarizasyon bölgesi için (E-i) eğrisi elde edilebilir. Lineer bölge dışında anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin simetrikliği bozulacağı için bu yöntemin kullanılması uygun olmaz [1].

Galvanostatik yöntemle polarizasyon ölçümleri (I)Üç elektrot yöntemi (II) iki elektrot yöntemi Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Galvanostatik Yöntemle Polarizasyon Ölçümleri [1]

LPR Ölçümlerine ilişkin yorumlama kriterleri Çizelge 2.7 de verilmiştir.

Çizelge 7 LPR Ölçümlerine İlişkin Yorumlama Kriterleri

Korozyon Akım Yoğunluğu	Korozyon Durumu
$I_{cor} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasif korozyon hali
$0,1 \mu A/cm^2 < I_{cor} < 0,5 \mu A/cm^2$	Hafif-orta arası korozyon
$0,5 \mu A/cm^2 < I_{cor} < 1,0 \mu A/cm^2$	Hafif-yüksek arası korozyon
$I_{cor} > 1 \mu A/cm^2$	Yüksek korozyon hızı

2.6.3 AC Empedans Tekniği

AC empedans tekniđi, özellikle empedansın yüksek olduđu veya iletkenliđin çok dűşűk ortamlarda donatı/beton ara yűzeyine iliřkin polarizasyon rezistansı ile kapasitans karakteristikleri hakkında sađladıđı teknik bilgi dolayısıyla son yıllarda betonda donatı korozyonu sűrecinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. LPR yűnteminin aksine, bu yűntemde dođrusal akım yerine kullanılan alternatif akım sayesinde genellikle çok dűşűk frekanslarla ۆlűmler gerçekleřtirilmektedir [1].

3. MATERYAL ve METOD

Türkiye bir deprem ülkesidir. 17 Ağustos 1999 Körfez ve 12 Kasım 1999 Düzce Depreminde korozyon; binada kullanılan donatıları da etkilemiş, donatıların paslanmasıyla birlikte yapısal elemanların taşıma kapasitesi olumsuz yönde etkilenmiştir. Depremin betonarme yapılardaki yıkıcı etkisinde korozyonun varlığı önemli bir etkidir. Altta Avcılar 1999 depreminde alınan görüntüler Şekil 3 1'de verilmiştir [2].



Şekil 3.1 Betonarme Yapılar Üzerinde Deprem Etkisi Avcılar 1999

Bu çalışmada: Deneyler için hazırlanan küp betonların içindeki donatı çubukların elektrot potansiyel değişiminin, donatıların kütle farkları arasında ki ilişkinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu iki parametre arasında sistematik ilişkinin varlığının fonksiyonel olarak belirlenebilmesi, yapılardaki deprem

sırasında ortaya çıkabilecek hasarların önceden tahribatsız ölçümlerle hızlı biçimde değerlendirilmesini sağlayacak ve böylece, çözümlerin esasını teşkil etmesini de kolaylaştıracaktır.

Deneysel çalışmalarda, Samsun Atakum bölgesinde denize yakın yıkılmak için boşaltılan yapılardan korozyon olasılığı yüksek donatılar doğal haliyle yerinden alınmıştır. Alınan donatılar clark çözeltisinden geçirilmiştir. Donatılar yaklaşık 10 cm. boyutunda kesilmiştir. Toplam 150 adet olan donatılar tartılmıştır ve çalışmanın amacına uygun olarak kütle farkları hesaplanmış ve kütle azalımı olanlar deneyler için seçilmiştir. OYAK Hazır Beton firmasında hazırlanan C14 CEM II A sınıflı 15X15X15 cm' lik beton küp numuneye yerleştirilmiştir [18]. Numuneler korozyon ölçüm cihazında ölçümünde nemli ve nemsiz ortam şartlarında ölçülmüştür. Nemli ortam; numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra, nemsizler ise laboratuvar ortamında 1 gün bekledikten sonra ölçüme alınmıştır. Bu donatılı küp numuneler Prof. Dr. Azer A. Kasımlı'nın sorumluluğundaki MF-046 nolu proje kapsamı içindeki: Korozyon ve malzemenin fiziksel özelliklerini tahribatsız ölçümleri için alet (korozyon ölçüm cihazı) ile ölçülerek numuneler içindeki donatıların potansiyeli doygun bakır/bakır sülfat kalomel elektroduna göre değerlendirilmiştir.

3.1 Donatı Çubukların Hazırlanışı ve Kütle Farklarının Hesaplanması

Deneyler için gerekli donatılar Samsun ve civarından sahil bandındaki yapıların yıkılması sonrasında tahribatsız olanlardan, korozyonlu olanlar seçilmiştir. Deney donatı çubukların hazırlanışındaki aşamalar aşağıdadır.

- 1-Donatı çubuklar 10 cm' e yakın uzunlukta kesilmiştir (Ek-1).
- 2-Yüzeyleri tornalanarak mekanik olarak temizlenmiştir
- 3-Elektrot yüzeyleri 1200 meş'lik zımpara pürüzsüz hale getirilmiştir
- 4-Donatı çubuklar clark çözeltisiyle temizlenmiştir.
- 5-Donatı çubuklar yüzeyleri doygun kuru yüzey halinde ve uçları düzgün yüzey haline gelinceye kadar törpüledikten sonra tartılmıştır (Ek-1).

6-Donatı çubukların çapları ölçülmüştür (Ek-1).

7-Donatı çubuklar tartılmıştır (Ek-1).

8-Donatıların korozyona uğramamış haliyle M_1 , korozyon hali M_2 arasındaki kütle farkı hesaplanmıştır M_3 .

Beton deney numunelere yerleştirilen donatı barların kütlelerinin hesaplanmış neticeleri EK-1' de verilmiştir. Donatı çubukların clark çözeltisinden önceki fiziksel durumları Şekil 3.2' de verilmiştir.



Şekil 3.2- Deney Öncesi ve Sonrası Donatı Çubuklar

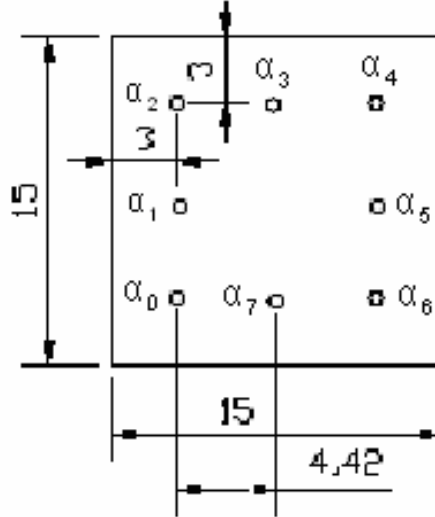
3.2 Donatıların Beton İçine Yerleştirilmesi ve Betonun Özellikleri

Hazırlanan donatı çubuklar OYAK Hazır Beton tesisinde C 14 sınıfı ve Mr 50 N katkı kullanılarak taze beton hazırlanmıştır. Taze betonun özellikleri (EK-3)' de verilmiştir. 15X15X15 cm.lik küp numuneler içine Şekil 3.3' deki gibi yerleştirilmiştir. ASTM-C-876-91' e uygun olarak; her gün Cu/CuSO₄ calomel referans elektrotu ile potansiyellerin değişimini ölçmek için beton numuneler ölçümler için hazır hale getirilmiştir.

Deneyler için seçilen beton sınıfı C14; tüm bölgede 1999 Gölcük depremi sonrasında uyarıların ve yasaklamaların etkisiyle az tercih edilmektedir (Hazır Beton Tesisleri içinde). Bölgede yapılan yapılarda ise hala betonyer ve elle beton dökümü devam etmektedir. Bölgedeki yapıların büyük bir çoğunluğu 1999

Gölcük depreminden önce yapılmış olduğu ve depremin yıkıcı etkisinin bu yapılarda daha fazla olacağı gerçeği nedeniyle; beton sınıfı olarak C14 tercih edilmiştir. Deneylerde seçilen beton sınıfının hazırlanmasında hazır beton tercih edilmiştir. Bunun gerekçesi ise potansiyel ölçümünde çıkan sonuçların dikkatli yorum gerektirdiğinden betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin deney için ortam koşullarının aynı olmasıdır. Kullanılan betonun özellikleri EK- 3' de verilmiştir. Deney için istenen beton yaş karışım olarak hazırlanan hazır-beton partisinden santral çıkışında transmiksirin ağzından boşaltılan betondan alınmıştır. Deneyler için seçilen beton, boşaltılan betonun yaklaşık olarak ilk %15 ' inden hemen sonra ve yine boşaltılan betonun ilk %85' inden önce alınmıştır [18]. Deneyler için hazırlanan betondan numune alma işlemleri, TS 2940 ve TS 3351 'e göre yapılmıştır [19, 20]. Hazırlanan numuneler kür havuzlarında potansiyel ölçümlerine kadar bekletilmiştir [21]. Deneylerde kullanılan A, B, C, D ve E numunelerin birbirinden farkı içine konulan donatıların farklı boy ve kütlelere sahip olmasıdır.

