

**ATMOSFERİK KOROZYONUN METAL
YAPI MALZEMELERİNE ETKİSİ ÜZERİNE
DENEYSEL BİR ÇALIŞMA VE YAPAY SİNİR
AĞI İLE KOROZYON HIZI TAHMİNİ**

Gülşah DOĞAN
Yüksek Lisans Tezi

Mimarlık Anabilim Dalı
Kasım-2006

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gülşah Doğan'ın “Atmosferik Korozyonun Metal Yapı Malzemelerine Etkisi Üzerine Deneysel Bir Çalışma ve Yapay Sinir Ağı ile Korozyon Hızı Tahmini” başlıklı Mimarlık Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.11.2006 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard. Doç. Dr. Emrah GÖKALTUN	
Üye	: Doç. Dr. Türkan GÖKSAL ÖZBALTA	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Emin GERMEN	

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATMOSFERİK KOROZYONUN METAL YAPI MALZEMELERİNE ETKİSİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA VE YAPAY SİNİR AĞI İLE KOROZYON HIZI TAHMİNİ

Gülşah DOĞAN

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı**

**Danışman: Yard. Doç. Dr. Emrah GÖKALTUN
2006, 105 sayfa**

Atmosfer, yapı malzemelerinin en sık maruz kaldıkları çevredir. Bu çevrenin kontrolsüz bir şekilde kirlenmesi sonucunda oluşan hava kirliliği ise hem canlı yaşamı hem de yapı malzemeleri için yadsınamayacak olumsuz sonuçların doğmasına neden olmaktadır. Bu olumsuz sonuçlardan birisi de metal yapı malzemelerinin atmosferik korozyon hasarına uğramasıdır. Kütle kaybı ile sonuçlanan atmosferik korozyon, metal yapı malzemelerinin bulundukları ortamdaki performanslarını ve yaşam sürelerini ciddi ölçüde etkilerken, sosyal ve ekonomik açıdan ise büyük maliyetlere neden olmaktadır.

Konunun bu çerçevedeki öneminden yola çıkılarak yapılan bu tezde, metal yapı malzemeleri üzerinde atmosferik korozyonun gelişimi ve etkileri deneysel bir yöntem ile araştırılmıştır. Korozyonun metal yapı malzemeleri üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymanın bir şekli de metalin korozyon hızının belirlenmesidir. Dolayısıyla, bu çalışmada, atmosferik korozyon hızı tahmini için bir yapay sinir ağı (DYSA) geliştirilmiş ve DYSA'nın korozyon hızı tahmin performansı literatürdeki MICAT ağıyla karşılaştırılmıştır. DYSA'nın MICAT ağına göre istatistiksel anlamda daha iyi korozyon hızı tahmini yapabileceği benzetim çalışmalarıyla ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Metal Yapı Malzemeleri, Atmosferik Korozyon, Korozyon Hızı, Yapay Sinir Ağı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACT OF THE ATMOSPHERIC CORROSION ON THE METAL BUILDING METEERIALS AND PREDICTION OF THE CORROSION RATE VIA ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Gülşah DOĞAN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Architecture Program**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Emrah GÖKALTUN
2006, 105 pages**

Atmosphere is the environment to which the building materials are often exposed. Air pollution which is formed due to polluting this environment in an uncontrolled way causes undeniable negative results for both living beings and building materials. One of these unfavorable results is the atmospheric corrosion damage to the metal building materials. The weight loss as a consequence of the atmospheric corrosion significantly affects the performance and lifetime of the metal building materials and results in big economical and social costs.

In this thesis, which is based on the importance of the subject in the aforementioned context, the development of the atmospheric corrosion on the metal building materials and its effects are investigated based on an experimental study. One of the ways that can be used to quantify the impact of the corrosion on the metal building materials is to determine the corrosion rate. Thus, in this study, an artificial neural network (DYSA) was developed to predict the atmospheric corrosion rate, and the prediction performance of the DYSA was compared against the MICAT network presented in the literature. The fact that the DYSA can predict the corrosion rate better than the MICAT network in the statistical sense was showed using simulation studies.

Keywords: Metal Building Materials, Atmospheric Corrosion, Corrosion Rate, Artificial Neural Network

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. ÇEVRE, ÇEVRE SORUNLARI VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ	4
2.1. Çevre Kavramı	4
2.2. Çevre Sorunları ve Sebepleri	7
2.3. Çevre Kirliliği	10
3. ATMOSFER KİRLİLİĞİ, KAYNAKLARI, KİRLETİCİLER VE ETKİLERİ	13
3.1. Atmosfer Kavramı	13
3.2. Atmosferik Kirlilik ve Hava Kalitesi	15
3.3. Atmosferik Kirlilik Kaynakları	17
3.3.1. Doğal kaynaklar	18
3.3.2. Antropojenik (Yapay) kaynaklar	19
3.4. Atmosferik Kirleticiler	20
3.4.1. Primer (Birincil) kirleticiler	20
3.4.1.1. Karbon oksitler (CO _x)	20
3.4.1.2. Kükürt oksitler (SO _x)	21
3.4.1.3. Azot oksitler (NO _x)	23
3.4.1.4. Partikül maddeler (PM)	24
3.4.2. Sekonder (İkincil) kirleticiler	25
3.4.2.1. Fotokimyasal oksidantlar	25
3.4.2.2. Atmosferik asitler ve asit yağmurları	27

4. YAPI MALZEMELERİNDE HASARA NEDEN OLAN FAKTÖRLER VE ETKİLERİ	29
4.1. Yapı Malzemesi-Dayanıklılık-Hasar İlişkisi	30
4.2. Yapı Malzemelerinin Sınıflanması	33
4.3. Yapı Malzemelerinde Hasara Neden Olan Faktörler	34
4.3.1. Çevresel (Atmosferik) faktörler	36
4.3.1.1. Güneş-radyasyon etkisi	36
4.3.1.2. Su ve nem etkisi	37
4.3.1.3. Isı-sıcaklık etkisi	38
4.3.1.4. Yağış ve rüzgar etkileri	38
4.3.2. İnsan kaynaklı faktörler	39
4.3.2.1. Atmosferik kirlilik etkisi	39
5. METAL MALZEMELERDE KOROZYON OLAYI VE ATMOSFERİK KOROZYON	43
5.1. Korozyon ve Önemi	43
5.2. Korozyon Olayının Temelleri	45
5.3. Korozyon Oluşum Şekilleri	47
5.4. Atmosferik Korozyon	49
5.4.1. Atmosferik korozyonu etkileyen faktörler	50
5.4.1.1. Hava bileşenlerinin etkileri	51
5.4.1.2. Doğal koşulların etkileri	53
5.5. Korozyon Hızı ve Önemi	54
6. METAL YAPI MALZEMELERİNDE ATMOSFERİK KOROZYON OLUŞUMUNA İLŞKİN DENEYSEL BİR ÇALIŞMA	56
6.1. Yöntem	56
6.2. Bulgular	59
6.3. Değerlendirme ve Sonuç	60

7. KOROZYON HIZI TAHMİNİNDE KULLANILAN YAPAY SİNİR AĞLARININ YAPISINA GENEL BİR BAKIŞ	64
7.1. Yapay Sinir Hücresi (Algılayıcı)	66
7.2. Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı Yapısı	69
7.3. Öğrenme Süreci	70
7.4. Geriye Yayılım Algoritması	72
7.5. Çok-Katmanlı Ağların Eğitilmesi	72
8. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KOROZYON HIZI TAHMİNİ	74
8.1. MICAT Projesi.....	74
8.2. DYSA- Korozyon Hızı Tahmini Yapay Sinir Ağı.....	76
8.2.1. DYSA Ağ Yapısının Belirlenmesi	76
8.2.2. DYSA Eğitim Algoritmasının Seçilmesi	77
8.2.3. DYSA İçin Verilerin Gruplanması ve Ölçeklendirilmesi.....	79
8.2.4. DYSA'nın Eğitimi ve Sonuçlar	81
8.3. Hızlandırılmış Korozyon Deneyleri İçin Korozyon Hızı Tahmini ...	87
9. SONUÇLAR	89
KAYNAKLAR	92
Ek-1 MICAT Veri Tabanı	96
Ek-2 Eğitim ve Test Gruplarını Oluşturmak İçin Geliştirilen MATLAB Programı	100
Ek-3 Korozyon Hızı Tahmini İçin Geliştirilen MATLAB Programı ...	102
Ek-4 DYSA'nın Ağırlık ve Eşik Değerleri	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.1	Yapı ömrü-dayanıklılık ilişkisi.....	31
5.1	Çelik çubuk üzerinde korozyon oluşumu.....	46
5.2	Atmosferik korozyon süreçlerinde atmosferik kirleticiler, meteorolojik şartlar ve çökelme mekanizmalarının etkileşimi.....	51
6.1	UVS/KVS değerleri ile hazırlanmış sülfirikasit/nitrikasit kuru çökelme mekanizmalarının deney desikatörü içinde oluşturulması.....	58
6.2	Metal örneklerin cam desikatör içindeki konumları.....	58
6.3	Deney düzeneği.....	59
6.4	Kapakları hava geçirmeyecek şekilde kapatılmış olan desikatörler.....	59
6.5	Sülfirikasit (UVS/KVS) KÇM aracılığıyla kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları.....	60
6.6	Nitrikasit (UVS/KVS) KÇM aracılığıyla kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları.....	61
6.7	KÇM mekanizmasının etkisi ile kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları.....	61
7.1	Yapay sinir hücresi (algılayıcı) modeli.....	66
7.2	Sigmoid fonksiyonun şekilsel gösterimi.....	68
7.3.	Bir yapay sinir hücresinin çalışması örneği.....	68
7.4	Çok katmanlı yapay sinir ağı örneği.....	69
7.5	Öğretmenli öğrenmenin blok diagramı.....	71
8.1	Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu.....	78
8.2	DYSA'nın sıcaklık ve nisbi nem değişkenleri için duyarlılık analizi.....	86
8.3	DYSA'nın ıslaklık süresi ve yağış miktarı değişkenleri için duyarlılık analizi.....	87
8.4	DYSA'nın kükürtdioksit ve klor iyonu değişkenleri için duyarlılık analizi.....	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1	Normal kuru havanın bileşenleri.....	15
3.2	Hava kirliliği probleminin ölçekleri.....	17
4.1	Hava kirliliği nedeniyle yapılan yenileme faaliyetlerinin maliyetleri.....	30
4.2	Yapı ömrü kategorileri.....	32
4.3	Çeşitli malzemelerde oluşan hava kirliliği hasarları.....	42
5.1	Metallerin gerilim serisi ve normal potansiyelleri.....	47
6.1	Uzun vadeli ve kısa vadeli hava kalitesi sınır değerleri.....	57
8.1	MICAT ağının teknik özellikleri.....	75
8.2	DYSA'nın teknik özellikleri.....	79
8.3	DYSA'nın çeşitli ara katman sinir hücresi sayıları için ölçülen performans değerleri.....	83
8.4	DYSA'nın çeşitli aktivasyon fonksiyonları için ölçülen performans değerleri.....	84
8.5	DYSA ile MICAT ağının performans karşılaştırması.....	84

1. GİRİŞ

Yeryüzünde bulunan tüm canlılar için yaşamın sürdürülebilmesi, ancak çevreyle uyumlu bir birliktelik söz konusu olduğu takdirde mümkündür. Çünkü çevre canlı-cansız tüm elemanları ile bir bütündür ve bu elemanlar arasında çok yönlü ilişkiler ve etkileşimler bulunur. Diğer tüm canlılar gibi yaşamın gereklilikleri için çevresine bağımlı olan insan da çevresinden etkilenmekte ve çevresini etkilemektedir. İnsan ve çevresi arasında süregelen çok yönlü ve kesintisiz etkileşim, zaman içinde insanoğlunun sınırsız gereksinimlerini karşılamak üzere çevreyi bilinçsizce kullanması sonucunda bozulmaya başlamıştır. Gelişen teknoloji, nüfus artışı ve beraberinde oluşan plansız ve çarpık kentleşme gibi insandan kaynaklanan etkiler doğanın dengelerini zorlamaya başlamış, tüketim toplumunun gereksinimleri için çevre kullanılır hale gelmiştir. Üretim ve tüketim faaliyetlerinin çevre gözetilmeksizin gerçekleştirilmesi ise pek çok çevre sorununu beraberinde getirmiştir. Yaşam standartlarının hızla yükseldiği günümüzde, her geçen gün artan enerji gereksiniminin fosil kökenli yakıtlardan sağlanması çok ciddi bir tehdit olan hava kirliliğinin oluşmasında önemli bir rol oynamıştır. Taşınım ve yayılım süreçleri nedeniyle yerel olmanın ötesine geçerek küresel bir soruna dönüşen hava kirliliği hem canlı hem de cansız çevre için ciddi bir sorun halini almıştır. Canlı yaşamı üzerinde yaptığı zararlı etkiler ile birlikte, yapılı çevre üzerindeki etkileri nedeniyle de hava kirliliği günümüzde üzerinde en çok durulan çevre kirliliği problemi olmuştur.

Yapılar bulundukları ortam şartlarına göre, yaşam süreleri boyunca çok çeşitli etkilere maruz kalırlar. Bu etkiler süresince, yapıda kullanılan malzemelerin içyapılarında ya da yüzeylerinde bozulma ve hasarlar oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan malzemelerde oluşabilecek hasarlar kullanıcıların konforunu ve sağlığını olumsuz olarak etkilerken, yapı ömrünün de azalmasına yol açmaktadır. Yapı sağlığının korunması, var olan strüktürün servis ömrünün artırılabilmesi, yapılarda hasar/bozulma kaynaklı zararların neden olduğu ekonomik ve sosyal maliyetlerin önüne geçilebilmesi, yani uygun koruyucu tedbirlerin alınabilmesi için yapı malzemelerinde hasara neden olabilecek faktörlerin ve etkilerinin anlaşılması gerekmektedir. Bu faktörler içinde yer alan hava kirliliği, yapı malzemeleri üzerinde çeşitli hasar mekanizmalarının oluşmasında ya da oluşan hasar mekanizmalarının hız kazanmasında oldukça önemli bir unsur olmaktadır. Dolayısıyla, yapılar ve yapı malzemeleri üzerindeki yıkıcı etkileri hava kirliliği probleminin pek çok alanda

olduğu gibi mimarlık alanında da yankı bulmasına neden olmuş, gerek anıtlar ve tarihi yapılar, gerekse günümüz yapıları üzerinde hava kirliliğinin olası etkilerinin anlaşılabilmesi mimarlık alanında da hava kirliliği konusunda kapsamlı çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmıştır (Atkinson, 1970; Yocom ve Upham, 1976; Rosvall, 1988).

Bu çalışmada ise, hava kirliliğinin etkilerinden oldukça fazla zarar gören metal yapı malzemeleri üzerinde atmosferik korozyonun gelişimi ve etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Atmosfer, metal yapı malzemelerinin en sık maruz kaldıkları çevredir ve çeşitli nedenlerle de yeterince koroziftir. Ancak, üretim, ısınma ve ulaşım amacıyla kullanılan fosil kaynaklı yakıtların yanma atıkları olarak atmosfere bırakılan ve hava kirliliğinin oluşumunda önemli rol oynayan SO₂ ve NO₂ gibi kirleticilerin varlığında, atmosferin korozif etkisi önemli ölçüde artmaktadır. Bu kirleticiler çeşitli atmosferik faktörlerle (sıcaklık, nem) birleşerek, tüm malzemelere olduğu gibi metallere de “Kuru ve Islak Çökelme Mekanizmaları” olmak üzere iki farklı şekilde ulaşmakta ve metallerin korozyon hızını etkilemektedir. Korozyon, metallerde kütle kaybına neden olan çok önemli bir hasar biçimidir. Ancak oldukça yavaş ilerleyen bir süreç olması nedeniyle oluşum ve gelişim açısından kütle kaybının meydana gelmesi için uzun bir süreye ihtiyaç vardır. Bu nedenle metallerde kısa zamanda korozyonun oluşmasını ve ilerlemesini sağlamak amacıyla laboratuvar koşullarında hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmasına karar verilerek, atmosferik kirleticilerin (SO₂ ve NO₂) kuru çökelme mekanizmalarının etkileri ve bu etkiler sonucunda seçilen metaller üzerinde oluşan korozyon oluşumlarının hangi boyutta gerçekleştiğinin araştırılması amaçlanmıştır. Başlangıçta, oluşan korozyon ürünlerinin öncelikle kütle artışına neden olması ve ilerleyen süreçte korozyon ürünlerinin metal yüzeyinden ayrılması sonucunda kütle kaybının gerçekleşmesi nedeniyle, başlangıçtaki kütle artışının korozyon hasarının gözlenmesinde temel veri olabileceği düşünülmüş ve metal yapı malzemeleri olarak, inşaat sektöründe yoğun bir şekilde kullanılan düz demir, kutu profil ve saç levha seçilmiştir.

Atmosferik korozyon nedeniyle oluşan çok ciddi sosyal ve ekonomik kayıplar göz önüne alındığında, kullanılacakları ortam koşullarında metal malzemelerin olası korozyon yatkınlıklarının bilinmesi ve bu doğrultuda önleyici tedbirler alınması gerçeği gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Günümüzde gelişmiş ülkelerde atmosferik korozyon hızının ölçülmesi ve korozyon kaynaklı kayıpların önlenmesi amacıyla sürekli olarak araştırmalar yapılmaktadır. Atmosferik korozyonun anlaşılabilmesi için,

birçok farklı bilim dalındaki (metalürji, fizik, kimya, klimatoloji, vb.) teorik ve pratik bilgi birikimine duyulan gereksinim, disiplinler arası çalışmaların yapılmasını gerekli kılmış ve atmosferik korozyon çalışmalarında, elektrik-elektronik ve bilgisayar mühendisleri tarafından 1980’li yıllardan sonra özellikle yoğun biçimde araştırma konusu yapılan yapay sinir ağları, korozyon hızı tahminlerinde literatürde yaygın olarak kullanılmıştır (Pintos ve ark. 2000; Cai ve ark. 2002; Parthiban ve ark. 2005). Literatürdeki çalışmalara paralel olarak, bu çalışmada yapay sinir ağlarının korozyon hızının tahmini için kullanılması amaçlanmıştır.

2. ÇEVRE, ÇEVRE SORUNLARI VE ÇEVRE KİRLİLİĞİ

“İnsan ve diğer tüm canlıların yaşamlarını sağlamalarını ve sürdürebilmelerini olanaklı kılan bir sistemler bütünlüğü” olarak tanımlanabilen çevre, içerisinde barındırdığı dengelerin insan kaynaklı etkiler ile bozulması sonucunda çok çeşitli şekillerde ortaya çıkan ve dünyamızın geleceği için önlemler alınmasını zorunlu kılan ciddi sorunlar nedeniyle, günümüzde üzerinde çok tartışılan bir konu haline gelmiştir. Çevre sorunları içerisinde, çok eskiden beri var olmakla birlikte özellikle endüstrinin gelişmesi, yaygınlaşması ve gelişen teknolojiye paralel olarak yaşam standartlarının yükselmesi sonucunda büyük bir sorun olarak belirginleşen çevre kirliliği önemli bir yer tutmaktadır. Bugün boyutları nedeniyle insanlığın dünya çapındaki sorunlarından birisi olan çevre kirliliğinin yıkıcı etkileri, hem canlılar hem de cansız sistemler üzerinde açık bir şekilde görülebilmektedir.

2.1. Çevre Kavramı

Yeryüzünde yaşayan tüm canlılar, varlıklarını devam ettirebilmek ve gelişebilmek için en uygun fiziksel ve kimyasal koşullara gereksinim duyarlar. Bir canlının var olabilme koşullarını oluşturan bu fiziksel-kimyasal unsurlar ve diğer tüm canlılar, o canlının çevresini meydana getiren öğeleri oluştururlar.

Bu açıdan bakıldığında en genel anlamıyla “çevre”, bir organizmanın yaşamı üzerinde etkisi olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörlerin bütünlüğüdür.

İnsan açısından ise en geniş tanımıyla çevre, insan ve diğer tüm canlı varlıklar ile birlikte doğanın ve doğadaki insan yapısı öğelerin bütünü olarak tanımlanabilir (Ertürk, 1994).

“Çevre”; doğal, yapısal, sosyal, ekonomik ve kültürel değerlerin ve bu değerlerin etkileşimlerinin bir bütünüdür. Nitekim, Çevre Envanteri Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanan Türkiye Çevre Atlasında çevre kavramı için şu tanım yapılmaktadır:

Çevre, insanın içinde yaşadığı ve sürekli olarak yararlandığı tüm doğal varlıklar ile meydana getirdiği tarih ve kültürün birbiriyle ilişki ve etkileşim içinde bulunduğu bir sistemler bütünüdür (Baykan, 2004).

Çevre kavramı çok geniş bir kapsama sahip olan ve çeşitli disiplinler açısından incelendiğinde farklı biçimlerde tanımlanabilen bir kavramdır. Ancak bu tanımlarda ortak olan şu öğeler belirginleştirilebilir:

- Canlı ve cansız varlıklar arasındaki ilişki,
- Canlı yaşamını etkileyen fiziksel, kimyasal, biyolojik ve toplumsal etkenler.

Her canlının çevresi, canlı ve cansız çevrelerden oluşur. Bir canlı ile aynı fiziksel alanı paylaşan ve canlıyı doğrudan yada dolaylı olarak etkileyen tüm canlılar onun “canlı çevre” sidir. Yaşayan tüm canlıların yaşamları içindeki her türlü ilişkilerini kapsayan bu ortamın öğeleri, insanlar, bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalardır.

Diğer taraftan canlının, içinde veya üzerinde yaşamının olduğu somut ortamlar “cansız çevre”yi meydana getirir. Canlı üzerinde etkili olan fiziksel ve kimyasal tüm cansız faktörler, yerküre, iklim elemanları, su ve toprağın fiziksel, kimyasal özellikleri, cansız çevrenin öğeleridir.

Taygun ve Balanlı (2005) tarafından, yaşam içinde yer alan ilişkiler ve yaşamın oluşturduğu ortamlar bütünlüğü olarak tanımlanan çevrede, canlı ve cansız çevre öğeleri arasında karşılıklı bir ilişki ve etkileşim söz konusudur.

İnsanın diğer insanlarla olan ilişkiler sürecinde birbirleri üzerinde etkin olması, insan dışındaki canlı varlıklarla ilişki ve etkileşim süreci, bunun yanısıra tüm cansız öğelerle olan karşılıklı ilişkisi, cansız çevre üzerinde birtakım etkiler yaparak farklılaşmalar meydana getirmiştir. Bu farklılaşma sonucunda, insanın kendi amaç ve gereksinimleri doğrultusunda, gerek kent ölçeğinde gerekse yapı ölçeğinde kendisinin yarattığı “yapay çevre” (şehirler, yollar, barajlar) oluşmaktadır. Buna karşılık, oluşumunda hiçbir insan etkisi olmayan cansız çevre ise “doğal çevre” (su, hava, toprak) olarak varlığını korur. Bu şekilde incelendiğinde cansız çevre, doğal çevre ve içinde oluşturulan yapay çevrelerden oluşmaktadır.

Tüm canlılar her türlü yaşam faaliyetlerini yerkürenin biyosfer (ekosfer) adı verilen katmanında gerçekleştirir. Biyosfer ise; “belirli bir alanda yaşayan ve birbirleriyle sürekli etkileşim içinde olan canlılar ile cansız çevrelerin oluşturduğu bütün (Özer, 1995)” olan ekosistemlerden meydana gelir ve tüm ekosistemleri kapsar. Bir ekosistemde canlı ve cansız çevre arasında hiç durmaksızın süren bir madde ve enerji akışı gerçekleşir.

Yaşamın sürekliliğini sağlayan ve yaşamın temel öğeleri olan su, mineral, besin maddeleri, oksijen, karbon, azot gibi birçok madde, canlılar ve cansız çevre arasında düzenli ve dengeli olarak dolaşmaktadır. Ekosistemler içinde veya ekosistemler arasında devam eden bu süreçlere doğal (ekolojik) döngü denmektedir (Erdin, 1995). “Doğal (ekolojik) döngü” dengesinin bozulmaması tüm canlılar için büyük önem taşımaktadır.

Çevre canlı ve cansız elemanları ile bir bütündür ve bu bütünün bir parçası olan insan da diğer canlılar gibi varlığını sürdürmek için çaba içerisinde. “Yaşam” dediğimiz olayın sürdürülebilmesi için, diğer insanlardan ayrı, bireysel yaşamak yerine toplu halde yaşamaya gereksinim duyarak, bu ortamlarda belirli alanlarda uzmanlaşıp, işbölümünün yerleşmesini sağlayan insanlar, toplumları oluşturarak toplumsal yaşam içinde yer alırlar.

Toplumsal yaşam karmaşıklaştıkça, her geçen gün sayıları giderek artan ve çeşitlenen insan gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. İnsan ise bu gereksinimleri karşılama sürecinde daha ileri teknolojileri üretmektedir. Söz konusu süreçler yaşanırken, yaşam koşullarını sürekli olarak geliştirmeye ve çağın koşullarına uyum sağlamaya çalışan insan ve çevresi arasındaki etkileşim de vazgeçilemez niteliktedir.

Dinamik bir yapıya sahip olan çevre, kendisini sürekli olarak yenileyip geliştirirken, içinde yaşayan insanların algısı, bilgisi ve yaşam biçimleri de sahip olduğu zekâsı ile zaman içinde çeşitli değişimler göstermekte ve gelişmektedir. İnsanları ve diğer canlıları birbirinden ayıran en önemli ekolojik fark, diğer canlıların var olan ekolojik koşullara uyum sağlaması, insanların ise doğal çevre koşullarını kısmen de olsa değiştirerek denetimleri altına almalarıdır (Erdin, 1995). Başlangıçta çevresinden yararlanma çabasıyla başlayan ancak bilim ve teknolojinin gelişme gösterdiği tüm zamanlar içinde, egemen güç olmaya çalışan insanın, geçmişten günümüze çevreyi öznel istekleri doğrultusunda sürekli olarak değiştirmesi ve kullanması, doğal çevresiyle arasında var olması gereken uyumu bozmaktadır.

İnsanoğlunun doğayı fethi ve denetimi geliştirmek amacıyla bilgisini örgütlemesiyle oluşan teknoloji şimdi öncelikle, amaç, öncelik ve yöntemlerini değiştirmek zorundadır. İnsanın kendisiyle de yabancılaşmasını önleyecek bir yeni anlayış gerektiren bu değişim sonucunda teknoloji, teknoloji’ye dönüşecektir. Böylece teknoloji doğaya karşı bir fetih ve talan aracı olmaktan çıkarak, insanın doğayla uyumuna hizmet edecektir. Doğayla uyuma yönelen insan zamanla onu değiştirmeyi sürdürse bile bu değişim yok etme yerine geliştirme boyutuna ağırlık

verecektir (Eryıldız, 1996). Bu nedenle insanın içinde bulunduğu doğal ve toplumsal dünyayı kendi amaçları doğrultusunda en etkin ve verimli bir şekilde değiştirilebilmesi ve kontrol edebilmesi için insan bilgisinin ve deneyimlerinin en gelişkin bir şekilde toplumsal yaşama uyarlanması gerekmektedir.

Bir yaşamı sürdürme ve sağlama sistemi olan çevre, bize geçmişten bırakılan bir miras değil, korunması, geliştirilmesi ve gelecek nesillere en güzel şekilde devredilmesi gereken bir emanettir. İnsan, geleceği için çevreyi tanıma ve doğru kullanma yöntemlerini geliştirerek onunla uyum içinde yaşamasını öğrenmelidir. Kirlenmiş, bozulmuş bir çevrede insanın sağlıklı bir şekilde yaşaması mümkün olamaz.

2.2. Çevre Sorunları ve Sebepleri

İnsan dünya üzerindeki varlığını sürdürebilmek için çevresi ve diğer canlılar ile bir birliktelik içinde olmak zorundadır (Tönük, 2003). İnsan yaşamın temel gereksinimleri için çevresine bağımlıdır ve çevresini etkilediği ölçüde çevresinden etkilenmektedir.

İnsan ve çevresi arasında süregelen bu iki yönlü ve kesintisiz etkileşim zaman içinde, gelişen teknolojiler, nüfus artışı ve beraberinde oluşan çarpık ve düzensiz kentleşme gibi, insandan kaynaklanan etkilerin doğanın dengelerini zorlaması sonucu bozulmaya başlamıştır.

Özellikle 17. yüzyıldaki sanayi toplumuna geçiş çabaları ve bilim ve teknolojinin doğanın üstünde görülmesi anlayışı, insanoğlunu doğadan koparmış ve doğayı sadece kaynak olarak gören zihniyeti de beraberinde getirmiştir. Artan nüfusun besin ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla yeni tarım alanları açmak için doğaya yapılan müdahaleler ile başlayan iyi niyetli yaklaşımlar, tüketim toplumunun gereksinimleri için doğanın kullanımına kadar dayandırılmıştır (Eryıldız, 2003).

Çevre sorunlarının oluşumu, 18 yüzyılın ikinci yarısında gerçekleşen endüstri devrimi ile başlamaktadır. Buna paralel olarak baş döndürücü bir hızla artan sanayi ve teknolojiye gelişmeler sorunun boyutlarının her geçen gün artmasına neden olmuştur. Bunun temelinde yatan sebep ise, sanayileşmenin meydana getirdiği aşırı fosil yakıt tüketimidir. Hayatın her anında ve her alanında kullanmak zorunda olduğumuz enerjinin büyük ölçüde fosil kökenli enerji kaynaklarından sağlanması ve bu yakıtların yanma atıkları olan emisyonların atmosfere bırakılması ile havadaki

karbondioksit miktarının artması sonucu küresel ısınma ve ozon tabakasının incelmeye gibi tüm insanlığı ilgilendiren küresel boyuttaki sorunlar meydana gelmiştir. Zehirli kimyasalların ve tehlikeli atıkların sanayi üretimi sırasında ve sonrasında, kontrolsüz şekilde doğaya bırakılması dünyada geri dönüşü imkânsız zararlara yol açmaktadır.

Dünya üzerinde nüfusunun hızla artması çevre sorunlarının oluşumunda önemli bir başka kaynağı oluşturmaktadır. 1650 yıllarından başlayıp, nüfus patlamasına varacak boyutlardaki artış, “dünya çapında afet” olarak nitelendirilmiştir (Akıncıtürk, 1999). İhtiyaçların sınırsız, kaynakların sınırlı olduğu yeryüzünde, hızlı nüfus artışı sonucunda, gün geçtikçe tükenen kaynakları daha fazla sayıda insanın kullanmak durumunda kalması ve tüketim sonrasında oluşan çeşitli atıkların doğada kalması ve birikmesi çevrenin giderek bozulmasına neden olmaktadır.

Çevre sorunlarının oluşumunda bir diğer sebep ise kentleşme olgusudur. Sanayileşme ve ekonomi gibi çeşitli nedenlerle insanların köylerden, kasaba ve kentlere göç etmesiyle kentlerde nüfus yoğunluğu hızla artmaktadır. Ancak kentlerde yaşayan nüfusun toplam nüfus içindeki payının artıyor olması, yerleşim alanlarındaki kentsel standartların yükseldiği ve yaşam kalitesinin arttığı anlamına gelmemektedir (Hafizoğulları, 1996). Kentlere göç eden nüfusun gereksinim duyduğu hizmetlerin yeterli ölçüde sağlanamayışı, tarım alanlarının etkin olmayan kullanımı ve doğal kaynakların yer aldığı bölgelerin yerleşim amacıyla kullanılması “çarpık ve sağlıklı kentleşme” sonucunu doğurmaktadır. Ne yazık ki bu durum insanların hem sağlık koşullarını hem de toplumsal yaşamlarını olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

Günümüz çevre sorunları, süregelen üretim ve tüketim ilişkilerinin bir sonucu olarak yorumlanabilir (Hafizoğulları, 1996). Sınırsız insan gereksinimlerine bağlı olarak şekillenen üretim ve tüketim faaliyetleri doğa gözetilmeden gerçekleştirildiği takdirde birçok sorunu beraberinde getirmektedir. Nitekim, insan bu gereksinimlerin karşılanması sürecinde,

- gerek duyduğu hammaddelerin sağlanması,
- mal ve hizmetlerin üretimi-tüketimi ve
- daha sonra doğaya atık olarak aktarılması

aşamalarının her birinde doğaya önemli ve geri dönülemez zararlar vermektedir (Karakaya ve Özçağ, 2004).

Bu açıklamalar ışığında genel anlamda çevre sorunları; yapay çevresini oluşturmaya çalışan insanın, doğal çevre üzerinde yarattığı tüm olumsuz etkiler ile

doğal kaynakların aşırı ve yanlış kullanımı ve doğal çevre tahribinin yanısıra, yapay çevrenin sağlık koşullarına uygun olmayışı nedeniyle ortaya çıkan sorunlar olarak tanımlanabilir (Ertürk, 1994).

Tüm çevresel sorunların en büyük kaynağı aslında, sınırsız insan gereksinimlerinin karşılanması için çevreyi bilinçsizce kullanan insanoğludur. Sanayileşme, nüfus artışı ve düzensiz kentleşme gibi süreçleri yaratan insan, teknolojinin verdiği güç ile doğal dengeleri bozmaya başlamış, ancak uzun süre çevreye verdiği zararlardan habersiz bir şekilde yaşamını sürdürmüştür. Yaşadığımız yüzyılın başlarına kadar kendi kendini yenileyebilen doğa, insanoğlunun giderek yoğunlaşan zararlı eylemleri sonucunda kendini yenileyemez hale gelmiştir (Gürçınar ve Uzun, 1998). Bunun sonucunda, uzun yıllar fark edilmeyen çevresel etkiler, “çevre sorunları” olarak adlandırılan ve çevre ile ilişkilerimizde çok ciddi, kaygı verici bir dizi olayla sonuçlanınca, insan bu problemlerle nasıl mücadele edeceğini sorgular olmuştur. Sınır tanımaz özellikte oluşu nedeniyle küresel bir sorun haline gelmiş olan çevre sorunları, dünyanın geleceğini koruma ve gelecek kaygısı ile tüm dünyanın dikkatini çevre konusuna yöneltmiştir. Çevre sorunlarının önüne geçilmesi, çevre bilinci ve eğitimi, çeşitli etkinlik ve konferanslarla (Stockholm Konferansı- 1972, Rio Konferansı- 1992) dünya ülkelerinin gündemine yerleşmiştir. Günümüzde insanlığın dünya çapındaki sorunlarından bazıları şunlardır:

- Sera etkisi yapan gazların kontrolsüz şekilde artan emisyonları sonucu küresel iklim değişikliği,
- Küresel ısınma sonucunda deniz seviyesinde meydana gelen yükselmeler,
- Ozon tabakasının incilmesi,
- Tropikal ormanların yok olması ve çölleşmenin hızla yayılması,
- Hayvan ve bitki türlerinin neslinin tükenmesi,
- Fosil yakıtların aşırı kullanımının asit yağmurlarını artırması,
- Çevre kirliliği.

Çeşitli kaynaklardan bırakılan atıkların artması ve çeşitlenmesi sonucunda, hava, su ve toprakta meydana gelen ve çevre kirliliği olarak tanımlanan kirlilikler bu sorunlar arasında büyük dikkat çekmekte, içinde bulunduğumuz yüzyılda halen, dünyamızın geleceği için ciddi bir tehdit oluşturmaya devam etmektedir.

