

104320

**KİMYASAL SENSÖR DİZİLERİNDE YAPAY SİNİR
AĞLARI VE BULANIK MANTIK UYGULAMALARI :
GAZLARIN SINIFLANDIRILMASI VE GAZ
KONSANTRASYONLARININ BELİRLENMESİ**

104320

DOKTORA TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
DOKÜMAN TAYINMA MÜHÜRÜ

Elek.-Elektronik Yük. Müh. Fevzullah TEMURTAŞ

Enstitü Ana Bilim Dalı : Elektrik-Elektronik Müh.
Enstitü Bilim Dalı : Elektrik-Elektronik

Bu tez 16/06/2000 tarihinde aşağıdaki Jüri tarafından Oy birliği / Oy çokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Burhanettin Can
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Zafer Ziya Öztürk
Jüri Üyesi ve Tez Danışmanı


Prof. Dr. Bekir Aktaş
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Abdullah Ferikoğlu
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Ethem Köklükaya
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın konusunu teklif eden ve bütün aşamalarında yardımlarını ve katkılarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Zafer Ziya ÖZTÜRK' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Gazların hazırlamasında ve deneysel dataların elde edilmesinde yardımcı olan değerli arkadaşım Cihat TAŞALTIN' a ve fikirlerinden faydalandığım değerli hoca ve arkadaşlarım Yrd. Doc. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU, Prof. Dr. Vefa AHSEN, Dr. Nejat YUMUŞAK ve Dr. Ahmet ALTINDAL' a, ALSTOM Elektrik Endüstrisi GETİ Dökme Reçineli Trafolar Genel Müdürü Sn. Ergin DİKMEN'e ve çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen eşim Nuran, oğlum Halil ve kızım Tuğba' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2000

Fevzullah TEMURTAŞ
Elektrik-Elektronik Yük. Müh.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Genel.....	1
1.2. Gaz karışımlarının sınıflandırılması ve gaz konsantrasyonlarının tahmini konusunda literatürde yer alan çalışmaların irdelenmesi.....	5
1.3. Çalışmanın amacı ve getirilen yenilikler.....	6
BÖLÜM 2.	
YAPAY SİNİR AĞLARI ve BULANIK MANTIK.....	9
2.1. Yapay Sinir Ağları.....	9
2.1.1. YSA'nın tanımı.....	9
2.1.2. Biyolojik Sinir Sisteminin Yapısı.....	10
2.1.3. Yapay Sinir Modeli.....	12
2.1.3.1. YSA'nın özellikleri.....	14
2.1.3.2. Paralellik.....	14
2.1.3.3. Hata toleransı.....	14
2.1.3.4. Gerçekleme kolaylığı.....	15
2.1.3.5. Öğrenebilirlik ve adaptasyon.....	15
2.1.5. Aktivasyon Fonksiyonu.....	15
2.1.6. Yapay Sinir Ağı Modelleri.....	16
2.1.6.1. Çok katmanlı Perseptron.....	16
2.1.7. Geri Yayılım (Back Propagation) ile Öğrenme.....	17
2.1.8. Eğitim Algoritması.....	18
2.1.9. Çıkış Katmanı Öğrenmesi.....	19
2.1.10. Gizli Katman Öğrenmesi.....	22
2.1.11. Sınırlara Besleme Eklenmesi.....	25
2.1.12. Geri Yayılımda Momentum.....	26
2.1.13. YSA'nın Uygulama Alanları.....	27
2.2. Bulanık Mantık.....	28
2.2.1. Bulanık Mantığa giriş.....	28
2.2.2. Bulanık Kümeler.....	29
2.2.3. Bulanık Küme Tabanlı Sistemlerin Temel Yapısı.....	30
2.2.3.1. Bulanıklaştırma.....	32
2.2.3.2. Bulanık Mantık Kural Tabanı.....	35
2.2.3.3. Bulanık Mantık Sonuç Çıkarım Ünitesi.....	36

2.2.3.4. Berraklaştırma.....	36
2.2.4. Bulanık Mantığın Avantajları.....	37
BÖLÜM 3.	
GAZ SENSÖRÜ GENEL BİLGİLERİ	39
3.1. Gaz Sensörleri.....	39
3.1.1. Interdigital Transducer (IDT).....	39
3.1.2. Quartz Cristal Microbalance (QCM).....	41
3.1.2.1 QCM sensörlerin çalışma prensibi.....	42
3.1.2.2 QCM sensörlerin kütle duyarlılığı.....	45
3.1.2.3 QCM sensörlerin elektriksel karakterizasyonu.....	49
3.1.2.4 Algılayıcı malzeme kaplı QCM sensörlerin elektriksel karakterizasyonu.....	51
3.2. Algılayıcı Malzeme –Gaz etkileşimleri.....	55
BÖLÜM 4.	
GAZ SENSÖRÜ YAPILARI VE YÖNTEM.....	57
4.1. Gaz Sensörleri.....	57
4.1.1. IDT (Interdijital Transduser).....	57
4.1.2. QCM Sensörler.....	59
4.1.3. Sensörlerin kaplanması.....	59
4.1.3.1. Smearing.....	59
4.1.3.2. Airbrush (Jetsprey).....	61
4.1.4. Kimyasal kaplama malzemeleri.....	63
4.2. Gaz Ölçüm Sistemi.....	63
4.2.1. Ölçüm sistemi.....	64
4.2.2. Ölçüm sisteminin otomasyonu.....	66
4.2.3. Ölçüm sisteminin kalibrasyonu.....	66
BÖLÜM 5.	
SENSÖR SİNYAL DATALARININ HAZIRLANMASI, ALGORİTMA KURMA VE DEĞERLENDİRME.....	69
5.1. Sensör Sinyal Datalarının Hazırlanması.....	69
5.1.1. CCl ₄ gazı ölçüm dataları.....	69
5.1.2. CHCl ₃ gazı ölçüm dataları.....	77
5.1.3. Metanol gazı ölçüm dataları.....	78
5.1.4. Toluen gazı ölçüm dataları.....	79
5.1.5. CCl ₄ - Metanol gaz karışımı ölçüm dataları.....	80
5.1.6. CCl ₄ - Toluen gaz karışımı ölçüm dataları.....	83
5.1.7. Metanol –Toluen gaz karışımı ölçüm dataları.....	86
5.2. Dataların Normalize Edilmesi.....	89
5.2.1. Normalize edilmiş CCl ₄ gazı ölçüm dataları.....	89
5.2.2. Normalize edilmiş CHCl ₃ gazı ölçüm dataları.....	95
5.2.3. Normalize edilmiş Metanol gazı ölçüm dataları.....	96
5.2.4. Normalize edilmiş Toluen gazı ölçüm dataları.....	96
5.2.5. Normalize edilmiş CCl ₄ - Metanol gaz karışımı ölçüm dataları.....	97
5.2.6. Normalize edilmiş CCl ₄ - Toluen gaz karışımı ölçüm	

dataları.....	98
5.2.7. Normalize edilmiş Metanol – Toluen gaz karışımı ölçüm dataları.....	99
5.3. Algoritmaların oluşturulması.....	101
5.3.1. YSA ile CCl ₄ , CHCl ₃ ,Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyonlarının saptanması.....	103
5.3.2. Bulanık Mantık algoritması kullanılarak CCl ₄ , CHCl ₃ , Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyonlarının saptanması.....	105
5.3.3. YSA ile CCl ₄ -Metanol, CCl ₄ –Toluen ve Metanol -Toluen gaz karışımlarının sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının saptanması.....	107
5.3.4. Paralel YSA yapısı ve Bulanık Mantık kullanılarak CCl ₄ -Metanol, CCl ₄ –Toluen ve Metanol -Toluen gaz karışımlarının sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının saptanması.....	110
5.4. Değerlendirme.....	113
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR.....	114
6.1. YSA ile elde edilen CCl ₄ gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	114
6.2. Bulanık Mantık ile elde edilen CCl ₄ gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	131
6.3. YSA ile elde edilen CHCl ₃ gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	134
6.4. Bulanık Mantık ile elde edilen CHCl ₃ gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	136
6.5. YSA ile elde edilen Metanol gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	137
6.6. YSA ile elde edilen Toluen gaz konsantrasyon saptama sonuçları.....	139
6.7. YSA ile elde edilen CCl ₄ ve Metanol gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları	141
6.8. YSA ile elde edilen CCl ₄ ve Toluen gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları.....	144
6.9. YSA ile elde edilen Metanol ve Toluen gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları	147
6.10. Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen CCl ₄ ve Metanol gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları.....	150
6.11. Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen CCl ₄ ve Toluen gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları.....	153
6.12. Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen Toluen ve Metanol gaz karışımının sınıflandırma ve konsantrasyon saptama sonuçları.....	156