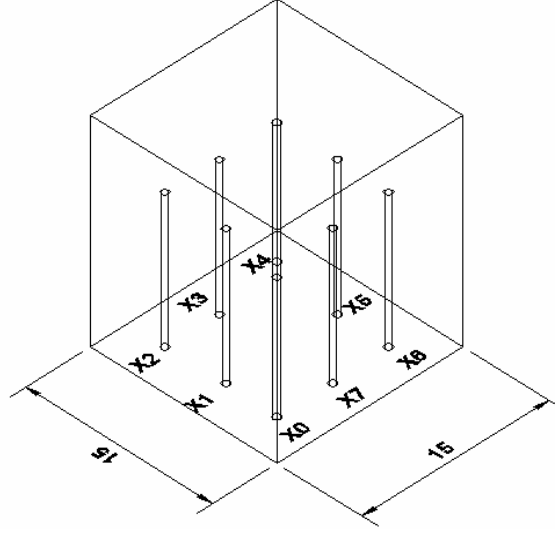
Her bir beton numuneler numaralandırılmıştır. α_0 ise korozyonsuz numunedir (referans donatı).



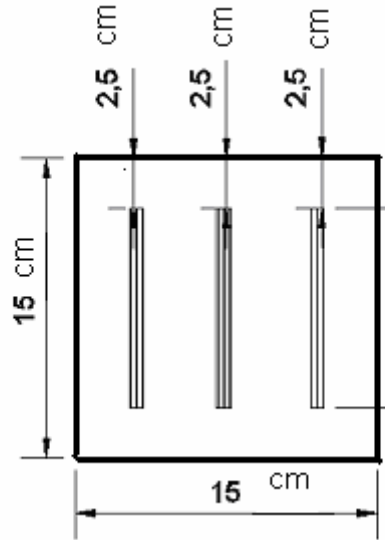
Şekil 3.3 Donatıların beton numuneye yerleştirilmesi

Donatılar, betonun köşelerine 3 cm' lik uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Donatıların uzunlukları EK-1' de verilmiştir ve her bir beton numunesinde ayrı

ayrı yerleştirmiştir (EK-4). Donatılar beton içine alttan ve üstten donatının uzunluğuna göre dış yüzeye 2.5 cm' lik uzaklıkla yerleştirilmiştir. şekil 3.4 ve şekil 3.5 de 3 boyutlu görünümü verilmiştir.



şekil 3.4 Donatıların beton numune içindeki 3 boyutlu görünümü



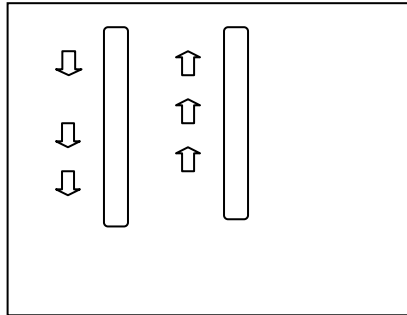
şekil 3.5 Donatıların beton numune içindeki görünümü

3.3 Korozyon Ölçüm Cihazı İle Numunelerin Ölçülmesi

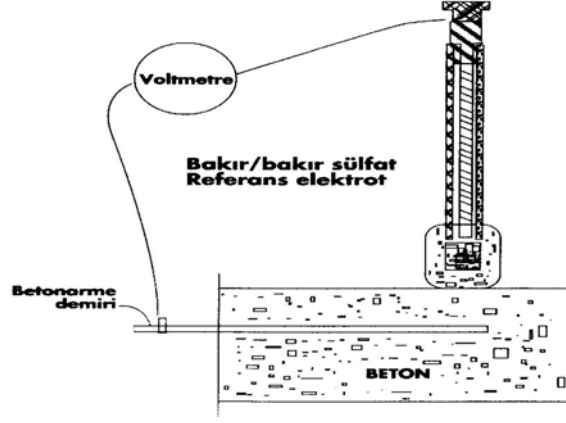
Betonarme donatılarının potansiyeli ölçülerek, korozyonun varlığı hakkında fikir edinilebilir. Beton içinde bulunan bir donatının potansiyeli Nemst denklemine göre çözünmüş iyonu konsantrasyonuna bağlıdır. Bu denkleme göre, çözünmüş iyon konsantrasyonu arttıkça Elektrot potansiyeli negatif yöne kayar. Ancak Elektrot potansiyelinin atması yalnızca iyon konsantrasyonuna bağlı değildir. Bu nedenle potansiyel değerinin diğer etkenler de göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekir [14, 16, 22].

Deney ASTM C 876–91 metoduna göre aşağıdaki şekilde yapılır. Deneyden önce potansiyel ölçülecek olan bölgede, beton kalınlığını ölçen cihaz ile betonarme donatıların yeri belirlenir. Betonarme donatılarına uygun bir noktadan kablo bağlantısı yapılır. Bu bağlantı kaynak, lehim veya klamp ile yapılabilir. Klamp ile tutturulması halinde betonarme donatı yüzeyi bir tel fırça ile iyice kazınarak üst kısımdaki oksit tabakası kaldırılmalıdır. Donatılardan gelen kablo voltmetrenin pozitif ucuna referans elektrot voltmetrenin negatif ucuna bağlanır [22].

Referans elektrot tam betonarme donatı üzerinde olacak şekilde beton yüzeyine konulur. Beton yüzeyi ve referans elektrot tabanında bulunan sünger bu çözelti ile ıslatılarak referans elektrot ile beton arasındaki elektrolitik temas kolaylaştırılır Şekil 3.7 [22], Şekil 3.8. Ölçümlerde donatıların tam üzerine gelecek şekilde yukarıdan altta doğru yapılır. Şekil 3.6 de ölçüm yönleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Donatıların ölçüm yönleri



Şekil 3.7 Betonarme donatıları potansiyelinin ölçülmesi [22]



Şekil 3.8 Betonarme numune donatılarının potansiyelinin ölçülmesi

Ölçüm ve yorumlama ASTM C 876'da belirtilen göre yapılır ve bu kriter katodik koruma içinde kılavuz niteliği taşır. Potansiyel ölçümlerine ilişkin kriterlerin değerlendirilmesi Çizelge 8 'de verilmiştir.

Çizelge 8 Potansiyel ölçümlerine ilişkin ASTM C 876 kriterleri [22]

Bakır/Bakır Sülfat (CSE)	Kalomel Elektrot (SCE)	Korozyon Riski
> (-200 mV)	> (-126 mV)	Korozyon olasılığı %10
(-200 mV) - (-350 mV)	(-126 mV) - (-276 mV)	Korozyon belirgin değil
< (-350 mV)	< (-276 mV)	Korozyon olasılığı %90
< (-500 mV)	< (-426 mV)	Şiddetli korozyon hakim

Yorumlamada aşağıdaki hususların da göz önüne alınması uygun olur. Eğer beton içinde az miktarda oksijen varsa, korozyon söz konusu olmadığı halde elektrot potansiyeli çok negatif bir değer alabilir. Karbonasyon etkisinde kalan betonlarda da potansiyel ölçümünde yanıltıcı sonuçlara varılabilir. Bu nedenle karbonasyona uğramış betonlarda potansiyel ölçümleri yapılmadan önce beton yüzeyinin ıslatılması ve 2 saat bekledikten sonra potansiyel ölçümü yapılması uygundur. Kaçak akımların bulunması halinde de potansiyel ölçümlerinden yanıltıcı sonuçlara varılabilir [14]. Elde edilen potansiyel değeri ortamın pH değerine gözenek suyunun iletkenliğine ve nem durumuna bağlıdır [1].