2.3. Çevre Kirliliği

Teknolojik gelişmeye dayalı olarak hızla gelişen sanayileşme insanoğluna önemli olanaklar sunmakla birlikte, aşırı nüfus artışı ve çarpık kentleşme faktörleriyle ile beraber, çevre sorunları içinde çok önemli bir yer tutan ve en çok dikkat çeken “çevre kirliliği” sorununa sebep olan unsuru da oluşturmaktadır. Artan nüfusun ve kentleşmenin gereksinimlerini karşılayabilmek için sanayide ortaya çıkan "daha çok üretim" zorunluluğu, daha çok atık oluşmasına neden olmuş ve bunun sonucu olarak çevre kirlenmesi görülmeye başlamıştır.

Başta sanayi olmak üzere insanların tüm ekonomik ve yaşamsal faaliyetleri sonucu ortaya çıkan zehirli kimyasallar ve tehlikeli atıklar her hangi bir işlem görmeden doğrudan doğaya bırakıldıklarında, doğanın bu atık maddeleri her zaman için özümsemesi mümkün olamamaktadır. Bu imkânsızlığın temelinde doğanın sınırlarını zorlayan aşırı birikim yatmaktadır. Özdemir (1988) tarafından, çevre kirliliklerinin oluşmasındaki temel neden, doğanın insan etkinlikleri sonunda ortaya çıkan atıkları kendiliğinden giderme yeteneğini aşması olarak belirtilmiştir.

Doğada oluşan birikimin bir kısmı mikroorganizmaların etkisi ile fiziksel ve kimyasal değişime uğratarak canlılara zarar vermeyecek duruma gelmektedir. Ancak bazı atıkların zararlı özellikleri değişime uğramamakta, kirliliği oluşturan maddeler besin zinciri ile canlılara taşınmakta ve birikmektedir. Bu durum ise kısa ve uzun vadede canlı bünyesinde hasarlara yol açmakta ve onların yaşamlarını tehdit eder bir hal almaktadır. Çevre kirliliği sadece canlı varlıkları etkilemeyip aynı zamanda cansız varlıklar üzerinde de çeşitli zararlı etkiler yapmakta, binalar, araç ve malzemeler de çevre kirliliğinden olumsuz bir şekilde etkilenmektedir.

Çevre kirliliği Ertürk (1994) tarafından, toprak, su ve havanın fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerinde insan etkinlikleriyle ortaya çıkan ve arzu edilmeyen değişimler olarak doğal dengeyi bozan, fizyolojik ve psikolojik etkiler yoluyla canlılar ve cansızlar üzerinde olumsuz etkiler yaratan bir olgu olarak tanımlanmıştır. Normal koşullarda fiziksel çevrenin öğelerini oluşturan su, toprak ve havada doğal bir denge söz konusudur. Biyosferde gerçekleşen çok yönlü- karşılıklı etkileşim nedeniyle su, toprak veya havadan birisinde oluşan kirlilik diğerlerine de taşınarak dolaylı olarak kirlenmesine neden olmaktadır. Ancak kirlenmelerin sebepleri ve etkileri farklılıklar göstermektedir. Çevre kirliliği başlıca su, toprak ve hava kirliliği olarak ele alınabilir.

Su kirliliği, organik, inorganik, biyolojik ve radyoaktif herhangi bir maddenin suya karışarak suyun nitelik ve yapısında değişikliklere neden olmasıdır. Tarımsal, kentsel ve endüstriyel etkinlikler sonucunda su kirliliği meydana gelmektedir. Bu etkinliklerden bazıları şunlardır:

- Tarla verimini arttırmak için kullanılan kimyasal gübrelerin ve tarımsal mücadele ilaçlarının toprağa karışıp su kaynaklarına ulaşması,
- Yerleşim alanlarındaki alt yapı yetersizlikleri nedeniyle, kanalizasyon ve çöp atıklarının katı ya da sıvı şekilde suya bırakılması,
- Sanayi atıklarındaki zehirli madde ve kimyasal kirleticilerin suya karışması.

Toprak aşınması ile toprağın en verimli üst kısmının sürüklenerek su kaynaklarına karışması ve tarımsal mücadele ilaçlarının da (pestisit) etkisiyle, azot ve fosfor gibi besin maddeleri suda daha fazla bulunmakta ve su ortamında yaşayan bazı yosun türlerinin çoğalmasına neden olmaktadır. Sudaki erimiş oksijen tüketimini arttıran yosunlar diğer bitki ve hayvan türlerinin yaşamasını engellemektedir. Bu ise ortamdaki canlı çeşitliliğinin azalmasına neden olabilecek önemli bir sorundur. Bir diğer önemli unsur ise, pestisitlerin (DDT) ve zehirleyici etkilere sahip olan sanayi atıklarının (kurşun, cıva, bakır) balıklarda yoğunlaşarak besin zinciri yoluyla insanlara ulaşması ve insan sağlığını ciddi bir şekilde etkilemesidir.

Toprak kirliliği, insan etkinlikleri sonucunda, toprağın fiziksel, kimyasal, biyolojik ve jeolojik yapısının bozulmasıdır. Toprak kirliliğine neden olan en önemli kirletici unsurlar katı ve sıvı atıklardır. Bu atıklar,

- uygun olmayan tarım teknikleri,
- aşırı gübre ve pestisit kullanımı,
- atık ve zehirli maddelerin toprağa bırakılması,
- asit yağmurları ve havadaki kirletici gazların toprağa karışması ve
- kirlenen sularla toprağın sulanması

gibi nedenler sonucunda toprakta birikmekte ve kirliliği meydana getirmektedir.

Sanayi tesisleri ve kent alanlarının ürettiği kimyasal maddeler, toprağın asitleşmesi, aşırı ve bilinçsiz gübreleme, biyolojik aktivitelerin azalması, toprak yapısının olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır. Toprak yapısının bozulması, bitki gelişimini yavaşlatmakta bunun sonucunda ise verimlilik azalmaktadır. Diğer yandan

toprak ve bitki üzerinde biriken ağır metaller insan bünyesine geçerek insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

Hava kirliliği ise, boyutları ve canlı-cansız varlıklar üzerindeki yıkıcı etkileri nedeniyle çevre kirliliği sorunu içerisinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Canlı yaşamı üzerinde genel bir tehdit oluşturmalarının yanısıra, özellikle yapılar ve yapı malzemeleri üzerinde hasar oluşumlarına neden olmakta ya da malzemelerin doğal bozulma süreçlerini hızlandırmaktadır. Dolayısıyla, bu hasar mekanizmalarının oluşmasında/hızlanmasında temel rol oynayan atmosferik kirleticiler ve niteliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle hava kirliliği konusu kapsamlı ve ayrıntılı bir şekilde Bölüm 3'te anlatılacaktır.

3. ATMOSFER KİRLİLİĞİ, KAYNAKLARI, KİRLETİCİLER VE ETKİLERİ

İnsan gereksinimlerinin hızla arttığı ve teknolojik gelişmelerin sınır tanımadığı günümüzde, tüm canlılar için yaşamın temelini oluşturan atmosfer, gerek doğa olayları ve gerekse insan faaliyetleri sonucunda çeşitli şekillerde kirlenmektedir. Belirli ölçülerde kendi kendini temizleyebilme yeteneğine sahip olmasına rağmen, nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme gibi nedenlerle oluşan kirliliklerin gün geçtikçe çoğalması ve aşırı birikmesi atmosferin doğal yapısında birtakım değişikliklerin oluşmasına ve bunun sonucunda da atmosferik kirliliğin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

3.1. Atmosfer Kavramı

Atmosfer yerçekimi kuvvetinin etkisiyle biyosferi çepeçevre saran gazlar topluluğudur. Canlılar için yaşamsal öneme sahip olan atmosfer, troposfer, stratosfer, kemoster ve iyonoster olmak üzere dört bölümden oluşmaktadır. **Troposfer**, alt atmosfer tabakasıdır ve yeryüzü ile doğrudan ilişkili olup hava olayların çoğu bu tabakada gerçekleşmektedir. Ekvator üzerinde 16, kutuplar üzerinde ise 8 km kalınlıkta olan troposfer atmosferin toplam kütesinin % 75'ini oluşturmaktadır. İkinci tabaka **stratosfer** tabakasıdır. Güneşten gelen zararlı ultraviyole ışınlarını süzen ve dünya üzerindeki canlı yaşamı koruyan ozon tabakası bu katman içinde yer almaktadır. Stratosferdeki ozon konsantrasyonu troposfere göre yaklaşık 1000 kat fazladır (Bishop, 2004). **Kemosfer** ve **iyonosfer** ise stratosferin üzerindeki tabakalardır. Bu tabakalarda güneş enerjisinin absorbe edilmesinin ve saçılmasının, troposfer ve stratosferdeki güneş enerjisi miktarı, dağılımı ve bu iki katmana erişen kozmik ışınlar açısından önemli bir rolü vardır (Stern ve ark. 1984). Farklı fiziksel-kimyasal özellikleri dolayısıyla farklı işlevlere sahip olan bu katmanlar, yerküre üzerinde canlı yaşamını olanaklı kılan, koruyan ve düzenleyen birer örtü gibi atmosfer ortamı içinde sıralanmaktadırlar. Çok çeşitli işlevleri olmakla birlikte, dünya atmosferi insanoğluna varoluşundan bugüne,

- yaşamını sürdürebilmesi için nefes alacağı havayı sağlamak ve
- atıklarını atabileceği bir ortam olarak görev yapmak

üzere iki temel şekilde hizmet etmektedir (Bach, 1972).

Oksijene bağımlı diğer tüm canlılar ve insan için yaşamsal önemi olan, canlı yaşamını sürdürülebilir kılan **hava**, içindeki değişik gazlar, su buharı ve partiküller ile atmosferi dolduran renksiz ve kokusuz bir gazdır. Oksijen yaşam için temel oluşturanın yanı sıra, yanma olaylarını da sağlayan bir maddedir. Havanın bileşimini oluşturan gazlar, hava içerisinde değişik oranlarda bulunmaktadır. Bu gazlardan azot, oksijen ve argon gazları hava içinde ağırlıklı olarak yer aldıklarından dolayı, hava içindeki miktarları yüzde oranları ile ifade edilebilmektedir. Diğer gazlar ise çok küçük miktarlarda bulunduklarından genellikle ppm (parts per million) veya ppb (parts per billion) birimleriyle ifade edilmektedir. Buna göre ppm, havanın bir milyon hacimlik kısmında yer alan bileşenin, ppb ise bir milyar hacimlik kısmında yer alan bileşenin hacim miktarıdır. Normal kuru havanın doğal bileşimi Çizelge 3.1’de gösterilmektedir (Bishop, 2004). Kirlenmemiş havada bulunan gazlar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

- Havada devamlı bulunan ve çoğunlukla miktarları değişmeyen gazlar (azot, oksijen ve soygazlar),
- Havada devamlı bulunan ve miktarları azalıp çoğalan bileşenler (karbondioksit, su buharı, ozon),
- Kirlenici özellik taşıyan gazlar (iz gazlar: kükürtdioksit, azotdioksit, metan, amonyak, diazotmonoksit, hidrojen).

Azot, oksijen ve soygazlar olarak bilinen helyum, neon, argon, kripton ve ksenon gazları, miktarları değişmeyen ana gazlardır. Buna karşılık su buharı yüzdesi, sıfıra yakın değerler ile dört arasında olup, oldukça değişkendir (Bishop, 2004). Bunların dışında yine doğal bileşenler olarak ancak çok küçük miktarlarda bulunan iz (trace) gazlar da temiz havada yer almaktadır. Sıkça “kirlenitiler” olarak isimlendirilen bu bileşiklerin miktarları insan aktivitelerinden dolayı önemli ölçüde artmaktadır (Amoroso ve Fassina, 1983). Hava kirliliğinin oluşması da bu iz (trace) gazlarının havadaki derişimlerinin artışı ile gerçekleşmektedir.

Gerek doğa olayları ve gerekse insan aktiviteleri sonucunda, atmosfer hiç bir zaman temiz olmamış, antik çağlardan başlayarak günümüze kadar çeşitli derecelerde sürekli olarak kirlenmiştir. Buna karşılık, insan aktivitesiyle ilişkili, kabul edilebilir miktarlardaki atıkların etkili bir şekilde ortadan kaldırılmasını sağlayacak yeteneğe sahip olan atmosferi, insanın ayırım gözetmeksizin devasa bir çöp öğütücü olarak

kullanımı yerel hava kirliliklerine ve en sonunda da ortam hava kalitesinin küresel ölçekte kötüleşmesine neden olmaktadır (Bach, 1972).

Çizelge 3.1. Normal kuru havanın bileşenleri

Gaz	Formül	Hacim Yüzdesi
Azot	N ₂	78.08
Oksijen	O ₂	20.94
Argon	Ar	0.934
Karbondioksit	CO ₂	0.033
Neon	Ne	0.00182
Helyum	He	0.00052
Metan	CH ₄	0.00015
Kripton	Kr	0.00011
Hidrojen	H ₂	0.00005
Diazotmonoksit	N ₂ O	0.00005
Ksenon	Xe	0.000009

3.2. Atmosferik Kirlilik ve Hava Kalitesi

Atmosferik kirlilik, karmaşık taşınım süreci ve hava kirliliğinin karakterini değiştirebilecek fiziksel ve kimyasal süreçlerin çokluğu nedeniyle karmaşık bir problemdir (Bishop, 2004). Bu nedenle, içerik ve kapsam olarak bazı değişiklikler söz konusu olsa da genel olarak: “Havada katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı hayatına ve ekolojik dengeye zararlı olabilecek derişim ve sürede bulunması (Okutan, 1993)” olarak tanımlanabilir.

Modern yaşamın bir sonucu olarak karşımıza çıkan atmosferik kirlilik çeşitli nedenlerle havanın doğal yapısının değişmesidir. Bir kaynak, bir taşıyıcı ortam ve bir de alıcı ortamın bulunduğu kirlilik olayında, kirlilik oluşturan maddelerin atmosferde artarak havanın doğal yapısını değiştirmesi, alıcı için hava kalitesini azaltmaktadır. Hava kalitesi, insan ve çevresi üzerine etki eden hava kirliliğinin bir göstergesidir. Hava kalitesi sınır değerleri ise insan sağlığını korumak ve çevrede kısa-uzun vadeli olumsuz etkilerin ortaya çıkmasını önlemek amacıyla, uzun vadeli sınır değerler (UVS) ve kısa vadeli sınır değerler (KVS) olarak tespit edilmiş değerlerdir. UVS,

kirleticilerin düşük miktarlarının uzun süreler solunmasıyla ortaya çıkan kronik etkiler için verilen üst sınır değerlerdir. KVS ise, kısa sürede hava kirleticilerin yüksek derişimlerinin solunmasıyla ortaya çıkan kısa süreli akut etkiler için belirtilen sınır değerlerdir (Okutan, 1993).

Atmosferik kirlilik yaratan kaynaklar çok çeşitli olmakla birlikte, atmosfer üzerindeki olumsuz etkileriyle hava kalitesini bozan en önemli faktör yanma olaylarıdır. Isınma ve ulaşım gibi amaçlar için kullanılan yakıtların kalitesi bu nedenle oldukça önemlidir. Teknolojik gelişmelerin ve dünya nüfusunun hızla artışına paralel olarak artan enerji ihtiyacının fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanması yanında, yanma sonucunda oluşan atık gazların yeterli teknik önlemler alınmadan havaya bırakılması, endüstri kuruluşlarının yanlış yerlerde yapılandırılması, yerleşim alanlarının uygun topografik yapı gözetilmeksizin oluşturulması, yeşil alanların yeterli miktarda olmaması kirliliğinin boyutlarını etkileyen diğer önemli faktörleri oluşturmaktadır. Hava kirliliğini etkileyen tüm bu nedenler kentleşme ve sanayileşmeden yani insan aktivitelerinden kaynaklanmaktadır. Motorlu araç sayısının artması da hava kirliliğini etkileyen oldukça önemli bir unsurdur.

Meteorolojik koşullar ve kirleticilerin havada kalış süreleri de hava kirliliği olayının boyutlarını ciddi ölçüde etkileyen faktörleri oluşturmaktadır. Çok çeşitli kaynaklardan atmosfere bırakılan kirleticiler, atmosfer olaylarının etkisiyle yatay ve dikey yönde uzak mesafelere taşınabilir (Döğeroğlu ve Kara, 1988). Bir süre atmosferde taşınan kirleticiler, çeşitli reaksiyonlar sonucunda (çökelme, seyrelme, vb.) belirli ölçüde atmosfer ortamından uzaklaştırılıp yok edilebilmektedirler. Kirlilik kaynağı, kirliliğin taşınımı ve oluşan bu reaksiyonların havayı temizleyebilme karakteristiği kirleticilerin havada kalış sürelerinin çeşitlilik göstermesinde önemlidir. Örneğin tek bir SO₂ molekülü bir dakikadan daha az ya da bir aydan daha fazla süreyle havada kalabilmektedir (Amoroso ve Fassina, 1983). Diğer yandan rüzgâr hızı, yönü, hava nemi, sıcaklık, basınç, güneş radyasyonu ve yağışlar gibi meteorolojik olaylar, yoğunluklarının çok az olması nedeniyle hızla hareket edebilen kirleticilerin yayılma alanını etkilemektedir. Atmosferde gerçekleşen böylesi meteorolojik olaylar sonucunda bazı hava kirleticiler dikey yönde yükselerek atmosferin üst tabakalarında uzun süreler kalabildiği halde, bazıları da yatay yönde yayılımını kıtalar arası mesafelerde dahi sürdürebilmektedir (Döğeroğlu ve Kara, 1988). Çizelge 3.2’de atmosferik kirlenmenin coğrafik ölçekleri, etkili olacağı

yükseklik, kirlenme süreleri ve önlem alması gerekli en uygun örgüt belirtilmiştir (Stern ve ark. 1984).

Çizelge 3.2. Hava kirliliği probleminin ölçekleri

Kategori	Düşey Ölçek	Ortalama Kirlenme Süresi	Önlemekle Görevli Örgüt
Yerel	Baca Yüksekliği	Saatler	Yerel
Kentsel	Bir Kilometre	Günler	Belediye
Bölgesel	Traposfer	Aylar	Devlet
Kıtasal	Stratosfer	Yıllar	Komşu Devletler
Global	Atmosfer	On Yıllar	Uluslararası

Global ölçekteki hava kirliliği sorunları küresel ısınma ve ozon tabakasının delinmesi olup tüm dünyayı ilgilendirmektedir. Asit yağmurları bölgesel ölçekte bir sorundur. Yerel ölçekteki hava kirliliği sorunları ise çok daha dar bir alanda etkili olan fakat bilhassa insan sağlığı açısından toplu ölümlere neden olabilecek sonuçlar yaratabilen sis vb. olaylardır.

Yerelden küresel ölçeğe kadar, farklı hava kirliliği sorunlarının nedenlerini, oluşum mekanizmalarını ve bu sorunların canlı ve cansız varlıklar üzerindeki etkilerinin boyutlarını belirleyen en temel faktör, havaya karışan kirleticilerdir. Hangi kirleticilerin ne tür hava kirliliği sorunlarına neden olduğunun belirlenmesinde, kirliliği oluşturan maddelerin oluşum biçimlerinin ve kaynaklarının da bilinmesi gerekmektedir.

3.3. Atmosferik Kirlilik Kaynakları

Havayı kirleten maddeler doğal olarak ortaya çıkmakta ya da insan aktivitelerine bağlı olarak (antropojenik) meydana gelmektedir. Doğal kaynaklardan oluşan hava kirleticiler, antropojenik kirleticilerden çok daha fazla miktarlarda atmosfere verilmelerine rağmen, tüm dünya üzerinde eşit olarak dağılırlar ve atmosferde oluşan bir takım doğal temizleme işlemleri (yağış, oksidasyon, okyanus ve toprak tarafından absorbe edilme) sonucunda ortalama konsantrasyonları düşer. Buna karşılık özellikle yoğun kentsel alanlarda ve büyük emisyon kaynakları yakınlarındaki

atmosferin kalitesini etkileyen, insan aktivitelerinin oluşturduğu antropojenik kirleticiler bu bölgelerde daha konsantre olmaktadır. Örneğin, karbonmonoksitin (CO) karakteristik global değerleri 0.1-0.5 ppm iken bazı kentsel bölgelerdeki CO konsantrasyon 100 kat fazla olabilmekte, 1-50 ppm arasında bir değer alabilmektedir (Karishna, 1995). Antropojenik kaynakların çok büyük miktarlardaki emisyonları, havanın kendisini temizleyebilme yeteneğini zorlayarak belirli bir alandaki tüm canlı yaşamını, yapıları ve yapı malzemelerini olumsuz bir şekilde etkilemesi nedeniyle tüm canlı-cansız çevre için çok ciddi bir tehdit oluşturmaktadır.

3.3.1. Doğal kaynaklar

İnsan aktivitelerinden bağımsız olarak, doğanın kendisi de içerisinde meydana gelen bir takım doğal olaylarla atmosfere çeşitli maddelerin karışmasına neden olmaktadır. Atmosferik kirliliğe neden olan doğal kaynaklar,

- yanardağ patlamaları,
- orman yangınları,
- toz fırtınaları,
- okyanuslar ve denizlerdeki aerosoller ve
- bitki ve ağaçlardan kaynaklanan biyolojik faaliyetler

olarak belirtilebilir. **Yanardağ patlamaları**, ortaya çıkan partiküller ve gazların, (kükürtdioksit (SO₂), karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ve metan (CH₄)) uzun süreler boyunca havada kalabilmeleri ve volkanik kaynaktan çok uzaktaki çevreye dahi zarar verebilmeleri nedeniyle önemli doğal kirlilik kaynaklarıdır. **Orman yangınları** da, insan aktiviteleri sonucunda ortaya çıkmış olsalar dahi doğal kaynak olarak sınıflandırılmaktadır. Bu yangınlar, duman, yanmamış hidrokarbonlar, CO, nitrojen oksitler ve kül formunda büyük miktarlarda kirleticiler yaymaktadırlar. **Toz fırtınaları**, dünyanın pek çok yerinde hava kirliliğine neden olan yaygın doğal kaynaklardan birisidir. Küçük bir kum fırtınası bile çevre hava kalitesi standardının bir veya iki katı mertebesi büyüklüğünde partikül maddeye neden olmaktadır. Doğal kum fırtınaları nedeniyle atmosferde oluşan toz parçacıkları bir yılda 182 milyon tondur. 1970'li yıllarda kum fırtınaları Rajasthan'daki Thar çölünden Delhi'ye, görülebilirliği çok kötü bir şekilde etkileyen, çok büyük miktarlarda kum taşımıştır (Karishna, 1995). Dünyadaki **okyanus** ve **denizler** kirletici maddelerin önemli bir kaynağıdır. Okyanus

püskürmeleriyle meydana gelen küçük zerreciler su buharlaşması ile kara parçalarına taşınarak arkalarında deniz tuzu partikülerini bırakırlar (Amoroso ve Fassina, 1983). Çoğunlukla sodyum klorid yani tuzlardan meydana gelen deniz zerrecikleri son derece korozyiftir ve yapı malzemelerine, metallere ve boyalara zarar verirler. Her yıl yaklaşık 900 milyon ton tuz partikülü okyanus ve denizlerden oluşmaktadır (Karishna, 1995). **Bitki ve ağaçların** biyolojik aktiviteleri sonucunda oluşan ve çok çeşitli formlarda olan parçacıklar da havaya karışarak rüzgârlarla atmosferde yayılmaktadır. Bu yeşil bitkiler karbondioksitin fotosentez yoluyla oksijene dönüşmesinde önemli bir rol oynamalarına rağmen, dünyadaki hidrokarbonların önemli kaynaklarındandır (Stern ve ark. 1984). Bitki ve ağaçlar tarafından üretilen ve solunum gücü ve alerjilere neden olan polenler ile küf sporları, havadaki bakteri ve virüsler de bu kategori altında incelenebilecek diğer hava kirliliği kaynaklarıdır.

3.3.2. Antropojenik (Yapay) kaynaklar

İnsan aktiviteleri sonucunda oluşan atmosferik kirlilik kaynakları üç şekilde sınıflandırılabilir:

- Tek veya nokta kaynaklar,
- Çok yönlü veya alan kaynaklar,
- Çizgi kaynaklar.

Çelik tesisleri, enerji santralleri, petrol rafinerileri ve kâğıt fabrikaları gibi endüstriyel tesisler “nokta kaynaklar”; yerleşim alanları, apartmanlar, ofis binaları, hastaneler ve okullar ise “alan kaynaklar” olarak tanımlanmaktadır. Nokta kaynaklar olumsuz ve ciddi etkileri nedeniyle hava kirliliğinin başlıca kaynakları olarak genellikle bilinmektedirler. Devasa miktarda ve düşük seviyedeki emisyonları nedeniyle aynı derecede kötü olan alan kaynaklar da hava kirliliğinin önemli kaynaklarıdır (Bach, 1972). Nokta ve alan kaynaklar sabit kaynaklar olup, ısınma ve üretim amaçlı faaliyetlerin yapıldığı yerlerdir. Sabit kaynaklar, katı sıvı veya gaz yakıtların yanması ile ya da herhangi bir üretim süreci esnasında oluşan kirleticileri bir baca yoluyla atmosfere bırakmaktadır (Okutan, 1993).

“Çizgi kaynaklar”, ulaşım ve taşımacılık amacı ile kullanılan araçlardır. Hareketli kaynaklar olarak da tanımlanabilen motorlu kara taşıtlarının oluşturduğu kirleticiler araçların egzozlarından atmosfere verilmektedir. Egzoz gazı çıkışları yer

seviyesine çok yakın olan bu araçlar, herhangi bir kaynağa göre çok daha büyük miktarlardaki kirleticileri havaya bırakmakla birlikte, zehirleri solunum seviyesinde yaymalarından dolayı halka çok büyük bir sağlık tehlikesi oluşturmaktadırlar (Bach, 1972). Bu emisyonlar canlıların solunum yollarında ve kanda çeşitli rahatsızlıklara neden olabilmektedir.

3.4. Atmosferik Kirleticiler

Hava kirleticiler normal havanın kompozisyonunda bir değişime neden olan maddelerdir. Bu tanıma göre, doğal olarak atmosferde bulunmamakta; ancak normal olarak atmosferde bulunduklarında ise standart kompozisyonadaki miktarlarının artması nedeniyle hava kirliliği problemlerine neden olmaktadır. Dolayısıyla kirleticiler, havada taşınabilen herhangi bir doğal yada yapay maddeyi içermektedirler (Amoroso ve Fassina, 1983). Fiziksel durumları göz önüne alındığında, kirleticiler atmosferde katı, sıvı ve gaz halinde bulunmaktadır. Kaynaktan çıkışlarına göre ise, primer (birincil) kirleticiler ve sekonder (ikincil) kirleticiler olarak isimlendirilmektedirler.

3.4.1. Primer (Birincil) kirleticiler

Primer kirleticiler, belirli bir kaynaktan doğrudan doğruya atmosfere verilen bileşiklerdir. Bu grupta yer alan kirleticiler, karbon oksitler (CO_x), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler (PM)'dir.

3.4.1.1. Karbon oksitler (CO_x)

Hava kirliliği açısından karbonun iki önemli bileşiği karbonmonoksit ve karbondioksittir. Karbonmonoksit, karbon içeren yakıtların tam yanmamaları sonucunda oluşan, renksiz, kokusuz, suda çözünen ve havanın mol ağırlığına eşit olması nedeniyle kaynaklandığı nokta etrafında iyi dağılmayan zehirli bir gazdır. Atmosfere verilen karbonmonoksit toplam emisyon miktarı diğer kirleticilerden önemli ölçüde fazladır ve ana kaynağı motorlu taşıt trafiğidir. Dünyanın toplam karbonmonoksit üretimi 232 milyon ton olup, bu miktarın % 80'i otomobil kaynaklıdır (Bach, 1972). Doğal oluşum kaynakları ise orman yangınları, tarımsal

alanlardaki yakma işlemleri ve özellikle biyolojik aktiviteler sonucunda oluşan metan gazı ile oksijenin tepkimeye girmesidir. Karbonmonoksitin atmosferdeki kalış süresi 2-4 ay kadardır (Okutan, 1993).

Karbonmonoksit ortamdaki serbest oksijen molekülüne, sıcaklığa ve katalizörlere bağımlı olarak karbondioksit dönüşebilmektedir. Fosil yakıtların yanması, volkanik faaliyetler, canlıların solunumu ve karbonmonoksitin hidroksit radikaller ile oksitlenmesi sonucunda oluşan ve normal hava içerisinde hacimce yüzde 0.033 oranında bulunan karbondioksit, tüm yaşam süreçlerinin temelini oluşturmasından dolayı bir hava kirletici olarak düşünülmemektedir. Atmosfere bırakılan karbondioksit fotosentez yoluyla ve yeryüzündeki büyük su kütleleri tarafından atmosferden uzaklaştırılır. Karbondioksitin doğal kaynakları ve atmosferden temizlenmesi olayları yüzlerce yıl boyunca atmosferdeki karbondioksit yoğunluğunu yaklaşık olarak 200-250 ppm'de dengelemiştir. Fosil yakıtların yakılması, şimdiki değeri 335 ppm olan atmosferdeki karbondioksit yoğunluğunda son iki yüz yıldır sürekli bir artışa neden olmuştur ve gelecek elli yıl içerisinde de dünya çapında 400-600 ppm miktarında olacağı tahmin edilmektedir (Stern ve ark. 1984). Aşırı artış sonucunda atmosferde biriken karbondioksit, güneşten gelen ışın enerjisinin yeryüzüne geçişine izin verdiği halde yansıyan ısı enerjisini absorbe ederek atmosferin yüksek tabakalarına çıkmasını engellemektedir. Sera etkisi olarak bilinen bu olayda başta karbondioksit olmak üzere karbonmonoksit, kloroflorokarbon gazları, hidrokarbonlar, azotoksitler ve metan, sera gazları olarak davranmakta ve dünyanın sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Buz çağından beri atmosferik karbondioksitin doğal miktarlarda bulunduğu süreler boyunca uzun süreli global ısı değişiklikleri 1°C'den az olmuştur. Buna karşılık global ısınma sonucu, dünya sıcaklığında 2075 yılına kadar 1.5-4.5°C arasında, çok ciddi iklim değişikliklerine neden olacak olan artışlar beklenmektedir (Bishop, 2004). Sera etkisi nedeniyle çok sık yağın sağanak yağışlar deniz seviyesinin yükselmesine ve taşkınlara neden olmaktadır. Öyle ki deniz seviyesindeki 1 metrelik yükselme bile, 5 milyon km² toprak alanının su altında kalmasına neden olacaktır (Karishna, 1995).

3.4.1.2. Kükürt oksitler (SO_x)

Kükürt oksitler 6 farklı kükürt oksidinden oluşur ve SO_x olarak kolektif bir parametre ile gösterilir. Bunlar; kükürtmonoksit (SO), kükürtdioksit (SO₂),

kükürttrioksit (SO_3), kükürttetraoksit (SO_4), kükürtseskioksit (S_2O_3) ve kükürtheptaoksit (S_2O_7) olup atmosferde en çok bulunan türleri kükürtdioksit (SO_2) ve kükürttrioksit (SO_3)'tir.

Kükürtdioksit (SO_2) renksiz ve yanmayan bir gaz olup hava kalitesi standartlarına göre yıllık ortalama değeri 0.03 ppm'dir. Bu değerin üzerinde boğucu bir hisse yol açmaktadır. Antropojenik emisyon olarak kömür, fuel-oil ve mazot gibi yakıtların doğal olarak yapısında bulunan kükürt bileşiklerinin yanması ile açığa çıkan kükürtdioksitin dünya çapındaki temel kaynakları, endüstriyel prosesler (mineral işleme tesisleri), ısınma amaçlı kullanılan evsel yakıtlar ve elektrik üretmek amacıyla çok büyük miktarlarda kükürlü katı ve sıvı yakıtlar yakan termik santrallerdir. Çok az miktarı ise dizel yakıtlı taşıt araçlarından kaynaklanmaktadır. Kükürt içeren yakıtlar yakıldıklarında az miktarda sülfür küller ile kalır; geri kalan sülfür baca gazlarıyla kükürtdioksit olarak bırakılır. Bırakılan kükürtdioksitin küçük bir miktarı genellikle bacada kalırken, geri kalanı eğer atık gaz arıtması yapılmıyorsa atmosfere yayılır (Meetham ve ark. 1981). Yanma olayında ortamdaki oksijen miktarı, kükürt oluşum oranını etkilemez. Ancak yakıtın niteliği ve içerdiği kükürt miktarı önemlidir. Örneğin, kömür % 1-3 sülfür içermekte ve 100 ton kömürün yanması, 170-520 kg kükürtdioksit üretmektedir (Amoroso ve Fassina, 1983).

Kükürtdioksitin atmosfere doğal emisyonları çoğunlukla biyolojik süreçlerden kaynaklanmaktadır. Biyolojik süreçler ile, havada daha sonra oksitlenecek olan hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer indirgenmiş kükürt bileşikleri atmosfere bırakılır. Diğer bir doğal kaynak ise, doğrudan kükürtdioksit yayan volkanik aktivitelerdir. Günümüzdeki antropojenik kaynakların toplam kükürt emisyon miktarı, başlıca kükürtdioksit olarak, her yıl yaklaşık 80×10^6 ton iken; doğal olarak atmosfere bırakılan toplam kükürt miktarı ise yaklaşık $50-100 \times 10^6$ tondur (Rosvall, 1988). Kükürtdioksitin havada 2-4 gün kalabildiği ve 1000 km'ye kadar taşınabildiği tahmin edilmektedir (Kaytakoğlu ve ark. 1997).

Ortamda herhangi bir katalizör madde bulunmadığı durumda, kükürt dioksit yavaş bir reaksiyonla kükürttrioksite dönüşür. Üretilen kükürttrioksitin miktarı özellikle sıcaklığa bağlıdır ve bu miktar tüm kükürt oksitlerin içinde % 1-10 arasındadır. Yanma sürecinde reaksiyon çoğu zaman dengeye ulaşacak kadar zamana sahip olmamaktadır. Yüksek sıcaklıkta kükürttrioksit oluşum reaksiyon hızı artmasına rağmen, reaksiyon hızından dolayı ürün karışımında çok az kükürttrioksit oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda denge durumunda elde edilebilecek kükürttrioksit

miktarı, düşük sıcaklıkta denge durumunda elde edilebilecek olandan daha azdır. Buna karşılık düşük sıcaklıklarda reaksiyon öyle yavaş ilerler ki denge durumuna asla ulaşamaz. Bu nedenle yanma sırasında oluşan kükürttrioksit çok az miktardadır (Amoroso ve Fassina, 1983). Ancak, sıcak ve soğuk suda eriyen ve renksiz bir gaz olan kükürttrioksit su ile asit oluşturması nedeni ile kirletici olarak büyük önem taşımaktadır.

3.4.1.3. Azot oksitler (NO_x)

Atmosferde bulunan en önemli azot oksitler, azotmonoksit (NO), azotdioksit (NO_2) ve diazotmonoksit (N_2O) olup, bu oksitlerin ilk ikisi atmosferik kirletici olarak önem kazanmaktadır.