BÖLÜM 7.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	160
KAYNAK LAR.....	168
EK A - Gaz Ölçüm Sisteminin kontrolü için yazılan program.....	177
EK B – YSA ile yapılan konsantrasyon tahmininde kullanılan örnek data seti (CCl ₄ gazının 10000 ppm değeri için – 36 nolu QCM sensör ile).....	187
ÖZGEÇMİŞ.....	190



SİMGELER LİSTESİ

- BM : Bulanık Mantık
f : Frekans [Hz]
GK : Gizli Katman
YSA : Yapay Sinir Ağları
 η : Öğrenme katsayısı
 α : Momentum katsayısı
ITD : Interdigital Transducer
I : Akım [A]
QCR : Quartz Kristal Resonatör
QCM : Quartz Kristal Mikrobalans
SAW : Yüzey Akustik Dalgaları
TSM : Kalınlık Makaslama Modu
AC : Alternatif akım
 Δf_{12} : 12 nolu QCM sensörün frekans değişim cevabı
 Δf_{24} : 24 nolu QCM sensörün frekans değişim cevabı
 Δf_{36} : 36 nolu QCM sensörün frekans değişim cevabı
 Δf_{46} : 46 nolu QCM sensörün frekans değişim cevabı
 ΔI : IDT sensörünün akım değişim cevabı
t : zaman
 $\Delta f(t_1)$: QCM sensörlerin t1 anındaki frekans değişim cevabı
ppm : konsantrasyon birimi, milyonda olarak
 Δf : Bulanık küme frekans farkı üyelik kümesi
PPM : Bulanık küme konsantrasyon üyelik kümesi
E(RAE): Ortalama görelî mutlak hata
max(RAE) : Maksimum hata

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Biyolojik sinir yapısı.....	12
Şekil 2.2. Yapay sinir modeli.....	13
Şekil 2.4. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı.....	18
Şekil 2.5. Üyelik fonksiyonu.....	29
Şekil 2.6. Bulanık tabanlı bir sistemin genel yapısı.....	31
Şekil 2.7. Tek değişkenli bir sisteme ait bulanık kontrolör blok diyagramı.	32
Şekil 2.8. Üçgen şeklinde üyelik fonksiyonları ile tanımlanmış bulanık küme	33
Şekil 3.1.1 İnterdijital Transduser Yapısı.....	39
Şekil 3.1.2 Tipik bir Quartz Kristal Rezonatörün Yapısı.....	42
Şekil 3.1.3 AT- Kesilmiş Quartz Kristal Tabaka ve Kalınlık Makaslama Modda Titreşen Quartz Kristal.....	43
Şekil 3.1.4 N=1 ve N=3 için shear dalgalar.....	45
Şekil 3.1.5 Rezonans durumundaki QCM Rezonatörün Elektriksel Eşdeğer Devresi.....	50
Şekil 3.1.6. Yüzeyi İnce bir Filmle Kaplanmış QCM Rezonatörün Elektriksel Eşdeğer Devresi.....	52
Şekil 3.1.7 Yüzeyi İnce Film Kaplı QCM sensörün Elektriksel Eşdeğer Devresi	54
Şekil 4.1.1. İnterdijital Transduser Yapısı ve Boyutları.....	58
Şekil 4.1.2 İnterdijital Elektrot yapısının eldesindeki işlem basamakları.....	58
Şekil 4.1.3 Smearing kaplama sistemi.....	60
Şekil 4.1.4. Jetsprey (airbrush) kaplama sistemi.....	62
Şekil 4.2.1. Ölçüm Sisteminin Şeması.....	64
Şekil 4.2.2. Ölçüm sistemi ölçüm anında (MAM Kimya Bölümü).....	65
Şekil 5.1.1. 12 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ölçülen Δf değerleri.....	70
Şekil 5.1.2. 24 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ölçülen Δf değerleri.....	71
Şekil 5.1.3. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ölçülen Δf değerleri.....	71
Şekil 5.1.3. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ölçülen Δf değerleri.....	71
Şekil 5.1.5. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 15 gün sonra ölçülen Δf değerleri.....	73
Şekil 5.1.6. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 1 ay sonra ölçülen Δf değerleri.....	73
Şekil 5.1.7. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 6 ay sonra ölçülen Δf değerleri.....	74
Şekil 5.1.8. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 8 ay sonra ölçülen Δf değerleri.....	74
Şekil 5.1.9. 36 no'lu QCM sensörün farklı zamanlardaki frekans değişimlerinin kararlı hal geçişleri.....	75
Şekil 5.1.10. IDT sensörü ile CCl ₄ gazı için ölçülen Δf değerleri.....	76
Şekil 5.1.11. 36 no'lu QCM sensörü ile CHCl ₃ gazı için ölçülen Δf değerleri	77
Şekil 5.1.12. 24 no'lu QCM sensörü ile Metanol gazı için ölçülen Δf değerleri	78
Şekil 5.1.13. 24 no'lu QCM sensörü ile Toluene gazı için ölçülen Δf değerleri	79

Şekil 5.1.14. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Metanol gaz karışımı (CCl ₄ :500..2000 ppm- Metanol 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	81
Şekil 5.1.15. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Metanol gaz karışımı (CCl ₄ :500..2000 ppm- Metanol 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	82
Şekil 5.1.16. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Metanol gaz karışımı (CCl ₄ :500..3000 ppm- Metanol 4000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	82
Şekil 5.1.17. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Toluen gaz karışımı (CCl ₄ :500..3000 ppm- Toluen 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	84
Şekil 5.1.18. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Toluen gaz karışımı (CCl ₄ :500..3000 ppm- Toluen 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	85
Şekil 5.1.19. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile CCl ₄ -Toluen gaz karışımı (CCl ₄ :500..3000 ppm- Toluen 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	85
Şekil 5.1.20. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol-Toluen gaz karışımı (Metanol :500..3000 ppm- Toluen 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	87
Şekil 5.1.21. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol-Toluen gaz karışımı (Metanol :500..1000 ppm- Toluen 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	88
Şekil 5.1.22. 12,24 nolu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol-Toluen gaz karışımı (Metanol :500..1000 ppm- Toluen 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	88
Şekil 5.2.1. 12 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	90
Şekil 5.2.2. 24 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	90
Şekil 5.2.3. 36 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	91
Şekil 5.2.4. 46 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	91
Şekil 5.2.5. 36 nolu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 15 gün sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri.....	92
Şekil 5.2.6. 36 nolu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 1 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri.....	92
Şekil 5.2.7. 36 nolu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 6 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri.....	93
Şekil 5.2.8. 36 nolu QCM sensörü ile CCl ₄ gazı için ilk ölçümden 8 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri.....	93
Şekil 5.2.9 IDT sensörünün normalize edilmiş ΔI değerleri.....	94
Şekil 5.2.10. 36 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	95
Şekil 5.2.11. 24 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	96
Şekil 5.2.12. 24 nolu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri.....	97
Şekil 5.2.13. CCl ₄ -Metanol gaz karışım için normalize edilmiş Kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	98
Şekil 5.2.14. CCl ₄ -Toluen gaz karışım için normalize edilmiş Kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	99