3.4 Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Numunelerde yapılan elektrot potansiyel ölçümleri ve donatı çubukların kütle farkları arasında matematiksel gerçeklerin değerlendirilmesi için ortam şartları hazırlanmıştır. Korozyon değerini ölçerken betonun içerdığı hava miktarı her beton numunede değişkendir. Hapsolmuş hava değeri %0.2-%3 arasında değişmektedir. Bu da beton içindeki oksijen miktarının her numunede farklı olacağını gösterir. Elektrot potansiyel ölçümleri sırasındaki tüm numuneler ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR

Yapılan tez çalışmasında bölüm 2' de açıklandığı gibi önce donatı donatıların hazırlanması ve kütle neticeleri, daha sonra da hazırlanan beton numunelerde korozyon ölçüm cihazı ile yapılan ölçümler neticelendirilmiştir. Betonarmenin içinde bulunan bir çeliğin potansiyeli Nemst denklemine göre çözülmüş donatı iyonu konsantrasyonuna bağlıdır [16]. Bu denkleme göre, çözülmüş iyon konsantrasyonu arttıkça elektrot potansiyeli negatif yöne kayar. Korozyon hızı ile kütle farkı arasında doğru orantı vardır. Korozyona maruz kalan donatı önce ağırlığı artarak sonunda ise ağırlığını kaybederek fiziksel bir gerçeklik halindedir. Bu nedenle; çeliğin elektrot potansiyelinin negatif yönde artması çeliğin kütlelerinin değiştiğini gösterir. Bu fiziksel gerçeğe matematiksel olarak analitik bağlantısı bu tezde araştırılmıştır. Bu sonucu açıklayan neticeler altta verilmiştir.

4.1 Donatı Çubukların Kütle Neticeleri

Deneylerde kullanılan donatı çubukların kütlelerinin hesaplanması altta verilmiştir. Tüm kütle değerleri ise EK-1' de verilmiştir.

M_1 : Clark çözeltisinden geçen korozyonlu donatı çubukların ağırlığı (gr)

M_2 : Donatı çubukların korozyonsuz ağırlığı (gr)

π : 3.14

a_1 : Donatının alanı $2 \times \pi \times r(r + L)$ (cm²)

a_2 : 1 cm düşen alan a_1/L (cm)

L : Donatı çubukların boyu (cm)

φ : Donatı çubukların çapı (cm)

M_3 : $M_2 - M_1$ (gr)

M_4 $\frac{(M_2 - M_1) \times 100}{M_2}$

M_5 M_3/a_2 (\sum gr/cm)

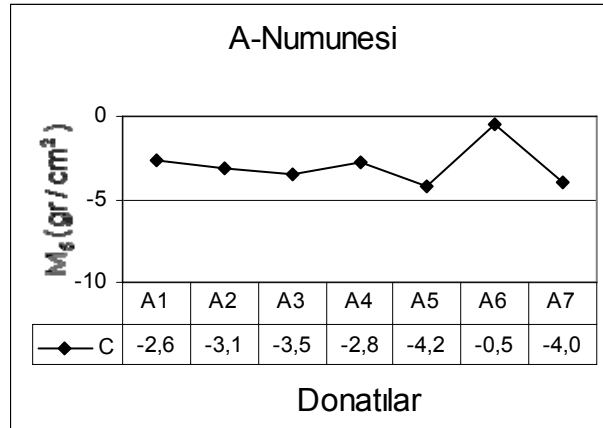
- MPY : (534 W)/(DAT)
M : Kütle kaybı (mg)
A : Alan (inç²)
T : Zaman (saat)
D : Çeliğin birim hacim ağırlığı 7.85 gr / cm

Çalışmada kullanılan elektro potansiyel değişimi ile kütle farklarının kütle vasıtasıyla korozyon hızını tanımlayan formül üstte verilmiştir [18].

4.1.1 Numunelerdeki Donatı Çubukların M_5 Değişimi

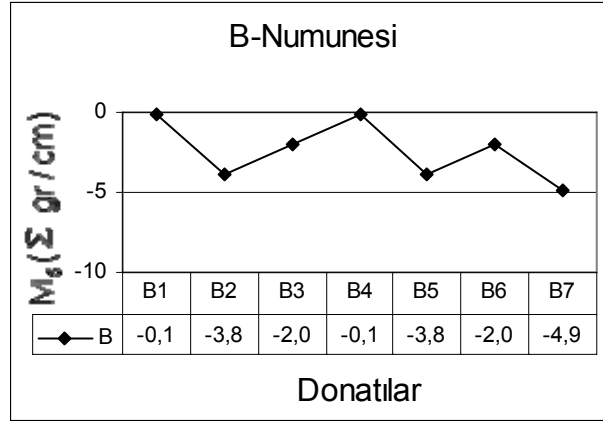
Donatıların kütlelerinin hesaplamaları EK-1 de gösterildiği gibidir. Çalışmanın esası olan kütle kayıplarının, ölçülen elektrot potansiyelleriyle karşılaştırılması için en gerçekçi kütle farkı hesabının; her bir numunede olan donatıların uzunluklarının farklılık göstermesi nedeniyle, her numune 1 cm²' ye düşen 1 cm' nin kütle farkıdır. M_5 in hesaplama yöntemi Ek-1 de verilmiştir.

Şekil 4.1 de A numunesinde ki her bir donatının kütle kayıpları verilmiştir. A numunesinde 7 farklı donatı kullanılmıştır. Donatıların diğer fiziksel özellikleri EK-1 de verilmiştir.



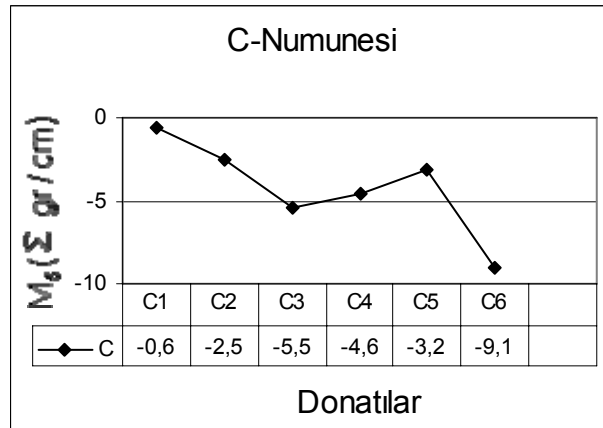
Şekil 4.1 Donatı Çubukların A Numunesindeki M_5 Değişimi

Şekil 4.2 de B numunesinde ki her bir donatının kütle kayıpları verilmiştir. B numunesinde 7 farklı donatı kullanılmıştır. Donatıların diğer fiziksel özellikleri EK-1 de verilmiştir.



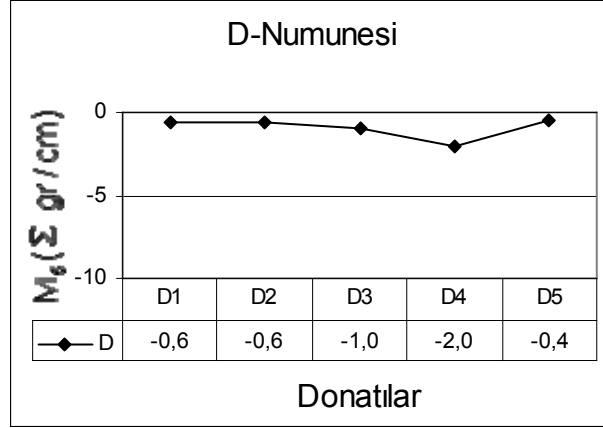
Şekil 4.2 Donatı Çubukların B Numunesindeki M_5 Değişimi

Şekil 4.3 de C numunesinde ki her bir donatının kütle kayıpları verilmiştir. C numunesinde 6 farklı donatı kullanılmıştır. Donatıların diğer fiziksel özellikleri EK-1 de verilmiştir.



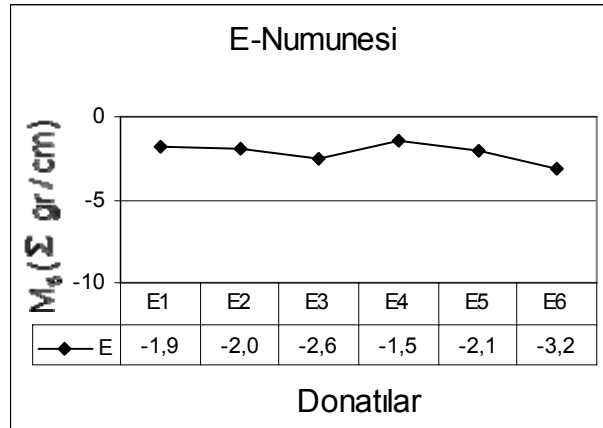
Şekil 4.3 Donatı Çubukların C Numunesindeki M_5 Değişimi

Şekil 4.4 de D numunesinde ki her bir donatının kütle kayıpları verilmiştir. D numunesinde 5 farklı donatı kullanılmıştır. Donatıların diğer fiziksel özellikleri EK-1 de verilmiştir.