Atmosferin ana kütlelerini oluşturan azot, doğada oldukça hareketli olan, atmosfer, toprak ve canlı organizmalar arasında sürekli dolaşan bir elementtir. Yalnızca yüksek sıcaklık ve yanma kaynaklarında meydana gelen basınç gibi özel durumlarda kimyasal reaksiyona girmektedir. Azot, bir yanma bölgesinde yüksek sıcaklık altında havadaki oksijenle reaksiyona girerek azotmonoksite (NO) dönüşür (Amoroso ve Fassina, 1983). Ortamdaki azot monoksit ve oksijenin konsantrasyonuna bağlı olarak, azotmonoksit atmosferde azotdioksite (NO_2) oksitlenmektedir. Bu dönüşüm güneş ışığı, hidrokarbon ve ozonun varlığına bağlı olarak artmaktadır.

Atmosferik azotun (N_2), oksitlerine dönüşümü yanma işlemleri ile meydana gelmektedir. Azotoksitler atmosferde doğal olarak bulunmaları yanında, içten yanmalı motorlarda yüksek basınç altında oluşan yanma ürünleridir. En önemli kaynakları enerji üretimi için fosil yakıt yakılması ve araçların egzoz gazlarıdır. Gübre üretimi gibi endüstriyel süreçler de azotoksit emisyonlarına katkıda bulunmaktadır. Kent atmosferindeki azotoksitlerin en yaygın kaynağı araç trafiğidir (Rosvall, 1988). Azotoksitler için başlıca doğal kaynaklar toprakta ve okyanuslardaki organik bozulmalardır. Fotokimyasal reaksiyona girmeyen azotoksit miktarı genellikle, yaklaşık üç günde havadan uzaklaştırılmaktadır (Bach, 1972). Doğal ve yapay kaynakların azot emisyon miktarları karşılaştırıldığında, antropojenik emisyonlar, başlıca azotoksitler olarak, her yıl 20×10^6 ton iken, doğal kaynaklardan kaynaklanan emisyon 30×10^6 ton azottur (Rosvall, 1988).

Atmosferdeki azotdioksit miktarından çok daha fazla olmakla beraber nispeten zararsız olan azotmonoksit, azotdioksit oksitlendiğinde keskin kokulu, sarı-

kahverengi ve zehirleyici bir gaza dönüşmekte, atmosferin saydamlığını bozarak görüş mesafesini azaltmakta, absorbe ettiği güneş ışığı ile reaksiyona girerek fotokimyasal olarak hava kirliliğine ve asit yağmurlarına neden olmaktadır.

3.4.1.4. Partikül maddeler (PM)

Kirletici maddeler havada gaz halinde olabildiği gibi; tanecik yapısında, katı parçacıklar ve sıvı zerrecikler şeklinde de bulunabilmekte ve partikül madde (PM) olarak isimlendirilmektedir. Partiküller, ya katı veya sıvı maddenin parçalanması ile (toz fırtınaları veya deniz püskürmeleri) ya da gaz fazından yoğunlaşma ile (endüstri tarafından üretilen dumanlar) oluşabilirler (Amoroso ve Fassina, 1983).

Büyüklik en önemli fiziksel özelliklerindendir ve μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm}$) ile ölçülmektedirler. Atmosfer içine yayılmış katı veya sıvı maddelerin küçük parçaları olan partiküller, 0.005-100 μm arasında değişen büyüklüklerde olabilirler (Bishop, 2004). Partiküller büyüklüklerine göre aşağıdaki gibi gruplandırılmaktadır (Bach, 1972):

- $\text{PM} > 10 \mu\text{m}$ —→ Toz, uçucu kül, büyük parçacıklı kir (coarse),
- $\text{PM} < 5 \mu\text{m}$ —→ Duman, fume,
- $\text{PM} < 1 \mu\text{m}$ —→ Aerosol.

Tozlar, ezilme, ufalama veya patlama gibi süreçler sonucu büyük kütlelerin parçalanması ile oluşmuş küçük katı maddelerdir ve kömür, çimento veya buğday taneleri gibi malzemelerin işlenmesiyle doğrudan ortaya çıkabilmektedir. Hava veya diğer gazların içinde geçici olarak asılı kalsalar da tozlar yayılamazlar ve yerçekiminin etkisi ile yere inerler (Karishna, 1995). **Uçucu küller**, katı yakıtların yanması sonucunda oluşan, yanma gazındaki küllerdir. Yine yanma sonucu oluşan kurumlar ve deniz tuzları ise büyük parçacıklı partiküller (coarse) olarak tanımlanmaktadır. Kömür, odun veya tütün gibi organik maddelerin tam olarak yanmaması sonucu oluşan **duman** ve küçük katı partiküller çoğunlukla karbon ve diğer yanabilir maddeleri içerirler. Arıtma, damıtma, yakma veya metal eritme süreçlerinden oluşabilen **fume** ise, katı malzemelerin buharının yoğunlaşması ile oluşmuş küçük katı partiküllerdir (Karishna, 1995). **Aerosoller**, gaz ortamında koloidal büyüklükte dağılmış pozitif veya negatif yüklü veya yüksüz katı veya sıvı taneciklerdir (Okutan, 1993). Bu sıvı tanecikler türbülans şartları altında havada asılı kalmalarına rağmen

durağan şartlar altında büyüklük ve yoğunluklarına bağlı olarak yere düşerler. Sıvı damlacıklardan oluşan aerosoller bazen **mist** olarak da isimlendirilmektedir (Amoroso ve Fassina, 1983).

Partiküllerin doğal emisyon miktarı antropojenik etkilerle oluşan miktardan çok daha fazladır. Bir yıl içinde oluşan, yaklaşık olarak 2900×10^6 ton toplam partikül emisyonunun 2600×10^6 tonu sadece doğal kaynaklardan ve 300×10^6 tonu ise yapay kaynaklardan oluşmaktadır (Karishna, 1995). Oluşan partiküller büyüklüklerine göre havada asılı kalabilmekte yada yere inmektedirler. Yere çökme süreci, partiküllerin atmosfer ortamından uzaklaştırılmasını sağlayan doğal bir temizleme sürecidir.

Havada asılı kalan partiküller, görüşün azalmasına ve çeşitli solunum problemlerine neden olmaktadır. Özellikle $2.5 \mu\text{m}$ 'den küçük partiküller solunabilir olup ciğerlerin içlerine kadar ilerleyebilmektedir. Partiküllerin troposferdeki ömürleri sadece birkaç gündür. Ancak stratosfere ulaşırlarsa birkaç yıl boyunca dünya çevresinde dönebilmektedirler (Bach, 1972). Güneşten gelen ışınları tutmaları ve dünyanın sıcaklığını değiştirmeleri nedeniyle küresel iklim üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler.

3.4.2. Sekonder (İkincil) kirleticiler

Birincil kirleticilerin atmosferde kimyasal reaksiyona girmeleri sonucu meydana gelen en önemli sekonder kirleticiler, fotokimyasal oksidantlar ve atmosferik asitlerdir.

3.4.2.1. Fotokimyasal oksidantlar

Güneşten gelen ultraviyole ışınların etkisiyle ortaya çıkan reaksiyonlar fotokimyasal reaksiyon, bu reaksiyonlar sonucunda oluşan ürünler de fotokimyasal ürünler olarak tanımlanmaktadır. Fotokimyasal ürünler, çeşitli reaksiyonlarla atmosferde oluşmaları nedeniyle ikincil ürünler olup, en önemli olanları ozon (O_3) ve peroksiasetilnitrat (PAN)'tır.

Oksijen molekülünün güneşten gelen ultraviyole ışınları, atmosferin üst tabakalarında absorbe ederek oksijen atomlarına dönüşmesi (3.1) ve yüksek enerjili bu atomların da oksijen molekülü ile hızla reaksiyona girmesiyle oluşan ozon (3.2),

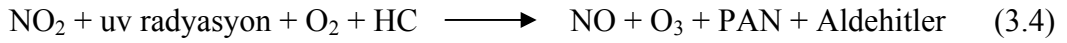
atmosferin stratosfer katmanında yeryüzünden 25-40 Km yükseklikte birikmekte ve ozon tabakası olarak bilinmektedir.



Tehlikeli ultraviyole radyasyonun çoğu bu ozon tabakası tarafından tutulur, ancak bir kısmı atmosferin alt tabakalarına geçmektedir. Burada, etkin bir ultraviyole (uv) radyasyon emicisi olan azotdioksit tarafından absorbe edilir ve bu reaksiyonla azotmonoksit ve oksijen atomu meydana gelir (3.3).



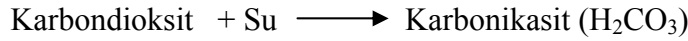
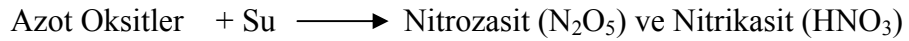
Oluşan atomik oksijen ozon oluşturmak üzere (3.2)'deki oksijen molekülü ile tekrar reaksiyona girer. Ortamda hidrokarbonların bulunması durumunda ise (fotokimyasal reaksiyona girmeyen metan hariç), ozon bunlarla reaksiyona girer (3.4), peroksiasetilnitrat (PAN) ve diğer oksidantların oluşumuna neden olurlar (Bishop, 2004).



Ozon ve peroksiasetilnitrat, fotokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşmuş yan ürünlerdir ve fotokimyasal smog olarak bilinen hava kirliliğini meydana getirirler. Fotokimyasal smog oluşması için NO_x , hidrokarbonlar ve güneş ışığı gerekli olup hava ve topografik şartlar da bu oluşumda önemli faktörlerdir. Fotokimyasal smog olayında bu ürünler atmosferin yüksek katmanlarına yayılmaktan çok dünyanın yüzeyi etrafında birleşmektedir. Örneğin, Los Angeles, Denver, Phoenix gibi şehirlerde dağlar, yüzey havası ile yüksek katman havasının karışımını engellemekte ve bu nedenle şehirler sise boğulmaktadırlar (Bishop, 2004). Los Angeles tipi hava kirliliği olarakta bilinen bu kirlilik, Londra tipi sis olarak bilinen kükürt ve tanecik yoğunluğunun artmasıyla ortaya çıkan kükürtdioksitli smogdan farklı olarak, sabah erken saatlerde değil, trafiğin yoğun olduğu ve sıcaklığın yükseldiği öğlen saatlerinde en yüksek konsantrasyonuna erişir. Meteorolojik koşullarla değişiklik gösteren ozon miktarı temiz hava içerisinde yaklaşık 10-30 ppb iken fotokimyasal smog oluşum periyodları sırasındaki ozon konsantrasyonu öğlen saatlerinde 200 ppb'ye kadar yükselebilmektedir (Rosvall, 1988).

3.4.2.2. Atmosferik asitler ve asit yağmurları

Hava kirlilikleri içerisinde, fotokimyasal oksidantların neden olduğu sis problemleri nispeten sınırlı bir bölgeyi etkileyen yerel problemler olmalarına karşılık, atmosferde yine ikincil tepkimelerle ortaya çıkan asitler ve bu asitlerin asit yağmurları şeklinde yeryüzüne ulaşmaları, daha büyük bölgeleri etkilemelerinden dolayı bölgesel ölçekli sorunlar olarak ortaya çıkmaktadır. Endüstri tesislerinin bacaları ve motorlu taşıtların egzozları gibi çok çeşitli yollarla havaya karışan azot, kükürt ve karbon içeren gazların atmosferdeki su buharı ile birleşmesiyle atmosferik asitler meydana gelmekte, bu asitlerin yağışlarla yeryüzüne inmesi de asit yağmurları olarak tanımlanmaktadır.



Atmosferik asitler ıslak veya kuru çökme mekanizmaları ile yeryüzüne ulaşmakta ve canlı-cansız tüm çevreyi etkilemektedir. **Kuru çökme** (fiziksel), yağmur olmadığı zamanlarda gerçekleşmektedir. Gaz halindeki kükürtdioksit, azotdioksit ve asit aerosolları (sülfat (SO_4) ve nitrat (NO_3)), su kütleleri, bitki, toprak ve diğer malzemelere temas edip yüzeye yapıştığında çöker. Eğer yüzeyler nemli veya sıvıysa solüsyon içine girerek asit oluştururlar (Stern ve ark. 1984). **Islak çökme** (kimyasal) ise kükürtdioksit (SO_2) ve azotoksitlerin (NO_x) atmosferik su buharı, bulutlardaki su damlacıkları veya yağmur damlaları ile birleşip asitleri oluşturmaları ve yağmur, kar gibi yağışlarla iyonlarına ayrışıp yeryüzüne inmeleri şeklinde gerçekleşir. Asit yağmuru genel terimi yağmur yer almasa bile tüm asit yağışı formlarını tanımlamak için kullanılmaktadır (Bishop, 2004).

Normal şartlarda yağmur suları, havada doğal olarak bulunan karbondioksitin atmosferde çözünmesinden oluşan karbonikasit nedeniyle hafifçe asidiktir. Yağmurdaki minimal asit depolama kapasitesi nedeniyle, çok küçük miktarlarda oluşan bu asitlik bile yağmurun PH seviyesini düşürmek için yeterlidir. Ancak karbonikasit malzemeye temasa geçtiğinde kısa süre içinde nötralize olabilir ve bu asidin çevre üzerinde genellikle ihmal edilebilir bir etkisi vardır (Bishop, 2004). Buna karşılık antropojenik kaynaklardan yoğun bir şekilde atmosfere bırakılan kükürtdioksit ve azotoksitler yağmur suyundaki asit oranını ciddi ölçüde artırabilmektedir. Asitlik

logaritmik ölçekte okunan PH değeri ile belirtilmektedir. Suyun nötral PH değeri 7 iken doğal yağmur suyunun PH değeri 5.6 olup asitlik arttıkça PH değeri çok daha düşük olmaktadır. Örneğin 1969 yılında New Hampshire’da PH değeri 2.1 olan yağmur kaydedilmiştir. New Hampshire çok az miktarda kömür yakan bir alan olmasına rağmen orta-batıda yüksek kükürtlü kömür yakan endüstri bölgesindeki hava akışlarından etkilenmiştir. Bu PH değeri normal temiz havaya göre yaklaşık 5000 kat daha fazla asit içeren bir yağmura karşılık gelmektedir (Bishop, 2004). Bu etkilenmenin nedeni ise kükürt ve azot gazlarından oluşan sülfat ve nitrat aerosollerinin rüzgârlarla çok uzak bölgelere de taşınabiliyor olmalarından kaynaklanmaktadır.

Atmosferik asitlerin oluşumuna çoğunlukla içten yanmalı motorlar (azotoksit emisyonları) ve petrol bazlı yakıtlar - kömür yakılması (kükürtoksit emisyonları) neden olmaktadır. Petrol bazlı yakıtların çoğu az miktarda kükürt içermeleri nedeniyle, asit yağmurlarının büyük bir kısmı kömür yakılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Özellikle elektrik üretiminde kömür kullanımı yıllar boyunca büyük oranda artmış ve bu artış asit yağmuru problemlerine önemli bir katkı yapmıştır. Öyle ki elektrik santralleri ABD’deki yıllık kükürtdioksit emisyonunun yaklaşık % 70’ini, azotdioksit emisyonunun % 30’unu oluşturmaktadır (Bishop, 2004). Atmosfere bırakılan bu emisyonlar sonucunda Amerika Birleşik Devletleri’nin doğusunda oluşan asit yamurlarının yaklaşık olarak % 65’inin sülfirikasit, % 30’unun nitrikasit ve % 5’inin de diğer asitlerden oluştuğu belirtilmiştir (Stern ve ark. 1984).

Kükürt ve azot oksitlerin atmosferde oksidasyonu sonucunda oluşan sülfirikasit ve nitrikasitin yağışlarla yeryüzünde birikmesi, toprak ve suyun kimyasal yapısını bozarak asitleşmesine neden olmakta ve bu ortamlarda yaşayan tüm canlı hayatı etkilemektedir. Bitkiler, göller, akarsular, ormanlar, hayvanlar ve insanlar üzerinde ciddi etkiler yapmanın yanı sıra, yapılar ve malzemeler de asit yağışlarından zarar görmektedir. Bu asitler, doğal taşlar ile inşa edilmiş yapıları aşındırıcı, metalik malzemelerde de korozyonu hızlandırıcı bir etki yapmaktadır.

4. YAPI MALZEMELERİNDE HASARA NEDEN OLAN FAKTÖRLER VE ETKİLERİ

Yapı malzemelerinde gözlenen hasar ve bozulmalar, çok çeşitli ancak birbirinden kesin çizgilerle ayrılamayan faktörlere bağlı olarak ortaya çıkan sorunlar olmaları açısından karmaşık kavramlar olsada, bu hasarlara neden olan faktörleri temel olarak doğal kaynaklı olan çevresel faktörler ve insan etkisi ile olan faktörler olmak üzere iki ana başlık altında incelemek mümkündür. İnsan etkisi başlığı altında incelenen ve malzemeleri bozan-hasara uğratan en önemli faktör atmosferik kirlenmedir. Günümüzde önemli çevre sorunlarından birisi olan atmosferik kirlenmenin temelinde büyük ölçüde insan aktiviteleri yatmakta ve bu sorun, canlıların yaşamları üzerinde genel bir tehdit oluşturmalarının yanında cansız varlıkları da etkilemekte, özellikle yapı malzemelerinde önemli bozulma ve hasar oluşumlarına yol açmaktadır. Metal yapı malzemelerinde gözlenen ve kütle kaybına neden olan korozyon olayında atmosferik kirlleticiler birer korozif eleman olarak davranmakta ve metaller üzerinde atmosferin korozif etkisini önemli ölçüde artırmaktadır. Atmosferik kirlilik dışında çeşitli çevresel faktörler de yapı malzemelerinde hasara neden olan ya da malzemelerin doğal bozulma süreçlerini hızlandıran faktörler olmaları açısından önem kazanmaktadır.

Bir yapının, içinde yaşayan insanların ihtiyaçlarına cevap verebilmesi, kullanım ve estetik değerlerini zaman içinde yitirmeden koruyabilmesi ve tarihi süreç içinde anıt niteliği kazanmış eserlerin gelecek kuşaklara bozulmadan ulaşması gibi temel unsurlar söz konusu olduğunda, yapıyı oluşturan malzemelerde oluşabilecek hasarların ne denli önemli olabileceği de ortaya çıkmaktadır. Yapı malzemelerinde oluşan hasar ve bozulmalar hem kullanıcı sağlığı ve konforunu, hem de yapının kendi sağlığını olumsuz olarak etkilemektedir. Yapı sağlığının bozulması ise, yapının beklenen kullanım süresinin azalmasına neden olmaktadır. Yapı ömrünün azalmasının yanısıra, çeşitli bozucu, aşındırıcı ve yıpratıcı faktörlerin yapının taşıyıcı sistemini oluşturan malzemeleri etkilemesi durumunda ise, ortaya çıkabilecek hasar-bozulmalar, can ve mal kaybı ile sonuçlanabilecek ciddi sorunların ortaya çıkmasına dahi yol açabilmektedir. Diğer yandan, bir yapıda malzeme ya da malzemelerin hasar görmesi ya da bozulması, yenileme, onarma ve temizleme gibi yaklaşımları gerekli kılmakta, bu tür faaliyetler ise ekonomik açıdan ek maliyetler getirmeleri nedeniyle oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Avrupa'nın çeşitli ülkelerinde yapılan çalışmalar

sonucunda, hava kirliliği nedeniyle binaların yenilenmesi için kişi başına düşen maliyet Çizelge 4.1’de gösterilmektedir (Rabl, 1999).

Çizelge 4.1. Hava kirliliği nedeniyle yapılan yenileme faaliyetlerinin maliyetleri

	Kişi Başına Maruz Kalan Yüzey (m²/kişi)	Kişi Başına Düşen Yenileme Maliyeti (FF/kişi)	Birim Yüzey Başına Yenileme Maliyeti FF*/(m²×yıl)	Kirlilik (µg/m³ SO₂)
Almanya	55.6	370	6.65	>30
Prag	83	757	9.12	70
Sarpsborg	165	358	2.17	20-60
Stokholm	132	138	1.04	<20
UK	-	17	-	-
Paris	21	35	6.14	19

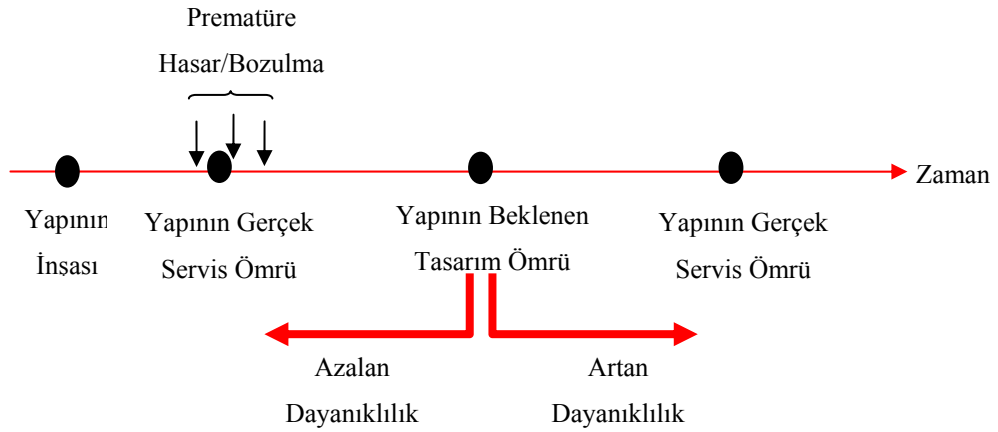
* Fransız frankı

4.1. Yapı Malzemesi-Dayanıklılık-Hasar İlişkisi

Hiçbir yapı malzemesinin ömrü sonsuz değildir ve bu nedenle tüm yapı malzemeleri ve dolayısıyla yapılar zamanla bozulurlar. Ancak bilinçli planlama, uygun malzeme seçimi gibi kontrol edilebilir şartlar sayesinde malzemeler üzerindeki olumsuz etkiler azaltılabilir veya geçici bir süre de olsa bozulma süreci yavaşlatılabilir. Bu nedenle, kontrol edilebilir şartlara ve iklim gibi nedensel faktörlere bağlı olarak malzemelerin bozulma hızları çeşitlilik göstermektedir. Çok çeşitli faktörlerin olumsuz etkilerine maruz kalan yapılar bakım ve onarım gibi işlemlerle, ilk yapıldığı gibi korunabilirler veya doğal bozulma sürecine bırakılmış olabilirler. Her iki durumda yapıların, kullanılabilir yaşam süresi boyunca hedeflenen fonksiyonlarını yerine getirebilmesi, hem içteki hem de dıştaki malzemelerin çeşitli özelliklerine ve en önemlisi de dayanıklılıklarına bağlıdır.

Dayanıklılık, bozulma hızının bir ölçüsü ve istenen görünüm ve fonksiyonların yeterli derecede sağlanabilmesindeki kalitedir (Atkinson, 1970). Bir başka tanıma göre ise, bir malzeme veya sistemin servis ömrü süresince tatmin edici estetik, ekonomik ve fonksiyonel performansı sürdürebilmesindeki kalitesidir (Nicastro ve Surovek, 2005). Yani dayanıklılık aslında, bir malzemenin kendisinden beklenen

özellikleri karşılayabilmesinin yanısıra, aynı zamanda bu özellikleri zaman içinde sürdürebilmesi yani kalıcı olabilmesidir. Yapı için henüz tasarım aşamasında öngörülen beklenen tasarım ömrüne karşılık, yapının kullanılabilir servis ömrü daha az ya da daha çok olabilmektedir. “Yeni olarak hizmete alındığı ve rutin bakım yapıldığı kabulleri altında, bir malzemenin fonksiyonlarını yerine getirmesi için tahmin edilen ortalama zaman” olarak tanımlanan tasarım ömrü ve kontrol altına alınmamış bozulma ve hatalar olmaksızın sürdürebileceği gerçek servis ömrü arasındaki ilişki, malzemelerin dayanıklılığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.1’de yapı ömrü ve dayanıklılık ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Yapı ömrü-dayanıklılık ilişkisi

Bir yapı malzemesi, yapının tüm yaşamı için ya da kısa bir süre için dayanıklı olacak şekilde tasarlanmış ve sınıflanmış olsun ya da olmasın prematüre bozulma/hasarlar yapının gerçek servis ömrü, beklenen tasarım ömründen az olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu duruma örnek olarak kontrolsüz bozulmalara zemin hazırlayan yetersiz bakım faaliyetleri veya tasarım, üretim, ya da uygulama gibi süreçler sırasında oluşan hatalar gösterilebilir. Bozulma, yaşlanma ve aşınma gibi nedenlerden dolayı çoğu yapı malzemesi için doğal bir süreçtir. Bununla birlikte bir bozulma ya da hasarın prematüre olarak tanımlanabilmesi, ancak yapının servis ömrü beklentileri bilindiği takdirde mümkün olabilmektedir. Çizelge 4.2’de beş farklı yapı ömrü kategorisi gösterilmektedir (Nicastro ve Surovek, 2005).

Çizelge 4.2. Yapı ömrü kategorileri

Kategori	Bina Yaşamı	Örnekler
Geçici konaklama	5 yıla kadar	Bina yapımı sırasında kullanılan tesisler
Kısa yaşam süreli binalar	5-30 yıl	Kısa süreli endüstriyel süreçler için geçici sınıflar ve binalar
Orta yaşam süreli binalar	30-60 yıl	Perakende ve toptan satış binaları, endüstriyel binaların çoğu
Normal yaşam süreli binalar	En az 60 yıl	Yeni sağlık ve eğitim binaları ve yeni konut yapıları
Uzun yaşam süreli binalar	60-120 yıl	Önemli salonlar, mahkemeler ve resmi binalar

Bir bütün olarak binanın dayanıklılığı, seçilen malzemenin tipi ve kalitesi, binanın vereceği hizmet açısından tasarımın uygunluğu, binanın üzerinde yükseleceği zeminin sağlamlığı gibi çok çeşitli faktörlerin bir fonksiyonudur. **Bozulma** ise neredeyse dayanıklılıkla zıt anlamlıdır. Ancak dayanıklılık temelde bir hız iken, bozulma bir durumdur. Bozulma kavramına yakın bir terim olan aşınma da, malzemelerin görünümünde veya yapılarında istenen veya istenmeyen değişiklikleri ortaya çıkaran bir süreçler dizisi olarak tanımlanmaktadır. Yapı malzemelerinin bozulması genellikle malzemelerin istenmeyen aşınmalarının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir (Atkinson, 1970).

Yapıların bozulması, yapılmış oldukları malzemelerin bir kısmının veya tamamının değerindeki bir kayıp ve başlangıçta hedeflenen fonksiyonları yerine getirmesi için kullanılan ürünlerin veya elemanların bir kısmının ya da tamamının yeteneğindeki bir azalma olarak tanımlanmaktadır. Dış yüzeylerdeki bozulmalar, görünür olabilir veya dış örtünün altında saklı kalabilir (estetik veya fonksiyonel). Çoğu zaman aynı nedenden kaynaklansa dahi, görünüşteki bozulmayı içyapıdaki bozulmadan ayırt etmek gereklidir. Bozulmaya bağlı olarak görünüşte meydana gelen değişiklikler, istenen bir durum olduğunda ya da ne malzemenin fiziksel özellikleri ne de yapının içindeki fonksiyonları bu değişiklikten etkilenmediğinde bozulmayı düzeltmek için genellikle birşey yapılmamaktadır. Ancak bazı durumlarda estetik bozulma, binanın vermiş olduğu hizmette veya değerinde belirgin bir azalmaya neden olabilmektedir. Bu tip bir bozulma, dış yüzeylerin tonlarındaki ve renklerindeki değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Yüzeylerin fiziksel bozulması veya erozyonu dokuda, şekilde veya görsel tanımda değişikliklere neden olabilmekte, bunun sonucunda orijinal tasarım kavramı, büyüklük ve oranlar, psikolojik etki ve görsel

çekicilik kolayca yok olabilmektedir. Diğer yandan bir yapıda meydana gelen içyapı hasarları kullanım ve çevrenin ortak etkileri altında binanın yapılmış olduğu malzemelerdeki ya da bu malzemelerden yapılmış olan daha büyük elemanlardaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak meydana gelen değişimleri tanımlamaktadır (Atkinson, 1970).

4.2. Yapı Malzemelerinin Sınıflanması

Yapı malzemeleri, çeşitli etkiler nedeniyle oluşabilecek sorunları ortadan kaldırmak amacıyla, uygulanacağı şartlara uygun olarak seçilmelidir. Malzemelerin sahip oldukları özelliklerin, davranışlarının ve oluşabilecek hasarın nedenleri ile hasar süreçlerinin bilinmesi, uygun koruyucu tedbirlerin ortaya konulabilmesi açısından da oldukça önemli olmaktadır (Feilden, 1982). Bu nedenle öncelikli olarak yapı malzemelerinin sınıflamasının yapılması ve bu sınıflamaya dair özelliklerin belirtilmesi gerekmektedir.

Yapı malzemesi kendi özellikleri oranında insanın yaşamı için gerekli fiziksel ortamı ve yapının gelecek çağlara devrini sağlayan ve yapıyı oluşturan çeşitli elemanlar olarak tanımlanabilir (Eriç, 1994). Yapıda kullanılan malzemeleri içyapılarına göre üç grupta incelemek mümkündür:

- Kristal yapılı malzemeler (metaller),
- Molekül yapılı malzemeler (organik malzemeler),
- Karma yapılı malzemeler (inorganik malzemeler).

Kristal yapılı malzemeler, üç boyutlu kafes sistem görünümünde olan atomlardan oluşmaktadır. Bu grupta yer alan metaller, yer kabuğundan cevher olarak elde edilen ve serbest elektronlara sahip olan homojen, yoğun dokulu, özgül ağırlıkları fazla ve mukavemetli malzemelerdir. Yapı malzemesi olarak kullanılan başlıca metaller demir, bakır, alüminyum, çinko ve kurşundur. Kristal aralıkları nedeniyle iç bağlarının zayıf olmasından dolayı daha az olan mukavemetleri, kristal yapılarını sıkılaştırmak amacıyla yapılan dövme ya da ısıtma işlemleri sonucunda artırılabilir. Farklı metallerin değişik oranlarından oluşan metal alaşımları da, kristal yapılarındaki boşlukların azalmasından dolayı daha yüksek mukavemetlere sahip olabilmektedir. Metaller saf formda iken çok dayanıksız oldukları için, yapıda genellikle alaşımlı metaller kullanılır (Everett, 1986). Serbest elektronları nedeniyle ısı, ses ve elektriği

iyi iletirler. Ayrıca ısısal genleşmeleri yüksek, basınç ve çekme mukavemetleri ise eş değerde ve uzamaya elverişli sünek malzemelerdir. Metal yapı malzemelerinde hasara neden olan en önemli olay korozyondur.

Molekül yapıli malzemeler, iki ayrı molekülün birleşmesi (kondansasyon) veya bir molekülün kendinden küçük parçalara bölünerek büyümesi (polimerizasyon) sonucu oluşmuş, zincir bağları şeklinde bir yapıya sahip olan malzemelerdir. Bu malzemelerde molekül gruplaşması halinde bazı boşluklar ortaya çıkmaktadır. İçyapıdaki bu boşlukların artması mukavemetin düşmesine, ısı yutuculuk değeriinde artışa, boşlukların devamlılığı halinde ise su ve buhar geçirimsizlik değeriilerinin de yükselmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla malzeme donmaya karşı dayanıksız hale gelmektedir. Karbon, hidrojen ve azot esaslı ahşap ve plastik (doğal ve yapay reçineler) gibi organik malzemeler bu grupta yer almaktadır (Eriç, 1994). Bu malzemeler, ısı ve elektriğe karşı geçirimsiz, ayrıca ses yutucu malzemeler olup kırılma süreleri uzun olan sünek malzemelerdir. Ahşabın boşluklu, hafif ve mukavemet değeriileri yüksek bir malzeme olmasına karşılık, rutubet ve mikroorganizma etkilerinden fazlasıyla etkilenmesi nedeniyle diğeri yapı malzemelerine göre daha fazla korunması ve bakım yapılması gerekmektedir. Plastiklerden molekül ağırlıkları düşük olanları yumuşak, yüksek olanları ise sert ve ısıya dayanıklı olan boşluklu malzemelerdir (Eriç, 1994).

Karma yapıli malzemeler ise kristalli ve moleküllü sistemlerin birarada olduğu malzemelerdir. Silisyum, kalsiyum ve çeşitli mineral esaslı doğal taş, yapay taş (beton), pişmiş toprak (tuğla) ve cam gibi inorganik malzemeler bu grupta yer alırlar. Serbest elektronları olmadığı için ısı, ses ve elektriğe karşı geçirimsizdirler. Ergime noktaları yüksektir ve kristalleri büyük olduğu için sert ve gevrek yapılidırlar. Molekül boşlukları bulunması nedeniyle basınç mukavemetine oranla çekme mukavemetleri düşüktür. Ayrıca her noktada aynı derecede ısınmadıklarından dolayı ısısal gerilimlere karşı dayanıksızdırlar. Karma yapıli malzemelerden doğal taş, yapay taş ve seramik gibi malzemeler boşluklu yapıya sahip malzemelerdir (Eriç, 1994).

4.3. Yapı Malzemelerinde Hasara Neden Olan Faktörler

Yapıda kullanılan malzemeler bulundukları ortam şartlarına göre, yaşam süreleri boyunca farklı etkilere maruz kalmaktadır. Bu faktörlerin etkisinde, yapı malzemelerinde bozulma ve hasarlar başlamakta ya da bozulma ve hasar

mekanizmaları hız kazanmaktadır. Malzemenin içyapısında ya da yüzeyinde oluşan bu tür olaylar genellikle uzun bir süreç sonucunda görüldükleri için malzemede veya strüktürde ani çökmelere ve bozulmalara yol açmazlar. Dolayısıyla gözle görünür halde ortaya çıkışları uzun seneler gerektirir (Eriç, 1994). Bu uzun zaman aralığı içinde, oluşabilecek hasarlara karşı hiçbir koruyucu önlem alınmaması ise varolan strüktürün servis ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Yapı sağlığının korunması, dolayısıyla yapı servis ömrünün artırılabilmesi için öncelikle yapı malzemelerinde hasara neden olabilecek faktörlerin tanımlanması ve malzemeler üzerindeki etkilerinin anlaşılması gerekmektedir. Buna göre yapı malzemelerinde ve yapılarda oluşan hasarlar,

- çevresel (doğal kaynaklı) faktörler etkisinde oluşan hasarlar ve
- insan kaynaklı faktörler etkisinde oluşan hasarlar,

olmak üzere iki şekilde tanımlanabilir. Çevresel faktörler ve insan kaynaklı faktörler topluca, yapının içinde, dış kabuğunda, toprağın altında ve üstünde yer alan tüm malzemeleri etkilemektedir.