Şekil 5.2.15. Metanol-Toluen gaz karışım için normalize edilmiş Kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri.....	100
Şekil 5.3.1. Çalışmalarda kullanılan YSA geri yayılım öğrenme algoritması Akış diyagramı.....	102
Şekil 5.3.2. Çalışmada kullanılan ileri beslemeli Ysa yapısı.....	103
Şekil 5.3.3. Gaz konsantrasyonu saptamasında kullanılan YSA yapısı.....	104
Şekil 5.3.4. CCl_4 ve $CHCl_3$ gazları için kullanılan Δf üyelik fonksiyonu.....	106
Şekil 5.3.5. CCl_4 ve $CHCl_3$ gazları için kullanılan PPM üyelik fonksiyonu....	106
Şekil 5.3.6. CCl_4 ve $CHCl_3$ gazları için kullanılan genişletilmiş Δf üyelik fonksiyonu.....	107
Şekil 5.3.7. CCl_4 ve $CHCl_3$ gazları için kullanılan genişletilmiş PPM üyelik fonksiyonu.....	108
Şekil 5.3.8. Miktersal sınıflandırma için kullanılan YSA yapısı.....	109
Şekil 5.3.9. Miktersal sınıflandırma için kullanılan paralel YSA yapısı.....	111
Şekil 5.3.10. Bulanık karar mekanizmasında kullanılan Δf üyelik fonksiyonu	112
Şekil 5.3.11. Bulanık karar mekanizmasında kullanılan YSA üyelik fonksiyonu	112
Şekil 6.1.1. 12 no'lu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri.....	116
Şekil 6.1.2. 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri.....	116
Şekil 6.1.3. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri.....	118
Şekil 6.1.4. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri	118
Şekil 6.1.5. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri.....	120
Şekil 6.1.6. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri.....	120
Şekil 6.1.7. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (8 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri.....	122
Şekil 6.1.8. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (8 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri.....	122
Şekil 6.1.9. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (5 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri.....	124
Şekil 6.1.10. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (5 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri.....	124

Şekil 6.1.11. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (3 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	126
Şekil 6.1.12. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (3 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	126
Şekil 6.1.13. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (1 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	128
Şekil 6.1.14. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (1 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	128
Şekil6.1.15. İlk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	130
Şekil6.1.16. İlk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	130
Şekil 6.3.1. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	135
Şekil 6.3.2. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	135
Şekil 6.5.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	138
Şekil 6.5.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	138
Şekil 6.6.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri.....	140
Şekil 6.6.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri.....	140
Şekil 6.7.1. CCl_4 ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları ($E(RAE)$).....	143
Şekil 6.7.2. CCl_4 ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları ($\max(RAE)$).....	143
Şekil 6.8.1. CCl_4 ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları ($E(RAE)$).....	146
Şekil 6.8.2. CCl_4 ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları ($\max(RAE)$).....	146

Şekil 6.9.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları (E(RAE))	149
Şekil 6.9.2. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları (max(RAE)).....	149
Şekil 6.10.1. CCl ₄ ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE)).....	152
Şekil 6.10.2. CCl ₄ ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE)).	152
Şekil 6.11.1. CCl ₄ ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE)).....	155
Şekil 6.11.2. CCl ₄ ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE))	156
Şekil 6.12.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE)).....	159
Şekil 6.12.2. CCl ₄ ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE)).....	159
Şekil 7.1. CCl ₄ gazı ve 36 nolu sensör için YSA giriş sayısına göre hata grafiği.....	162

TABLolar LİSTESİ

Tablo2.2. Bulanık kural tabanı tablosu.....	35
Tablo 4.1.1. 10, 20, 30 µm hacimlerinde 4000 volt gerilim uygulanarak jet sprey metodu ile hazırlanan kaplanmış quartzların listesi.....	63
Tablo 4.2.1. Mass spektrometresinden alınan sonuçlar.....	67
Tablo 5.1.1 36 no'lu QCM sensörün farklı zamanlardaki frekans değişimlerinin kararlı hal değerleri ve sapma oranları.....	75
Tablo 5.3.1 YSA ile yapılan konsantrasyon tahmini için kullanılan öğrenme ve test kümesi.....	105
Tablo 6.1.1. 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	114
Tablo 6.1.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	117
Tablo 6.1.3. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	119
Tablo 6.1.4. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (8 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	121
Tablo 6.1.5. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (5 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	123
Tablo 6.1.6. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (3 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	125
Tablo 6.1.7. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (1 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	127
Tablo 6.1.8. İlk ölçümden 15 gün 1 ay, 6 ay, 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	129
Tablo 6.1.9. 46 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	131
Tablo 6.1.10. IDT no' lu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	133
Tablo 6.2.1. 12 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	135
Tablo 6.2.2. 12 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	135
Tablo 6.2.3. 24 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	136
Tablo 6.2.4. 24 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	136
Tablo 6.2.5. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	137
Tablo 6.2.6. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	137

Tablo 6.3.1. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	138
Tablo 6.4.1. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	140
Tablo 6.4.1. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini.....	140
Tablo 6.5.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	141
Tablo 6.6.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları.....	143
Tablo 6.7.1. CCl ₄ ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları	145
Tablo 6.8.1. CCl ₄ ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları	148
Tablo 6.9.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları	151
Tablo 6.10.1. CCl ₄ ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları.....	154
Tablo 6.11.1. CCl ₄ ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları.....	157
Tablo 6.12.1. Metanol ve Toluen gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları.....	161
Tablo 7.1. CCl ₄ , CHCl ₃ , Metanol ve Toluen gazları için sensör cevap süreleri ve YSA tahmin sonuçları.....	165
Tablo7.2. İlk ölçümden 15 gün , 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA sonuçları ve frekans sapmaları.....	167
Tablo 7.3. CCl ₃ ve CHCl ₃ gazları için sensör cevap süreleri ve Bulanık Mantık tahmin sonuçları.....	168
Tablo 7.4. CCl ₄ – Metanol, CCl ₄ – Toluen ve Metanol – Toluen gaz karışımları için YSA ve Paralel YSA yapıları kullanılarak elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma sonuçları.....	169

ÖZET

Kimyasal Sensör Dizilerinde Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık Uygulamaları : Gazların Sınıflandırılması ve Gaz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Anahtar kelimeler: Gaz sensörleri , Gaz Konsantrasyonu Saptama, Miktersal sınıflandırma, Yapay Sinir Ağları, Geri Yayılım, Bulanık mantık.

Bu çalışmada Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Bulanık Mantık(BM) tabanlı algortimalar kullanılarak Gaz konsantrasyonunun saptanmasına ve Gaz karışımlarının sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç ile sensör olarak Kuartz Kristal Mikrobals (QCM) ve Interdijital Transduser (IDT) tip sensörler kullanılmıştır.

Gaz konsantrasyon değerlerini ve gaz karışımlarını kontrol etmek ve sensör sinyal datalarını ölçmek için, IEEE 448 kartını kullanan bilgisayar kontrollü bir ölçüm ve otomasyon sistemi kurulmuştur.