Şekil 4.4 Donatı Çubukların D Numunesindeki M_5 Değişimi

Şekil 4.5 de E numunesinde ki her bir donatının kütle kayıpları verilmiştir. E numunesinde 6 farklı donatı kullanılmıştır. Donatıların diğer fiziksel özellikleri EK-1 de verilmiştir.



Şekil 4.5 Donatı Çubukların D Numunesindeki M_5 Değişimi

4.2 Korozyon Ölçüm Cihazı İle Numunelerin Değerlendirilmesi

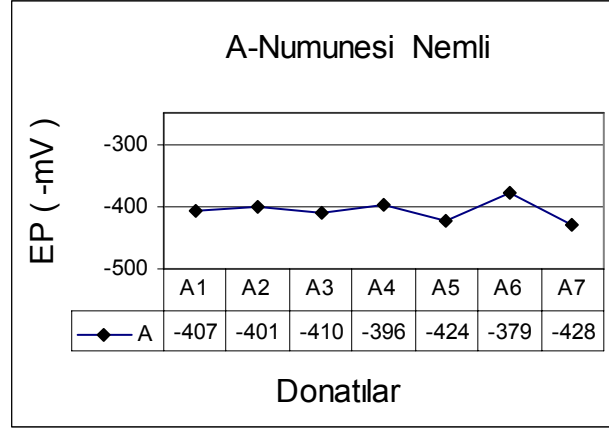
Numunelerin korozyon ölçüm cihazı ile değerlendirilmesinde ortam şartlarının nemli ve nemsiz olması nedeniyle; ölçümler iki farklı ortamda yapılmıştır. Numunelerin nemli ve nemsiz ortam şartlarına göre ortalama elektrot potansiyel değişimleri öncelikle daha sonra her bir numunenin nemli ve nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Sonuç olarak ise tüm numunelerin nemli ve nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

4.2.1 Numunelerde ki Korozyon Ölçüm Cihazı Sonuçları

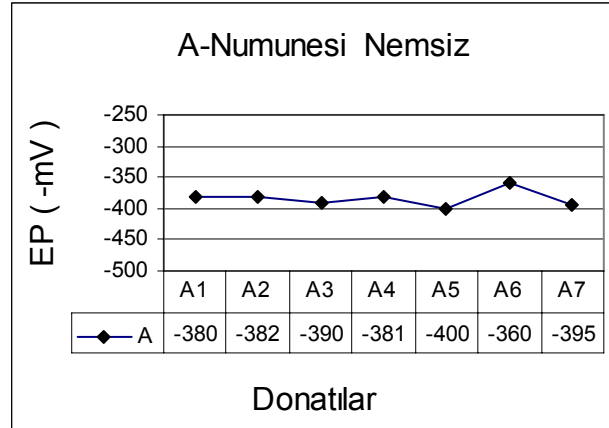
Numuneler iki farklı ortam şartlarında ölçülmüştür. Nemli ölçümlerde numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan, nemsizler ise bir gün bekletildikten sonra ölçülmüştür. Korozyon ölçüm cihazı ile betonarme içindeki donatıların üzerine temas edilerek her numune ayrı ayrı ölçülmüştür. Donatı barlar arasında elektriksel sürekliliğin olması nedeniyle avometre yardımıyla bu işlem kontrol edilmiştir. Yapılan her ölçüm 5 dk içinde aynı noktayı ± 20 mV' dan az gösterdiğinde değerlendirilmeye alınmıştır. Alınan değerlerin yorumlanması bölüm 3.3' de verilmiştir. Alınan potansiyel ölçüm sonuçlarını değerlendirilmesinde Çizelge 3.3.1 ASTM 876-91 göz önüne alınmalıdır. Ölçümler 5 kez tekrarlı olarak yapılmıştır. Her bir numunede ki donatıların elektro potansiyel değerleri ölçümlerin ortalama değerleridir. Değerlendirmede ölçümün özellikleri nedeniyle maksimum ve minimumlar için ayrı değerlendirme yapılmamıştır. Potansiyel ölçümlerinde korozyona maruz olan ve olmayan bölgeleri tespit etmek oldukça güçtür [1]. Ölçümlerde kullanılan aletin teknik özellikleri de göz önüne alınmıştır.

4.2.1.1 Numunelerin nemli ve nemsiz ortam şartlarına göre ortalama elektrot potansiyel değişimleri

A numunesindeki elektrot potansiyel değişimler Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 de verilmiştir.



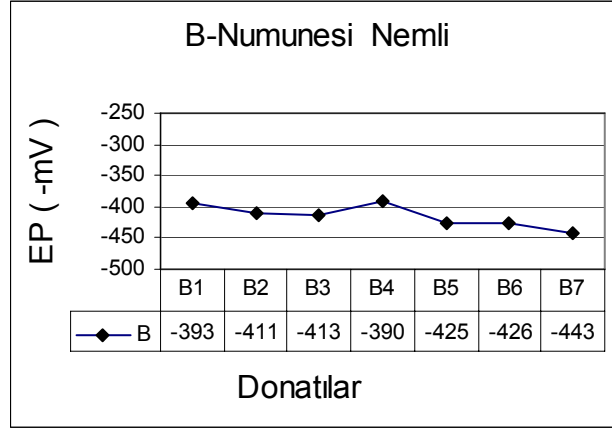
Şekil 4.6 A Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi



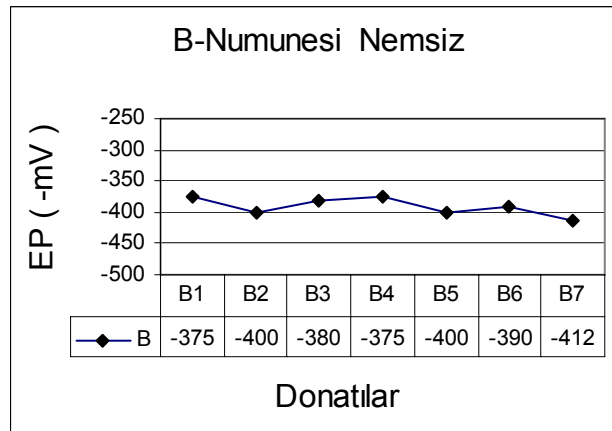
Şekil 4.7 A Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi

A numunesinde nemli ve nemsiz şartlarda elektrot potansiyellerinin ortalamaları alınmış -406 mV nemli şartlarda, nemsiz şartlarda ise -384 mV olarak ölçülmüştür. Elektrot potansiyellerinde -20 mV luk bir fark gözlenmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

B numunesindeki elektrot potansiyel değişimler Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 da verilmiştir.



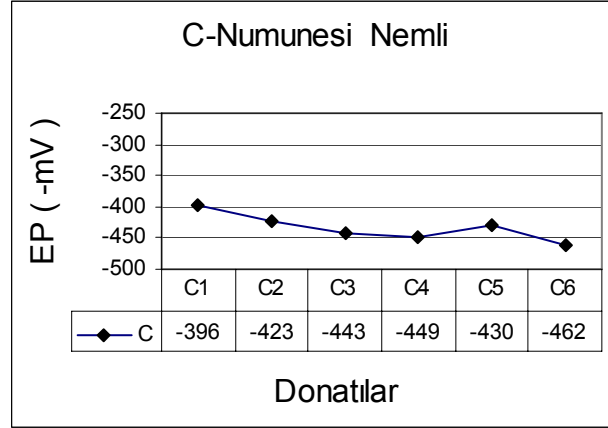
Şekil 4.8 B Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi



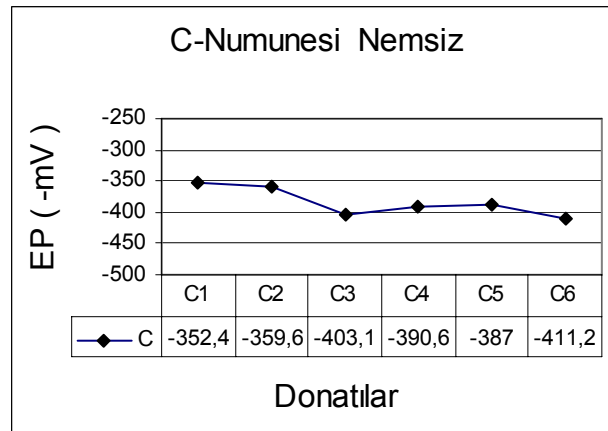
Şekil 4.9 B Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi

B numunesinde nemli ve nemsiz şartlarda elektrot potansiyellerinin ortalamaları alınmış -414 mV nemli şartlarda, nemsiz şartlarda ise -390 mV olarak ölçülmüştür. Elektrot potansiyellerinde -24 mV luk bir fark gözlenmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

C numunesindeki elektrot potansiyel değişimler Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 de verilmiştir.