Çevresel faktörlerin içinde başlıca, güneş radyasyonu, sıcaklık, nem, yağışlar ve rüzgâr gibi, uzun süreli ve bozucu etkileri ile atmosferik faktörler gelmektedir. Bu etkenler dışında, biyolojik ve botanik nedenler (böcek, fare, mikroorganizmalar ve bitkiler) ve doğal felaketler (deprem, sel, erozyon), zemin suları ve toprağın nemi gibi nedenler de malzemeler üzerinde yıpratıcı etkileri olan diğer çevresel faktörleri oluşturmaktadır. Çevresel faktörler, en az kontrol edilebilen faktörlerdir ve özellikle dış ortamla temas eden yüzeylerde (duvar ve çatı) kullanılan malzemeler üzerinde çok büyük etkileri vardır (Atkinson, 1970).

İnsan kaynaklı nedenler temelde kontrol edilebilir şartlar olup, bunlar içerisinde en önemlisi atmosferik kirliliktir. Bunun dışında bir yapının tasarım, yapım ve kullanım süreçleri de yapı malzemelerinde gözlenen hasar olaylarına zemin hazırlayıcı nitelikte olabilmektedir. Bunlara örnek olarak, taşıyıcı sistem elemanlarının yatay ve düşey yükleri karşılayabilecek kesitlerde yapılmaması gibi boyutlandırma hataları, hatalı malzeme kullanımı, hatalı işçilik, kötü kullanım, yetersiz bakım faaliyetleri ve yapının terk edilmesi gibi durumlar gösterilebilir.

4.3.1. Çevresel (Atmosferik) faktörler

4.3.1.1. Güneş-radyasyon etkisi

Güneşten gelen görünür ışıklardan kısa dalga boyuna sahip olanlar mor, uzun dalga boyuna sahip olanlar ise kırmızı renklidir. Bu ışınların daha kısa dalga boyunda olup gözle görülmeyenleri morötesi (ultraviyole-UV), kırmızı renktekinden daha büyük dalga boyuna sahip olanları ise kızılötesi (Infrared-IR) ışınlar olarak adlandırılmaktadır. Bu ışıklardan özellikle ultraviyole olanlar bozucu niteliktedir. Güneş ışınımının inorganik yapı malzemeleri üzerinde herhangi bir doğrudan kimyasal etkiye sahip olduğu düşünülmemektedir (Rosvall, 1988). Buna karşılık güneş ışınımı yapı malzemelerinden özellikle ahşap, tekstil ve pigment gibi organik olanlarında,

- renk kaybı,
- kırılma ve
- kütle kaybı

gibi önemli ayrışma ve çözümler meydana getirebilmektedir. Örneğin, ahşap gibi selüloz esaslı doğal malzemelerde selülozu bozarak karbonu ayrıştırmakta, rengin kararmasına, yüzeysel parçalanmalara ve mekanik kuvvetin düşmesine; taşlarda ayrışabilir pigmentlerin renk değiştirmesine; dış cephe boyalarında boyanın bağlayıcı kısmını oluşturan film yapıcı maddeyi ayrıştırarak boyanın eskimesine, renginin solmasına; değişik plastik malzemelerin depolimerize olmasına ve böylece renklerinin bozulmasına, malzemenin çatlamasına ve çözülmesine neden olmaktadır (Toydemir ve ark. 2000). Kaplanmamış ahşap, ultraviyole ışın ve çabuk nem değişimlerinin ortak etkisi nedeniyle her yüzyılda 5-6 mm'lik hızda erozyona uğramaktadır (Feilden, 1982). Kızılötesi ışınlar ise, ısı enerjisi taşıyan ışıklardır. Bu özellikleri nedeniyle doğrudan ve dolaylı olarak ısınmış olan havanın neden olduğu ısınma ve sonrasında soğuma olayları ile oluşan genleşme ve daralma etkisi, malzemelerde yüzey bozulmasının temel nedenini oluşturmaktadır. Buradaki önemli parametreler yüzeyin absorbe etme yeteneği, termal genleşme sabiti ve malzemenin elastikiyetidir (Rosvall, 1988). Buna karşılık, plastik malzemenin çatlaması veya bazı boyaların solması gibi durumlarda, doğrudan güneş ışığı zararlarını, bir fotokimyasal oksidant olan ozonun

neden olduğu hasardan ayırmak genellikle mümkün değildir (Yokom ve Upham, 1976).

4.3.1.2. Su ve nem etkisi

Tüm yapı malzemeleri su ile temas ettiklerinde, içyapılarına bağlı olarak sudan çeşitli derecelerde etkilenirler. Sıvı su, atmosferik nemin yüzey üzerinde yoğunlaşmasıyla veya özellikle rüzgârın etkisiyle yağmur şeklinde yapıların yüzeyine ulaşması sonucu etki göstermektedir. Malzemenin bünyesine, ya su emme, (malzeme su içinde bulunuyor ise) ya da su geçirimsizlik (malzeme su ile temas ediyor ise) olarak iki şekilde giren suyun her iki durumda da neden olduğu zararın derecesinde malzemenin boşluklu içyapısı en önemli belirleyicidir. Ancak su ile yüzeysel temasta ise malzemenin boşluklu yapısına bağlı olarak kapiler basınç etkisi söz konusudur. Bu ise malzeme yüzeyinin su ile temas ettiği zaman, suyun yüzeysel gerilimi nedeniyle malzeme boşluklarında ve kılcal kanallarında suyun yükselmesi (kapilarite) olayıdır (Eriç, 1994). Su, yapı malzemelerini sıcaklığa bağlı olarak aşağıda açıklanan olaylar sonucunda etkilemektedir:

- Donma etkisi,
- Şişme-büzülme etkisi,
- Tuzların etkisi,
- Terleme-yoğuşma etkisi.

Malzemenin boşluklarına giren suyun en önemli etkisi sıcaklık derecesinin düşmesi ile oluşan don olayıdır. Bu durum malzeme iç gerilimlerinin artmasına ve malzemenin parçalanıp dağılmasına neden olmaktadır (Toydemir ve ark. 2000). Benzer bir etki malzemenin ıslanması sonucu şişme olarak tanımlanan hacim artışı ve ıslanma olayını takip eden kuruma sürecinde oluşacak büzölmeler sonucunda meydana gelmektedir. Şişme-büzölme mekanizmaları sonucunda malzemede çatlaklar oluşabilmekte ya da mevcut çatlak var ise daha da genişleyebilmektedir. Kuruma sürecinde buharlaşmanın etkisi ile ortaya çıkan diğerk bir sorun da çiçeklenme (effloresans)'dır. Malzemenin yapısında yer alan ya da zemin ve atmosfer sularından malzemeye taşınan tuzlar, su malzeme yüzeyinden buharlaştığı zaman ince kristaller halinde pamukçuklar şeklinde yüzeye birirmektedir. Diğerk yandan malzemenin yüzeyinde (terleme) ve içyapısında (yoğuşma- kondansasyon) sıcaklık düşmesi ile

buharın su haline dönüşmesi de söz konusudur. Terleme ve yoğuşma olayları, ısı tutucu malzemelerin değerini düşürmekte, metal malzemeleri korozyona uğratmakta, ahşabın deformasyonuna sebep olmakta, akış yönünde yüzeysel çiçeklenmelere veya kaplama malzemelerinde kabarma ve dökülmelere neden olmaktadır (Eriç, 1994).

4.3.1.3. Isı-sıcaklık etkisi

Yapı malzemeleri genellikle sıcaklığa maruz kaldıklarında boyları uzayarak hacimleri büyürken, soğutuldukları zaman ise boyları küçülmekte yani büzülmeaktedirler. Isı değişimlerine bağlı olarak meydana gelen genleşme ve büzülme malzemede iç gerilmeler oluşturmakta ve mekanik mukavemeti etkilemektedir. Hızlı ve büyük sıcaklık değişimleri (yazın bir günlük değişim) küçük ve yavaş sıcaklık değişimlerinden (bütün bir yıl boyunca meydana gelen değişimler) daha zararlı olmaktadır (Eriç, 1994). Sıcaklık değişim miktarı ile birlikte malzemenin ısısal genleşme katsayısı, elastiklik modülüne bağlı olarak ortaya çıkan iç gerilmelerin artması ve malzemenin mukavemet değerlerini aşması sonucunda malzemede ya çatlama ya da birbirine temas ettiği noktalarda ezilme şeklinde hasarlar oluşmaktadır. Isısal genleşmeyi etkileyen bir diğer faktör de malzemenin boşluklu iç yapısına göre değişim gösteren ısı iletkenlik değeridir. Isı enerjisi sıcak cisimden soğuk cisme doğru geçiş yapar. Malzemenin iç yapısında boşluklar arttıkça, boşluklar içerisindeki durgun havanın ısı iletkenliğinin az olması ve birim hacim ağırlığının azalması nedeniyle malzemenin ısı iletkenliğinin de küçülmesine neden olmaktadır. Buna karşılık nem (yoğuşma) olayı, malzemenin ısı iletkenliğinin artmasında önemli bir faktör olmaktadır. Tüm bu faktörlere ve sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen periyodik genleşme ve büzülme olayları, serbestçe yer değiştirmesi önlenmiş malzemelerde periyodik gerilme değişimlerine yol açmakta ve bir yorulma etkisi meydana getirerek malzemeyi çok uzun bir süre sonunda harap etmektedir (Kocataşkın, 2000). Ayrıca korozyon gibi hasarlar söz konusu olduğunda da kimyasal reaksiyonların hızı üzerinde sıcaklığın belirgin bir etkisi vardır.

4.3.1.4. Yağış ve rüzgâr etkileri

Rüzgâr, taşınan partiküllerin neden olduğu erozyon sonucu yapı malzemelerinin bozulmasına katkıda bulunan bir atmosferik faktördür. Rüzgâr aynı

zamanda buharlaşma hızını ve dolayısıyla malzemenin içindeki ve yüzeyindeki tuzların kristalleşme sürecini etkilemektedir (Rosvall, 1988). Bir malzemenin bozulma sürecinde rüzgâr hızı ve yönü de önemli değişkenler olmaktadır. Rüzgâr hızı, katı ve sıvı ajanların düşey yüzeylere çarpıp/çarpmayacağı, yatay yüzeyler üzerinde kalıp/kalmayacağı, aşınmaya neden olup/olmayacağını belirtmekte önemli bir yer tutmakta; rüzgâr yönü ise, yakın çevredeki kirleticilerin neden olduğu bozulmaların olduğu yerlerde önemli bir değişken olmaktadır (Yocom ve Upham, 1976).

Su buharının çeşitli koşullarda yoğunlaşması sonucu yeryüzüne ulaşan yağmur, kar, dolu ve sis gibi çeşitli atmosferik olayların tümü **yağış** olarak tanımlanmaktadır. Yağmur şeklinde olan sıvı suyun yapı yüzeylerine ulaşmasında rüzgâr önemli bir faktördür ve bu nedenle rüzgârın en ciddi etkileri özellikle yağmurla birleştiğinde ortaya çıkmaktadır. Yüzey, suyu emerek doyma noktasına ulaştıktan sonra, yoğun yağmurla birleşen rüzgâr da ciddi iç bozulmalara neden olmaktadır. Bu şekilde yağmur, rüzgâr basıncı ile çatlaklara, yarıklara ve boşluklu malzemelere nüfuz etmekte ve su-nem etkisi başlığı altında sözü edilen hasarlara neden olmaktadır. Ayrıca sis gibi atmosfer olaylarında havaya karışan kirleticiler ve zehirli gazlar su ile birleşerek yapıların dış kabuklarında zararlı etkilere neden olmaktadır (Toydemir ve ark. 2000).

Yukarıda açıklanan faktörlerin hiçbirisi birbirinden bağımsız davranmamaktadır. Örneğin, bir yüzeyin ısıtılması buharlaşma hızına bağlıdır, bu ise havadaki nemden, rüzgârın gücü ve taşıdığı nem bileşiminden etkilenmektedir (Rosvall, 1988). Bu nedenle bir faktörün etkisinde oluşan olayları diğer faktörlerin etkisi dikkate alınmaksızın tanımlayabilmek mümkün değildir. Ayrıca bu faktörlerin birleşik halde etki göstermeleri de hasar derecesinin artmasında önemli bir rol oynamaktadır.

4.3.2. İnsan kaynaklı faktörler

4.3.2.1. Atmosferik kirlilik etkisi

Atmosferik faktörler hava kirleticilerin bulunması koşulu olmadan malzemelerde hasara yol açabilen faktörlerdir. Ancak kirleticilerin bulunmaması durumunda bozulma hızı, atmosferik kirleticilerin varlığına göre 10-100 kat daha azdır (Watkiss ve ark. 2001). Bu nedenle hava kirleticileri, yapı malzemeleri hasarında

oldukça önemli unsurlar olmaktadır. Hava kirleticilerinin malzemeler üzerinde etkili olduğu beş farklı hasar mekanizması vardır:

1. Aşınma: Yeterince büyük ve yüksek hızlarda hareket eden katı partiküller yıkıcı aşınmaya neden olmaktadır.
2. Birikim ve temizleme: Bir yüzey üzerinde birikmiş katı ve sıvı partiküller, yüzeyin görünüşünü bozmak dışında malzemenin kendisine zarar vermez veya malzemeyi değiştirmez. Ancak bu partiküllerin temizlenmesi bir miktar bozulmaya neden olabilmektedir. Bir kez yapılan temizleme önemsenebilir bir zarar vermese de sıklıkla yapılan temizleme işlemleri sonucunda özellikle cephesi doğal taş ile kaplanmış yüzeylerde aşınma hızı artmaktadır.
3. Doğrudan kimyasal saldırı: Bazı hava kirleticiler doğrudan malzemelerle etkileşime girerek bozulmaya neden olmaktadır. Buna örnek olarak gümüşün kararması gösterilebilir.
4. Dolaylı kimyasal saldırı: Bazı malzemeler kirleticileri absorbe ederler ve kirleticiler kimyasal değişime uğradığı zaman zarar görürler. Örneğin, deri tarafından absorbe edilen kükürtdioksit, deriyi bozan sülfirik aside dönüşmektedir.
5. Elektrokimyasal korozyon: Yapısının çok önemli bir bölümü demirden oluşan metallerde, oluşan atmosferik hasarların çoğu elektrokimyasal süreç nedeniyledir. Atmosfere maruz kalan demir metal yüzeyler üzerinde çok sayıda küçük elektrokimyasal hücre oluşmaktadır. Yüzeyler üzerindeki yerel, kimyasal veya fiziksel farklılıkların sonucu oluşan anot ve katot hücreleri arasında oluşan potansiyel fark korozyon hareketin temel nedenidir. Eğer yüzey temiz ve kuru ise akım akmaz ve korozyon oluşmaz. Ancak su, kuru gibi gözükse bir yüzey üzerinde moleküler katmanda dahi varsa, akım akar. Bununla birlikte su, hava kirleticiler ile birleşirse büyük bir olasılıkla daha fazla elektriksel iletkenlik oluşacak ve korozyon daha hızlı ilerleyecektir (Yocom ve Upham, 1976).

Bu bozulma mekanizmalarından da görüldüğü gibi, malzemeler atmosferik kirleticilerin etkilerine maruz kaldıklarında, renk kaybı, kütle kaybı, yapısal bozulma ve kirlenme-lekelenme şeklinde hasarlar ortaya çıkmaktadır. Çeşitli malzemelerde atmosferik kirleticilerin etkisiyle ortaya çıkan bu hasarlar, ortaya çıkış belirtileri, hasar ölçümleri ve atmosferik kirleticiler ile birlikte etkili olan çevresel faktörler Çizelge

4.3'te gösterilmektedir (Yocom ve Upham, 1976). Atmosferik kirleticilerden karbondioksit (CO_2) ve kükürttrioksit (SO_3) gibi gazlar kalker içeren malzemeler (çimento, taş, beton) üzerinde önemli kimyasal etkiler yapmaktadır. Bu gazlar yağmurlu ve sisli havalarda karbonik asit ve sülfirik asit haline geçerek bilhassa binaların dış yüzeylerinde kullanılan malzemeler üzerine zararlı bir şekilde etkiler. Karbonik asit, suda erimez bir malzeme olan kalsiyum karbonatın (CaCO_3), suda erir bir malzeme olan kalsiyum bikarbonat haline geçişine neden olmakta ve bu şekilde malzeme su etkisinde erimeye başlamaktadır. Sülfirik asit ise yine kalsiyumkarbonatın, alçıtaşı/kalsiyum sülfata (CaSO_4) dönüşmesine ve bünyede hacimce genişleyip, parçalanıp dağılmasına neden olmaktadır (Kocataşkın, 2000). Bunun yanı sıra asidik birikimler ve atmosferik oksidantlar boya ve polimerik malzemeler üzerinde, parlaklık kaybı ve lekelenme, polimer yüzeyin aşınması, gevreklik ve çatlama gibi hasarlara neden olurken, metal yapı malzemeleri üzerinde de özellikle bu kirleticiler birer katalizör gibi davranarak, ıslak ve kuru çökelme mekanizmaları ile korozyon olayının hızlanmasına yol açmaktadır.

Çizelge 4.3. Çeşitli malzemelerde oluşan hava kirliliği hasarları

Malzemeler	Belirtiler	Ölçüm	Başlıca hava Kirleticileri	Diğer çevresel Faktörler
Metaller	Yüzeyin bozulması, metal kaybı, karama	Korozyon ürünlerinden dolayı kütle artışı, korozyon ürünlerinin temizlenmesinden sonra kütle kaybı, azalan fiziksel dayanım, değişen yansıtıcılık veya iletkenlik	SO ₂ , asitlik gazlar	Nem, sıcaklık
Yapı Malzemeleri	Renk değişimi ve kaybı	Genellikle rakamlarla ölçülmez	SO ₂ , asitlik gazlar, yapışkan partiküller	Nem, donma
Boyalar	Renk değişimi, incelmış cila	Genellikle rakamlarla ölçülmez	SO ₂ , H ₂ S, yapışkan partiküller	Nem, mantar
Deri	Yüzeyde pullanma, zayıflama	Gözlem, çekme dayanımı kaybı	SO ₂ , asitlik gazlar	Fiziksel aşınma
Kâğıt	Gevreklik	Azalan katlanma direnci	SO ₂ , asitlik gazlar	Güneş ışığı
Tekstil	Azalan çekme dayanımı	Azalan çekme dayanımı	SO ₂ , asitlik gazlar	Nem, güneş ışığı, mantar
Tekstil Boyası	Solma	Yansıtma ölçümleriyle solma	NO ₂ , oksidantlar, SO ₂	Güneş ışığı, nem
Kauçuk	Kırılma, zayıflama	Elastiklik kaybı, gerilme altındayken çatlak derinliklerinin artması	Oksidantlar, O ₃	Güneş ışığı
Seramik	Değişen yüzey görünümü	Değişen yansıma ölçümleri	Asitlik gazlar	Nem

5. METAL MALZEMELERDE KOROZYON OLAYI VE ATMOSFERİK KOROZYON

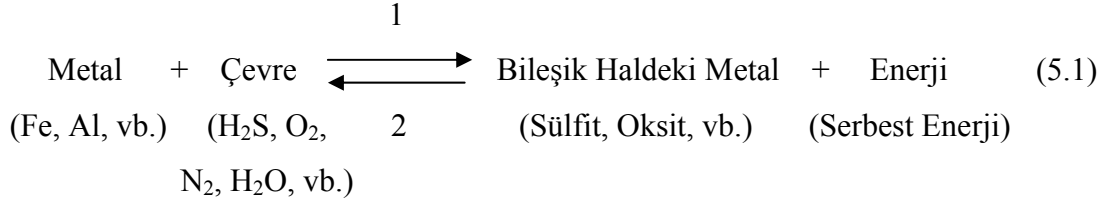
Dayanıklı ve sağlam bir yapıya sahip olmalarına rağmen, yeryüzünde bulunan diğer tüm malzemeler gibi metaller de zamanla bozulmakta ve hasara uğramaktadır. Yapı malzemesi olarak çok geniş bir kullanım alanı olan metallerin bozulma nedenlerinin başında ise bulundukları ortamla kimyasal olarak reaksiyona girme eğilimleri nedeniyle korozyon olayı gelmektedir. Kütle kaybı ile sonuçlanan korozyon, metallerin başlangıçta beklenen fonksiyonları yerine getirememelerine yani malzeme ömrünün azalmasına neden olan önemli bir hasar şeklidir. Bunun yanı sıra oluşan korozyon zararlarının giderilmesi için harcanan çok büyük emek, maliyet ve zaman göz önüne alındığında korozyonun önemi daha da belirginleşmektedir. Korozyon türleri arasında ise, metallerin en fazla temas ettiği çevre olan atmosfer ortamında gerçekleşen “atmosferik korozyon” öne çıkmaktadır. Atmosferik çevrenin korozyon etkenliğine bağlı olarak metallerin korozyon hızları önemli ölçüde değişmektedir. Atmosferik ortama maruz kalan bir metalin bulunduğu koşullardaki performansının tahmin edilebilmesi, pek çok faktörün korozyon hızını etkilemesi nedeniyle mümkün değildir. Ancak metalin korozyona yani bozulmaya karşı göstereceği performansta atmosferik kirleticiler önemli bir rol oynamaktadır.

5.1. Korozyon ve Önemi

Korozyon en geniş tanımıyla, metal ve alaşımlarının çevreleri ile girdiği reaksiyonlar sonucunda özelliklerinin bozulmasıdır. Diğer bir ifade ile korozyon, “metal yapı alaşımlarının, elektrokimyasal özellikleri ve bulundukları ortamın etkisi ile süreye bağlı olarak kemirilip tahrip olmaları (Eriç, 1994)” şeklinde tanımlanabilir.

Bakır ve altın gibi metaller doğada saf olarak bulunmazlar. Ocaktan, başka kimyasallarla karışık ve dengeli bir halde oksit, sülfat ve karbonat türevleri olarak çıkarılırlar. Metal, bu karışımlardan ayrıştırılarak endüstride saf olarak kullanılır hale getirilir. Bu şekilde saf olarak kullanılan metal atmosfer şartları, ısı, rutubet, basınç, diğer metal veya malzemelerle temas, metalin kendi kompozisyonu gibi etkenler altında, kullanılmakta oldukları saf hallerinden tekrar ocakta bulunmuş oldukları hallerine, başka bir deyişle doğal hallerine dönme eğilimi gösterirler. (Uluengin, 2006). Bu doğal hale dönüşün temelinde metallerin taşıdıkları yüksek enerjisi

yatmaktadır. Doğada iken düşük enerjili ancak kararlı halde olan bileşiklerin, fiziksel ya da kimyasal işlemlerle, enerji harcanarak bileşenlerine ayrılması sonucu elde edilen metaller, yüksek enerjili fakat kararsız olmaktadır. Uygun bir ortamın bulunması halinde ise, üzerinde taşıdığı enerjiyi geri vererek, doğadaki bileşiğine dönüşmekte yani korozyona uğramaktadır. Metal ve çevresi arasında gerçekleşen ve korozyon olarak tanımlanan reaksiyon Denklem (5.1)'de gösterilmiştir.



Bir metalin çevresi ile etkileşerek fazla enerjisini vermesi ve kararlı bileşiği haline dönüşmesi doğal bir olaydır. Ancak enerji ve emek sarfedilerek güçlüklerle elde edilen metallerin bu şekilde doğal hallerine dönüşleri, ekonomik açıdan oldukça büyük kayıplara neden olmaktadır. En basit deyimle korozyon sonucu kaybedilen metal, elde edilmesi sırasında harcanan emeğin, enerjinin ve paranın boşa gitmesi demektir. Her ülkenin, özellikle de sanayileşmiş ülkelerin korozyon giderleri oldukça büyük miktarlar tutmaktadır (Dehri, 1994). Türkiye’de ise korozyon kayıplarının, gayri safi milli hâsılanın % 4.36’sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir. 1997 yılında eğitime ayrılan payın, GSMH’nın % 1.76’sı, 1998 yılında % 2.53’ü olduğu dikkate alınırsa, konunun önemi açıkça görülmektedir (Yüzer, 1999). Yadsınamayacak kadar önemli olan bu rakamlar, korozyonla mücadelenin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Korozyon, ekonomik açıdan olduğu kadar, insan sağlığı bakımından da oldukça önemlidir. Korozyon ürünlerinin gıda maddelerine karışması tehlikeli sonuçlar doğurabilmekte, korozyon sonucu dayanımını yitirmiş yapıların beklenmedik bir zamanda çökmesi can kaybına neden olabilmektedir. Görevini yapamayacak duruma gelmiş metal malzemenin değiştirilmesi sırasında, tesisin üretim faaliyetlerinin durdurulması da doğrudan ürün kaybına yol açmaktadır. Bunların yanı sıra metalin korozyon yoluyla bileşiklerine dönüşmesi hammadde rezervlerinin daha kısa sürede tüketilmesine neden olmaktadır.

Korozyonun neden olduğu çevresel ve ekonomik zararların boyutu, korozyon çalışmalarının önemini gündeme getirmektedir. Korozyon zararlarını gidermek için çok büyük emek, maliyet ve zaman gerekmektedir. Bu nedenle korozyon hızının

ölçülmesi ve korozyon kaynaklı kayıpların önlenmesi amacıyla gelişmiş ülkelerde sürekli olarak araştırmalar yapılmaktadır. Ülkemizde de korozyon olayının anlaşılması ve korunma yöntemlerinin geliştirilmesi için artan bir dikkate ihtiyaç vardır.

5.2. Korozyon Olayının Temelleri

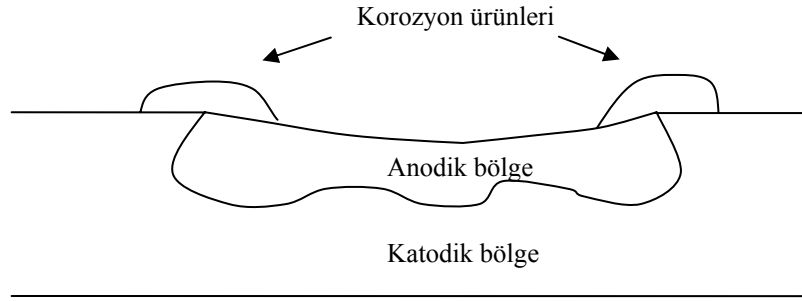
Metal ve alaşımlarının korozyon yoluyla zamanla dıştan içe doğru aşınması çevredeki agresif ortamların etkisiyle meydana gelmektedir. Ortamın bozulma olayına etkisi ise kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlardan biri ya da her ikisi ile birlikte olmakta, dolayısıyla bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen bozulma olayları da kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olarak tanımlanmaktadır. Metal ve alaşımlarının oksitlenmesi kimyasal korozyon (kuru korozyon) iken, sulu ortamlar içinde bozulmaları ise elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon) olarak tanımlanmaktadır (Doruk, 1982).

Kimyasal etki ile oluşan korozyon reaksiyonları metaller ile gazlar ve eriyikler arasında oluşmaktadır (Weissbach, 2000). Kimyasal korozyon, susuz ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta metalin doğrudan oksit oluşturmalarıdır. Metallerin korozyona uğramaları sonunda oluşan bileşikler korozyon ürünü olarak tanımlanmaktadır. Bu korozyon ürünlerinden oluşan yüzey tabakaları, çoğunlukla gözeneklidir; bu nedenle difüzyon yoluyla kalınlaşırlar, ancak malzemenin ısı genleşme değerinin değişmesi nedeniyle pullanarak dökülürler. Bu nedenle dökülen yüzeyin altında esas metal tekrar açığa çıkar ve korozyon bu yolla devam eder. Yani korozyon ürünlerinin yüzeyden uzaklaşması korozyonun devam etmesi anlamına gelmektedir. Bu metallere örnek olarak demir ve çelik gösterilebilir. Buna karşılık bazı metaller gözenekli olmayan oksit tabakaları oluştururlar ve bu yolla kendilerini daha sonraki oksitlenmelerden korurlar (Weissbach, 2000). Bakır ve alüminyum gibi metallerin havanın oksijeniyle temas etmelerinden oluşan oksitleri, koruyucu bir tabaka olarak korozyonun derinlere işlemesini durdurmaktadır. Bir metalin oksijen ile verdiği tepkime basit olarak Denklem (5.2) ile gösterilmektedir.



Korozyon olaylarının çoğu elektrokimyasal yolla gerçekleşmektedir. Metalin bulunduğu ortam elektriği iletiyorsa, bir korozyon hücresi oluşarak elektrokimyasal korozyon meydana gelmektedir. Bir korozyon hücresinde ise anot ve katot olmak

üzere iki elektrot yer alır. Anot ve katotlar farklı metaller üzerinde yer alabileceği gibi, heterojen yapılu bir metal yüzeyinde bölgesel olarak da oluşabilir ve bu elektrotlar, elektrolit denen iletken bir sıvı içinde bulunur. Elektrokimyasal olarak gerçekleşen tepkimelerde daima bir elektron alışverişi söz konusudur. Dolayısıyla bu tepkimeleri elektron üreten (anodik), elektron tüketen (katodik) tepkimeler olarak ikiye ayırmak mümkündür (Taze, 2003). Anodik reaksiyon ile elektron kaybeden metalin iyonları çözeltiye geçer, yani anot olan metal ya da metal yüzeyindeki anodik bölge çözünür, korozyona uğrar.



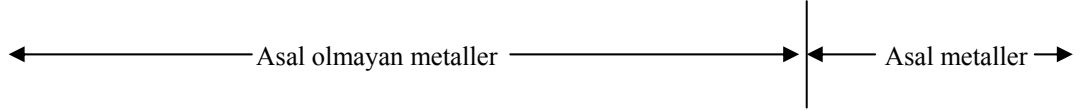
Şekil 5.1. Çelik çubuk üzerinde korozyon oluşumu

Anot ve katot arasındaki potansiyel fark korozyon olayının temel nedenidir. Söz konusu potansiyel fark, negatif potansiyele sahip, iyonlaşma eğilimi fazla, yani aktif olan metalden (ya da metalin daha negatif potansiyele sahip bölgesinden), pozitif potansiyele sahip, iyonlaşma eğilimi az yani asal olana (ya da metalin daha pozitif potansiyele sahip bölgesine) doğru elektron akışına neden olur ve korozyon başlar.

Metalin aktifliği, elektronunu verme eğilimi, yani reaksiyona girme eğilimi onun korozyon direncini belirler. Korozyon direnci düşük olan metaller en büyük negatif potansiyele sahiptir. Çizelge 5.1’de metallerin normal potansiyelleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Metallerin gerilim serisi ve normal potansiyelleri

Element	Na	Mg	Al	Zn	Cr	Fe	Sn	Pb	H	Cu	Ag	Au
Potansiyel	- 2.7	-2.4	-1.7	-0.76	-0.56	-0.44	-0.14	-0.12	0	0.34	0.8	1.36



5.3. Korozyon Oluşum Şekilleri

Korozyon sonucunda hasara uğramış bir metalin yüzeyinin ve kesitinin görünüşüne bakılarak korozyon oluşum şekilleri çeşitli sınıflara ayrılmıştır. Bunları şöyle sıralamak mümkündür:

- Homojen dağılımlı korozyon,
- Galvanik korozyon,
- Oyuk korozyonu,
- Çatlak korozyonu,
- Taneler arası korozyon,
- Gerilmeli korozyon.

Homojen dağılımlı korozyon, korozyona maruz kalan tüm metal yüzeyinde eşdeğer şiddette oluşan ve elektrokimyasal etki ile meydana gelen bir korozyon türüdür. Metalin yüzeyi aynı hızda ve aynı oranda çözünür, dolayısıyla metal her noktada aynı miktarda azalır. Örneğin atmosfer ortamında bulunan demir levhanın her yanı aynı derecede korozyona uğrar. Ağırlık taban alındığında, çelik başta olmak üzere metallere en fazla zarar veren korozyon türüdür. Ancak,

- boyama,
- inhibitör ve
- katodik koruma,

gibi korozyon azaltıcı işlemler ile kolaylıkla kontrol edilebilir (Smith, 1993).

Galvanik korozyon, farklı elektrokimyasal potansiyele sahip iki metalin birarada kullanılması sonucu temas yüzeylerinde meydana gelir. Korozyon dayanımı az olan aktif metal anot, asal olan metal ise katot görevini görerek aktif metalde korozyona neden olur. Galvanize edilmiş çelik, çinko ile kaplanmış çelik, bir metalin

(çinko), diğer metali (çelik) korumak için kurban edildiği bir örnektir. Burada çelik üzerine kaplanmış çinko anodiktir ve dolayısıyla korozyona uğrar (Smith, 1993).

Oyuk korozyonu, bir metal içinde oyuklar üreten lokalize olmuş korozif saldırıların bir formudur. Metal yüzeyinde önce delikçikler oluşur ve zamanla bu delikçikler çukurlara dönüşür. Çoğu zaman oyulmaların saptanması zordur. Çünkü küçük oyuklar korozyon ürünleri ile kaplanmış olabilir. Birbirine yakın oyuklar pürüzlü bir görünüm vermektedir. Metal yüzeyindeki eklemeler, yapısal ve kompozisyonel heterojenlikler oyukların oluştuğu yaygın yerlerdir. Bu tip korozyon farkına varılmadan oluştuğu için yıkıcı bir korozyon türüdür ve lokalize olmasından dolayı ani ve beklenmedik hasarlara yol açabilmektedir (Smith, 1993).

Çatlak korozyonu, metal yüzeyindeki çatlaklarda, iki metalin birleşme yeri olan dar bir aralıkta ve kabuk altında oluşabilen lokalize ve elektrokimyasal bir saldırdır. Korozyonun oluşabilmesi için çatlak, sıvının girişine izin verecek kadar geniş ancak sıvıyı durgun tutacak kadar da dar olmalıdır (Smith, 1993).

Taneler arası korozyon, heterojen yapıli alaşımlarda, homojen yapıda olanların aksine, metal atomlarının oluşturduğu kristallerin düzgün dağılmış olmaması nedeniyle metalin tane sınırlarına yakın bölgelerde meydana gelen lokalize bir korozyon türüdür. Taneler arasındaki sınır çizgisinde veya sınıra yakın bölgelerde metalin birisinin diğerine göre daha küçük derişimde bulunması korozyon için uygun bir ortam oluşturur.

Gerilmeli korozyon, en tehlikeli korozyon türüdür. Mekanik gerilme ve metal üzerine etkiyen belirli bir korozif ortamın ortak etkisi sonucunda oluşmaktadır. Malzemenin yüzeyinde çatlak oluşumu ile ortaya çıkar ve bu çatlaklar bir başlangıç aşamasından sonra, ani kopma oluşana kadar sürekli bir biçimde yayılır.

Metal ve alaşımlarında farklı şekillerde ortaya çıkan bu korozyon türleri çeşitli ortamlarda oluşabilmektedir. Yaygınlık ve ekonomik önem bakımından korozyon olayını; su ortamında korozyon, deniz suyunda korozyon, zeminde korozyon ve atmosferik korozyon başlıkları altında incelemek mümkündür. Bu çalışmada, metal yapı malzemeleri üzerinde atmosferik korozyonun oluşum ve gelişim süreci incelenecektir.

5.4. Atmosferik Korozyon

Atmosferik korozyon bilinen korozyon çeşitlerinin en eskisidir ve atmosfer metallerin en sık maruz kaldığı çevredir. Korozyon türleri arasında gerek harcanan para gerekse yitirilen madde miktarı bakımından en büyük olanı atmosferik korozyondur (Dehri, 1994). Atmosferik korozyonun yüksek teknoloji toplumlarına etkisi, atmosferik korozyona karşı koruma maliyeti, tüm korozyon önlemlerinin toplam maliyetinin % 50'sini oluşturduğu kabullenmesi ile örneklenmektedir (Leygraf, 1995).