İlk aşama olarak YSA ve Bulanık Mantık algoritmaları kullanılarak CCl_4 , $CHCl_3$, Toluen ve Metanol gazlarının konsantrasyonları saptanmaya çalışılmıştır. Bulanık Mantık algoritması kullanılan çalışmada sensörlerin sadece kararlı hal cevapları kullanılmıştır. YSA Algoritması kullanılarak yapılan konsantrasyon saptama çalışmasında sensörlerin cevap süreleri olarak adlandırılan sürenin içinde kalan geçici hal cevapları da kullanılarak tahmin süresinin kısaltılmasına çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında YSA ve YSA-BM algoritmaları kullanılarak ikili CCl_4 – Toluen, CCl_4 – Metanol ve Metanol – Toluen gaz karışımlarının miktersal sınıflandırması üzerinde çalışılmıştır. Bu amaç ile ilk olarak iki katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı kullanılmıştır. Elde edilen miktersal sınıflandırma sonuçlarının iyileştirilmesi için ikinci adım olarak BM karar algoritmalı paralel YSA yapısı kullanılmıştır. Böylece oldukça sınırlı bir sayıdaki sensör tepkisiyle bile oldukça iyi sonuçlar elde edilmesi sağlanmıştır.

Çalışmalarda gerek YSA ve gerek bulanık mantık ile yapılan Gaz konsantrasyonu tesbitlerinde ve bulanık mantık karar mekanizmalı Paralel YSA yapısı ile yapılan miktersal sınıflandırmada oldukça iyi sonuçlar elde edilmiş ve YSA ve bulanık mantık yapılarının gaz karışımlarının miktersal sınıflandırılması ve konsantrasyon saptamada uygun araçlar olduğu görülmüştür.

SUMMARY

Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Applications in the Chemical sensor Arrays : Classification of Gases and Determination of Gas Concentrations

Keywords: Gas sensors, Gas Concentration Detection, Quantitative Classification, Neural Network, Back propagation, Fuzzy Logic.

In this study, Artificial Neural Network (ANN) and Fuzzy Logic based algorithms are used in the determination of the gas concentrations and quantitative classification of the gas mixtures. For this purpose Quartz Crystal Microbalance (QCM) and Interdigital Transducer (IDT) type sensors were used.

For control of the gas concentration values and gas mixtures, a computer controlled measurement and automation system with IEEE 448 card was set up.

As a first step, an Artificial Neural Network (ANN) and Fuzzy Logic based algorithms were used to determination of the concentrations of the CCl_4 , CHCl_3 , Methanol and Toluene gases. In the study made by using Fuzzy Logic algorithms, steady state response of the sensors were used. In the study made by using ANN algorithms, transient response of the sensors were also used. So the prediction time was decreased.

In the second step ANN and ANN-Fuzzy Logic based algorithms were used for quantitative classification of the binary CCl_4 – Toluen, CCl_4 – Metanol and Metanol – Toluen gas mixtures. Firstly two layer feed forward ANN structure were used. Secondly, for improving the result of quantitative classification parallel ANN structure with fuzzy logic decision algorithm were used. By using this parallel ANN structure, very good results were obtained even with a limited number of sensors.

In the gas concentration determination studies made by both ANN and Fuzzy Logic and in the quantitative classification studies of the binary gas mixtures made by parallel ANN structure with fuzzy logic decision algorithm, quite good result were obtained.

Consequently, appropriateness of the ANN and Fuzzy Logic for the quantitative classification and the gas concentration determination were seen

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu bölümde bu tez çalışmasında ele alınan konular hakkında genel bilgiler, bu konu ile ilgili literatürün irdelenmesi ve bu çalışmanın amacı ve getirilen yenilikler yer almaktadır.

1.1. Genel

Çeşitli ortamlardaki kimyasal veya biyokimyasal bileşiklerin belirlenmesi teknolojik önemlerinin yanısıra insan sağlığı ile olan doğrudan ilişkileri nedeniyle de büyük önem arzederler. Kimyasal sensörler, bir kimyasal hali elektrik sinyaline çeviren aygıtlardır ve dedekte edilecek parçacıkları algılayan bir kısım, algılanan parçacığın oluşturduğu etkiyi ölçülecek nicelik haline çeviren bir transduser ve transduserin verdiği sinyali elektriksel büyüklüğe çeviren elektronik kısımlardan oluşur. Bir kimyasal durum, farklı konsantrasyonlar, kısmi basınçlar veya atom, molekül ve iyon gibi parçacıkların gaz, sıvı veya katı fazdaki aktivitelerince belirlenir. Farklı bileşenleriyle çevrenin kimyasal durumu ise komple analitik bilgiyi içerir [1,2].

Kimyasal nünunelerin çok yüksek seçicilik ve miktarsal deteksiyonunda herhangi bir sorun yoktur. Analitik kimya laboratuvarlarında özgün kimyasal reaksiyonlarla ve/veya gelişmiş spektrometrelerle çok hassas analizler mümkündür. Buna karşılık kimyasal numunelerin kimyasal sensörlerle deteksiyonu hem hassasiyet hem de seçicilik bakımından analitik cihazlara göre oldukça düşük seviyededir. Ancak bu sensörler küçük boyutlu ve oldukça ucuz olduklarından ve genellikle sürekli deteksiyon imkanı verdiklerinden birçok uygulamada tercih edilmektedirler. Bu sensör uygulama alanları, çevre ve atmosferik kirlilik kontrolü, çalışma alanı hava kontrolü, ekzoz kontrolü, yangın uyarı ve güvenlik kontrolü, proses kontrolü, kimyasal analiz, tıbbi uygulamalar, zirai uygulamalar, vb alanlardır

Belli başlı kimyasal sensör tipleri ise elektronik iletkenlik ve kapasitans sensörleri, kütle algılayıcı sensörler, alan etkili sensörler, kalorimetrik sensörler, optokimyasal ve fotometrik sensörlerdir [2].

Kimyasal sensörlerle ilgili olarak yürütülmekte olan çalışmalar iki alanda yoğunlaşmaktadır ;

- i) Yüksek algılama özelliğine sahip sensör araştırmaları [3-17].
- ii) Farklı sensörlerden oluşan sensör dizileri üzerindeki araştırmalar [18-24].

Birinci alandaki çalışmalar duyarlık ve seçicilik gibi önemli sensör parametrelerini iyileştirme üzerinde yoğunlaşmış durumdadır. Bir gaz sensörünün performansı sensör konfigürasyonuna bağlı olduğu kadar algılayıcı malzemenin gaz/gazlar etkileşmelerinin doğasına ve devamına da bağlıdır [18]. En basit haliyle bir kimyasal sensör, gaz/gazların adsorpsiyon/absorpsiyonu için arayüzey maddesi olarak bir algılayıcı malzeme ile adsorpsiyon/absorpsiyon sonucu algılayıcı malzemenin fiziksel özelliklerindeki değişimi ölçülebilir bir elektrik ya da optik sinyaline dönüştürecek bir transduserden oluşur. Algılayıcı malzemenin elektriksel iletkenliğindeki değişimlerin ölçülmesi esasına dayanan sensörlerde yaygın olarak kullanılan transduser tipi İnterdijital Transduserdir (IDT). Bir interdijital transduser iç içe geçmiş parmaklardan oluşur.

Potansiyometrik, amperometrik, kemiresistif (chemiresistive), kalorimetrik, optik sensörler gibi çok sayıdaki sensör türü arasında yeni bir sensör sınıfı olarak akustik dalga tabanlı sensörler en çok ilgi çeken ve üzerinde en fazla çalışılan sensörlerdir[3-9]. Quartz kristal rezonatör gaz sensörü olarak ilk defa King [25] tarafından kullanılmıştır. Daha sonraları bir çok araştırmacı tarafından QCR, çevre kirliliğini [26], fosfor kirliliğini [27] ve Amonyak [28], HCl [29], CO [30], Toluen [31], CO₂ [32], Aseton [33], NO₂ [29] gibi çok değişik gazların dedeksiyonu için kullanılmıştır.