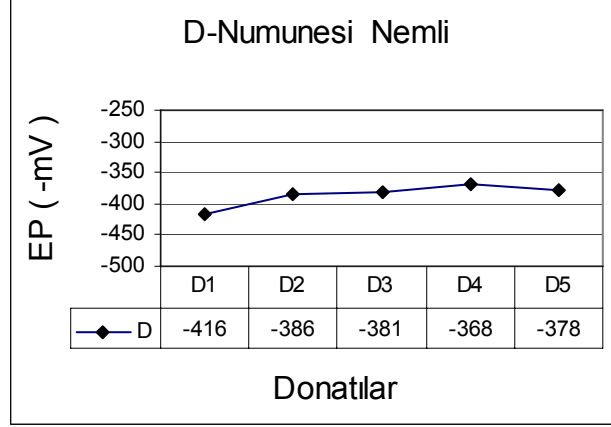
Şekil 4.10 C Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi



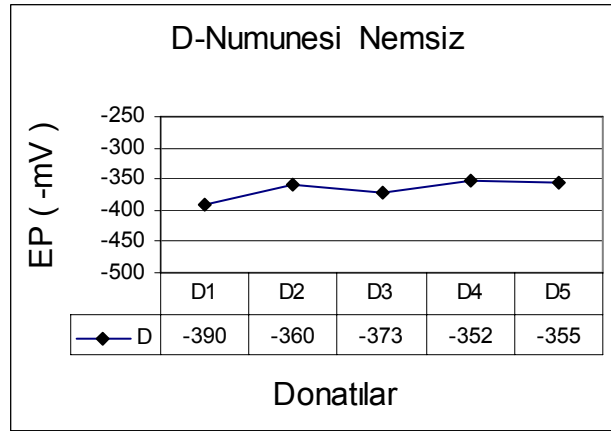
Şekil 4.11 C Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi

C numunesinde nemli ve nemsiz şartlarda elektrot potansiyellerinin ortalamaları alınmış -434 mV nemli şartlarda, nemsiz şartlarda ise -384 mV olarak ölçülmüştür. Elektrot potansiyellerinde -50 mV luk bir fark gözlenmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

D numunesindeki elektrot potansiyel değişimler Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 de verilmiştir.



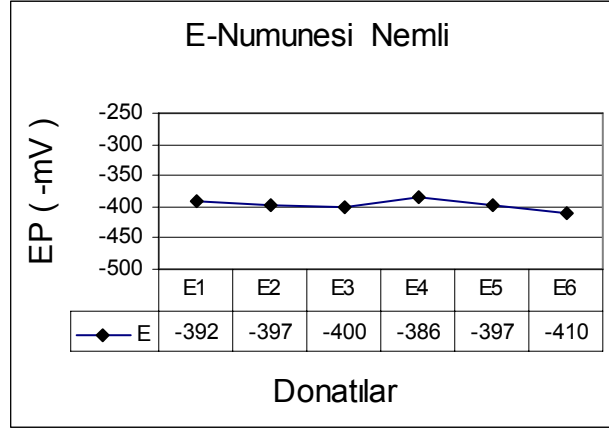
Şekil 4.12 D Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi



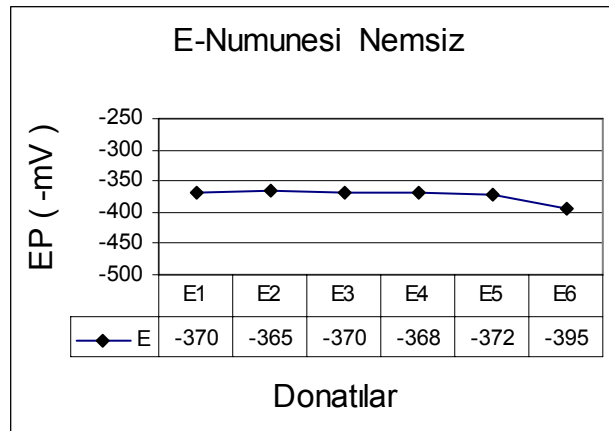
Şekil 4.13 D Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi

D numunesinde nemli ve nemsiz şartlarda elektrot potansiyellerinin ortalamaları alınmış -386 mV nemli şartlarda, nemsiz şartlarda ise -366 mV olarak ölçülmüştür. Elektrot potansiyellerinde -20 mV luk bir fark gözlenmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

E numunesindeki elektrot potansiyel değişimler Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 de verilmiştir.



Şekil 4.14 E Numunesinin Nemli Elektrot Potansiyel Değişimi

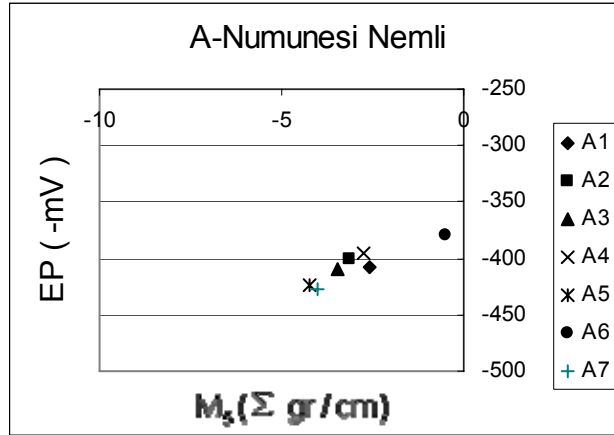


Şekil 4.15 E Numunesinin Nemsiz Elektrot Potansiyel Değişimi

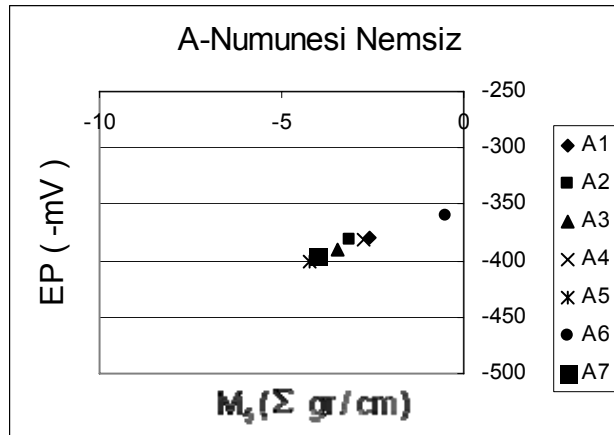
E numunesinde nemli ve nemsiz şartlarda elektrot potansiyellerinin ortalamaları alınmış -397 mV nemli şartlarda, nemsiz şartlarda ise -373 mV olarak ölçülmüştür. Elektrot potansiyellerinde -24 mV luk bir fark gözlenmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

4.2.1.2 Her bir numunenin nemli ve nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler

A Numunesindeki nemli ve nemsiz şartlarda ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler Şekil 4.16 – Şekil 4.17' de verilmiştir.



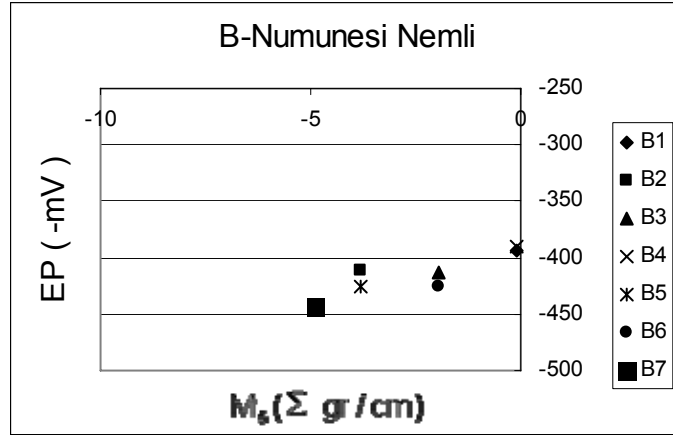
Şekil 4.16 A Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki



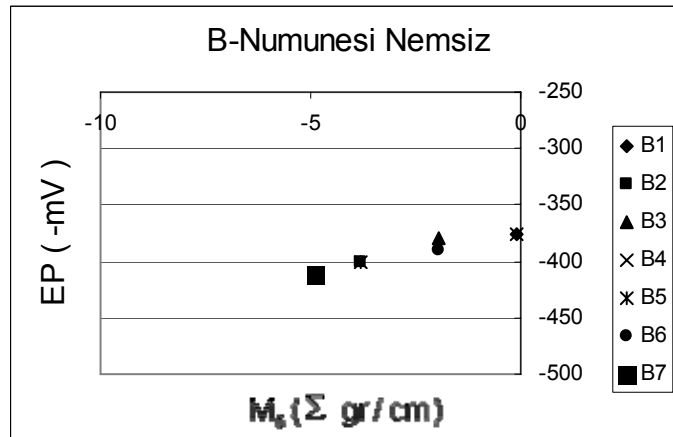
Şekil 4.17 A Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

A numunesinde her iki ortam şartında da elektrot potansiyel azalmasına karşı kütle (M_5) azalımı gözlenmiştir.