Atmosferik korozyon çoğunlukla metal olan bir malzeme ve atmosferik çevre arasındaki etkileşimin sonucudur. Oda sıcaklığındaki hemen hemen nemsiz atmosfere maruz kaldığı zaman metallerin çoğu anında katı bir oksit tabaka oluştururlar. Eğer oksit kararlı ise büyüme hızı durur ve oksit azami 1-5 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{ m}$) arasında bir kalınlığa ulaşır. Atmosferik korozyon çoğunlukla, maruz kaldığı çevre şartları altında oksitlenmiş metaller üzerinde oluşan ince bir sıvı tabakasının varlığında oluşmaktadır. Bu tabaka tek moleküllü kalınlıktan, rahatlıkla görülebilir su tabakasına kadar değişebilir. Dolayısıyla atmosferik korozyonu metal yüzeyin ıslanma derecesine göre iki şekilde sınıflamak mümkündür: nemli korozyon ve yağ korozyon (Leygraf, 1995).

Nemli atmosferik korozyon, bağıl nemin % 100'den az olduğu atmosferlerde ancak metal yüzey üzerinde ince elektrolit tabakalar oluştuğu zaman meydana gelir. Sürecin hızı, havanın bağıl nemine, atmosferik kirlilik derecesine ve korozyon ürünlerinin nem tutabilme (higroskopî) özelliklerine son derece bağlıdır. Nemli atmosferik korozyon su buharı ve kirleticilerin izlerinin varlığını gerektirir (Leygraf, 1995). **Yağ atmosferik korozyon** ise bağıl nemin % 100'e yakın olduğu atmosferlerde gerçekleşmektedir. Bu durumda, metalin yüzeyinde yağ damla yoğunlaşma mümkündür ya da deniz veya nehir mistlerinden kaynaklanan elektrolitle metal doğrudan ıslanır. Bu korozyon formu, nispeten kalın, görülebilir elektrolit tabakaların varlığı ile karakterize edilir ve bu nedenle daha çok sulu korozyona benzer. Yağmur veya kirleticilerle birlikte diğer büyük su formlarını gerektirir (Leygraf, 1995).

5.4.1. Atmosferik korozyonu etkileyen faktörler

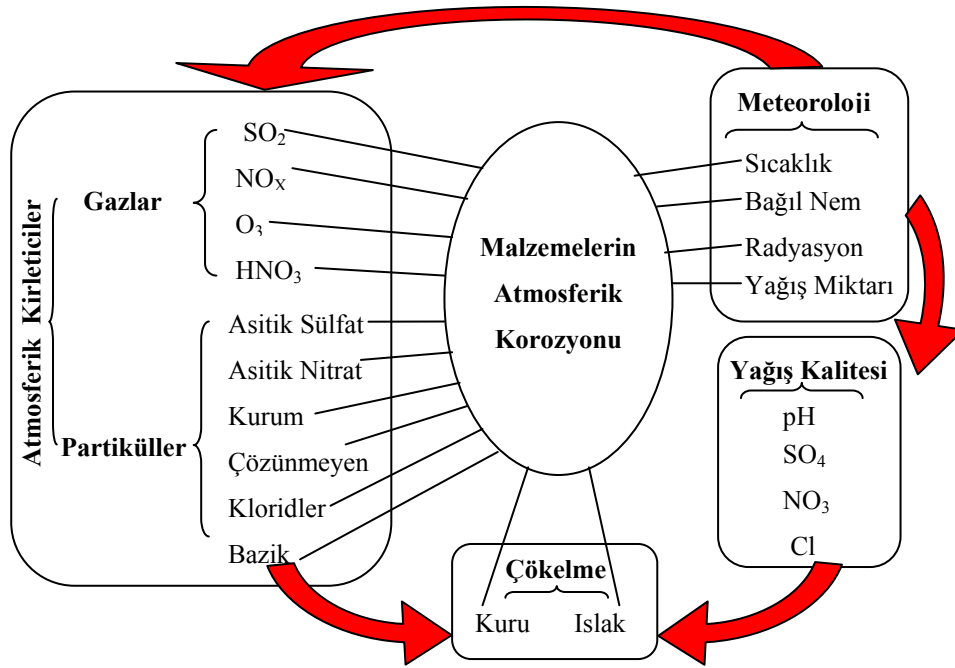
Atmosferik korozyon hızı, metalin bulunduğu çevre şartlarına göre önemli ölçüde değişmektedir. Doğal ya da insani süreçler sırasında atmosfere bırakılan kirleticiler nedeniyle atmosferin bileşiminde meydana gelen değişiklikler sonucunda, atmosferik çevrenin korozyon etkenliği de önemli ölçüde değişmektedir. Atmosferik çevreler korozyon etkenlikleri bakımından kırsal, deniz ve endüstriyel olmak üzere üç grupta sınıflandırılmıştır:

Kırsal atmosfer, en az saldırgan olanıdır. Deniz atmosferinin saldırganlığı, kırsal atmosfere oranla yaklaşık 500 kat daha fazladır. Endüstri atmosferi için bu oran yaklaşık 100 kattır. **Deniz atmosferinin** saldırganlığı, içerdiği bol miktardaki sodyum klorürden kaynaklanmaktadır. Kıyıdan uzaklaştıkça sodyum klorür miktarında azalma görülmekte ve bu değişim korozyon hızına aynen yansımaktadır. **Endüstri atmosferinin** en belirgin özelliği kükürtdioksit (SO_2) gazını bol miktarda içermesidir. Karbondioksit (CO_2), hidrojen sülfür (H_2S), amonyak (NH_3) ve azotdioksit (NO_2) türünden gazların miktarı daha azdır. Ayrıca, çeşitli tuzlar ve karbon, metal oksitler gibi katı parçacıklarla yüklenmiş olabilmektedir. SO_2 gazı, hava içindeki su ile reaksiyona girerek sülfürik aside dönüşmektedir. Bu oluşumdan özellikle sülfürik aside dayanıklı olmayan çinko, demir gibi metaller etkilenmektedir. Kurşun, alüminyum ve paslanmaz çelikler bu oluşuma dayanım gösteren metallerdir (Sezer, 2004).

Korozyon açısından metallerin bulunduğu atmosferik ortam oldukça önemlidir. Bununla birlikte, bir metalin çevre içindeki performansının belirlenebilmesi, çok çeşitli faktörlerin korozyon hızı üzerinde etkili olması nedeniyle halen mümkün değildir. Ancak, atmosferik korozyon süreçlerinde, korozyon hızına etki eden en önemli çevresel parametreler şunlardır:

- Bağıl nem,
- Sıcaklık,
- Kirlilik miktarı,
- Rüzgâr yönü ve hızı,
- Yağışlar,
- Güneş ışığı.

Bu faktörlerle beraber metalin kütlesi ve konumu, korunma miktarı, oluşan korozyon ürünlerinin doğası gibi faktörler de korozyon hızı açısından önem taşımaktadır. Çevresel parametrelerin atmosferik korozyon olayına olan etkilerini, havayı oluşturan bileşenlerin etkisi ve doğal koşulların etkileri başlıkları altında açıklamak mümkündür. Atmosferik korozyon süreçlerinde çevresel faktörlerin karmaşık etkileşimi Şekil 5.2’de gösterilmektedir (Knotkova, 2005).



Şekil 5.2. Atmosferik korozyon süreçlerinde atmosferik kirleticiler, meteorolojik şartlar ve çökeltme mekanizmalarının etkileşimi

5.4.1.1. Hava bileşenlerinin etkileri

Kirletilmemiş saf atmosfer içinde, nem ve oksijen dışında korozyona neden olacak başka bir bileşen yoktur. Atmosferik nem, nemlilik olarak bilinen buhar veya gaz formunda/ küçük su zerrecikleri şeklinde sis veya bulut olarak bilinen buz kristalleri olarak/ yağmur, kar, dolu, olarak bilinen sıvı yağış içinde oluşabilmektedir (Feilden, 1982). Pek çok açıdan kritik öneme sahip olan atmosferik nem, metal yüzeyi üzerinde ince bir elektrolit tabaka oluşturur ve korozyon reaksiyonları bu ortamda gerçekleşir.

Nem miktarı atmosferin korozifliğini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. İlke olarak, bağıl nemin % 100’e ulaşmadığı durumlarda, atmosferik korozyonun

hissedilir ölçüde oluşmayacağı varsayılmaktadır. Ancak bağıl nem miktarı sıcaklığın azalmasıyla artmaktadır. Ayrıca havanın higroskopik özelliğe sahip katı parçacıklarla yüklü olması, korozyon için gerekli olan su yoğuşmasının daha düşük nem miktarlarında oluşmasına yol açmaktadır. Atmosferik korozyonu önleyebilmek için, bağıl nemliliğin % 50-70'in altında tutulması gereği ortaya çıkmaktadır. Havada asit buharı olmaması kaydıyla, bağıl nemliliğin % 50'nin altına düşürülmesi atmosferik korozyonu önlemektedir (Doruk, 1982).

Atmosferin yeryüzüne en yakın katmanı olan troposferin ana bileşenleri (N_2 , O_2) ve eser miktarlarda bulunan gazlar (Ne, Kr, He, ve Xe) havanın toplam ağırlığının % 99.9'dan fazlasını oluşturmaktadır. O_2 dışındaki gazların, metal yüzeylerle etkileşimde bulunma yetenekleri olmaması nedeniyle, bu gazların atmosferik korozyon açısından önemleri yoktur. Ancak O_2 katodik reaksiyonlara elektron alıcı olarak katılması nedeniyle büyük öneme sahiptir.

Atmosferik nemin oluşturduğu elektrolit tabakasının korozifliğini önemli ölçüde etkileyen maddeler daha çok bu elektrolit içinde çözünen kirletici gazlar ve partikül maddelerdir. Bu maddelerin hava içindeki miktarları değişebilmektedir. SO_x (kükürtoksit) ve NO_x (azotoksit) gibi kentsel atmosferik ortamda çok yüksek oranlara ulaşabilen kirleticiler metaller üzerine; gaz şeklini içeren “Kuru Çökeltme Mekanizması” ya da asidik şeklini içeren “Islak Çökeltme Mekanizması” ile ulaşır ve bir katalizör gibi, korozyon aşamasını hızlandırırlar. Atmosferik kirliliğin olduğu ortamlarda bulunan partikül maddeler de, metaller üzerinde korozyon etkisine sahiptir. Kuru havada partiküllere karşı dayanıklı olan metaller, nemli koşullarda aynı dayanım gücüne sahip değildir. Partiküllerin çevresinde su buharı yoğunlaşır ve bunların içinde SO_x (kükürtoksit) ve NO_x (azotoksit) gazları çözünerek, korozyon işlemi hızlanır. Bu nedenle atmosferik kirliliğin yüksek olduğu endüstriyel ortamlarda, korozyonun daha fazla olduğu görülür (Doğan ve Gökaltun, 2004).

Metal yapı malzemeleri atmosferik kirleticilerden önemli ölçüde etkilenmekte ve korozyon sonucunda tahrip olmaktadır. Örneğin St. Gile's Katedrali'nde, cephede yer alan demir kuşakların kesit bölgeleri, korozyon etkisi ile son 50 yıl içerisinde % 40 oranında bir aşınmaya uğramıştır. Eski yapıların kurşun çatı kaplamalarında da sülfirikasit ve karbonikasit içerikli kirleticiler ile korozyon oluşmakta ve 100 yıllık bir süre sonunda, kurşun çatı kaplamasında 3-4 mm'ye varan aşınmalar meydana gelebilmektedir (Gökaltun, 2001).

Vernon'un çığır açan deneysel çalışmaları korozyon açısından kirletici-bağıl nem ilişkisini şu şekilde ortaya koymaktadır:

- % 60'ın altındaki bağıl nemlilikte, çok ysek kirletici seviyelerinde dahi çok az korozyon olmaktadır.
- Nemlilik % 80'e doğru arttırıldığında, korozyon başlamaktadır. % 80'in üzerindeki bağıl nemde ise korozyon, 100 ppm kükürtdioksit ve partiküllerin çeşitli kombinasyonundan oluşan test şartlarında, hızlı bir şekilde ilerlemektedir.
- Kükürtdioksit ve kömür partikülleri ile kirlenmiş hava, sadece kükürtdioksit ile kirlenmiş havaya göre daha ysek bir korozyon hızına neden olmaktadır.
- Saf havada korozyon çok ysek nemde dahi minimaldir (Yokom ve Upham, 1976).

Atmosferdeki nem olmazsa, en kötü şekilde kirlenmiş çevrelerde dahi çok az korozyon olurdu. Korozyonun oluşması için yüzeylerin görünebilir derecede ıslak olması gerekli değildir. Havadaki su buharı doğun halden daha az olduğu zaman bile korozyona neden olabilir. Pek çok metal için, aşıldığı zaman, korozyon hızında keskin bir artışa neden olan kritik bir atmosferik nem değeri olduğu söylenebilir. Bu kritik atmosferik nem, metal yüzeyinde sıvı filmin oluşmasına neden olan minimum bağıl nem miktarıdır. Kükürtdioksit içeren atmosferde, alüminyum % 80, yumuşak elik % 60-75 kritik nem değerlerine sahiptir. Nikel ve bakır için ise bu kritik değer % 70 ve 63'tür (Yokom ve Upham, 1976). Nem miktarı bu değerlerden daha az olduğunda ise metal yüzeyinde sıvı tabakası görülmez.

5.4.1.2. Doğal koşulların etkileri

Atmosferin korozyon etkinliğini belirleyen doğal koşullar, sıcaklık, rüzgar yönü ve hızı, yağışlar ve güneş işığıdır.

Atmosferik korozyon hızında en önemli unsur, metal üzerinde oluşan elektrolit tabakasının yüzeyde kalış sresidir. Bu süreyi belirleyen faktör ise sıcaklıktır. Sıcaklık düşük olduğu sürece metal yüzeyindeki elektrolit tabakasının kuruması gecikeceğinden korozyon devam edecektir. Bu nedenle sıcaklığın düşük olduğu kuzey bölgelerde korozyon hızı, güney bölgelere göre daha fazladır (Dehri, 1994).

Yağmur formundaki nem, kirli atmosferlerdeki metallerin korozyon hızını düşürmektedir. Bu etki, korozif maddelerin yağmurla seyreltilmesi veya tamamen yıkanması nedeniyle olabilmektedir. Ancak bazı durumlarda ise, bu korozif maddeler bir metal malzemenin daha alt kenarlarında birikerek korozyonu hızlandırabilmektedir (Yokom ve Upham, 1976).

Atmosferik korozyonun yürümesi için mutlaka suya gereksinim vardır. Bu nedenle yıllık yağış miktarı korozyon hızı açısından önemlidir. Ancak yağış miktarı kadar sıklığı ve kurumaya süresi de önemlidir. Bu nedenle bölgedeki rüzgar hızı ve yönü de önemli bir parametre olmaktadır. Rüzgar, kurumayı hızlandırdığı gibi yüzeyde toplanan toz ve kurum şeklindeki partikül maddelerin sürüklenerek uzaklaşmasına da neden olur.

5.5. Korozyon Hızı ve Önemi

Günümüzde, ısınma, ulaşım ve üretim gibi faaliyetler için gün geçtikçe artan enerji talebi ve bu talebin fosil kaynaklı enerji kaynaklarından sağlanmaya çalışılması, havadaki kirlilik miktarının önemli ölçüde artmasına neden olmuştur. Bu kirlilik artışı karşısında korozyon hızı da artmakta ve metal yapı malzemelerinin hasar oranında artışa yol açmaktadır. Bu ise malzemenin daha sık onarılması, temizlenmesi ve korunması gibi çabaları gerektirmektedir. Daha fazla maliyet, emek ve zaman anlamına gelen bu çalışmalar beraberinde korozyonun daha iyi anlaşılmasının zorunlu bir gereklilik olduğunu ortaya koymaktadır. Korozyon nedeniyle metal yapı malzemelerinin işlevlerini kaybetmesi üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bazı araştırmalara göre, her yıl pas nedeniyle harap olan çelik miktarı, yılda üretilen çelik miktarının yüzde 0.5'ini bulmaktadır (Eriç, 1994). Böylesi önemli ve ciddi bir sorun olan korozyon olayında, yapısal özelliklerine ve ortamın etkisine bağlı olarak metallerin korozyon hızlarının bilinmesi, korozyon zararlarının önüne geçilebilmesinde temel bir rol oynamaktadır.

Korozyon hızı, metalin birim zamanda çözünme miktarıdır. Buna göre, korozyon hızlarının bilinmesi, metal ve alaşımlarının korozyona karşı dayanımlarının belirlenebilmesi için önemlidir. Ortamın korozifliğine bağlı olarak malzemenin korozyon yatkınlığının bilinmesi ise, kullanılabilecek en uygun malzemenin seçilmesi ve gerekli koruyucu tedbirlerin alınabilmesi açısından çok büyük önem taşımaktadır. Literatürde, korozyon hızını belirlemek için çok çeşitli yöntemler kullanılarak

alışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise öncelikle, “belirli zamanlarda, birim alanda kütle azalması” olarak tanımlanabilen “kütle kaybı yöntemi” temel alınarak yapılan deneysel çalışma ile metal yapı malzemelerinin korozyon miktarları belirlenmiş; daha sonraki bölümlerde ise korozyon hızı tahminde yaygın olarak kullanılan ve oldukça başarılı sonuçlar veren yapay sinir ağılarının yapısı genel olarak tanıtılmış ve geliştirilen yapay sinir ağı ile korozyon hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

6. METAL YAPI MALZEMELERİNDE ATMOSFERİK KOROZYONUN OLUŞUMUNA İLİŞKİN DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Çevre kirliliği canlı ve cansız çevre üzerindeki çok çeşitli zararlı etkileri ve neden olduğu ekonomik kayıplardan dolayı günümüzde üzerinde en çok tartışılan çevre sorunlarından birisi haline gelmiştir. Fosil kökenli enerji kullanımı ile ortaya çıkan ve sonuçları itibarıyla çevre kirlilikleri içerisinde ilk sıralarda yer alan atmosferik kirlilik ise sadece canlı yaşamı üzerinde değil aynı zamanda yapılar ve yapı malzemeleri üzerinde de oldukça zararlı etkilere neden olmaktadır. Atmosferik kirlilik nedeniyle yapı malzemelerinde önemli hasarlar ve bozulmalar meydana gelmektedir. Bu hasarlar içinde neden olduğu çevresel-ekonomik zararların boyutu ile ilk sıralarda yer alan metallerin korozyonudur. Atmosfere açık metal yapı malzemeleri için yeterince korozif olan atmosfer, kirlleticilerin etkileriyle daha da korozif hale gelmektedir. Özellikle kükürtoksit (SO_x)’ler ve azotoksit (NO_x)’ler birer katalizör gibi korozyon olayını hızlandırmakta ve sonuç olarak, metal yapı malzemelerinin performanslarının ve beklenen kullanım ömürlerin azalmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Deneysel çalışmada, konunun bu temeldeki öneminden yola çıkarak metal yapı malzemeleri üzerinde atmosferik korozyonun gelişimi ve etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Alan testleri ile yapılacak olan bir çalışmada korozyon oluşum ve gelişim sürecinin olası uzunluğu göz önünde tutularak yöntem olarak laboratuvar koşullarında hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılması tercih edilmiştir. Atmosferde yüksek oranlarda bulunabilen kirleticiler yeryüzüne ve tüm malzemelere iki farklı şekilde ulaşmakta ve etkilemektedir. Yağış olmadığı zamanlarda fiziksel olarak gerçekleşen **“Kuru Çökelme Mekanizması”** (KÇM) ve yağışlı zamanlarda kimyasal olarak gerçekleşen **“Islak Çökelme Mekanizması”** (İÇM) aracılığıyla metallere ulaşan kirleticiler korozyon olayında etkili olmaktadır. Bu çalışmada ise sadece, atmosferik kirleticilerin KÇM aracılığı ile oluşan etkileri gözlenmiştir.

6.1. Yöntem

Bu çalışmada üretim ısınma ve ulaşım gibi faaliyetler sonucunda özellikle kentsel atmosferik ortamlarda çok yüksek miktarlara ulaşabilen SO_x ve NO_x gibi hava kirleticilerinin, metal yapı malzemeleri üzerinde atmosferik korozyona olan etkileri

araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılan düz demir, kutu profil ve saç levha örnekleri kullanılmıştır. Metal yapı malzemeleri üzerinde oluşabilecek korozyon hasarının açık atmosfer koşullarında ortaya çıkması için, gerçekte daha uzun bir süreye ihtiyaç vardır. Çünkü açık atmosfer koşullarında alan testleri ile yapılacak bir çalışmada, oluşacak hasar mekanizmalarının etkilerini hızlandırıcı bir müdahale söz konusu değildir. Ancak, laboratuvar ortamında yapılacak bir çalışmada bu süreci hızlandırmak mümkündür. Dolayısıyla, bu çalışmada da deney süresini minimum düzeye indirmek için atmosferik ortamda kısa ve uzun vadede en yüksek düzeyde bulunabilecek kükürtoksit ve azotoksit oranlarının kullanılması uygun görülmüştür. Bu oranların tespitinde ise uluslararası standartlara göre genel atmosferik ortam için belirlenmiş Uzun Vadeli Hava Kalitesi Sınır Değerleri (UVS) ve Kısa Vadeli Hava Kalitesi Sınır Değerleri (KVS) kabul edilmiştir. Uzun Vadeli Sınır Değeri (UVS), bir yıl içinde aşılmaması gereken, tüm ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması olan değer, Kısa Vadeli Sınır Değeri (KVS) ise maksimum günlük ortalama değerler veya istatistik olarak bütün ölçüm sonuçları sayısal değerlerin büyüklüğüne göre dizildiğinde, ölçüm sonuçlarının % 95' ini aşmaması gereken değerdir. UVS ve KVS içerisinde bulunması gereken maksimum SO₂ (kükürtdioksit) ve NO₂ (azotdioksit) miktarları Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

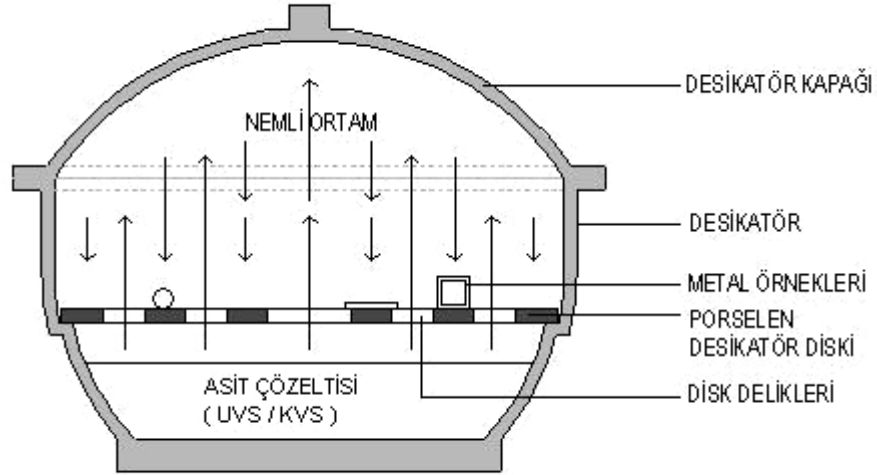
Çizelge 6.1. Uzun vadeli ve kısa vadeli hava kalitesi sınır değerleri

	Birim	UVS	KVS
Kükürtdioksit (SO ₂) ve (SO ₃) dahil Endüstri Bölgeleri	µg/m ³	250	400
Azotdioksit (NO ₂)	µg/m ³	100	300

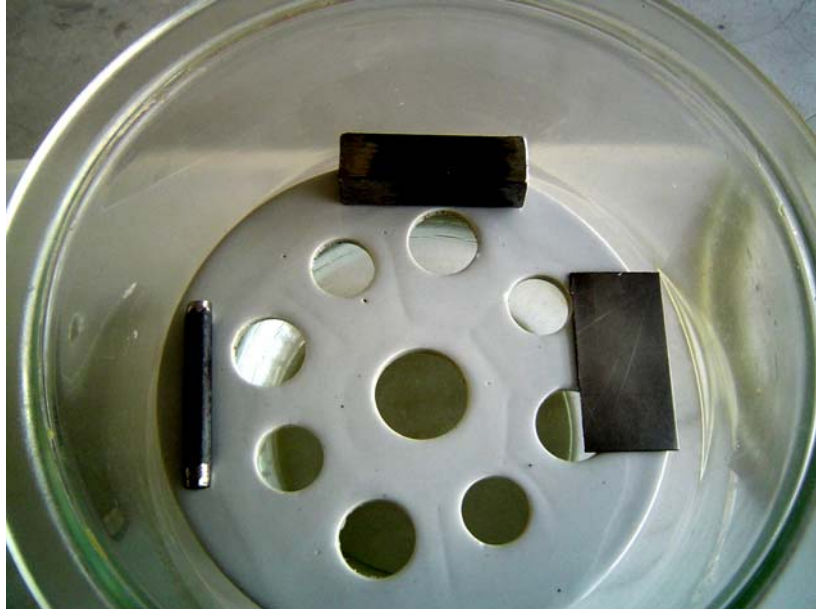
UVS ve KVS değerleri baz alınarak, 1 litre saf su içerisine karşılık gelen H₂SO₄ (sülfirikasit) ve HNO₃ (nitrikasit) oranları ayrı ayrı hesaplanmış ve çözeltiler hazırlanmıştır. Bu amaçla 30 cm çapında dört adet cam desikatör kullanılmıştır. Buna göre:

- 1 nolu desikatörün alt bölümüne UVS değeri ile hazırlanmış H₂SO₄,
- 2 nolu desikatörün alt bölümüne KVS değeri ile hazırlanmış H₂SO₄,
- 3 nolu desikatörün alt bölümüne UVS değeri ile hazırlanmış HNO₃,
- 4 nolu desikatörün alt bölümüne KVS değeri ile hazırlanmış HNO₃,

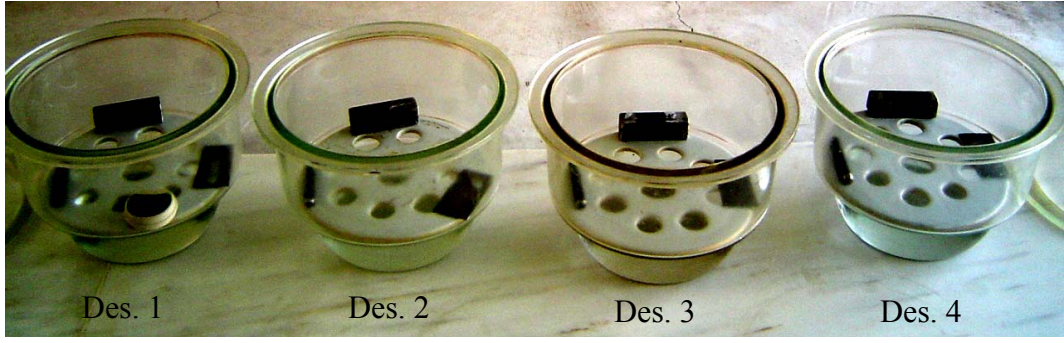
konulmuştur. Bu çözeltilerin porselen desikatör diski üzerine yerleştirilen metal örneklerine kapalı ortam içerisinde buharlaşma yoluyla yani **“Kuru Çökelme Mekanizması”** ile etki edeceği varsayılmıştır (Şekil 6.1). Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4 hazırlanan deney düzeneklerini göstermektedir.



Şekil 6.1. UVS/KVS değerleri ile hazırlanmış sülfirikasit/nitrikasit kuru çökelme mekanizmalarının deney desikatörü içinde oluşturulması



Şekil 6.2. Metal örneklerin cam desikatör içindeki konumları



Şekil 6.3. Deney düzeneği

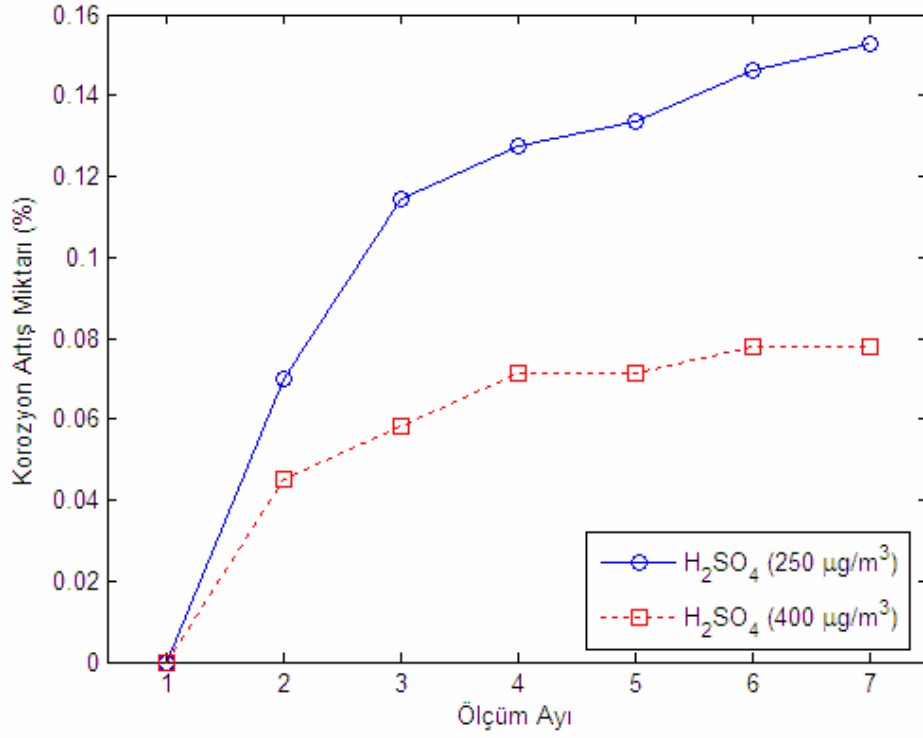


Şekil 6.4. Kapakları hava geçirmeyecek şekilde kapatılmış olan desikatörler

6.2. Bulgular

Birer aylık periyotlarla ölçümler yapılarak 7 ay sonunda elde edilen veriler ile hazırlanan grafiklere göre:

- Sulfirikasit için belirlenmiş olan UVS ve KVS değerleri ile hazırlanan çözelti ortamlarında yani 1 ve 2 nolu desikatörlerde bulunan saç levha ve düz demir örnekleri reaksiyonlardan etkilenmemiş ve dolayısıyla ağırlık bakımından da hiç bir değişikliğe uğramamıştır. Buna karşılık kutu profil örneklerinde farklı oranlarda korozyon ve korozyona bağlı ağırlık artışları meydana gelmiştir (Şekil 6.5).

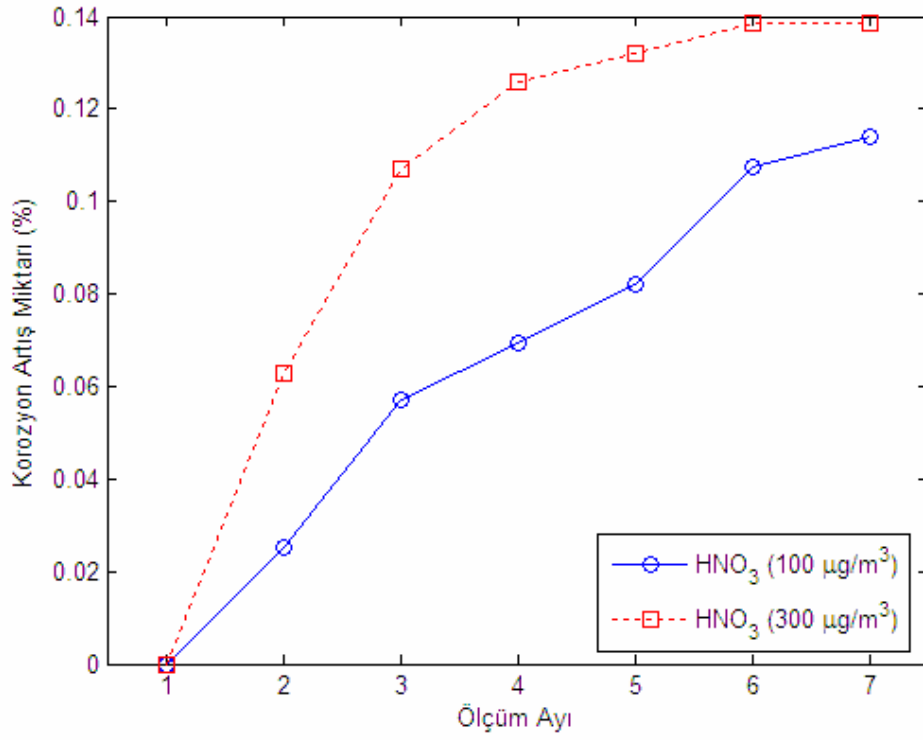


Şekil 6.5. Sülfirikasit (UVS/KVS) KÇM aracılığıyla kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları

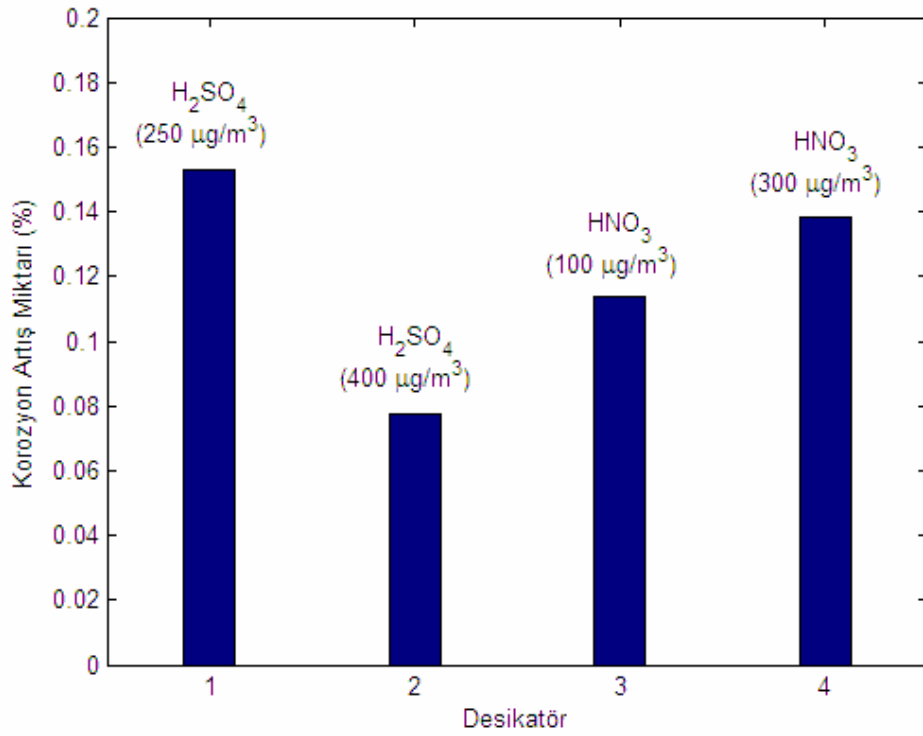
- 3 ve 4 nolu desikatörlerde, UVS ve KVS değerleri ile hazırlanan nitrikasit çözeltilerinin Kuru Çökelme Mekanizmaları saç levha ve düz demir örnekleri üzerinde bir reaksiyon gösterememiş, dolayısıyla ağırlık artışına neden olmamıştır. Ancak kutu profil örnekleri üzerinde farklı oranlarda korozyon ve korozyona bağlı ağırlık artışları meydana gelmiştir (Şekil 6.6).