Yüksek algılama özelliğine sahip sensör araştırmalarında karşılaşılan gaz sensör parametreleriyle ilgili problemler tipik olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir [34,35];

- *Yaşlanma* : zaman geçtikçe aynı gaza değişik tepkilerin alınması

- *Tekrar üretilebilme* : Aynı gaz için tepkinin üretilen sensörden sensöre değişmesi
- *Düşük duyarlılık* : belirli gazların düşük konsantrasyonlarının saptanmasındaki zorluklar
- *Düşük kararlılık* : çevre koşullarındaki değişikliklerin etkisi nedeniyle gazların sürekli saptanmasındaki zorluklar
- *Zayıf seçicilik* : gazların ayırımı ve sınıflandırılmasındaki zorluklar
- *Yavaş cevap zamanı* : onlarca saniyeler mertebesinde dakikalar mertebesine kadar olan cevap süreleri

Bu problemlerden “tekrar üretilebilirlik” ve “düşük kararlılık” sensör imalat metodları ile ilgili problemdir. Bu çalışmada kullanılan imalat metodlarından jet sprengiyi yöntemi aynı sensörün tekrar üretilebilmesi için oldukça uygundur [36].

Kimyasal sensörlerle ilgili olarak yürütülmekte olan çalışmaların ikinci alanı farklı sensörlerden oluşan sensör dizileri ve veri işleme yöntemleri üzerinde odaklanmıştır. Bir karışım içindeki bir bileşimin ayrı olarak saptanması için sensör dizayn etmek ve geliştirmek çok önemlidir. Fakat tek başına sensör dizaynıyla bu tam seçicilik gerçekleştirilemez. Bu yüzden çeşitli değişik metodlar bu problemin üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. İnsanın koku alma sistemine benzer bir şekilde, farklı sensör dizileri ve bu sensörlerin değerlerini analiz etmek için veri işleme yöntemleri kullanılmıştır [37]. Kimyasal ve biyolojik sensörler çevresel algılama alanında çok geniş bir uygulama saha yelpazesine sahiptir. Uçucu organik buharların saptanması için tam seçici sensörler olmadığı için, karşı etkileşimleri dikkatli seçilmiş sensörler bir sensör dizisi biçiminde kullanılmak yoluyla değişik çoklu komponent ve örnek tanıma algoritmaları kullanılmaktadır. Bu sensör elemanlarını seçmek için önemli kriterler ; belirli ve yeterli seçicilik ve aynı sonuçları aylarca sonra bile alabilmek için uzun dönemli bir stabilite, hızlı cevap süresi ve yüksek duyarlılık [35, 38].

Biyolojik sistemlerde birçok koku hücresinin çıktı verileri bir sinir sistemi tarafından tanımlanır [18]. Genel olarak kullanılan iki örnek tanıma yöntemi vardır. Birincisi multi-lineer regresyon yöntemi , diğeri de yapay sinir ağları tekniğidir. Her iki metod da modelleme için büyük çaba gerektirir. Modellenmesi gereken sistem karmaşıklıkça

lineer analiz kullanılması durumunda modelleme hataları meydana gelir. Bu durumda YSA metodu kullanıldığında büyük miktarda sensör sinyal dataları kullanılması gerektirir.

Sensör dizileri kimyasal ortamdaki gaz ve/veya koku' ları saptamada büyük ölçüde çalışılmıştır. Çok iyi kontrol edilmiş ortamlar dışında tek bir sensör sadece bir gaza duyarlı değildir , sensör tepkisi değişik gazların konsantrasyonlarına karmaşık bir şekilde bağlıdır. Bu yüzden bir sensör dizisinin tepkisi sistemin mükemmel olmayan seçiciliğini kompanse etmek için işlenmeye ihtiyaç duyar. Kısmi - en küçük kareler yöntemi gibi örnek tanıma metotları, bir sensör dizisinin seçiciliğini, çok fazla sapmaları olmayan normal dağılımlarda büyük ölçüde iyileştirebilirler. YSA 'nın gaz sensör dizilerinin tepkisine uygulanması bu tür veri işleme tekniklerine göre gürültü tolerans, adapte edilebilirlik gibi avantajlar sağlar [19]. YSA algoritmaları , kısmi - en düşük kareler analizine göre zor miktarlandırma problemlerinde daha uygundur [20].

Çeşitli problemlerin çözümünde şimdiye kadar çok değişik YSA modelleri geliştirildi. Bunlar arasında pratikteki uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan ileri beslemeli çok katmanlı perceptron modelidir[19]. Bu model bölüm 2.1.6.1 'de izah edilecektir.

Gaz sensör dizileri ile çalışmak amacı ile uygun yapay sinir ağları modellerini seçmek zordur. İleri beslemeli ağlar normal olarak sınıflandırma ve cevap tahmini alanlarında tercih edilmektedir[18-24].

Yapay Sinir Ağları (YSA), birbirine belirli ağırlık değerleri üzerinden bağlanmış bir çok elemanın oluşturduğu bütünsel paralel bir yapıdır ve biyolojik sinir sisteminin anlaşılmasından sonra oluşturulmuştur. Bir yapay sinir ağı, örnekleri, dağıtılmış kodlama ile saklar ve eğitilebilir lineer olmayan dinamik bir sistem oluşturur [39]. Ayrıca bir yapay sinir ağı ardışıl sayısal bir bilgisayardan, insan beyninin paralel kabiliyetine benzemesine çalışması ile daha hızlı bir cevap ve daha yüksek bir performansa sahiptir[40-43]. Günümüzün gelişmekte olan yapay sinir ağı teknolojisi içinde büyük çalışma modellerinden biri ileri besleme ağıdır. Yapay sinir ağlarının

ortaya çıkan günümüz teknolojisi, sınıflandırma, kontrol, işaret işleme, arıza erken tanısı gibi birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. [44-48].

Bulanık mantık, insan düşünme ve algılamasını modellemek için kullanılan güçlü bir araçtır. Bulanık sistemler iki değerli önerme yerine çok değerli kümelerle sonuç verir. Bulanık sistemler kuralları saklayıp dilsel girişten dilsel çıkışa örneklenmiş fonksiyonlar tahmin eder. Kesin olmayandan bahsetmek örnek tanımada ve sınıflandırmada genel bir problem oluşturur. Bulanık küme teorisinin sınıflandırma problemlerinde önemli bir çözüm olduğu ispatlanmıştır[49,50]. İnsanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi kontrol edebilmelerinin bir sebebi, belirsiz yani “kesinlik” ile ifade edilemeyen bir takım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğine sahip olmalarına dayanmaktadır[51]. Bulanık mantık işlemleri, bir problemin analiz edilmesi ve tanımlanması, değişken kümelerin ve mantıksal ilişkilerin geliştirilmesi ile bulunan bilgilerin bulanık kümelere dönüştürülmesi ve modelin yorumlanması işlemlerinden oluşmaktadır[52,53].

1.2. Gaz karışımlarının sınıflandırılması ve gaz konsantrasyonlarının tahmini konusunda literatürde yer alan çalışmaların irdelenmesi

Çeşitli gazların ve gaz karışımlarının değişik sensör yapıları ve sensör dizileri vasıtası ile ölçülen sinyal dataları ile YSA ve Bulanık Mantık algoritmaları kullanılarak yapılan sınıflandırma ve konsantrasyon tahmini çalışmaları gittikçe artan bir şekilde devam etmektedir[18-24].