B Numunesindeki nemli ve nemsiz şartlarda ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler Şekil 4.18 – Şekil 4.19’ da verilmiştir.



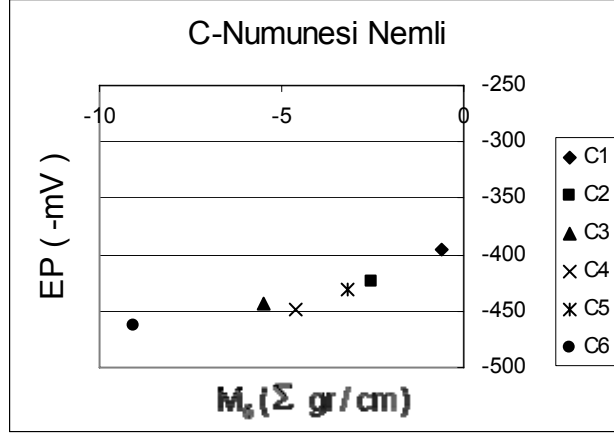
Şekil 4.18 B Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki



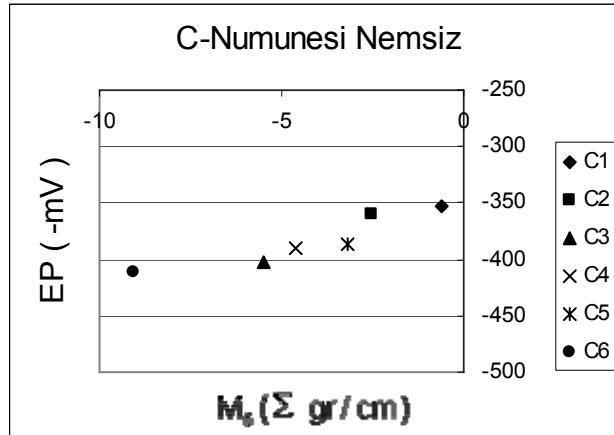
Şekil 4.19 B Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

B numunesinde her iki ortam şartında da elektrot potansiyel azalmasına karşı kütle (M_5) azalımı gözlenmiştir

C Numunesindeki nemli ve nemsiz şartlarda ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler Şekil 4.20 – Şekil 4.21’ de verilmiştir.



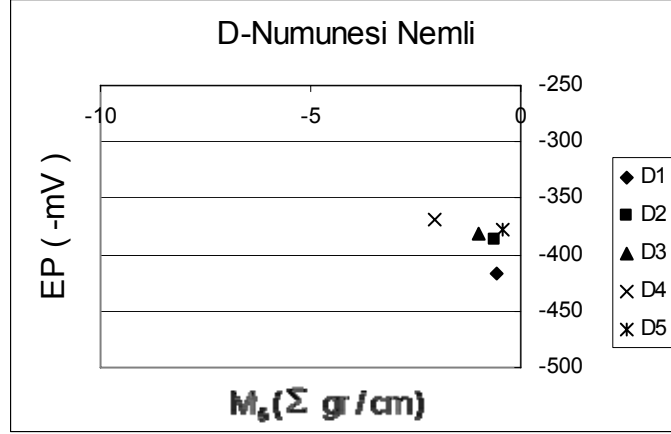
Şekil 4.20 C Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki



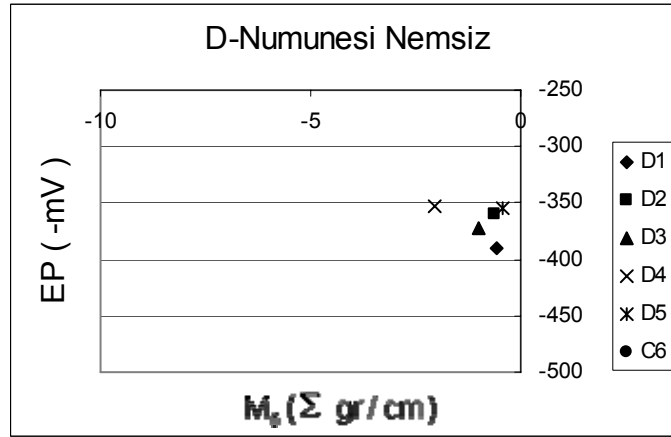
Şekil 4.21 C Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

C numunesinde her iki ortam şartında da elektrot potansiyel azalmasına karşı kütle (M_5) azalımı gözlenmiştir

D Numunesindeki nemli ve nemsiz şartlarda ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler Şekil 4.22 – Şekil 4.23' de verilmiştir.



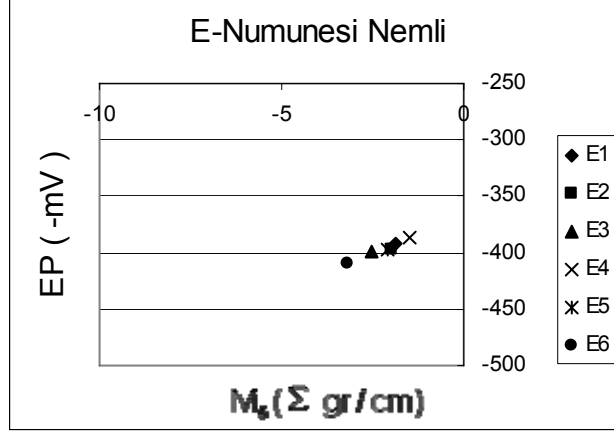
Şekil 4.22 D Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki



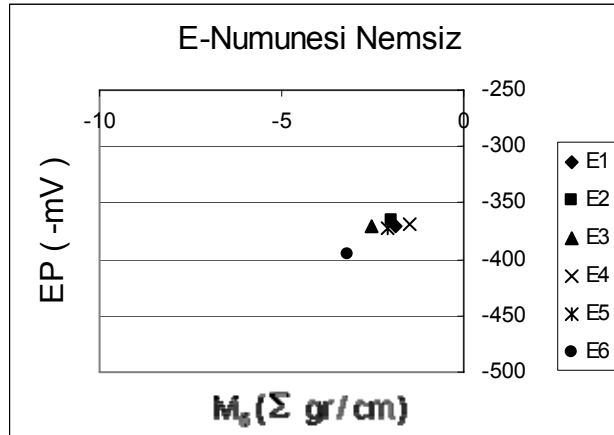
Şekil 4.23 D Numunesindeki Nemsiz Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

D numunesinde her iki ortam şartında da elektrot potansiyel azalmasına karşı kütle (M_5) azalımı gözlenmiştir

E Numunesindeki nemli ve nemsiz şartlarda ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler Şekil 4.24 – Şekil 4.25’ de verilmiştir.



Şekil 4.24 E Numunesindeki Nemli Şartlardaki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki



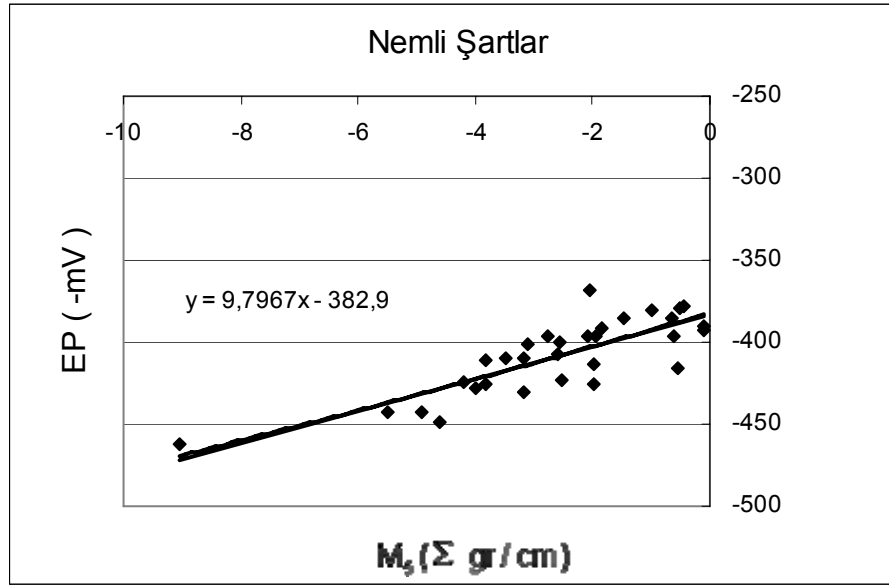
Şekil 4.25 E Numunesindeki Nemsiz Şartlarda Ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

E numunesinde her iki ortam şartında da elektrot potansiyel azalmasına karşılık kütle (M_5) azalımı gözlenmiştir

4.2.1.3 Tüm numunelerin nemli ve nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler

Tüm numunelerin nemli ve nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişkiler ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çalışmada, donatıların kütle farklarıyla elektrot potansiyel değişiminin ölçülmesi sonucunda, bu iki parametrenin birlikte değişimi değerlendirilmiştir. Donatılarda ölçülen elektrot potansiyel değerleri ortalamadır. Kütle kaybı ile elektrot potansiyel değişimi arasındaki ilişkinin hesaplanabilmesi için regresyon analizinde doğrusal fonksiyon kullanılmıştır.