6.3. Değerlendirme ve Sonuç

Sülfirikasit ve nitrikasitin UVS ve KVS değerlerinin kullanılması ile hazırlanan dört farklı çözeltinin, metal örnekler üzerinde Kuru Çökelme Mekanizmaları aracılığıyla oluşan etkileri sadece kutu profil örneklerinde korozyona ve ağırlık artışına neden olmuş, diğer metal örnekler bu reaksiyonlardan etkilenmemiştir. Kutu profil örnekler üzerinde meydana gelen ağırlık artışları Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Nitrikasit (UVS/KVS) KÇM aracılığıyla kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları



Şekil 6.7. KÇM mekanizmasının etkisi ile kutu profil örnekleri üzerinde meydana gelen korozyon oluşumlarına bağlı ağırlık artışları

Şekil 6.7'deki veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki yorumları yapmak mümkündür:

- 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük (UVS) sülfirikasit çözeltisi, 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük (KVS) sülfirikasit çözeltisine göre çok daha etkili olurken ve korozyon nedeniyle oluşan ağırlık artışı, sülfirikasit miktarı ile ters orantılı olarak, en fazla 1 nolu desikatörde meydana gelmiştir.
- Nitrikasit ile hazırlanan iki farklı çözelti ortamında, 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük (KVS) nitrikasit çözeltisi, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 'lük (UVS) nitrikasit çözeltisine göre daha etkili olurken, ağırlık artışı da nitrikasit miktarı ile doğru orantılı olarak en fazla 4 nolu desikatörde meydana gelmiştir.
- Ortamdaki kirletici miktarı korozyon hızını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Literatürdeki çalışmalar da, sülfirikasit konsantrasyonunun artması ile korozyon hızının arttığını ortaya koymaktadır (Knotkova, 2005; Syed, 2006). Bu çalışmada ise, 2 nolu desikatördeki kutu profilin daha yüksek konsantrasyondaki sülfirikasite maruz kalması nedeniyle 1 nolu desikatördeki kutu profile göre kütle artışının daha fazla olması beklenmekteydi. Ancak deney düzeneğinin hazırlanışı sırasında malzeme yüzeylerinin eşit ölçüde temizlenememiş olması ihtimalinin böyle bir sonuç doğurabildiği tahmin edilmektedir.
- Pek çok malzeme için oldukça zararlı olan bir kirletici olmasına rağmen literatürde diğer kirleticilerle karşılaştırıldığında (SO_2 , Cl^- , O_3), nitrikasitin etkileri çok az araştırılmıştır. Malzemeler üzerine yapışma katsayısının yüksek olması nedeniyle oldukça yüksek çökeltme hızlarına ulaşabilmesi ve bu nedenle deney ortamındaki konsantrasyonunun ve deney malzemeleri üzerinde çökelen miktarın kontrolünün ve gözlemlenmesinin çok zor olması, nitrik asitin korozif etkilerinin diğer kirleticilere göre daha az araştırılmasında temel bir neden oluşturmuştur (Samie ve ark. 2005). Nitrikasitin malzemeler üzerine kolay ve hızlı bir şekilde çökmesi, çalışılması zor bir kirletici olmasının yanısıra, etkileri açısından sülfirikasit ile karşılaştırılmasını da oldukça güçleştirmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, metal malzemeler üzerindeki korozif etkilerinin karşılaştırılmasının doğru bir veri oluşturmayacağı göz önünde tutularak bu yönde bir değerlendirme yapılmamıştır.

- Korozyon oluşumunda metalin reaksiyona açık yüzeylerinin fazlalığı oldukça önemli olmaktadır. Bundan dolayı daha geniş yüzeye sahip (kutu profil) metaller, daha az yüzeye sahip (düz demir, saç levha) metallere göre daha kısa sürede korozyona uğramaktadır.

7. KOROZYON HIZI TAHMİNİNDE KULLANILAN YAPAY SİNİR AĞLARININ YAPISINA GENEL BİR BAKIŞ

Yapay sinir ağları üzerine çalışmalar, beynin geleneksel sayısal bilgisayardan tamamen farklı bir şekilde hesaplama yaptığının ortaya çıkarılması üzerine başlamıştır. Beynin temel yapı taşı sinir hücresidir. Bilgisayar ise mantık kapılarının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Beyin, milyarlarca sinir hücresi ve bu hücreler arasındaki çok sayıdaki arabağlantı sayesinde, sinir hücresinin mantık kapısına göre çok daha yavaş olan çalışma hızına rağmen son derece verimli bir yapı haline gelmektedir. İnsan sinir sisteminde yaklaşık olarak 10 milyar sinir hücresi ve bu hücreler arasında 60 trilyon arabağlantı olduğu tahmin edilmektedir (Haykin, 1994).

Beyin son derece karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel bir bilgisayardır. Belirli hesaplamaları (örüntü tanıma, algılama ve hareket kontrolü) günümüzde var olan en hızlı bilgisayardan pek çok kat daha hızlı bir şekilde yapmak üzere sinir hücrelerini organize etme yeteneğine sahiptir. Örneğin insan görüşünü ele alalım. Görme sistemi bize çevreyle etkileşim içinde olabilmemiz için ihtiyaç duyduğumuz bilgiyi sağlamaktadır. Bu çerçevede, beyin daha önce görmediğimiz bir sahnede gömülü olan bildiğimiz bir yüzü tanıma işlemini olağan bir şekilde 100-200 ms içinde gerçekleştirebilmektedir. Daha basit karmaşıklığa sahip bir tanıma işi geleneksel bir bilgisayar üzerinde çok daha uzun sürmektedir (Haykin, 1994).

En genel şekliyle, yapay sinir ağı, beynin belirli bir işi veya fonksiyonu yapma şekli model alınarak tasarlanmış bir makinedir. Yapay sinir ağı genellikle elektronik elemanlar kullanılarak veya bilgisayar yazılımı benzetimiyle gerçekleştirilir. İnsan beyninde bilgi işleme birimleri olarak sinir hücreleri görev yaparken, yapay sinir ağı yapay sinir hücrelerinden oluşmaktadır. Yapay sinir ağının bir diğer tanımı şu şekildedir: Yapay sinir ağı, deneyimsel bilgiyi doğal olarak depolama eğilimine sahip ve bu bilgiyi kullanım için sunabilen son derece paralel ve dağıtık bir işlemcidir. Yapay sinir ağı iki açıdan beyne benzemektedir:

- Bilgi, öğrenme süreci yardımıyla ağ tarafından depolanır,
- Sinaptik ağırlıklar olarak bilinen sinir hücreleri arasındaki arabağlantı ağırlıkları bilgiyi depolamak için kullanılır.

Öğrenme sürecini gerçekleştirmek için kullanılan yöntem *eğitim (öğrenme) algoritması* olarak isimlendirilir. Eğitim algoritmasının fonksiyonu istenilen tasarım

amacını elde edebilmek için ağın sinaptik ağırlıklarını belirli bir düzen içerisinde değiştirmektedir (Haykin, 1994).

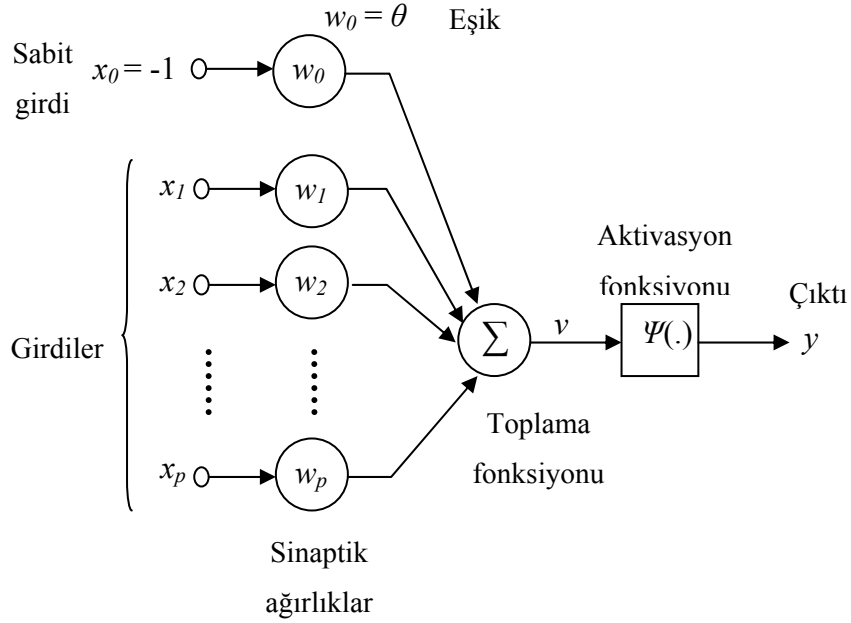
Yapay sinir ağı, son derece paralel ve dağıtık yapısı ve öğrenme yeteneği sayesinde, insan beyninin fonksiyonel özellikleriyle benzer şekilde öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon gibi konularda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Yapay sinir ağının bazı genel özellikleri aşağıdaki gibidir (Öztemel, 2003):

- Makine öğrenmesi gerçekleştirir: Olayları öğrenerek benzer olaylar karşısında benzer kararlar vermeye çalışırlar.
- Bilgi saklar: Ağ bağlantılarında bilgi saklanır.
- Örnekler yardımıyla öğrenir: Ağın olayları öğrenebilmesi için olay ile ilgili örnekler belirlenip, örnekler eğitim algoritması yardımıyla ağı öğretilirler.
- Görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilir.
- Kendi kendini organize etme ve öğrenebilme yeteneğine sahiptir: Yeni durumlara adapte olup sürekli olarak yeni olayları öğrenebilir.
- Sadece sayısal bilgiler ile çalışmaktadır.
- Hatalara karşı daha az duyarlıdırlar.

Yapay sinir ağları gerek yukarıda belirtilen gerekse burada anılmayan diğer özellikleri nedeniyle pek çok alanda çözümü geleneksel yöntemlerle başarılması mümkün olmayan problemlerin çözümünde başarıyla kullanılmaktadır. Yapay sinir ağlarının, çözümü için yaygın olarak kullanıldığı problemlerden biriside korozyon hızının tahminidir (Pintos ve ark. 2000; Cai ve ark. 2002; Parthiban ve ark. 2005). Korozyon hızı tahmini, korozyon hızını etkileyen çok sayıdaki faktörlerin doğrusal olmayan etkileşimleri nedeniyle oldukça zor bir problemdir. Literatürde, yapay sinir ağları dışında, korozyon hızını tahmin etmek için çeşitli metotlar önerilmiştir: çoklu doğrusal regresyon metotlarını kullanan kinetik denklemler (Cai ve ark. 2002), güç fonksiyonu ve doğrusal regresyon (Hou ve Liang, 2004) ve D/R (Dose/Response) denklemleri (Knotkova, 2005). Yapay sinir ağının doğrusal olmayan ve karmaşık sistemleri modellemedeki kanıtlanmış başarısı ve geçmiş deneyimlerine dayanarak görmediği örnekler hakkında dahi bilgi üretebilme yeteneği nedenleriyle doğrusal regresyon metotlarıyla karşılaştırıldığında korozyon hızının tahmini için yapay sinir ağları tercih edilen bir yöntemdir.

7.1. Yapay Sinir Hücresi (Algılayıcı)

Biyolojik sinir ağları sinir hücrelerinden oluştuğu gibi yapay sinir ağlarında yapay sinir hücrelerinden oluşmaktadır. *Yapay sinir hücresi*, yapay sinir ağlarının çalışmasına temel teşkil eden bir bilgi işleme birimi olarak tanımlanabilir. Çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağlarındaki sinir hücreleri *algılayıcı (perceptron)* olarak adlandırılmaktadır. Şekil 7.1 bir yapay sinir hücresinin modelini göstermektedir.



Şekil 7.1. Yapay sinir hücresi (algılayıcı) modeli

Yapay sinir hücresi modelinde beş temel eleman bulunmaktadır:

1. Girdiler ($x_0, x_1, \dots, x_p$): Yapay sinir hücresine dış dünyadan veya başka sinir hücrelerinden gelen bilgiler veya işaretlerdir. Girdiler arasında x_0 girdisinin değeri sabit olup -1 değerine eşittir. Diğer girdi değerleri ise genellikle değişkendirler.
2. Ağırlıklar ($w_0, w_1, \dots, w_p$): Yapay sinir hücresine gelen bilginin hücre üzerindeki etkisini gösterirler. Herbir girdinin sinir hücresi üzerindeki etkisi $x_j \times w_j$ çarpımının sonucudur. $w_0 = \theta$ ağırlığı *eşik değeri* olarak isimlendirilmekte ve aktivasyon fonksiyonuna olan net girdiyi azaltmak için kullanılmaktadır.

3. Toplama fonksiyonu: Girdi işaretlerinin değerlerine bağlı olarak sinir hücresine gelen net girdiyi hesaplamak için kullanılır. En yaygın olarak kullanılan toplama fonksiyonu *ağırlıklı toplamdır* – hücreye gelen herbir girdi işareti kendi ağırlığıyla çarpılarak toplanır. Matematiksel olarak, yapay sinir hücresinin net girdisi v , ağırlıklı toplam fonksiyonu temel alındığında, girdi işaretlerinin $x_0, x_1, \dots, x_p$ ve sinaptik ağırlıkların $w_0, w_1, \dots, w_p$ fonksiyonu olarak

$$v = \sum_{j=0}^p w_j x_j \quad (7.1)$$

şeklinde ifade edilir.

4. Aktivasyon fonksiyonu: Hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu net girdiye karşılık üreteceği çıktıyı belirler. Yapay sinir ağlarının oluşturulmasında en yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonu *sigmoid fonksiyonudur*.

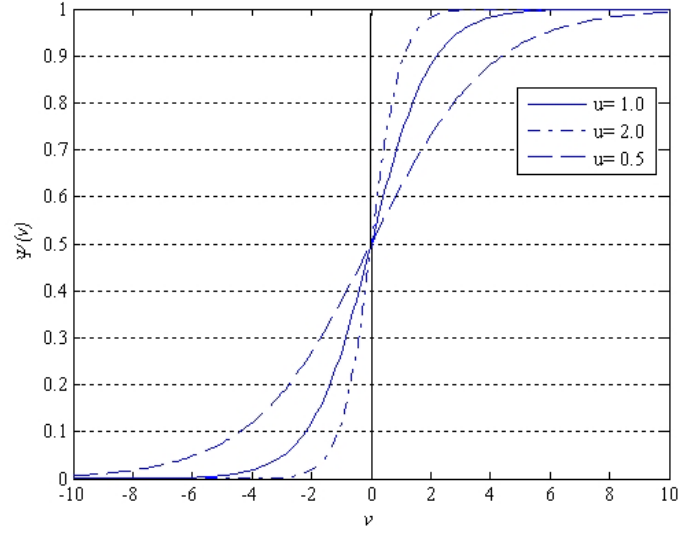
$$\psi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-uv)} \quad (7.2)$$

Denklem (6.2)'de, u parametresi sigmoid fonksiyonunun eğimini göstermektedir. Şekil 7.2 üç farklı u değeri için sigmoid fonksiyonunu şekilsel olarak göstermektedir.

5. Çıktı (y): Aktivasyon fonksiyonu tarafından belirlenen değer yapay sinir hücresinin çıktısını belirler. Üretilen çıktı dış dünyaya veya diğer sinir hücrelerine gönderilir. Yapay sinir hücresinin çıktısı y , ağırlıklı toplama v ve aktivasyon fonksiyonuna $\Psi(.)$ bağlı olarak

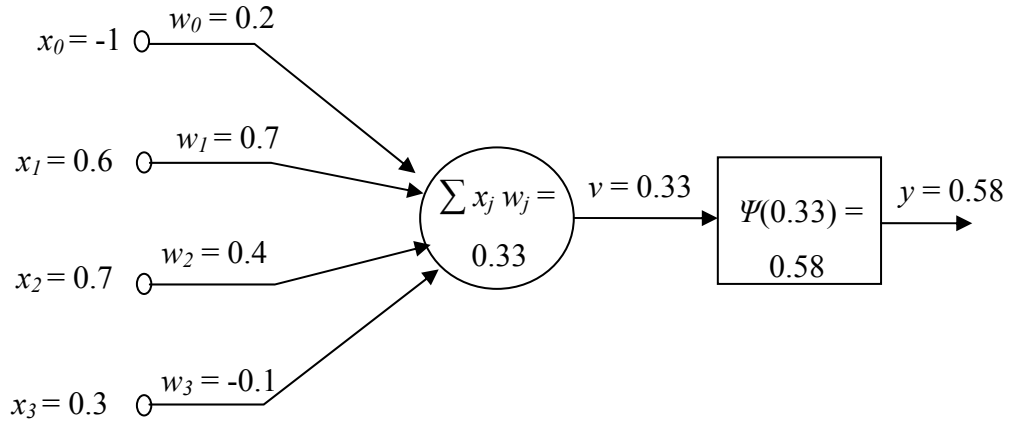
$$y = \psi(v) \quad (7.3)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 7.2. Sigmoid fonksiyonun şekilsel gösterimi

Bir yapay sinir hücresinin nasıl çalıştığını anlamak için bir örnek vermek faydalı olacaktır. Bir yapay sinir hücresine gelen bilgilerin ve ağırlıkların Şekil 7.3'teki gibi olduğunu varsayalım.



Şekil 7.3. Bir yapay sinir hücresinin çalışması örneği

Hücreye gelen net girdi, ağırlıklı toplam fonksiyonu kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

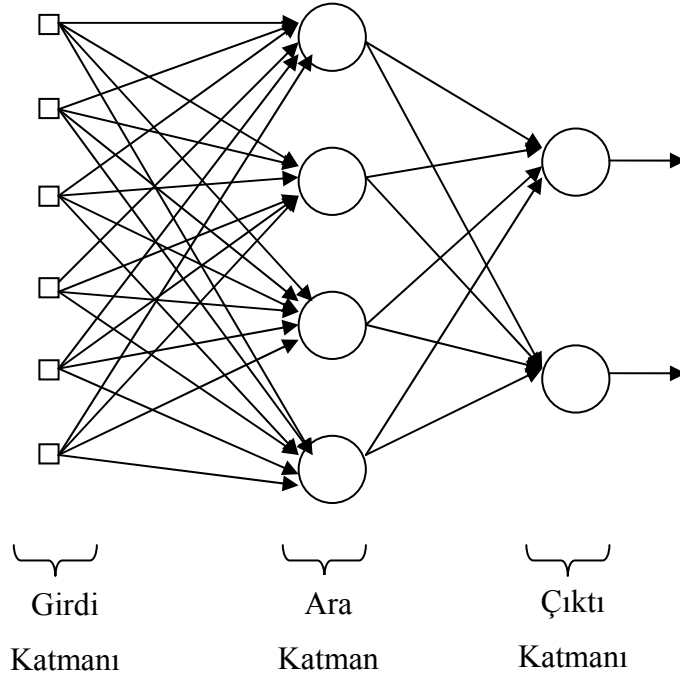
$$\begin{aligned}
v &= \sum_{j=0}^3 w_j x_j = w_0 x_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 \\
&= 0.2 \times (-1) + 0.7 \times 0.6 + 0.2 \times 0.7 + (-0.1) \times 0.3 \\
&= 0.33
\end{aligned}$$

Hücrenin sigmoid fonksiyonuna göre çıktısı ise aşağıdaki gibi olacaktır.

$$y = \psi(0.33) = \frac{1}{1 + \exp(-1 \times 0.33)} = \frac{1}{1 + 0.72} = 0.58$$

7.2. Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı Yapısı

Yapay sinir hücreleri bir araya gelerek yapay sinir ağlarını oluştururlar. Genel olarak bir yapay sinir ağında girdi, ara ve çıktı katmanları olmak üzere üç tane katman bulunur. Şekil 6.4 bir *çok-katmanlı yapay sinir ağı* örneğini göstermektedir.



Şekil 7.4. Çok katmanlı yapay sinir ağı örneği

Şekil 7.4'teki yapay sinir ağı literatürde *çok-katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı (multi-perceptron model)* olarakta bilinmektedir. Bu tip ağ yapısındaki her bir katmanın fonksiyonu aşağıda açıklanmıştır.

1. Girdi katmanı: Bu katmanda yapay sinir hücrelerinden farklı olarak kaynak düğümleri yer almaktadır. Kaynak düğümlerinde hesaplama yapılmaz. Kaynak düğümleri dış dünyadan gelen bilgileri alarak ara katmanlara transfer etmekle sorumludurlar. Her bir kaynak düğümünün ara katmandaki herbir yapay sinir hücresiyle bağlantısı mevcuttur.
2. Ara katmanlar: Çok-katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağında bir veya birden fazla ara katman bulunabilir. Ara katmanın bulunmadığı yapay sinir ağı yapıları ise literatürde *tek-katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı* olarak isimlendirilmektedir. Ara katman yapay sinir hücrelerinden oluşur. Girdi katmanından gelen bilgiler ara katmanda işlenerek çıktı katmanına gönderilmektedir. Ara katmandaki herbir sinir hücresiyle çıktı katmanındaki herbir sinir hücresi arasında bağlantı bulunmaktadır.
3. Çıktı katmanı: Bu katmandaki yapay sinir hücreleri ara katmandan gelen bilgileri işleyerek ağın girdi katmanından sunulan girdi için ağın çıktısını belirlerler. Üretilen çıktı dış dünyaya gönderilir.

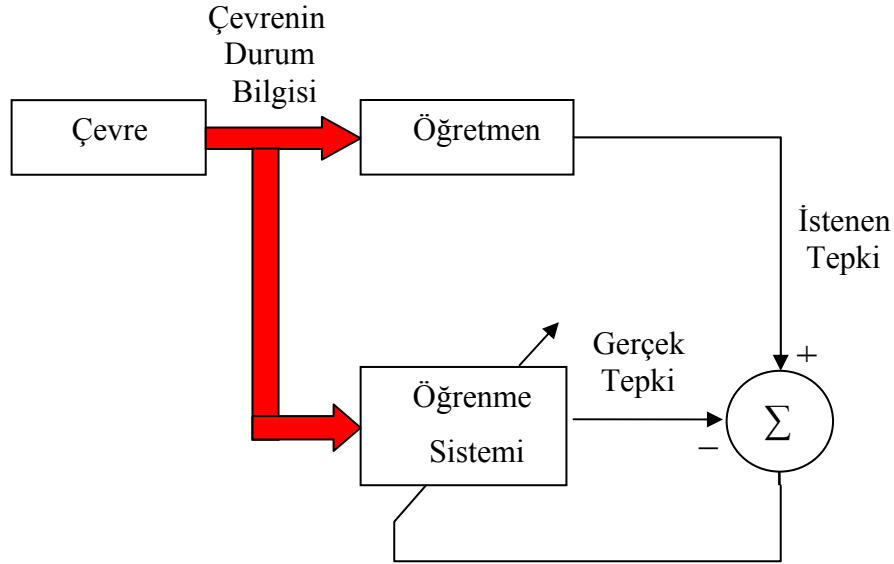
7.3. Öğrenme Süreci

Yapay sinir ağının pek çok ilginç özelliği arasında, birincil öneme sahip olan özelliği, ağın çevresinden öğrenebilme ve öğrenme yoluyla performansını artırabilme yeteneğidir. Yapay sinir ağı, sinaptik ağırlıklarını ve eşik değerlerini özyinelemeli olarak adapte ederek çevresini öğrenir. İdeal durumda, öğrenme sürecinin her bir iterasyonu sonucunda ağın çevresi hakkında daha çok bilgi sahibi olması beklenmektedir. Öğrenmeyi yapay sinir ağları bağlamında; “bir yapay sinir ağının serbest parametrelerinin ağın içinde bulunduğu çevrenin süregiden uyarım süreci vasıtasıyla adapte edildiği bir süreç” olarak tanımlayabiliriz. Öğrenme sürecinin bu tanımını aşağıdaki olaylar dizisini ima etmektedir:

- Sinir ağı çevre tarafından uyarılır,
- Sinir ağı bu uyarım sonucunda değişikliklere uğrar ve
- Sinir ağı, içyapısında meydana gelen bu değişiklikler sonucunda, çevresine yeni bir şekilde cevap verir.

Yapay sinir ağları için çeşitli öğrenme paradigmaları geliştirilmiştir. Bu öğrenme paradigmalarından, *öğretmenli öğrenme* çok-katmanlı ileri beslemeli yapay

sinir ağlarını eğitmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Öğretmenli öğrenmenin şekilsel gösterimi Şekil 7.5’te sunulmuştur.



Şekil 7.5. Öğretmenli öğrenmenin blok diagramı

Şekil 7.5'tede gösterildiği gibi öğretmenli öğrenmenin temel elemanı harici bir öğretmenin varlığıdır. Öğretmen, *girdi-çıkı örnekleri* kümesiyle ifade edilebilen çevre hakkında tam veya kısmi bilgi sahibidir. Öğrenme sisteminin (yapay sinir ağı) başlangıçta çevreyle ilgili bir bilgisi yoktur. Öğretmen ve sinir ağının çevreden gelen bir eğitim vektörüne maruz kaldığını varsayalım. Öğretmen, çevre hakkında sahip olduğu bilgi dolayısıyla, bu eğitim vektörü için *istenen veya hedef tepkiyi* yapay sinir ağına sağlayabilecektir. Gerçekten de, istenen tepki sinir ağından beklenen optimum tepkiyi göstermektedir. Ağ parametreleri, eğitim vektörü ve hata sinyaliyle bağlı olarak adapte edilirler (hata sinyali ağın gerçek tepkisiyle istenen tepki arasındaki farktır). Ağ parametrelerinin adaptasyonu, neticede sinir ağının öğretmen gibi davranmasını sağlayabilmek amacıyla özyinelemeli olarak adım adım devam ettirilir. Bir başka deyişle, öğretmenin çevre hakkında sahip olduğu bilgiye, sinir ağının da sahip olması sağlanır. Sinir ağı öğretmen kadar çevreyi öğrendikten sonra, öğretmen ortadan kaldırılarak sinir ağının çevreyle tamamıyla kendi başına etkileşim içinde olması mümkün kılınmış olur. Öğretmenli öğrenme gerçekleştirmek için kullanılan algoritmalar arasında *geriye yayılım* (back propagation) algoritması, çok-katmanlı ileri beslemeli ağların tasarımı için en yaygın olarak kullanılan ve en başarılı algoritmadır.

7.4. Geriye Yayılım Algoritması

Geriye yayılım algoritmasının her bir iterasyonu iki safhadan oluşmaktadır: ileri doğru hesaplama safhası ve geriye doğru hesaplama safhası.

1. İleri doğru hesaplama: Girdi vektörü yapay sinir ağının girdi katmanına uygulanır. Ara katmanlardaki ve çıktı katmanındaki sinir hücrelerinin çıktısı, ilk ara katmandan başlayarak çıktı katmanına doğru sırasıyla hesaplanır. Neticede, çıktı katmanındaki hücrelerin çıktısı yapay sinir ağının girdi vektörüne olan tepkisi olarak hesaplanmış olur. İleri doğru hesaplamada ağın sinaptik ağırlıklarının hepsi sabittir.
2. Geriye doğru hesaplama: Ağın ileri doğru hesaplama sonucu bulunan gerçek tepkisi, hata vektörünü oluşturmak üzere uygulanan girdi için istenen (hedef) tepkiden çıkarılır. Bu hata vektörü ağda geriye doğru yayılır. Sinaptik ağırlıklar, en son ara katman ve çıktı katmanı arasındakilerden başlayarak, ağın gerçek tepkisini istenen tepkiye yaklaştırmak için *hata düzeltme kuralı* çerçevesinde değiştirilir.

Geriye yayılım algoritması ağın öğrenmesi tamamlanıncaya, yani gerçekleşen çıktılar ile beklenen çıktılar arasındaki hata kabul edilebilir bir seviyeye gelinceye kadar özyinelemeli çalıştırılır.

7.5. Çok-Katmanlı Ağların Eğitilmesi

Çok-katmanlı ağlarının eğitilmesi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. Örneklerin toplanması: Ağın öğrenmesi istenilen çevre için daha önce gerçekleşmiş örneklerin bulunması adımıdır. Ağın eğitilmesi için örnekler toplandığı gibi (eğitim kümesi) ağın test edilmesi için de örnekler (test kümesi) toplanır.
2. Ağın topolojik yapısının belirlenmesi: Ara katman sayısı, her bir katmandaki kaynak düğümü veya sinir hücresi sayısı belirlenir. Kaynak düğümleriyle ara katman sinir hücreleri (girdi-ara katman), ara katman sinir hücreleriyle ara katman sinir hücreleri (ara katman-ara katman) ve ara katman sinir hücreleriyle çıktı katmanı sinir hücreleri (ara katman-çıkı) birbirleriyle tam olarak sinaptik ağırlıklarla bağlıdır.

3. Öğrenme parametrelerinin belirlenmesi: Ağın öğrenme katsayısı, yapay sinir hücrelerinin toplama ve aktivasyon fonksiyonları, vb. parametreler belirlenir.
4. Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması: Ağın topolojisiyle birlikte ortaya çıkan sinaptik ağırlıklara rasgele bir şekilde küçük sayılar atanır.
5. Ağın eğitilmesi: Eğitim setindeki örnekler ağa birer birer uygulanarak geriye yayılım algoritması yardımıyla ağ eğitilir. Her bir örnek ağa uygulanacak olan girdileri ve ağdan beklenen tepkiyi içermektedir.
6. Ağın testi: Ağın öğrenme başarısı, test seti kullanılarak ölçülür. Ağ eğitilirken ağa uygulanmayan test kümesindeki örnekler ağ eğitildikten sonra ağa uygulanarak gerçekleşen ve beklenen çıktı değerleri arasındaki fark hesaplanır. Bu fark kabul edilebilir derecede küçükse ağın eğitimi başarılı olarak kabul edilir.

8. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KOROZYON HIZI TAHMİNİ

Literatürdeki çalışmalarda korozyon hızı tahmini için yapay sinir ağları yaygın olarak kullanılmıştır: Cai ve ark. (1999), Cottis ve ark. (1999), Pintos ve ark. (2000), Nesic ve ark. (2001), Danaher ve ark. (2004), Parthiban ve ark. (2005). Bu çalışmalar içinde Pintos ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışma, gerek yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılan veri tabanının büyüklüğü, gerekse korozyon hızı tahmininde elde edilen başarılı sonuçlar nedeniyle, literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Dolayısıyla, Pintos ve ark. (2000) tarafından yapılan çalışmaya ve elde etmiş oldukları sonuçlara Bölüm 8.1’de detaylı bir şekilde değinilecektir.

Literatürdeki çalışmalarda yapay sinir ağlarının korozyon hızını tahmin etmede göstermiş olduğu başarılarla dayanarak, bu çalışmada da korozyon hızını tahmin etmek için yapay sinir ağının kullanılması öngörülmüştür. Yapay sinir ağlarının kullanılan eğitim setindeki veriye, eğitim setinin büyüklüğüne, eğitim setinin yapay sinir ağına uygulanış şekline, sinir ağının yapısına, eğitim algoritmasına, v.b. diğer faktörlere olan duyarlılığı bilinen bir gerçektir. Bu gerçekten de yola çıkarak, Pintos ve ark. (2000) tarafından kullanılmış olan veri tabanı kullanılarak, adı anılan araştırmacıların geliştirmiş oldukları yapay sinir ağına göre istatistiksel anlamda daha doğru korozyon hızı tahmini yapabilen bir yapay sinir ağının geliştirilebileceği öngörülmüştür. Bu öngörüler sonucunda geliştirilmiş olan yapay sinir ağı yapısı ve bu ağın Pintos ve ark. (2000) tarafından geliştirilmiş olan sinir ağıyla korozyon hızı tahmin performansı açısından karşılaştırması aşağıda sunulmuştur.

8.1. MICAT Projesi

Ibero-Amerika Atmosferik Korozyon Haritası (Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica - MICAT) projesi, Arjantin, Brezilya, Şili, Kolombiya, Kosta Rika, Küba, Ekvador, Portekiz, Peru, Meksika, Venezuela, Panama, İspanya ve Uruguay’ı içeren 14 Ibero-Amerika ülkesindeki 72 korozyon gözlem istasyonunu kapsamaktadır. Bu projenin üç temel amacı vardır: (i) Ibero-Amerika ülkeleri için bir korozyon haritasının oluşturulması, (ii) atmosferik korozyon olgusunun daha iyi anlaşılabilmesi, (iii) Ibero-Amerika’da atmosfere maruz kalan metallerin korozyon hızını, meteorokimyasal değişkenlerin fonksiyonu olarak tahmin etmekte kullanılabilecek matematiksel modellerin oluşturulması.

Pintos ve ark. (2000) MICAT projesinin (iii) amacını yapay sinir ağı yardımıyla gerçekleştirebileceklerini öngörmüşlerdir. Geliştirilecek olan yapay sinir ağının eğitiminde ve testinde kullanılmak üzere MICAT projesi süresince 14 farklı ülkedeki 72 farklı gözlem istasyonundan 130 gözlem toplanarak bir veri tabanı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu veri tabanı Ek-1’de sunulmuştur. Pintos ve ark. (2000) Ek 1’deki veri tabanını temel alarak yapay sinir ağı yardımıyla çeliğin korozyon hızını (Fe, $\mu\text{m}/\text{yıl}$), veri tabanını oluşturan meteorokimyasal değişkenlerin fonksiyonu olarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Veri tabanını oluşturan meteorokimyasal değişkenler, sıcaklık (T, $^{\circ}\text{C}$), nisbi nem (RH, %), ıslaklık süresi (TOW), yağış miktarı (P, mm), kükürtdioksit çökeltme hızı (SO_2 , $\text{mg}/\text{m}^2/\text{gün}$) ve klor iyonu çökeltme hızı (Cl^- , $\text{mg}/\text{m}^2/\text{gün}$) olmak üzere altı tanedir.

Pintos ve ark. (2000) tarafından geliştirilen yapay sinir ağının teknik özellikleri Çizelge 8.1’de verilmiştir. MICAT ağı üç katmandan oluşmaktadır: girdi katmanı, ara katman ve çıktı katmanı. MICAT ağında, girdi katmanındaki sinir hücresi sayısı, korozyon hızına etki eden her bir meteorokimyasal değişken için bir tane sinir hücresi karşılık gelecek şekilde 6; çıktı katmanındaki sinir hücresi sayısı, tahmin edilecek tek değişken korozyon hızı olduğu için 1 olarak belirlenmiştir. MICAT ağının ara katman sinir hücresi sayısı ise ağdaki ağırlıkların sayısı ($6 \times 6 + 6 = 42$) eğitim setindeki gözlem sayısının (105) yaklaşık %40’ı ($105 \times 0.4 = 42$) olacak şekilde 6 olarak kabul edilmiştir. Ağın ara katman ve çıktı katmanı sinir hücreleri için aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu; eğitim algoritması olarak gradyan inişi (Gradient descent) algoritması; ağın aşırı eğitilerek genelleştirme özelliğini kaybetmesini önlemek için erken durdurma tekniği kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. MICAT ağının teknik özellikleri

Girdi katmanı sinir hücresi sayısı	6
Ara katman sinir hücresi sayısı	6
Çıktı katmanı sinir hücresi sayısı	1
Aktivasyon fonksiyonu	Sigmoid
Eğitim algoritması	Gradyan inişi
Aşırı eğitimi önleme yöntemi	Erken durdurma

8.2. DYSA: Korozyon Hızı Tahmini Yapay Sinir Ağı

Pintos ve ark. (2000) MICAT veri tabanını kullanarak korozyon hızını tahmin etmek için yukarıda özellikleri açıklanan bir yapay sinir ağı geliştirmişlerdir. Çalışmanın bu bölümünde ise, MICAT veri tabanını kullanarak MICAT ağından istatistiksel anlamda daha iyi korozyon hızı tahmini yapmak üzere geliştirilmiş olan yapay sinir ağı DYSA (*Doğan Yapay Sinir Ağı*) ve DYSA'nın tasarım süreci sunulacaktır.