Bu konular ile ilgili olarak, A.Hierlemann ve arkadaşları [20], gaz karışımlarının sınıflandırılması ve gaz konsantrasyonlarının tesbiti ile ilgili çalışmalarında kısmi en küçük kareler yöntemiyle YSA algoritmasını karşılaştırmalarında YSA algoritmasının 6-7 ay sonra bile iyi sonuçlar verdiğini fakat kısmi en küçük kareler metodunda önemli hatalar görüldüğünü bildirmişlerdir.

G.Huyberegts ve arkadaşları [21] karbon monoksit ve metan gazlarının gerçek zamanlı konsantrasyon tahmini için ileri beslemeli geri yayılım YSA yapısını kullanmışlar ve % 5 ortalama hata gibi oldukça iyi miktarsal sonuçlar elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Bulanık mantık kolay uygulanabilir olması nedeni ile küçük mobil sistemlerde kolayca kullanılabilme avantajına sahiptir. B. Yea ve arkadaşları [22] yarı iletken sensör sinyal datalarını kullanan üç bulanık fonksiyonlu bulanık mantık algoritmasını kullanarak başarılı bir şekilde metan, hidrojen ve bütan gazlarının konsantrasyon tahminini çalışmışlardır. Aynı zamanda üyelik fonksiyonu sayısını ayarlamakla sonuçların iyileştirilebileceği görüşünü belirtmişlerdir.

İkili karışımların miktarsal sınıflandırması konusunda, T. Eklöv ve I. Lundström [23] ileri beslemeli YSA ağ yapısı ve beş adet Pd MOSFET sensör kullanarak, Hidrojen – Etanol , A.Hierlemann ve arkadaşları [20] ileri beslemeli YSA yapısı ve altı adet akustik dalga sensörü kullanarak Toluen – n-Octan, A. Szcurek ve arkadaşları [24] ileri beslemeli YSA ve dört adet ticari yarı iletken gaz sensörü kullanarak Butanol – Xylen gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırması üzerinde çalışmışlardır.

B. Yang ve arkadaşları [19] üç sensör kullanarak yaptıkları çalışmada H₂S ve NO₂ gaz karışımı miktarsal sınıflandırmak için kullandıkları ileri beslemeli YSA 'nın performansını , YSA girişlerinde sensör sinyal datalarını ön işleme tabi tutarak artırmaya çalışmışlardır.

1.3. Çalışmanın amacı ve getirilen yenilikler

Bu çalışmada temel olarak YSA ve Bulanık Mantık algoritmaları kullanarak değişik sensör sinyal dataları ile gaz konsantrasyonlarının saptanması, sensör dizileri ile yapılan ölçümlerle gazların miktarsal sınıflandırılması ve gaz sensörleriyle ilgili problemlere çözümler getirilmesi hedeflenmiştir.

Bu amaçla ilk aşama da örnek olarak seçilen CCl₄ , CHCl₃ , Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyonlarının tesbitine çalışılmıştır. Bu amaç ile ileri beslemeli geri

yayımlı algoritmalı YSA yapısı kullanılmıştır. YSA ile konsantrasyon saptaması yapılırken, sensör cevabında sadece kararlı hal cevabı değil aynı zamanda sensör cevap süresi kabul edilen geçiş bölgesi (transient) cevabı da kullanılmıştır. Burada hedeflenen, sensör cevap süresi tamamlanmadan önce konsantrasyon tahminini yapmak ve gaz sensörlerinde görülen *yavaş cevap zamanı* problemine çözüm üretmek idi.

Bu çalışmada birinci aşamanın farklı bir alanı olarak üç ve beş üyelik fonksiyonu kullanan bulanık mantık algoritmaları ile CCl_4 ve $CHCl_3$ gazlarının konsantrasyon saptaması yapılmaya çalışılmış ve bu işlem sırasında sensörlerin sadece kararlı hal cevapları kullanılmıştır.

Aynı zamanda, konsantrasyon saptama çalışmalarında değişik sensörler kullanılarak aynı gaz gösterilen farklı tepkilerin etkileri incelenmiştir.

İlaveten , sensörlerin CCl_4 gazına karşı değişik zamanlardaki tepkileri oluşturulan YSA yapısında değerlendirilerek incelenmiştir ve YSA yapısının gaz sensörlerinde görülen *Tekrarlanabilirlik (yaşlanma)* problemine ve sensör yaşlanması sorununa karşı katkıları incelenmiştir.

Bunlarla birlikte, gazların çeşitli konsantrasyonlarındaki sensör tepkileri kullanılarak YSA ve Bulanık Mantık yapılarının gaz sensörlerinde görülen *Düşük duyarlılık* problemine karşı etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmada ikinci aşama olarak, ikili CCl_4 - Metanol, CCl_4 - Toluen ve Metanol - Toluen gaz karışımlarının miktarsal olarak sınıflandırılması üzerinde çalışılmıştır. Kullanılan ölçüm sistemi kısıtları göz önüne alınarak iki adet QCM sensörden oluşan bir sensör dizisi kullanılmıştır.

Miktarsal sınıflandırma amacı ile ilk aşama olarak ileri beslemeli YSA ağ yapısı kullanılmıştır. YSA yapısı ile gaz sensörlerinin mükemmel olmayan seçiciliğini kompanse etmeye ve gaz karışımlarının miktarsal olarak sınıflandırılmasına

çalışılmıştır. Bu ilk aşamada elde edilen sonuçlar %20'nin üzerinde ortalama hata ile literatürle kıyaslandığında tatmin edici bulunmamıştır.

Sensör sayısının yetersizliğinin verdiği bu sonuç iyileştirmek için daha sonra Bulanık mantık karar algoritması kullanan Paralel YSA yapısı kullanılmıştır. Bu yapı kullanılarak gaz karışımının miktarsal sınıflandırılması işleminin sonuçlarının iyileştirilmesine ve YSA yapısının gaz sensörlerinde görülen *Zayıf seçicilik* problemine karşı getirdiği faydaların artırılmasına iyileştirilmesine çalışılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan Toluen, Metanol, CCl_4 ve $CHCl_3$ gibi uçucu organik gazlar, belirli seviyelerin üzerinde uzun bir süre maruz kalındığı zaman sağlık için zararlı etkilere sahiptirler ve kimya ve boya endüstrisinde oldukça geniş bir miktarda kullanılan malzemelerdir [54]. Aynı zamanda bir karışımdaki zararlı gazların diğerleri arasından spesifik olarak ayırt edilerek saptanması çok önemlidir [20].

Çalışmalarda gerek YSA ve gerek bulanık mantık ile yapılan Gaz konsantrasyonu tesbitlerinde ve bulanık mantık karar mekanizmalı Paralel YSA yapısı ile yapılan miktarsal sınıflandırmada oldukça iyi sonuçlar elde edilmiş ve YSA ve bulanık mantık yapılarının gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırılması ve konsantrasyon saptamada uygun araçlar olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarla ilgili sonuçlar daha sonraki bölümlerde verilmiş ve tartışılmıştır.

BÖLÜM 2. YAPAY SİNİR AĞLARI VE BULANIK MANTIK

2.1. Yapay Sinir Ağları

Bu bölümde Yapay Sinir Ağları (YSA) ele alınacaktır.

2.1.1. YSA'nın tanımı

Biyolojik sinir sistemi, birçok sinir hücresinin birbirine değişik etki seviyeleri ile bağlanması sonucu oluşan karmaşık bir sistemdir. YSA, biyolojik sinir sistemi çalışma ilkesinin yapay olarak benzetimi çalışmalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmış, basit fonksiyonlar ihtiva eden birçok yapay sinirin, çeşitli ağırlık ve eşik(threshold) değerleri ile birbirine değişik etki seviyeleri ile bağlanması sonucu oluşan bir sistemdir. [39].