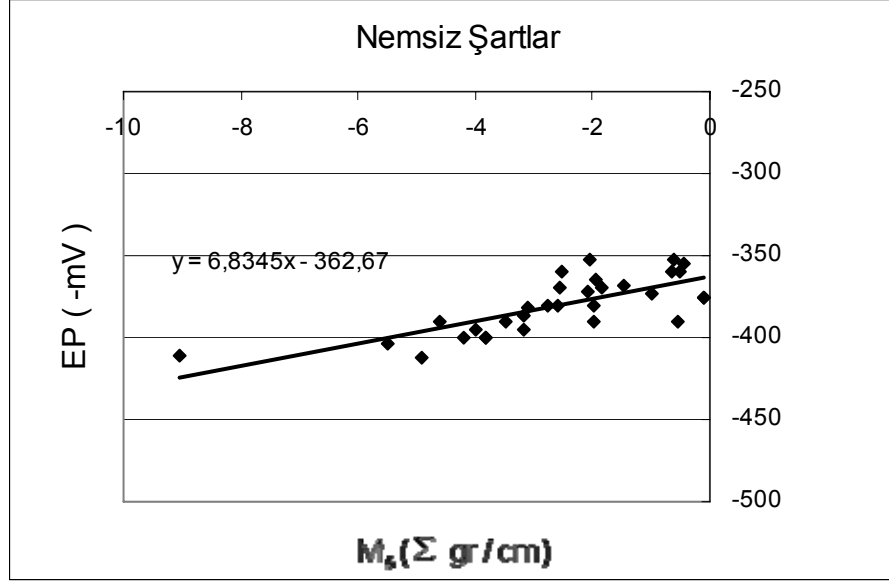
Nemli şartlardaki tüm numunelerin ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişki Şekil 4.26' da verilmiştir.



Şekil 4.26 Tüm Numunelerdeki Nemli Şartlarda Ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

Nemli şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri azaldıkça M_5 kütle kayıpları da azalmıştır.

Nemsiz şartlarda ki tüm numunelerin ortalama elektrot potansiyel değişimleri ile M_5 kütle kayıpları arasındaki ilişki Şekil 4'27 de verilmiştir.



Şekil 4.27 Tüm Numunelerdeki Nemsiz Şartlarda Ki Ortalama Elektrot Potansiyel Değişimleri İle M_5 Kütle Kayıpları Arasındaki İlişki

Nemsiz şartlarda ki ortalama elektrot potansiyel değişimleri azaldıkça M_5 kütle kayıpları da azalmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, donatıların kütle farklarıyla elektrot potansiyel değişiminin ölçülmesi sonucunda, bu iki parametrenin birlikte değişimi incelenmiş ve bu değişimin korozyonla ilişkisi araştırılmıştır. Korozyon mekanizması gereğince donatı; korozyon ürünleri oluşmaya başladıkça Fe^{++} iyonlarını kaybeden donatıda kütlece azalma olmaktadır[11, 12] Bu süreklilik devam ettikçe elektrot potansiyeli negatif yöne doğru kayar. Fiziksel gerçeklik olarak elektrot potansiyelin negatif değerler göstermesi, donatının korozif olmasını ve neticede önce kütle artımı daha sonra ise azalması olarak gerçekleşir [6, 8]. Bu nedenler ışığında kütle kaybı yüzde oranı ve elektrot potansiyel değişimi arasındaki değerlendirmede nemli nemsiz ortam şartlarında ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Fiziksel gerçeklik nedeniyle kütle değişimi arttıkça negatif elektrot potansiyel değerleri, kütle değişimi olmamışsa elektrot potansiyel değerlerinin ASTM C 876 ya göre -200mV yaklaşması gerekmektedir. Bu gerçeklik nedeniyle ölçüm sonuçlarının regresyon analizinde doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Şekil 4.26 ve 4.27 de sonuçlar verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre: Deneysel ölçümler ile fiziksel gerçeklik arasında bulgular önemlidir. Nemli ortam şartlarında: Kütle azalımı arttıkça, elektrot potansiyel değerlerinde azalma olmuştur. Ortalama elektrot potansiyel değerleri ise -408 mV olmuştur. Aynı numunelerin nemsiz ortamda yapılan ölçümlerinde ortalama elektrot potansiyel değeri -380 mV olarak aynı kütle azalımına karşılık gelmiştir. ASTM 876-91 e göre bu iki ortalama değer de korozyon olasılığı %90 aralığındadır.

Tüm bu değerlendirmeler; C14 sınıflı beton, pas payları ve diğer fiziksel özellikler ise bölüm 3' de açıklandığı veriler içindir. Bu çalışmada ölçüm yöntemi olan potansiyel ölçümü; teknik olarak söz konusu amaç için kullanılan elektro-kimyasal tekniklerin uygulama bakımından en basit olanıdır [14, 15]. Korozyon riskini belirlemede basit bir teknik olmasına rağmen bilimsel olarak doğrulanması oldukça güçtür ve yorumu dikkat ister [1, 5]. Buradan hareketle,

elektrot potansiyel değerinin azalmasını etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan en önemlileri beton bileşenleri, beton içindeki oksijen miktarı, karbonasyon durumu, klor durumu v.b. fiziksel değişimlerdir [17]. Bunun için tüm bu fiziksel ve mekanik farklılıklar elektrot potansiyelinin değişiminde asıl etkindir ve bunların farklılık göstermesi bu çalışmada ele alınan örneklere oranla farklılık gösterir.

Ülkemizin depremselliği, yapıların denetimsizliği ve kötü malzeme kullanımı sonucunda betondaki donatı korozyonunun ölçülmesinin yerinde tahribatsız, hızlı ve uzman kontrolünde olması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan kütle azalımı ile potansiyel azalım arasındaki ilişkinin kesin olarak ispatlanması için aynı numunelerin diğer bir yöntem olan Lineer polarizasyon rezistans ile karşılaştırılması gerekmektedir. Numunelerin sayısının 100 ün üzerinde olması ve yapı elemanlarına göre farklı boyutlarda olması gerekmektedir. Tüm bu karşılıklı değerlendirmelerin aynı şartları sağlaması çok dikkat istemektedir. Korozyon mekanizmasını etkileyen çok sayıda parametreyi sağlamak için laboratuvar ortamı yeterli olabilir fakat asıl amacın yerinde deneylerle bu ölçümleri gerçeğe en yakın ve bilimsel olması sağlanmasıdır. Ölçülen değerlerin ise genetik algoritmalar, sonlu farklar, sonlu elemanlar ve bulanık mantık gibi yöntemlerle karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmada uygulanan metot ve değerlendirme yöntemi ölçülen numunelerin korozyon hızı hakkında bilgi vermemektedir. Numunelerin aynı şartların korunarak aylık ölçümlerle; başlangıç da ki, ara ve sonuç ölçümler arasında potansiyel ölçümler değerlendirmelidir. Korelasyon yapılarak korozyon hızı hakkında bilimsel değerlendirmelere gidilmesi çalışmanın amaç sonuç ilgisini sağlamlaştıırır.