8.2.1. DYSA Ağ Yapısının Belirlenmesi

Bir yapay sinir ağının yapısını tanımlayabilmek için, ağdaki katman sayısının ve her bir katman için sinir hücresi sayısı ile birlikte aktivasyon fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. DYSA, MICAT ağı gibi, girdi katmanı, ara katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç katmandan oluşturulmuştur. Üç katmanlı ağ topolojisinin benimsenmesinin nedenini şu şekilde açıklayabiliriz: Korozyon hızının belirli bazı değişkenlere bağlı olarak tahmin edilmesi, temelde bir *fonksiyon tahmini* problemidir. Fonksiyon tahmini problemleri için, ara katman sinir hücresi sayısının, ara katman ve çıktı katmanı aktivasyon fonksiyonlarının ve ağırlıkların uygun şekilde belirlenmesi durumunda, üç katmanlı yapay sinir ağı herhangi bir fonksiyonu istenilen bir doğrulukla tahmin etme yeteneğine sahiptir (Demuth ve ark. 2006). Dolayısıyla, DYSA için birden fazla ara katmana sahip daha karmaşık bir ağ topoloji yerine tek ara katmanlı ağ yapısı tercih edilmiştir.

Yapay sinir ağının topolojisine karar verdikten sonra her bir katmandaki sinir hücresi sayısı şu şekilde belirlenmiştir. DYSA'nın girdi katmanındaki ve çıktı katmanındaki sinir hücresi sayısı MICAT ağında olduğu gibi sırasıyla 6 (veri tabanındaki meteorokimyasal değişken sayısı) ve 1 (sadece korozyon hızı tahmin edileceği için) olarak kabul edilmiştir. Ara katmandaki sinir hücresi sayısının en uygun değerinin ne olması gerektiği konusunda literatürde uygulanabilecek bilinen bir yöntem bulunmamaktadır. Dolayısıyla, ara katmandaki sinir hücresi sayısı genellikle veri setinin büyüklüğüne ve/veya ağın göstermiş olduğu performansa göre belirlenmektedir. DYSA için ara katman sinir hücresi sayısı, ağın göstermiş olduğu tahmin performansı ve seçilen eğitim algoritmasının özellikleri göz önüne alınarak deneme-yanılma yöntemi yardımıyla 8 (MICAT ağı için 6) olarak bulunmuştur. Ara

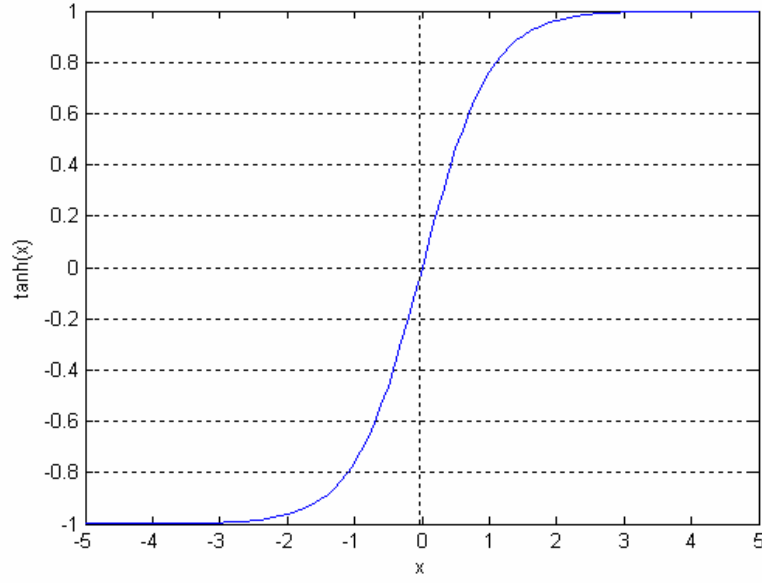
katman sinir hücresi sayısının ağı korozyon hızı tahmin performansı üzerindeki etkisi Bölüm 8.2.3'te rakamlarla da ifade edilecektir.

Ağ topolojisi ve her bir katmandaki yapay sinir hücresi sayısı belirlendikten sonra, DYSA'yı oluşturan herbir katman için bir aktivasyon fonksiyonu seçilmiştir. Ağı girdi katmanı için yapay sinir ağına genel yapısı nedeniyle bir aktivasyon fonksiyonuna ihtiyaç duyulmamakla birlikte, ara katman ve çıktı katmanı için aktivasyon fonksiyonu *hiperbolik tanjant* (Şekil 8.1) seçilmiştir (MICAT ağına sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır). DYSA için hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu deneme-yanılma yöntemi yardımıyla bulunmuş olup, aktivasyon fonksiyonlarının korozyon hızı tahmin performansı üzerindeki etkisi Bölüm 8.2.3'te rakamlarla da açıklanmıştır.

8.2.2. DYSA Eğitim Algoritmasının Seçilmesi

Yapay sinir ağları için çeşitli eğitim algoritmaları önerilmiştir. Bu algoritmalar dört grupta toplanabilir: gradyan inişi, eşlenik gradyan inişi (conjugate gradient descent), Newton ve Levenberg-Marquardt (Haykin 1994, Demuth ve ark. 2006). Bu algoritmaların her biri çok katmanlı yapay sinir ağlarını eğitmek için kullanılabilir. Ancak, algoritmadan algoritmaya yapay sinir ağına eğitimi süresi (yakınsama hızı) ve ağı performansı farklılık göstermektedir. Fonksiyon tahmini problemleri için, Levenberg-Marquardt algoritması, diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında, genellikle hem daha hızlı yakınsamakta hem de daha iyi tahmin performansı sağlamaktadır (Demuth ve ark. 2006). Dolayısıyla, DYSA için eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt seçilmiştir (MICAT ağına eğitimi algoritması gradyan inişidir).

Yapay sinir ağı seçilen bir eğitim algoritması kullanılarak eğilirken göz önünde tutulması gereken yapay sinir ağlarına özgü önemli dezavantajlar mevcuttur. Bu dezavantajlar: yetersiz eğitim (under-training), aşırı eğitimle (over-training) genelliğin kaybedilmesi ve global en iyi çözüme yakınsamama (Danaher 2004). *Yetersiz eğitim*, uygun olmayan bir veri tabanı ağı eğitiminde kullanıldığı ve/veya yeterince karmaşık olmayan bir ağ yapısı ile eldeki veriler modellenmeye çalışıldığı zaman ortaya çıkan bir problemdir. Bu problem, genellikle ağı karmaşıklığını artırmak yerine verilerin ölçeklendirilmesi ve/veya veri boyutunun azaltılması gibi teknikler yardımıyla çözülebilmektedir (Danaher 2004).



Şekil 8.1. Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu

Global en iyi çözüme yakınsayamama, çok katmanlı yapay sinir ağları sözü konusu olduğunda yukarıda anılan tüm eğitim algoritmaları için var olan ve ağı karmaşıklığıyla doğrudan ilişkili bir problemdir. Yapay sinir ağı eğitiminin istenilen herhangi bir tahmin performansını sağlayacak şekilde tamamlanması, ağı global en iyi çözüme yakınsaması için yeterli bir şart değildir. Dolayısıyla, ağı yerel en iyi çözüme yakınsaması sonucu bulunan bir çözüm kabul edilebilir bir tahmin performansı sağlasa da, bulunan yerel çözümle bilinmeyen global en iyi çözümün birbirinden oldukça farklı tahmin performansları gösterebileceği yapay sinir ağı tasarlanırken göz ardı edilmemelidir. Bu problem, ağı karmaşıklığı olabilecek en asgari düzeyde tutulmaya çalışılarak ve/veya seçilen eğitim algoritması birden fazla başlangıç koşulundan başlatılarak giderilmeye çalışılmaktadır (Danaher 2004).

Aşırı eğitimle genelliğin kaybedilmesi problemi, ağı kendisine sunulan eğitim veri grubunu ezberlemesi sonucu genelleştirme özelliğini yitirmesiyle ortaya çıkmaktadır. Aşırı eğitilmiş ağlara eğitim grubunda yer almayan veriler uygulandığı zaman oldukça kötü tahmin sonuçları alınabilmektedir. Aşırı eğitim probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerden birisi *erken durdurmadır*. Erken durdurma yöntemi gradyan inişi algoritması kullanılarak eğitilen MICAT ağına da kullanılmıştır. Bu yöntemde, veri tabanı eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç gruba bölünür. Eğitim ve doğrulama grupları ağı eğitimi sırasında, test grubu ise ağı eğitimi tamamlandıktan sonra kullanılır. Sadece eğitim grubu kullanılarak ağı

eğitilirken, doğrulama grubu için ağın performansı sürekli olarak ölçülür. Eğer ağın doğrulama grubu için tahmin hatası eğitim esnasında artmaya başlarsa, ağın aşırı eğitime başlandığı kabul edilerek eğitim sonlandırılır. Ancak, erken durdurma yönteminin pratikte bazı dezavantajları mevcuttur: Doğrulama grubunun büyüklüğünün ne olması ve veri tabanındaki hangi gözlemlerin bu grupta yer alması gerektiği soruları literatürde henüz cevap bulamamış sorulardır (Danaher 2004).

Aşırı eğitim probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerden bir diğeri ise *Bayes düzenlileştirmesidir*. Bu yöntem veri tabanından ayrılmış bir doğrulama grubuna ihtiyaç duymadığı için erken durdurma yönteminin yukarıda belirtilen dezavantajlarına sahip değildir. Bayes düzenlileştirme yöntemi, ağın genelleme yeteneğini kaybetmesinin genellikle sinir ağının ağırlık ve eşik değerlerindeki büyük değişimlerle karakterize edilen dengesiz bir ağ yapısıyla ortaya çıktığı gerçeğine dayanmaktadır. Dolayısıyla, Bayes düzenlileştirme ağırlık ve eşik değerlerindeki değişimleri mümkün olduğunca minimize ederek eğitim sonucunda dengeli bir ağ yapısının ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Danaher 2004). Sonuç olarak geliştirilen DYSA'nın teknik özellikleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. DYSA'nın teknik özellikleri

Girdi katmanı sinir hücresi sayısı	6
Ara katman sinir hücresi sayısı	8
Çıktı katmanı sinir hücresi sayısı	1
Aktivasyon fonksiyonu	Hiperbolik tanjant
Eğitim algoritması	Levenberg-Marquardt
Aşırı eğitimi önleme yöntemi	Bayes düzenlileştirme

8.2.3. DYSA için Verilerin Gruplanması ve Ölçeklendirilmesi

DYSA'nın eğitim ve testinde Ek-1'deki MICAT veri tabanı kullanılmıştır. Yukarıda açıklandığı gibi, Pintos ve ark. (2000) ağın aşırı eğitilerek genelleme yeteneğini kaybetmesini önlemek için erken durdurma yöntemini tercih etmişler ve veri tabanını 105, 16 ve 9 gözlemden oluşan eğitim, doğrulama ve test olmak üzere üç gruba ayırmışlardır. Ek-1'de her üç gruptaki gözlemler de ayrı ayrı belirtilmiştir.

Erken durdurma yönteminin uygulamadaki dezavantajları göz önüne alınarak DYSA için Bayes düzenlileştirilmesi yöntemi benimsenmiş ve ağıın eğitimi için eğitim grubuyla birlikte bir doğrulama grubunun kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Dolayısıyla, DYSA için MICAT veri tabanının eğitim ve test olmak üzere iki gruba ayrılması gerekmektedir. Ancak bu gruplamanın nasıl yapılması gerektiğine dair literatürde genel kabul görmüş bir yöntem bulunmamaktadır. Oysa ki eğitim grubu, eğitimin yakınsama hızını ve ağıın hem eğitim hem de test grubu için göstereceği performansı doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada MICAT veri tabanı, Ek-2’deki MATLAB dilinde yazılmış program aracılığıyla eğitim ve test gruplarına şu şekilde ayrılmıştır:

- Veri tabanında 130 gözlem bulunmaktadır. DYSA için eğitim grubunda 105, test grubunda 25 gözlemin bulunması ön görülmüştür. Dolayısıyla, eğitim grubu 105×7 , test grubu ise 25×7 ’lik bir matris olacaktır. MICAT ağı içinse eğitim ve test grupları sırasıyla 105 ve 9 gözlemden oluşturulmuştur. Dolayısıyla, DYSA ve MICAT ağları için aynı büyüklükteki eğitim grupları kullanılırken, DYSA daha büyük bir test grubuna maruz bırakılmıştır.
- Veri tabanındaki gözlemler öncelikle MATLAB’ın `clusterdata` fonksiyonu kullanılarak her bir grupta en az bir gözlem olacak şekilde 20 ayrı gruba bölünmüştür. `Clusterdata` fonksiyonu her bir gözlem çifti arasındaki uzaklığı Mahalanobis uzaklık fonksiyonunu kullanarak hesaplamakta ve daha sonra bu uzaklıkları temel alarak gözlemleri gruplamaktadır. Bir gözlemin hangi gruba ait olduğunu belirlemek için, gözlemin her bir grupta var olan gözlemlere olan ortalama uzaklığı hesaplanmakta ve ortalama uzaklığının en küçük olduğu gruba gözlem dahil edilmektedir. Dolayısıyla, `Clusterdata` fonksiyonu birbirine yakın gözlemleri aynı grupta toplamaktadır.
- Gruplama sonucunda gruptaki eleman sayıları düzgün bir dağılım göstermemektedir. Bir grup sadece 1 gözlemden oluşurken, diğer bir grup 20 gözlemden oluşabilmektedir. Dolayısıyla, her bir grubun eğitim için kullanılacak olan veri tabanında temsilini sağlayabilmek için her bir gruptan sırasıyla azami $130/20 \approx 6$ gözlem eğitim grubu için seçilmiştir. Bu şekilde ilk aşamada seçilen gözlem sayısı 68’dir. Eğitim grubunu

tamamlayabilmek için geriye kalan $105 - 68 = 37$ gözlem gruplardan rasgele seçilmiştir. Test grubunu oluşturmak içinse eğitim grubuna seçilmeyen gözlemler kullanılmıştır. Ek-1’de DYSA için test grubuna seçilen gözlemler koyu harflerle yazılmıştır.

MICAT veri tabanı temel alınarak eğitim grubu belirlendikten sonra, eğitim grubunun DYSA’nın eğitiminde kullanılabilmesi için ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Eğitim grubunun ölçeklendirilmesi iki aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Eğitim grubu 105×7 ’lik bir matristir. Bu matrisin her bir satırı bir gözleme ve her bir sütunu bir değişkene karşılık gelmektedir. Örneğin, 4. sütun sadece yağış miktarı verilerini içermektedir. Yağış miktarı verilerinin bulunduğu 4. sütun incelendiği zaman, yağış miktarının oldukça geniş bir aralıkta değiştiği (13.0 ile 4656.0 aralığında) görülmüştür. Dolayısıyla, yağış miktarı verileri ikinci aşamada $[-1,1]$ aralığına sıkıştırıldığında hassasiyetlerini önemli ölçüde kaybedeceklerdir. Bu durumun oluşmasını engellemek için, ilk aşamada, yağış miktarı verileri logaritmik olarak ölçeklenmiştir. Ölçeklendirme sonucunda 4. sütundaki veriler 2.56 ile 8.44 aralığında değişmektedir. MICAT ağında 4. sütun logaritmik olarak ölçeklenmemiştir.
- Demuth ve ark. (2000) Bayes düzenlileştirmesi kullanan Levenberg-Marquardt algoritmasının en iyi sonuçları genellikle eğitim grubu $[-1,1]$ aralığına ölçeklendiği zaman verdiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla, eğitim grubu matrisinin her bir sütunu kendi içinde $[-1,1]$ aralığına ölçeklenmiştir. MICAT ağında ise her bir sütun kendi içinde sütunun ortalama değeri sıfır standart sapması bir olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

8.2.4. DYSA’nın Eğitimi ve Sonuçlar

Yukarıda belirtildiği gibi eğitim grubu 105×7 ’lik bir matristir. Bu matrisin ilk altı sütunu meteorokimyasal değişkenlere ve son sütunu ise korozyon hızına karşılık gelmektedir. Öğretmenli öğrenme yöntemi çerçevesinde DYSA’yı eğitebilmek için ölçeklendirilmiş eğitim grubu *eğitim girdi matrisi* ve *eğitim hedef vektörü* olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim girdi matrisi, eğitim grubunun ilk altı sütunundan oluşan 105

$\times 6$ 'lık bir matristir. Eğitim hedef vektörü ise eğitim grubunun son sütunundan oluşmuş 105×1 'lik bir vektördür. Benzer şekilde 25×7 'lik test gruba da yukarıda anlatıldığı gibi ölçeklendirildikten sonra *test girdi matrisi* (25×6) ve *test hedef vektörü* (25×1) olmak üzere iki gruba ayrılmıştır.

DYSA'nın hem eğitim girdi matrisi hem de test girdi matrisi için performansı iki farklı metrik kullanılarak ölçülmüştür: ortalama kare hata ve ilgileşim (korelasyon) sabiti. Ortalama kare hata (*mse*) ve ilgileşim katsayısı (*R*) aşağıda tanımlanmıştır:

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2 \quad (8.1)$$

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (\hat{y}_k - \bar{y})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (\hat{y}_k - \bar{y})^2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2}} \quad (8.2)$$

Bu iki denklemde: N eğitim/test hedef vektöründeki eleman sayısını; y_k eğitim/test hedef vektörünün k . elemanını; $\hat{y}_k$ DYSA'nın hesaplamış olduğu korozyon hızı tahmin vektörünün k . elemanını; $\bar{y}$ eğitim/test hedef vektörünün ortalama değerini göstermektedir. Bu metrikler temel alınarak DYSA için belirlenen amaçlar şunlardır: (i) Ortalama nisbi hata/ortalama kare hata minimize edilerek DYSA'nın çıktısı ile hedef vektör arasındaki hata mümkün olduğunca küçültülmelidir. (ii) İlgileşim katsayısı maksimize edilerek DYSA'nın hedef vektördeki değişimleri mümkün olduğunca hesaba katması sağlanmalıdır. Bu iki amaç doğrultusunda, ortalama kare hata ve ilgileşim katsayısı metriklerini birleştiren yeni bir performans metriği aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Perf = mse/100 + (1 - R) \quad (8.3)$$

DYSA'nın eğitimi ve testi Ek-3'te verilen MATLAB dilinde yazılmış program aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. DYSA'nın eğitim süreci kısaca şu adımları içermektedir: Eğitim girdi matrisi başlangıçta rasgele oluşturulmuş olan ağa uygulanarak ağın çıktısı hesaplanır. Eğitim hedef vektöründen ağın çıktısı çıkarılarak ağın yapmış olduğu hata bulunur. Eğer hesaplanan hata kabul edilebilir bir hata değerinden küçükse eğitim sonlandırılır. Aksi halde, bu hatayı küçültecek şekilde eğitim algoritması ağın ağırlıklarını ve eşik değerlerini yeniden hesaplayarak yeni bir ağ oluşturur ve başa döner. DYSA'nın test süreci ise, test girdi matrisinin eğitim

sonucu elde edilmiş olan ağa uygulanması sonucu elde edilen çıktı vektörü ile birlikte test hedef vektörü kullanılarak ağın göstermiş olduğu performansın hesaplanmasından ibarettir. Ek-3'teki MATLAB programı, DYSA'nın yerel bir çözüme yakınsaması olasılığını azaltabilmek için, eğitimi 500 farklı başlangıç değerinden başlatmakta ve yukarıda tanımlanmış olan metrikler açısından en iyi çözümü sunan sinir ağını DYSA olarak belirlemektedir. DYSA için bulunan ağırlık ve eşik değerleri Ek-4'te sunulmuştur.

DYSA'nın ara katman sinir hücresi sayısı Çizelge 8.3 kullanılarak bulunmuştur. Çizelge 8.3 eğitim ve test girdi matrisleri için ölçülen performans değerlerini ara katmandaki sinir hücre sayısına bağlı olarak sunmaktadır. DYSA için hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çizelge 8.3'te, (8.3) ile tanımlanmış *Perf* fonksiyonunu minimize eden sinir hücresi sayısı 8 olup, bu değer ara katman sinir hücresi sayısı olarak alınmıştır.

Çizelge 8.3. DYSA'nın çeşitli ara katman sinir hücresi sayıları için ölçülen performans değerleri

Ara katman sinir hücresi sayısı	Ortalama Kare Hata (<i>mse</i>)		İlgileşim Katsayısı (<i>R</i>)		Perf
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	
6	28.75	158.25	0.99	0.69	1.09
8	21.15	100.28	0.99	0.75	0.73
10	19.42	140.40	0.99	0.64	0.97

DYSA'nın ara katman ve çıktı katmanı için aktivasyon fonksiyonları Çizelge 8.4 kullanılarak bulunmuştur. Çizelge 8.4 eğitim ve test girdi matrisleri için ölçülen performans değerlerini ara katman ve çıktı katmanı için kullanılan çeşitli aktivasyon fonksiyonlarına bağlı olarak sunmaktadır. DYSA için ara katman sinir hücresi sayısı 8 olarak alınmıştır. Çizelge 8.4'te, (8.3) ile tanımlanmış *Perf* fonksiyonu tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu için en düşük değerini aldığı görülmüştür.

Çizelge 8.4. DYSA'nın çeşitli aktivasyon fonksiyonları için ölçülen performans değerleri

Ara katman, çıktı katmanı aktivasyon fonksiyonu	Ortalama Kare Hata (<i>mse</i>)		İlgileşim Katsayısı (<i>R</i>)		Perf
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	
Sigmoid, Sigmoid	-	-	-	-	-
Sigmoid, Doğrusal	21.46	133.07	0.99	0.69	0.92
Tanjant Hiperbolik, Tanjant Hiperbolik	21.15	100.28	0.99	0.75	0.73
Tanjant Hiperbolik, Doğrusal	18.09	170.31	0.99	0.63	1.12

Çizelge 8.5. DYSA ile MICAT ağının performans karşılaştırması.

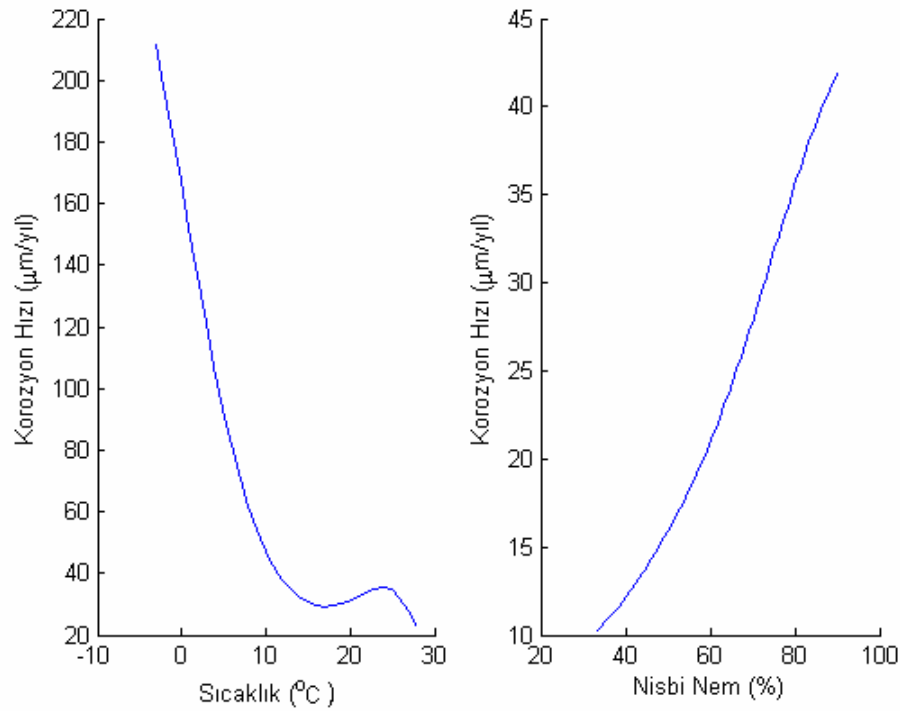
	DYSA				MICAT	
	DYSA girdi matrisleri		MICAT girdi matrisleri			
	<i>mse</i>	<i>R</i>	<i>mse</i>	<i>R</i>	<i>mse</i>	<i>R</i>
Eğitim	21.15	0.99	37.31	0.98	140.0	0.90
Test	100.28	0.75	23.65	0.99	220.0	—

DYSA ve MICAT ağlarının eğitim ve test performansları Çizelge 8.5'te karşılaştırılmıştır. DYSA'ya bu çalışma çerçevesinde hazırlanmış olan eğitim ve test girdi matrisleriyle birlikte, MICAT ağının kullanmış olduğu eğitim ve test girdi matrisleri uygulanarak göstermiş olduğu performans gözlemlenmiştir. Çizelge 8.5'e göre, DYSA MICAT ağıyla karşılaştırıldığında hem kendi girdi matrisleri hem de MICAT girdi matrisleri için çok daha iyi bir performans göstermektedir. DYSA, DYSA eğitim (test) girdi matrisi için ortalama kare hatayı % 84 (% 54) oranında azaltma; DYSA eğitim girdi matrisi için ilgilileşim katsayısını % 10 oranında artırma başarısı göstermiştir. Ayrıca, MICAT eğitim (test) girdi matrisi için ortalama kare hatayı % 73 (% 89) oranında azaltma; MICAT eğitim girdi matrisi için ilgilileşim katsayısını % 9 oranında artırma başarısı göstermiştir. Bu sonuçlar temel alındığında,

bu çalışmada geliştirilmiş olan DYSA'nın MICAT ağına göre istatistiksel anlamda çok daha iyi korozyon hızı tahmini yapma yeteneğine sahip olduğu görülmektedir.

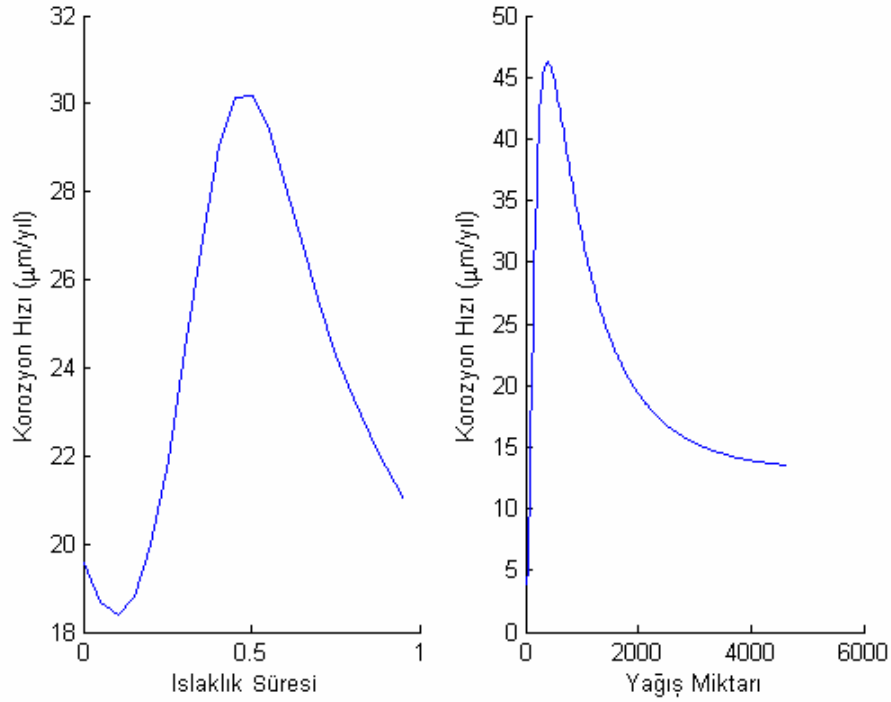
DYSA'nın korozyon hızı tahminindeki performansı veri tabanındaki herbir meteorokimyasal değişken için duyarlılık analizi yapılarak ta gözlemlenmiştir. Analiz iki aşamadan oluşmaktadır: (i) Herbir bir meteorokimyasal değişken için bir test girdi matrisinin oluşturulması. (ii) Test girdi matrislerinin birer birer DYSA'ya uygulanıp ağın çıktısının gözlemlenmesi. Duyarlılık analizi için test girdi matrisi şu şekilde oluşturulmuştur: Duyarlılık analizi yapılacak olan meteorokimyasal değişken için Ek-1'deki veri tabanı kullanılarak değişkenin almış olduğu minimum ve maksimum değerler bulunmuştur. Veri tabanındaki diğer meteorokimyasal değişkenlerin ise ortalama değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, analizi yapılacak olan değişken minimum ve maksimum değerleri arasında eşit aralıklarla değerler alırken, diğer değişkenlerin hesaplanan ortalama değerlerini aldıkları kabul edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan altı farklı test girdi matrisi DYSA'ya uygulanmış ve DYSA'nın vermiş olduğu tepkiler Şekil 8.2, 8.3 ve 8.4'te sunulmuştur.

Şekil 8.2'ye göre sıcaklık arttıkça korozyon hızı azalmaktadır. Sıcaklığın korozyon hızına etkisi iki şekilde olmaktadır: (i) Sıcaklık artışı reaksiyon hızını artıracak için korozyon hızı da artar. (ii) Sıcaklık artışı artan buharlaşma nedeniyle metalin ıslak kalma süresini ve dolayısıyla korozyon hızını düşürür (Dehri, 1994). Dolayısıyla, Şekil 8.2'ye göre, DYSA'nın sıcaklık artışına (ii) çerçevesinde tepki verdiği görülmektedir. Nisbi nem-korozyon hızı ilişkisi açısından bakıldığında, nem artışıyla birlikte metal üzerinde daha fazla miktarda elektrolit tabaka oluşmakta ve korozyon hızını artırmaktadır. Nisbi nem ve korozyon hızı arasındaki bu ilişki Şekil 8.2'de de görülmektedir.



Şekil 8.2. DYSA'nın sıcaklık ve nisbi nem değişkenleri için duyarlılık analizi

Şekil 8.3'te ıslaklık süresinin ve yağış miktarının korozyon hızına etkisi görülmektedir. Metalin ıslak kaldığı süre boyunca korozyon reaksiyonları devam edeceğinden ıslaklık süresi arttıkça korozyon hızının da artması beklenmektedir. Bu eğilim Şekil 8.3'te ıslaklık süresi yaklaşık 0.5 değerine ulaşıncaya kadar görülmekte, ancak bu kritik değerden sonra korozyon hızı azalmaktadır. Bu azalma DYSA'nın ıslaklık süresi ve korozyon hızı arasındaki ilişkiyi, belirli bir noktadan sonra oluşturamamasından kaynaklanabileceği gibi, bu iki değişken arasındaki ilişkiyi etkileyen ve bu çalışmada tanımlanamayan sebeplerden dolayı da oluşmuş olabilir. Yağış miktarı-korozyon hızı ilişkisi açısından bakıldığında, korozyon hızı artan yağış miktarıyla birlikte artar. Diğer taraftan yağış, metal yüzeyini yıkayarak korozyon ajanlarının temizlenmesi ve korozyon hızının azalmasına da neden olmaktadır. Bu çerçevede Şekil 8.3 incelendiğinde, belirli bir noktaya kadar artan yağış korozyon hızını artırsa da, daha sonra korozyon hızının azalmasına neden olmaktadır.

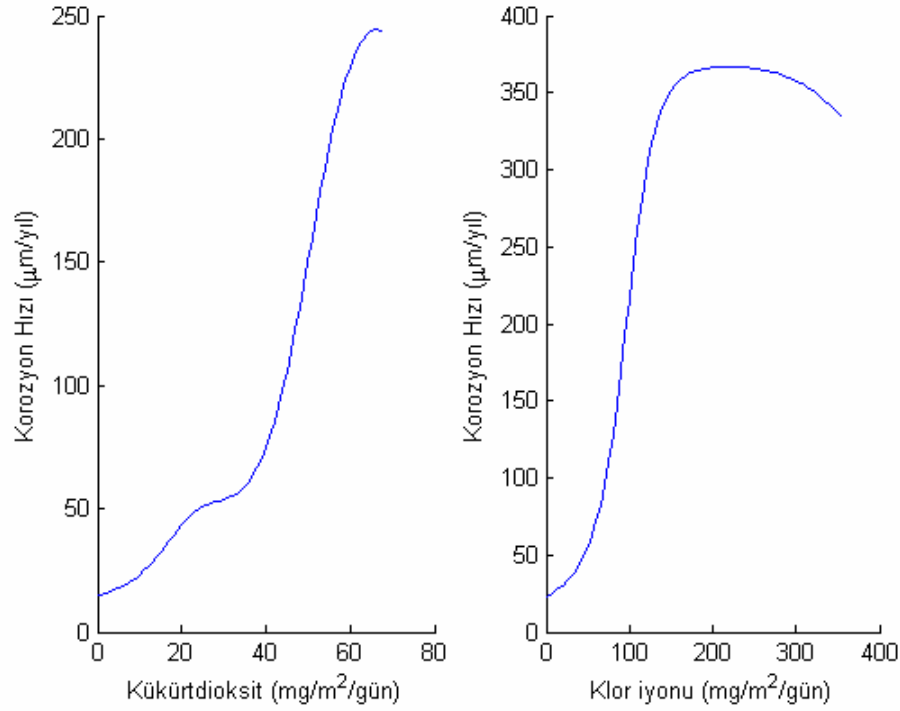


Şekil 8.3. DYSA'nın ıslaklık süresi ve yağış miktarı değişkenleri için duyarlılık analizi

Kükürtdioksit ve klor iyonu değişkenleri için duyarlılık analizi sonuçları Şekil 8.4'te sunulmuştur. Kükürtdioksit, korozyon hızını etkileyen en önemli atmosferik kirleticilerden birisidir. Kükürtdioksit miktarının artışı korozyon hızını da artırır. Kükürtdioksit-korozyon hızı arasındaki bu ilişki Şekil 8.4'te görülmektedir. Klor iyonu da, kükürtdioksit gibi, korozyon hızına etki eden önemli bir atmosferik kirleticidir. Şekil 8.4'te, klor iyonu artışıyla birlikte korozyon hızı artmakta ve daha sonra korozyon hızının belirli bir doyma noktasına ulaştığı görülmektedir. Klor iyonu ile korozyon hızı arasındaki doğrusal olmayan bu ilişki literatürdeki çalışmalarda da (Pintos ve ark., 2000) gözlemlenmiştir.