İlk defa 1940'larda Mc Cullah ve Pitts tarafından ilk biyolojik sinir hücresi modeli ortaya konmuştur [55]. 1949'da Donald Hebb tarafından yazılan "Organization Behavior" isimli kitapta hücresele seviyede öğrenme mekanizmaları anlatılmıştır [56]. Hebb'in biyolojik öğrenme kuralına göre bir sinir hücresinden dendrit yoluyla gelen bir aksonele giriş işareti onun bir darbe üretmesine neden olur. Aynı şekilde sonraki aksonele girişlerde benzer darbe üretmeye başlar. Böylece bir davranış biçimi ortaya çıkar.

1950'de Dosenblait basit bir nöron modeline dayanarak perceptron modelini ve öğrenme kuralını geliştirmiştir. 1960'da Widrow ve Hoff bu perceptron modelini kullanarak adaptif öğrenme sistemini geliştirmiştir [57]. 1969'da Minsky ve Papert yazmış oldukları bir kitapta algılayıcıların kesin analizlerini yaparak karmaşık mantık işlemlerin yapılamayacağını söylemişlerdir[58]. Böylece 1976'ya kadar YSA konusundaki çalışmalar bir duraklama dönemine girmiştir. 1976'da Grosber tarafından adaptif rezonans teorisi geliştirilmiştir [59]. Sonra 1982 yılında Hopfield optimizasyon problemlerini çözerek, lineer olmayan dinamik Hopfield ağını kurmuştur[60].

1984'de Kohonen eğitici olmadan (eğiticisiz) öğrenen ve "Self Organizing Maps" ismini verdiği özel bir ağ geliştirmiştir [61]. 1986'da Rumelhard "Parellel Distributed

Processing” grubuyla ileri beslemeli modellerde yeni bir öğrenme modeli oluşturarak hatanın geriye yayılması anlamına gelen “Back Propagation” algoritmasını geliştirmiştir [62].

YSA, 1990’lı yıllardan sonra da birçok değişik araştırma sahasında dikkate değer bir önem kazanmıştır. YSA çalışmaları hem sinir sistemi bilimleri hem de mühendislik, matematik gibi başka bilimlerde de sürdürüldüğü için önemli bir şekilde ilerleme kaydetmiştir. Sinir bilimciler sinir sisteminin yapısı üzerinde yoğunlaşırken diğer bilimciler yapay sinir ağlarının matematiksel kullanımı üzerinde durmuştur.

YSA’nın çekiciliği, mükemmel bir yapı olan insan sinir sisteminin işleyişinin kopyalanması gibi bir ayrıcalıktan ileri gelmektedir. İnsanlık her zaman için kendi düşünce ve fikir kabiliyeti üzerinde durmuş ve bunun mantığını anlamaya ve gerçek hayatta uygulamaya çalışmıştır. Bugün gelinen aşamada ise sinir sisteminin bağlantıları üzerinde oldukça yol alınmış olmasına rağmen işleyişi üzerinde elde edilen bilgi henüz yeterli düzeyde değildir [39,43].

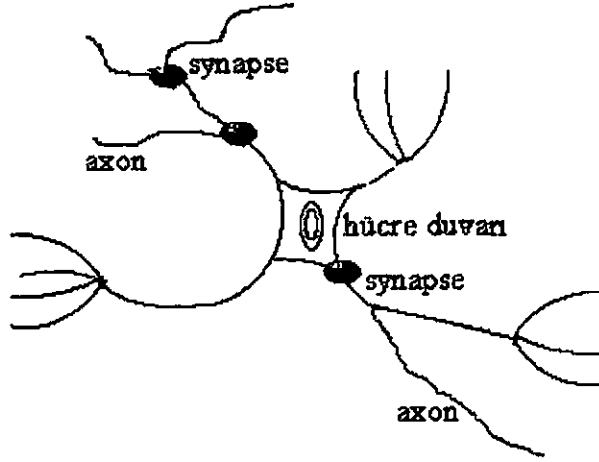
Bir çok bilimsel araştırmacılar insan sinir sistemi ile bilgisayar arasında bir çeşit ilişki kurabilmek için çalışmışlardır. Bu çalışmalar sinir sisteminin çalışma şeklinin bir seri bilgisayardan daha farklı olduğu sonucunu ortaya koymuştur [42]. Bilgisayarlar (paralel olarak tasarlanmadıkları sürece) komutları seri olarak işlerler. İki komutun seri bilgisayarda aynı anda işlenmesi mümkün değildir. Gerçekte bir bilgisayar sinir sisteminden daha hızlı işlem ünitesi içerir. Bir bilgisayar saniyede birkaç milyon işlem yapabilirken sinir sistemindeki üniteler ancak saniyede on işlem yapabilir. Fakat sinir sistemi bir defada bir çok değişik bilgilerle çalışabilir. Sinir sisteminin bu yüksek seviyeli paralellik özelliği çok önemlidir. Bu açıdan bakıldığında yüksek işlem karmaşıklığına sahip problemlerde bilgisayarlarla insan beyninin yarışabilmesi düşünülemez. Fakat görme ve konuşma ve anlama gibi birçok girişlerin ve yüksek derece paralelliğin olduğu problemlerde insan sinir sistemi çok daha üstündür. Bir insanın karşılaştığı problemler çok yüksek yoğunlukta paraleldir. Bu problemler farklı birçok bilginin işlenmesi ile çözülebilir. Sinir sisteminin bu paralel yapısı bu farklı bilgilerin çok daha kolay bir şekilde gösterilmesini sağlar. Yukarıda da belirtildiği gibi

önemli olan işlem ünitelerinin hızı değil paralellik derecesidir. Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sisteminin bu yüksek yoğunluktaki paralel ve kendi arasında bağlantılı yapısını modellemeye çalışır. Sinir sisteminin yüksek seviyeli bilgiyi nasıl sembolize ettiği bilinmemekle beraber bu sistemin kendi arasında yüksek yoğunlukta bağlı birçok yavaş üniteler kullandığını bilmekteyiz. YSA'nın paralel yapısından başka en önemli bir özelliği de biyolojik sinir sisteminin öğrenilme özelliğini taklit edebilmesidir. YSA'ların işlem ünitelerini çok daha iyi anlaşılabilmesi için biyolojik sinir sisteminin yapısının iyi bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu yüzden bir sonraki bölümde biyolojik sinir sisteminin yapısı incelenmiştir[39,43].

2.1.2. Biyolojik Sinir Sisteminin Yapısı

İnsan sinir sistemi üzerinde detaylı olarak çalışmalar yapılmış olmasına rağmen bu sistemin çalışması hakkındaki bilgiler hala yetersizdir. Sinir sistemi, işlevini sinir (nöron) adı verilen milyarlarca temel üniteler arasında paylaşarak suretiyle gerçekleştirir. Bu sinirlerden herbiri çevresindeki yaklaşık bin tane sinire bağlıdır. Bu sinirler arasında sürekli olarak bir bilgi alışverişi vardır.

Sinir, sinir sisteminin temel ünitesidir. Bir biyolojik sinirin yapısı şekil 2.1'de görülmektedir. Sinirler, çıkış ve girişleri 100 mikron civarında olan yerel sinirler arası hücreler ve sinir sistemini kaslara, duyu organlarını sinir sistemine veya sinir sisteminin değişik bölgelerini birbirine bağlamak gibi özelliklere sahip olan çıkış hücreleri olmak üzere iki tiptedirler. [42].