6. KAYNAKLAR

- 1-Erdoğdu, Ő., 2003, Betonda donatı korozyonu-ölçümü ve irdelenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler ve teknikler, 5.Ulusal beton kongresi
- 2-Çağatay, İ.H., 2004, "Experimental evaluation of buildings damaged in recent earthquakes in Turkey", *Engineering Failure Analysis*, V., 12, pp., 440–452
- 3-Sümer, M., Sarıbiyık, M., Fırat, S., Aydın, F., Depremde hasar görmüş yapıların beton kalitesinin incelenmesi, *Deprem Sempozyumu 2003* sf. 459–466
- 4-Koçak, A., 2003, "17 Ağustos 1999 Körfez ve 12 Kasım 1999 Düzce Depremi sonrası Marmara bölgesi' nde betonarme binaların onarım ve güçlendirmelerinde yapılan hatalar" Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Bildiri No: AT-077, İstanbul
- 5-Erdoğdu, Ő., 2002, Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu ve Katodik Koruma", *YKS Dergi*, stf.18-25, İstanbul
- 6-Covino Jr., Bullard , S.J., 2002, "Corrosion prevention and remediation strategies for reinforced concrete coastal bridges", *Cement & Concrete Composites*, V., 24, pp., 101–117
- 7-Feliu, S., Gonzales, J.A., Miranda, J.M., Feliu, V., 2005, Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in arge reinforced concrete structures", *corrosion science* 47, pp. 217–238
- 8-Fang C., Lundgren K., 2006, "Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete", *Cement and Concrete Research*, V., 36, 10, pp., 1931-1938
- 9-Parthiban, T., Ravi, R., 2004, "Neural network analysis for corrosion of steel in concrete" *Corrosion Science*, Vol.47, pp.1625-1642
- 10-Yeih, W., Huang, R., 1998, "Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing", *cement and concrete research*, Vol.28, pp.1071-1083
- 11-Law D., W., Cairns J., 2004, " Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarisation resistance measurements" *NDT & E International*, V. 37, Is., 5, pp. 381-388

- 12-Gonzales, J.A., Miranda, J.M., Feliu, S., 2004, "Consideration on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete", Corrosion Science, Vol.46, pp.2482-2485
- 13-Andre, C., Martinez, I., 2003, "Advances in the corrosion rate monitoring in real structures", 5.Ulusal Beton Kongresi, pp. 215-226
- 14-Yalçın, H., Koç, T., 2004, "Betonarme donatılarının korozyonu ve önlenmesi" CMS Ankara
- 15-Yalçın, H., Koç, T., 1997, Mühendisler için korozyon, TMMOB KMO Ankara
- 16-Talbot, D., Talbot, J., 1998, "Corrosion science and technology", CRC Press LLC, USA
- 17-Erdoğan, Ş., 2002, "Betonarme yapılarda akorozyonu ve katodik koruma", YKS Dergi, sf.18-25, İstanbul
- 18-TS 11222, Hazır-Beton, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000
- 19-TS 2940, Taze Betondan Numune Alma Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980
- 20-TS 3351, Şantiyede Taze Beton Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1979
- 21-TS 3068 Laboratuvarında Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı
- 22-ASTM C 94, Standart Test Method for Ready-Mixed Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1994

7. EKLER

- EK- 1 Donatı ubukların Ağırlık Neticeleri
EK- 2 Betonun zellikleri

Ek-1

M_1	Clark çözeltilisinden geçen korozyonlu Donatı çubukların ağırlığı (gr.)
M_2	Donatı çubukların korozyonsuz ağırlığı (gr).
M_3	$M_2 - M_1$ (gr.)
M_4	$(M_2 - M_1) / M_2$
a_1	Barın toplam alanı $2 \times \pi \times r(r + L)$ (cm ²)
a_2	1 cm düşen alan a_1 / L (cm)
M_5	M_3 / a_2 (\sum gr / cm)

NO	M_1	M_2	P_i	L	R	r	M_3	M_4 %	a_1	a_2	M_5
A1	31,86	38,67	3,14	9,8	8	0,4	-6,81	-17,61	25,6	2,6	-2,6
A2	31,34	39,46	3,14	10,0	8	0,4	-8,12	-20,57	26,1	2,6	-3,1
A3	29,98	39,06	3,14	9,9	8	0,4	-9,08	-23,25	25,9	2,6	-3,5
A4	31,82	39,06	3,14	9,9	8	0,4	-7,24	-18,54	25,9	2,6	-2,8
A5	28,06	39,06	3,14	9,9	8	0,4	-11,00	-28,17	25,9	2,6	-4,2
A6	38,94	40,25	3,14	10,2	8	0,4	-1,31	-3,25	26,6	2,6	-0,5
A7	27,84	38,27	3,14	9,7	8	0,4	-10,43	-27,26	25,4	2,6	-4,0
B1	39,59	39,85	3,14	10,1	8	0,4	-0,26	-0,66	26,4	2,6	-0,1
B2	30,66	40,64	3,14	10,3	8	0,4	-9,98	-24,56	26,9	2,6	-3,8
B3	34,32	39,46	3,14	10	8	0,4	-5,14	-13,02	26,1	2,6	-2,0
B4	39,59	39,85	3,14	10,1	8	0,4	-0,26	-0,66	26,4	2,6	-0,1
B5	30,66	40,64	3,14	10,3	8	0,4	-9,98	-24,56	26,9	2,6	-3,8
B6	34,32	39,46	3,14	10	8	0,4	-5,14	-13,02	26,1	2,6	-2,0
B7	27,39	40,25	3,14	10,2	8	0,4	-12,86	-31,95	26,6	2,6	-4,9
C1	36,64	38,27	3,14	9,7	8	0,4	-1,63	-4,27	25,4	2,6	-0,6
C2	32,05	38,67	3,14	9,8	8	0,4	-6,62	-17,12	25,6	2,6	-2,5
C3	25,14	39,46	3,14	10	8	0,4	-14,32	-36,29	26,1	2,6	-5,5
C4	27,03	39,06	3,14	9,9	8	0,4	-12,03	-30,81	25,9	2,6	-4,6
C5	31,19	39,46	3,14	10	8	0,4	-8,27	-20,95	26,1	2,6	-3,2
C6	14,98	38,67	3,14	9,8	8	0,4	-23,69	-61,26	25,6	2,6	-9,1
D1	20,44	21,53	3,14	9,7	6	0,3	-1,09	-5,06	18,8	1,9	-0,6
D2	21,84	23,08	3,14	10,4	6	0,3	-1,24	-5,39	20,2	1,9	-0,6
D3	20,74	22,64	3,14	10,2	6	0,3	-1,90	-8,39	19,8	1,9	-1,0
D4	18,91	22,86	3,14	10,3	6	0,3	-3,95	-17,28	20,0	1,9	-2,0
D5	21,33	22,20	3,14	10	6	0,3	-0,87	-3,90	19,4	1,9	-0,4
E1	104,52	111,86	3,14	12,6	12	0,6	-7,34	-6,57	49,8	3,9	-1,9
E2	74,71	82,57	3,14	9,3	12	0,6	-7,86	-9,52	37,3	4,0	-2,0
E3	83,05	93,22	3,14	10,5	12	0,6	-10,17	-10,91	41,8	4,0	-2,6
E4	85,6	91,44	3,14	10,3	12	0,6	-5,84	-6,39	41,1	4,0	-1,5
E5	81,3	89,67	3,14	10,1	12	0,6	-8,37	-9,33	40,3	4,0	-2,1
E6	70,66	83,45	3,14	9,4	12	0,6	-12,79	-15,33	37,7	4,0	-3,2

Ek-2

11.04.2006
11:10:19

AY-CAN İNŞAAT TAAH. TİC. LTD. STİ.
 Rasim Tekyıldız Cad. No:9
 19 Mayıs 106 004 7375
 OSKAR İNŞAAT
 SAMSUN

C14 CEM II A
 5136
 2370,75
 25 mm
 15 cm
 CLO,2
 CIIAPL425
 0-5,5-15,15-25
 MR5ON

C-14/16 Hazır
 7
 Pompalı
 0,72

11:10:19

M073 06 JND 74
 PO29

Malzeme	Formül	Hedef	N.farkı	Düzeltil	Reel	Kuru	Teori	Fark
1 Nolu agrega	390	2,73			2,71	2,71	2,73	-18
2 Nolu agrega	430	3,01			3,03	3,03	3,01	26
DKUM	1,11	7,82	336		7,76	7,42	7,82	-402
SU	181	1,26	-336		960	1,29	1,26	29
CIIAPL425	250	1,75			1,90	1,90	1,75	158
MR5ON	1,75	12,25			13,25	13,25	12,25	1
	2,37	16,59			16,38	16,38	16,59	-206

ÖZGEÇMİŞ

1970 tarihinde Ordu'da doğdum. İlkokulu Samsun Atatürk İlkokulunda, orta-lise öğrenimimi Samsun Anadolu Lisesinde tamamladım. 1990–1991 öğretim yılında İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümüne kayıt oldum. 21.3.1995 de lisans derecesiyle mezun oldum. 2002 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi' nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladım. 2003 yılında OMÜ Müh. Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladım. Halen Samsun Meslek Yüksekokulu' nda görev yapmaktayım.