8.3. Hızlandırılmış Korozyon Deneyleri İçin Korozyon Hızı Tahmini

Bu bölümde, Bölüm 6'da yer alan hızlandırılmış korozyon deneylerinden elde edilmiş sonuçlar doğrultusunda, DYSA ile korozyon hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bölüm 6'da sunulan deneylerde sadece kutu profil için kütle artışının gerçekleşmiş olması ve DYSA'nın atmosferik kirletici olarak kükürtdioksiti ve klor iyonunu girdi olarak kabul etmesi sebebiyle, sadece sülfirikasit ortamlarındaki (UVS, KVS) kutu profiller için DYSA ile korozyon hızı tahmini yapılmıştır. Bu çerçevede



Şekil 8.4. DYSA'nın kükürtdioksit ve klor iyonu değişkenleri için duyarlılık analizi

DYSA'nın kullanılabilmesi için kutu profillerin kütle artış miktarları aşağıdaki formül yardımıyla korozyon hızına dönüştürülmüştür (Syed, 2006):

$$Korozyon\ hızı\ (\mu m/yıl) = 8.76 \times 10^7 \frac{W}{A \times T \times D} \quad (8.4)$$

Denklem (8.4)'te, W metalin kütle kaybını (g); A metalin alanını (cm^2); T korozyon süresini (saat); D metalin yoğunluğunu (g/cm^3) göstermektedir. Deneysel çalışmada kutu profiller için ölçülmüş olan kütle artış miktarının, aynı miktarda kütle kaybına neden olduğu kabul edilerek (8.4) yardımıyla kutu profillerin korozyon hızları 3.85 $\mu m/yıl$ (UVS) ve 1.92 $\mu m/yıl$ (KVS) olarak bulunmuştur.

DYSA ile kutu profillerin korozyon hızını bulabilmek için ilgili deneysel ortamlara karşılık gelen test girdi matrisi oluşturulmuştur. Bu matriste, sıcaklık değeri 21 °C (7 aylık ölçümlerin ortalaması), nisbi nem %99, yağış miktarı, ıslaklık süresi ve klor iyonu değerleri sıfır olarak alınmıştır. Kükürtdioksit değeri, UVS için 10.8 ve KVS için 17.2 $mg/m^2/gün$ olarak hesaplanmıştır (Leygraf, 1995). Test girdi matrisi DYSA'ya uygulandığında korozyon hızı, UVS için 3.85 $\mu m/yıl$ ve KVS içinse 3.66 $\mu m/yıl$ bulunmuştur. Denklem (8.4) yardımıyla hesaplanan korozyon hızlarıyla karşılaştırıldığında, DYSA UVS için doğru bir tahminde bulunmuş, ancak KVS için aynı başarıyı gösterememiştir.

9. SONUÇLAR

Yapılı çevre içerisinde ve yapılarda kullanılan tüm malzemeler çok çeşitli faktörlerin etkisi altında zamanla bozulmakta/hasara uğramaktadır. Hiç bir malzemenin ömrü sonsuz değildir. Ancak malzeme özelliklerinin ve malzemelere etkiyen bu faktörlerin bilinmesi halinde, tasarım, yapım ve kullanım gibi süreçlerin tümünde, gerekli tedbirlerin alınabilmesi ve yapı malzemelerinin ve yapıların ömrünün artırılabilmesi mümkün olabilmektedir. Tasarım süreçleri sırasında öngörülen malzeme ömürlerini, değişik şekillerde/derecelerde olmak üzere azaltan ve malzemelerin fonksiyonel/estetik performansının azalmasına ve hatta yok olmasına neden olan en önemli faktörlerden birisi atmosferik kirliliktir. Modern yaşamın bir sonucu olarak ortaya çıkan ve her geçen gün artan enerji ihtiyacının özellikle fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanması sonucunda günümüzde küresel bir sorun halini alan atmosferik kirlilik, neden olduğu pek çok önemli soruna ek olarak yapı sağlığını da önemli ölçüde etkilemektedir.

Yapı malzemesi olarak, atmosferik kirliliğin yıkıcı etkilerinden en fazla zarar gören malzeme grubu metallerdir ve bu etkileşim sonucunda ortaya çıkan en önemli hasar mekanizması da atmosferik korozyondur. Yüksek ekonomik maliyetleri olan bu sorun, korozyon reaksiyonlarını etkileyen pek çok çevresel ve atmosferik faktörün etkisiyle oldukça karmaşık bir problem haline gelmektedir. Özellikle atmosferik kirlleticiler korozyon hasarında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak tüm bu faktörlerin karmaşık etkileşimi, metallerin kullandıkları koşullardaki performanslarının belirlenebilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle metallerin çeşitli ortamlardaki korozyon hızlarının ve korozyon dayanımlarının belirlenmesine yönelik olarak pek çok test programı gerçekleştirilmekte ve hatta bu çalışmalarların yapıldığı bölgelerin atmosferik korozyon haritaları oluşturulmaya çalışılmaktadır.

Yapılan bu çalışmayla da, atmosferik kirlleticiler (SO_2 , NO_2) ve korozyon hasarı arasındaki ilişki araştırılarak deneysel bir çalışma ile açıklanmaya çalışılmış ve korozyon hızının belirlenmesine yönelik olarak literatürde yaygın bir şekilde kullanılan yapay sinir ağları ile korozyon hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapay sinir ağları kullanılırken, gerek veri setinin büyüklüğü, gerekse korozyon hızı açısından elde ettiği başarılı sonuçlar nedeniyle, literatürde yer alan MICAT projesinden yararlanılmıştır.

Çalışmanın sonucunda, yapı malzemeleri üzerindeki pek çok hasar oluşumunda olduğu gibi, yapılarda kullanılan metal malzemelere de atmosferik kirleticilerin **“Kuru Çökme Mekanizması”** olarak nitelendirilen reaksiyonlarla ulaştığı ve atmosferik korozyon hasarı süreçlerinde metal yapı malzemeleri üzerinde önemli bir rol oynadığı deney süresince yapılan ölçüm ve gözlemlerle belirlenmiştir. Diğer yandan korozyon hızı tahminine yönelik olarak MICAT Projesi verileri ile ancak yeni olarak geliştirilmiş yapay sinir ağının daha iyi eğitilmesi sonucunda daha az hata oranı ile korozyon hızı tahmin etmesi, bu çalışmada DYSA olarak isimlendirilen yapay sinir ağının başarısını ortaya koymuştur. Geliştirilen bu yapay sinir ağı ile, çalışma içerisinde yer alan hızlandırılmış korozyon deneylerinin de korozyon hızları tahmin edilmeye çalışmıştır.

Hem deneysel çalışma hem de DYSA ile ortaya konulan tüm veriler yorumlandığında şunları söylemek mümkündür:

- Atmosfer metallerin en sık maruz kaldığı çevredir ve atmosfere açık metal yapı malzemeleri için, atmosferin bileşiminde kirleticiler nedeniyle meydana gelen değişiklikler, atmosferin korozyon bakımından saldırganlığını değişik derecelerde olmak üzere etkilemektedir.
- Kirleticilerle birlikte sıcaklık, nisbi nem, ıslaklık süresi, yağış miktarı, rüzgar yönü ve hızı gibi pek çok faktör atmosferin korozifliğini etkilemektedir. Bu faktörlerin karmaşık etkileşim süreçleri, korozyon olayının anlaşılması ve önlenmesi süreçlerinde ciddi zorluklar oluşturmaktadır.
- Kentsel atmosferik ortamlarda zaman zaman çok yüksek seviyelerde bulunabilen SO_x ve NO_x gibi kirleticiler metal yapı malzemeleri üzerinde korozyona neden olmaktadır.
- Tüm metaller için, başlangıçta ağırlık artışı olarak ortaya çıkan korozyon olayının ilerleyen aşamalarında, korozyon ürünlerinin metal yüzeyinden ayrılması sonucu ağırlık azalması şeklinde bir gelişim göstereceğini söylemek mümkündür.
- Yapay sinir ağları ile korozyon hızının başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği gösterilmektedir. Duyarlılık analizleri sonucunda herbir meterokimyasal değişkenin (sıcaklık, nisbi nem, ıslaklık süresi, yağış

miktarı, SO₂ ve Cl miktarı) korozyon hızı üzerindeki etkileri ortaya konmaktadır.

- Korozyonun dinamiğinin anlaşılabilmesi ve daha doğru modellenebilmesi için MICAT veri tabanından daha büyük bir veri tabanına ihtiyaç olduğu kesindir. Bu yönde uluslararası çalışmalar yapılmış ve bazı standartlar oluşturulmuş olsa da, herhangi bir atmosferik ortamdaki gerçek korozyon hızının doğru bir şekilde tahmin edilmesi halen ciddi bir problemdir. Dolayısıyla gerek laboratuvar gerekse açık atmosfer koşullarında yapılacak çalışmaların süreklilik kazanması, konunun daha iyi anlaşılabilmesi ve boyutlarının daha net bir şekilde ortaya konulabilmesi açısından oldukça önemli olacaktır.
- Çok-katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli yanısıra literatürde farklı ağ modelleri de bulunmaktadır. Bu modellerden biriside *özdüzenlemeli haritalar* (self-organizing maps) modelidir. Bu ağ modeli özellikle sınıflandırma problemlerinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir (Haykin, 1994). Gelecekte, atmosferik ortamları korozyon derecelerine göre sınıflandırmak amacıyla, özdüzenlemeli haritalar ağ yapısı kullanılarak çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akıncıtürk, N. (1999), “Ekomimari Ölçekte Yapı Elemanları ve Malzeme Olgusunun Sürdürülebilir Kentleşmeye Yansıması,” *BAÜ Fen Bil Dergisi*, **1**, 114-133.
- Amoroso, G.G., Fassina, V. (1983), *Stone Decay And Conservation*, Elsevier, Switzerland.
- Atkinson, B. (1970), “Weathering And Performance,” *The Weathering And Performance Of Building Materials* (Ed: Simpson, J.W., Horrobin, P.J.), John Wiley&Sons, Great Britain.
- Bach, W. (1972), *Atmospheric Pollution*, McGraw-Hill, Inc., A.B.D..
- Baykan, A.R. (2004), *Türkiye Çevre Atlası*.
http://www.cedgm.gov.tr/cevreatlasi/atlasin_metni.pdf
- Bishop, P. (2004), *Pollution Prevention Fundamentals and Practice*, Waveland Press, A.B.D..
- Cai, J., Cottis, R.A., Lyon, S.B. (1999), “Phenomenological modelling of atmospheric corrosion using an artificial neural network,” *Corrosion Science*, **41**, 2001-2030.
- Cottis, R.A., Qing, L., Owen, G., Gartland, S.J., Helliwell, I.A., Turega, M. (1999), “Neural Network Methods for Corrosion Data Reduction,” *Materials&Design*, **20**, 169-178.
- Danaher, S., Datta, S., Waddle, I., Hackney, P. (2004), “Erosion Modeling Using Bayesian Regulated Artificial Neural Networks,” *Wear*, **256**, 879-888.
- Dehri, İ. (1994), *Atmosfer Kirleticilerinin Yapı Mazemelerine Korozyon Etkisi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Demuth, H., Beale, Mark., Hagan, M. (2006), *Neural Network Toolbox User's Guide*, The Mathworks, Natick, MA, A.B.D..
- Doğan, G., Gökaltun, E. (2004), “Metal Yapı Malzemelerinde Atmosferik Korozyonun Oluşumuna İlişkin Deneysel Bir Çalışma,” *IXTH International Corrosion Symposium/Exhibition*, CMS Int. Org. Publishing, Ankara.
- Doruk, M. (1982), *Korozyon ve Önlenmesi*, ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Yayın No: 70, Ankara.
- Döğeroğlu, T., Kara, S. (1988), “Bazı Hava Kirleticilerinin Canlı Yaşamına ve Cansız Varlıklara Etkileri,” *Dördüncü Bilimsel ve Teknik Çevre Kongresi*, (Ed: Uslu, O., Evirgen, M.M., Müezzinoğlu, A.), İzmir.

- Erdin, N. (1995), "Malzeme Seçiminde Ekolojik Kriterler," *Yapı Dergisi*, **164**, 95-97.
- Eriç, M. (1994), *Yapı Fiziği ve Malzemesi*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Ertürk, H. (1994), *Çevre Bilimlerine Giriş*, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları, Bursa.
- Eryıldız, D.I. (2003), "Sürdürülebilirlik ve Mimarlık Dosyasında Ekolojik Mimarlık," *Arredamento Mimarlık*, **1**, 71-75.
- Eryıldız, S. (1996), "Kentsel Ekoloji," *Mimarlık*, **269**, 25-30.
- Everett, A. (1986), *Materials*, Mitchell Publishing Company Limited, London, United Kingdom.
- Feilden, B.M. (1982), *Conservation of Historic Buildings*, St. Edmundsbury Press Ltd., Great Britain.
- Gökaltun, E. (2001), *Atmosferik Kirleticilerin Kireçtaşı Mermerleri Üzerindeki Parlaklık Kaybına Etkisi*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- Hafizoğulları, G. (1996), "Çevre Duyarlı Kentleşme Politikaları," *Mimarlık*, **269**.
- Haykin, S. (1994), *Neural Networks A Comprehensive Foundation*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, A.B.D..
- Hou, W., Liang, C. (2004), "Atmospheric Corrosion Prediction of Steels," *Corrosion*, **60-3**, 313-322.
- Karakaya, E., Özçağ, M. (2004), "Sürdürülebilir Kalkınma ve İklim Değişikliği," *I. Maliye Konferansı*, Bışkek, Kırgızistan.
- Karishna, M. (1995), *Air Pollution And Control*, Kaushal & Co., Kakinada, India.
- Kaytakoğlu, S., Var, F., Öcal, S.E., Akyalçın, L., Sünel, F., Adar, N. (1997), *Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan SO₂ emisyonunu giderici yöntemlerin ve ilgili parametrelerin araştırılması ve giderme yöntemlerinin karşılaştırılması*, Anadolu Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi, Eskişehir.
- Knotkova, D. (2005), "Atmospheric Corrosion-Research, Testing, and Standardization," *Corrosion*, **61-8**, 723-738.
- Kocataşkın, F. (2000), *Yapı Malzemesi Bilimi*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Leygraf, C. (1995), "Atmospheric Corrosion," *Corrosion Mechanism In Theory And Practice* (Ed: Schweitzer, P.A.), Marcel Dekker, New York, A.B.D., 421-455.
- Meetham, A.R., Bottom, D.W., Cayton, S., Sellers, A.H., Chambers, D. (1981), *Atmosferik Pollution Its History, Origins and Prevention*, Pergamon Press, Germany.

- Nesic, S., Nordsveen, M., Maxwell, N., Vrhovac, M. (2001), "Probabilistic Modeling of CO₂ Corrosion Laboratory Data Using Neural Networks," *Corrosion Science*, **43**, 1373-1392.
- Nicastro, D.H., Surovek, A.E. (2005), "Defects, Deterioration, and Durability," *Structural Condition Assessment* (Ed: Ratay, R.T.), John Wiley&Sons, New York, A.B.D..
- Okutan, H. (1993), "Hava Kirliliğinin Kaynakları," *Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü*, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Gebze-Kocaeli, 1-15.
- Özer, U. (1995), *Çevre Bilimlerine Giriş*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.
- Özdemir, Ş. (1988), *Türkiye' de Toplumsal Değişme ve Çevre Sorunlarına Duyarlılık*, Palme Yayınları.
- Öztemel, E. (2003), *Yapay Sinir Ağları*, Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Parthiban, T., Ravi, R., Parthiban, G.T., Srinivasan, S., Ramakrishnan, K.R., Raghavan, M. (2005), "Neural network analysis for corrosion of steel in concrete," *Corrosion Science*, **47**, 1625-1642.
- Pintos, S., Queipo, N.V., Rincon, O.T., Morcillo, M. (2000), "Artificial neural network modelling of atmospheric corrosion in the MICAT project," *Corrosion Science*, **42**, 35-52.
- Rabl, A. (1999), "Air Pollution and Buildings: An Estimation Of Damage Costs In France," *Environmental Impact Assessment Review*, **19**, 361-385.
- Rosvall, J. (1988), "Air Pollution and Conservation," *Air Pollution and Conservation Safeguarding our Architectural Heritage* (Ed: Rosvall, J.), Elsevier, Netherlands, 25-53.
- Samie, F., Tidblad, J., Kucera, V., Leygraf, C. (2005), "Atmospheric corrosion effects of HNO₃-method development and results on laboratory-exposed copper," *Atmospheric Environment*, **39**, 7362-7373.
- Smith, W. F.(1993), "Corrosion," *Foundations Of Materials Science And Engineering*, McGraw-Hill, New York, A.B.D., 653-708.
- Stern, A.C., Boubel, R.W., Turner, D.B., Fox, D.L. (1984), *Fundamentals Of Air Pollution*, Academic Press, London, United Kingdom.
- Syed, S. (2006), "Atmospheric Corrosion Of Materials," *Emirates Journal for Engineering Research*, **11 (1)**, 1-24.
- Şenkal Sezer, F. (2004), "Yapılar Korozyondan Korumalı," *İnşaat Dünyası Dergisi*, **6**, 108-112.

- Taze, N. (2003), *Şehir ve Endüstri Atmosferinde Bulunan Kükürtdioksitin Çeşitli Yapı Malzemelerine Korozif Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Tırıs, M., Kalafatoğlu, E., Okutan, H. (1993), *Hava Kirliliği Kaynakları ve Kontrolü*, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli.
- Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L. (2000), *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Tönük, S., (2003), “Sürdürülebilir Mimarlık Bağlamında Akıllı Binalar,” *Arredamento Mimarlık*, **1**, 81-85.
- Uluengin, B. (2006), *Mimari Metaller Özellikleri, Bozulma Nedenleri, Koruma Ve Restorasyon Teknikleri*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Uzun, T., Gürçınar, Y. (1998), “Ekolojik Mimari Tasarımı İçin Bir Metodoloji,” *Tasarım Dergisi*, **83**, 114-117.
- Watkiss, P., Eyre, N., Rabl, A., Short, N. (2001), “Impacts Of Air Pollution On Building Materials,” *Pollution Atmospherique*, Special Bilingual Issue, 139-153.
- Weisbach, W. (2000), *Malzeme Bilgisi Ve Muayenesi*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yüzer, N. (1999), “Su Geçirirliliğinin Donatı Korozyonuna Etkisi,” *Yapıda Yalıtım Konferansı Bildiriler Kitabı*, Makina Mühendisleri Odası, Yayın No: 213, İstanbul, 107-119.
- Yocom, J.E., Upham, J., B. (1976), “Effects on Economic Materials and Structures,” *Air Pollution* (Ed: Stern, A.C.), Academic Press, San Diego, California, A.B.D., 65-116.

Ek-1 MICAT Veri Tabanı

T (°C)	RH (%)	TOW	P (mm)	SO ₂ (mg/m ² /gün)	Cl ⁻ (mg/m ² /gün)	Fe (µm/yıl)
MICAT EĞİTİM						
14.1	79.2	0.681	817.0	5.0	30.0	24.9
13.9	78.8	0.707	805.0	5.0	40.2	54.8
14.5	80.3	0.736	1226.0	5.0	70.2	66.0
17.1	71.5	0.482	983.0	5.0	10.0	16.1
17.0	73.6	0.494	1420.0	5.0	9.0	12.4
20.6	75.8	0.666	2158.0	5.0	1.5	5.7
22.1	74.7	0.633	1720.0	5.0	1.5	5.5
20.0	49.3	0.097	111.0	5.0	1.5	4.5
18.3	50.8	0.099	93.0	5.0	1.5	5.6
17.0	77.5	0.593	1178.0	6.2	1.5	25.3
21.5	73.5	0.482	847.0	0.8	8.9	8.6
20.9	74.9	0.482	1167.0	1.3	7.4	11.5
21.2	74.6	0.482	996.0	1.7	1.6	13.1
23.8	89.3	0.482	1122.0	23.8	8.6	52.5
22.9	91.1	0.482	1471.0	20.7	6.7	47.2
24.8	77.2	0.582	605.0	9.5	359.8	159.8
24.5	78.6	0.582	985.0	5.2	174.7	194.6
22.7	72.7	0.579	960.0	40.4	4.4	98.7
22.5	71.0	0.579	876.0	59.1	10.7	161.2
19.8	74.9	0.648	1409.0	28.0	1.5	14.6
19.6	76.0	0.648	1910.0	28.0	1.5	23.4
19.4	75.2	0.648	1034.0	28.0	1.5	24.2
20.1	79.1	0.598	1305.0	46.5	13.9	127.1
20.2	83.6	0.598	1229.0	26.6	13.7	73.1
26.1	87.7	0.682	2395.0	5.0	1.5	19.4
20.4	72.0	0.442	1440.0	5.0	1.5	12.9
27.6	87.0	0.966	940.0	14.2	36.4	30.6
28.2	87.1	0.976	940.0	8.9	69.5	54.0
11.4	89.5	0.8	1800.0	5.0	1.5	17.7
14.2	73.4	0.8	1800.0	5.0	1.5	19.6
22.9	88.3	0.838	3677.0	8.2	20.5	69.3
18.9	83.4	0.695	1845.0	4.2	15.5	16.6
25.2	79.5	0.468	1591.0	37.1	15.8	36.0
25.4	79.4	0.468	1303.0	36.5	10.9	26.4
25.3	79.4	0.468	1447.0	19.8	10.9	29.0
23.9	81.0	0.571	1488.0	16.0	12.3	32.5
23.9	81.0	0.571	1488.0	15.3	4.2	34.1
14.2	71.0	0.13	355.0	21.0	4.4	29.3
14.2	68.3	0.372	367.0	17.9	4.2	44.1

12.2	82.0	0.686	1294.0	63.9	14.3	167.2
26.9	82.1	0.661	635.0	2.7	1.3	22.6
12.9	66.0	0.409	554.0	1.0	0.4	7.7
23.0	81.0	0.776	631.0	3.0	58.4	66.1
12.0	68.8	0.384	652.0	16.2	1.5	19.3
11.1	62.7	0.241	334.0	16.2	1.5	19.7
13.0	62.8	0.416	359.0	3.8	3.9	12.6
13.0	62.8	0.416	359.0	8.9	3.9	10.8
13.0	62.8	0.416	359.0	6.3	3.9	10.6
16.8	65.1	0.17	443.0	18.6	3.8	17.9
15.7	65.5	0.156	655.0	14.8	5.1	18.1
18.1	65.2	0.39	554.0	8.3	1.5	20.3
17.0	62.8	0.302	521.0	5.7	1.5	19.4
17.2	61.9	0.316	374.0	1.9	1.5	21.0
16.3	59.3	0.151	416.0	10.3	1.5	12.3
15.6	57.5	0.274	266.0	2.8	1.5	6.4
16.9	71.5	0.369	1828.0	38.1	11.6	27.0
15.8	68.1	0.314	1704.0	34.7	10.3	29.6
15.1	69.6	0.249	1312.0	45.7	28.2	28.1
14.3	69.0	0.339	271.0	4.1	10.4	14.1
11.0	77.0	0.45	510.0	3.7	10.2	12.8
10.8	74.0	0.447	451.0	3.0	8.7	18.2
8.8	72.0	0.1	738.0	9.1	1.8	3.3
6.9	72.0	0.1	624.0	8.9	1.6	3.6
7.8	72.0	0.1	681.0	9.0	1.7	4.8
16.0	62.0	0.265	747.0	15.6	1.5	15.4
15.2	64.5	0.288	747.0	5.6	1.5	8.6
15.6	63.2	0.277	747.0	17.6	1.5	5.1
21.0	56.0	0.212	1724.0	9.9	1.5	11.4
21.0	56.0	0.2	1372.0	7.1	1.5	13.7
28.0	78.0	0.564	834.0	6.5	43.4	22.6
27.0	77.0	0.581	792.0	15.2	22.9	24.8
28.0	73.3	0.57	985.0	7.2	14.0	18.7
26.5	69.2	0.558	1686.0	38.5	4.8	25.6
27.2	70.3	0.562	1739.0	20.0	8.5	23.0
27.1	74.0	0.588	1387.0	11.0	9.6	28.3
27.1	75.5	0.62	3815.0	63.0	11.0	125.0
27.3	76.5	0.658	4656.0	50.5	18.7	93.3
26.9	75.5	0.691	3622.0	28.7	20.1	113.7
27.2	68.7	0.568	2082.0	20.3	12.7	14.2
27.3	71.6	0.58	2171.0	9.1	24.4	20.1

27.1	65.3	0.531	2427.0	13.7	4.5	23.0
26.9	69.1	0.56	2210.0	6.9	9.8	20.9
27.4	70.7	0.579	2123.0	3.9	11.8	23.2
19.1	86.0	0.837	14.0	17.6	39.4	35.2
18.8	83.5	0.761	13.0	28.9	19.8	34.0
16.4	37.0	0.0030	17.0	5.0	1.5	15.0
17.2	33.3	0.0030	89.0	5.0	1.5	16.5
25.4	84.0	0.5	1523.0	5.0	1.5	15.7
25.8	82.9	0.5	1656.0	5.0	1.5	12.9
15.9	62.1	0.379	1129.0	68.2	161.8	78.9
16.9	56.4	0.315	1129.0	67.2	82.6	106.4
17.2	71.3	0.351	685.0	9.1	6.9	27.1
16.1	66.0	0.35	685.0	7.2	5.1	24.5
17.4	72.4	0.4	685.0	7.1	6.1	29.9
16.8	73.5	0.586	1185.0	1.0	2.2	8.2
17.1	76.2	0.479	1036.0	16.3	7.6	37.6
27.7	78.0	0.419	809.0	6.6	73.1	30.1
28.0	74.5	0.462	311.0	2.7	24.3	20.9
26.6	77.1	0.571	362.0	3.9	32.0	16.6
28.1	74.2	0.427	344.0	2.6	25.7	15.1
27.7	75.0	0.513	983.0	19.0	15.8	23.0
26.5	84.0	0.684	807.0	1.4	12.8	37.3
-2.0	83.8	0.307	114.0	5.0	30.2	37.4
-2.3	85.0	0.264	114.0	4.5	14.2	24.1
-2.3	90.0	0.354	473.0	3.2	30.2	56.0
MICAT DOĞRULAMA						
18.0	50.6	0.114	35.0	5.0	1.5	4.6
23.0	90.4	0.482	1444.0	24.5	5.2	48.5
23.2	80.0	0.598	1152.0	33.9	14.2	61.3
27.6	87.0	0.971	940.0	7.7	43.7	15.9
27.6	80.2	0.562	1598.0	5.3	45.2	61.6
23.9	81.0	0.571	1488.0	8.9	5.9	28.6
26.1	71.4	0.554	936.0	4.2	1.5	19.5
15.9	63.0	0.168	705.0	16.6	4.3	16.1
15.8	57.7	0.126	239.0	5.4	1.5	6.8
21.0	56.0	0.19	1352.0	6.7	1.5	15.2
27.2	68.0	0.559	2593.0	20.9	7.4	25.7
19.2	85.0	0.761	13.0	28.9	19.8	27.5
17.3	80.1	0.608	1515.0	0.7	5.0	14.0
26.5	77.0	0.57	608.0	1.6	23.1	53.0

-3.1	84.0	0.276	114.0	5.0	30.2	35.9
12.2	67.0	0.325	792.0	0.0	0.0	1.7
MICAT TEST						
20.9	73.8	0.631	2624.0	5.0	1.5	5.8
24.2	77.0	0.582	716.0	4.4	167.7	128.4
14.1	81.4	0.8	1800.0	5.0	1.5	13.6
25.3	88.4	0.763	3531.0	4.7	138.1	371.5
14.0	82.0	0.762	463.0	18.7	8.4	35.5
10.6	64.5	0.271	495.0	16.2	1.5	22.5
27.1	76.6	0.496	263.0	4.2	38.7	23.9
12.2	67.0	0.325	632.0	0.0	0.0	1.0
-2.9	84.5	0.295	240.0	5.0	30.2	41.1

Ek-2 Eğitim ve Test Gruplarını Oluşturmak İçin Geliştirilen MATLAB Programı

```
%%%%%%%%%%  
% kumele.m fonksiyonu  
%%%%%%%%%%
```

```
function kumele()
```

```
clear all
```

```
%%%%%%%%%%  
% Veri tabanını oku  
%%%%%%%%%%
```

```
Veri= load('MicatVeri.dat');
```

```
[m,n]= size(Veri);
```

```
%%%%%%%%%%  
% N= Küme sayısını  
% M= Küme eleman sayisini  
%%%%%%%%%%
```

```
N= 20;
```

```
M= floor(m/N);
```

```
%%%%%%%%%%  
% Verileri kumele  
%%%%%%%%%%
```

```
TT= clusterdata(Veri, 'distance', 'mahalanobis', 'linkage', 'average', 'maxclust', N);
```

```
%%%%%%%%%%  
% Kümelenmiş verilerden eğitim ve test gruplarını oluştur  
%%%%%%%%%%
```

```
for j=1:N
```

```
    A(j)= prod(size(find(TT == j)));
```

```
end
```

```
[B, I]= sort(A);
```

```
X= []; l= 1;  
Y= []; ll= 1;  
for j=1:N
```

```
    C= find(TT == I(j));
```

```

for k=1:A(I(j))

    if (k <= M)

        X(l,:)= Veri(C(k),:);
        l= l + 1;

    else

        Y(ll,:)= Veri(C(k),:);
        ll= ll + 1;

    end

end

end

end

[m,n]= size(Y);

J= randperm(m);

for j=1:m

    X= [X; Y(J(j),:)];

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Çıktı dosyasına yaz
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

save MicatVeriKume.dat X -ASCII

```

Ek-3 Korozyon Hızı Tahmini İçin Geliştirilen MATLAB Programı

```
%%%%%%%%%%
% siniragi.m fonksiyonu
%%%%%%%%%%

function siniragi ()

clear all

%%%%%%%%%%
% 'MicatVeriKume.dat' isimli veri tabanı dosyasını oku
% Veri tabanı dosyası kumele.m fonksiyonu
% kullanılarak hazırlanmıştır.
%%%%%%%%%%

Veri= load('MicatVeriKume.dat');

%%%%%%%%%%
% Eğitim grubu verilerini ölçekle
% A: Eğitim girdi matrisi
% B: Eğitim hedef vektörü
% An: Ölçeklendirilmiş eğitim girdi matrisi
% Bn: Ölçeklendirilmiş eğitim hedef vektörü
%%%%%%%%%%

A= Veri(1:105, 1:6)';
B= Veri(1:105, 7)';

% Yağış miktarı sütununu logaritmik olarak ölçeklendir

AA= [A(1:3,:); log(A(4,:)); A(5:6,:)];

% Eğitim grubunu (AA ve B) [-1,1] arasına ölçeklendir

[An, Amin, Amax, Bn, Bmin, Bmax]= premnmx(AA, B);

%%%%%%%%%%
% Test grubu verilerini ölçekle
% S: Test girdi matrisi
% T: Test hedef vektörü
% Sn: Ölçeklendirilmiş test girdi matrisi
%%%%%%%%%%

S= Veri(106:130, 1:6)';
T= Veri(106:130, 7)';

% Yağış miktarı sütununu logaritmik olarak ölçeklendir

SS= [S(1:3,:); log(S(4,:)); S(5:6,:)];
```

% Test girdi matrisini [-1,1] arasına ölçeklendir

Sn= tramnmx(SS, Amin, Amax);

%%
% Yapay sinir ağını 500 farklı başlangıç koşulundan
% başlatarak en iyi tahmin performansını veren
% yapay sinir ağının bulunması
%%

best_pfun= Inf;

for i=1:500

%%
% Üç katmanlı yapay sinir ağını oluştur
% Girdi katmanı sinir hücresi sayısı = 6
% Ara katman sinir hücresi sayısı = 8
% Çıktı katmanı sinir hücresi sayısı = 1
% Ara katman aktivasyon fonksiyonu = tansig (hiperbolik tanjant)
% Eğitim fonksiyonu = trainbr (Bayes düzenlileştirmeli Levenberg-Marquardt)
%%

NET= newff(minmax(An), [8 1], {'tansig' 'tansig'}, 'trainbr');

%%
% Yapay sinir ağını ölçeklendirilmiş eğitim girdi matrisi An
% ve ölçeklendirilmiş eğitim hedef vektörü Bn için eğit
%%

NET.trainParam.show= NaN;
NET.trainParam.epochs= 500;

NET= train(NET, An, Bn);

%%
% Yapay sinir ağının eğitim ve test girdi matrisi için
% performansını (mse, R) belirle
%%

NetPerf= perfmetrik(NET, An, Sn, B, T, Bmin, Bmax);

%%
% Eğitim sonucunda oluşan sinir ağının daha önce bulunan
% en iyi sinir ağından daha iyi olup/olmadığını kontrol et
%%

norm_perf= mean(NetPerf) ./ [100 1];

perf_fun= norm_perf(:,1) + (1 - norm_perf(:,2));


```

if (perf_fun < best_pfun)

    best_net= NET;
    best_perf= NetPerf;

    best_pfun= perf_fun;

end

end

% Bulunan en iyi sinir ağını ve performansı dosyaya kaydet

save DYSA best_net best_perf

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function metrik= perfmetrik(NET, An, Sn, B, T, Bmin, Bmax)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Eğitim girdi seti için performans metriklerinin hesaplanması
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Ağın ölçeklendirilmiş eğitim girdi seti için çıktısını bul

Xn= sim(NET, An);

% Ağın çıktısını [-1,1] ölçeklemesinden geriye döndür

X= postmnmx(Xn, Bmin, Bmax);

% Performans metriklerini hesapla

error= B - X;

mse1= mse(error);
R1= mean(prod(corrcoef(B, X)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Test girdi seti için performans metriklerinin hesaplanması
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Yn= sim(NET, Sn);

Y= postmnmx(Yn, Bmin, Bmax);

error= T - Y;

mse2= mse(error);
R2= mean(prod(corrcoef(T, Y)));

metrik= [mse1 R1; mse2 R2];

```

Ek-4 DYSA'nın Ağırlık ve Eşik Değerleri

Girdi katmanı-ara katman ağırlık matrisi:

-0.023676	-0.28564	0.76378	-1.0042	2.5094	-1.2932
0.47108	0.81422	-1.9185	-0.016728	0.26326	0.56434
-0.5992	0.29026	0.92672	0.35448	1.8494	0.68
0.80017	1.0289	-0.98915	0.59896	1.2755	0.6828
-1.0227	-0.30194	0.13414	2.0415	-1.5008	0.97869
-2.1333	-0.1109	-0.55158	2.4612	-1.0091	-1.4288
0.51244	0.9534	0.23997	1.7926	0.84537	1.216
-0.79202	-0.28956	-0.45368	0.12527	0.078215	-2.1877

Ara katman-çıktı katmanı ağırlık vektörü:

-1.6127	-1.1425	1.6344	1.8077	-1.9824	1.9195	-1.743	-2.4451
---------	---------	--------	--------	---------	--------	--------	---------

Ara katman sinir hücrelerine ait eşik değerleri:

-0.026963	-0.51011	0.95259	0.36762	0.86724	-0.67707	0.082454	-0.59558
-----------	----------	---------	---------	---------	----------	----------	----------

Çıktı katmanı sinir hücresine ait eşik değeri: -0.36105