Şekil 2.1. Biyolojik sinir yapısı [63]

Bir sinirin çalışması karmaşık ve mikroskobik seviyede hala tam olarak anlaşılmamış bir olay olmakla beraber temel çalışma esasları açıktır. Bir sinir benzer şekillerde toplanan birçok girişi kabul eder. Bir defada yeteri seviyede aktif giriş alınırsa sinir aktifleşir ve tetiklenmiş olur. Aksi halde sessiz durumunu muhafaza eder. Aktif duruma 'uyarım', pasif duruma ise 'susma' denir. Sinapslar sinirler arasındaki temel yapısal ve fonksiyonel ünitelerdir [43]. Bir sinaps elektriksel bir sinyali önce kimyasal sonra tekrar elektriksel sinyale çevirir.

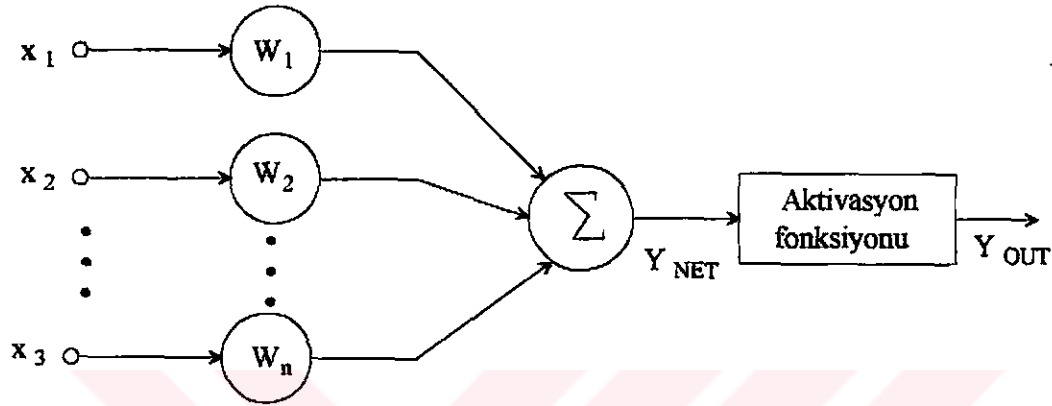
Bir akson sinir hücresine yapışmış ve elektriksel olarak aktif olan hücrenin çıkış kanalıdır. Aksonlar lineer olmayan eşik(threshold) elemanlarıdır. Vücut içindeki dinlenme potansiyeli bir kritik eşik seviyesine ulaştığında aksiyon potansiyeli denilen ve saniyenin binde biri kadar süren bir voltaj darbesi üretirler. Aksonlar sinapslarda biterek hücreye ulaşır [44,45].

2.2.3. Yapay Sinir Modeli

Yapay sinir önceki bölümlerde anlatılan gerçek biyolojik sinirin birinci dereceden karakteristiklerini göstermek üzere tasarlanmıştır. Bu sinire herbiri diğer sinirlerin çıkışlarını göstermek üzere bir girişler kümesi uygulanmıştır. Herbir giriş ise biyolojik sinirdeki sinaptik dayanımla benzer olarak ağırlıklarla çarpılmıştır. Bütün bu ağırlıklı

girişler ise nöronun aktivasyon düzeyini belirlemek için toplanmıştır [43]. Bu fonksiyonel açıklamayı gerçekleyen model Şekil 2.2'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} y_{NET} &= w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n \\ &= \sum_{j=1}^n w_j x_j \end{aligned} \quad (2.1.)$$



Şekil 2.2. Yapay sinir modeli [63]

Ağ yapılarının farklı olmasına rağmen YSA'ların tamamına yakını yukarıdaki nöron tanımıyla işlemektedir. Burada x_1, x_2, \dots, x_n nöron girişleridir. Herbir nöron girişi toplama işlemine girmeden önce w_1, w_2, \dots, w_n ağırlıkları ile çarpılmaktadır. Toplam olarak girişler X vektörü ile ağırlıkları ise W vektörü ile gösterilebilir. Bu durumda 2.1 denklemini vektör notasyonu ile

$$y_{NET} = W \cdot X \quad (2.2)$$

şeklinde gösterilebilir. Daha sonra çok katmanlı perseptron ve geri yayılım modeli incelendiğinde W , vektör yerine bir matris olarak tanımlanacaktır [44,45].

2.1.4. YSA'nın özellikleri

YSA öğrenerek karar verme prensibi üzerine kurulmuştur. Öğrenme, sistemlerin aynı veya benzeri işlemleri yaptıklarında, o işleri bir önceki yaptıkları şeklinden daha verimli ve etkin olarak gerçekleştirerek değişiklikleri oluşturma süreci olarak tanımlanabilir. İnsan sinir sistemini taklit etme esası üzerine kurulan YSA, bir bilgi işleme yöntemi olup, birbirine paralel olarak bağlanmış işlem birimlerinden ve bu birimlerin hiyerarşik organizasyonundan oluşurlar [46].

YSA lineer olmayan sistemlerin kontrolü ve modellenmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Mühendislik problemlerinde ve birçok pratik uygulamalarda verimli bir kullanım için YSA'nın şu özelliklerini bilmek gerekmektedir.

2.1.4.1. Paralellik

Bilgi işlem yöntemlerinin çoğu ardışıl seri işlemlerden oluşmaktadır. Bu durum ise beraberinde özellikle hız problemlerini getirmektedir. Bilgisayarlar insan sinir sistemine göre çok hızlı çalışmasına rağmen sinir sisteminin toplam hızı bilgisayarlara göre kıyaslanamayacak kadar yüksektir. YSA paralel bir yapıya sahip olduğundan ağa gelen girişler, diğer katmanlar boyunca paralel olarak işleme sokulur. Aynı katmanlardaki hücreler arasında zaman bağımlılığı yoktur. Böylece diğer yöntemlere göre işlem hızı arttığından daha kısa zamanda işlem sonucuna ulaşılır [59,63,64].

2.1.4.2. Hata toleransı

Seri bilgisayarda herhangi bir işlem elemanının yerinden çıkarılması veya değiştirilmesiyle bilgisayar iş yapamaz hale gelir. YSA'da birkaç elemanın olmaması toplam ağ performansında önemli bir azalma meydana getirmez. Çünkü YSA yapısında paralel çalışma bulunması ile sistemde bulunan elemanlar eksik elemanların işlerini yapabilecek hale gelir [48].

2.1.4.3. Gerçekleme kolaylığı

Yapay Sinir Ağları, karışık fonksiyonlar yerine basit işlemler içerdiği için gerçekleştirme işlemi diğerlerine göre daha kolaydır. YSA'nda herbir işlem birimi çözülecek problemin tümüyle ilgilenmek yerine yalnızca bir kısmıyla ilgilenmektedir. Hücrelerin çok basit işlemleri yapmalarına rağmen sağlanan görev paylaşımı nedeniyle çok karmaşık ve çok zor problemler daha kolay çözülebilmektedir [47].

2.1.4.4. Öğrenebilirlik ve adaptasyon

Bilgi işleme yöntemlerinin çoğu programlama yoluyla hesaplamaya dayanır. Bu yöntemlerle herhangi bir problemin çözümü için uygun bir algoritmanın geliştirilmesi zorunluluğu vardır ve isbatı mümkün olmayan durumların çözülmesinde kullanılmaz. Yapay sinir ağları nicel ve nitel verilerle işlem yapabilir ve bir sistemin çalışmasından alınan verilerle eğitilir. Bu eğitim sonucunda ağ sistemin çalışmasını öğrenir. Uygun bir şekilde eğitilen ağ, daha sonra kendisine sunulan ve eğitim setinde bulunmayan bir girişe de uygun cevabı verecektir. YSA'da problemler verilen örneklerle çözümlenir. Öğrenme, yapay sinir ağlarında ağırlıklarla olmaktadır. YSA bir çok girişi işleme sokarak bu girişlere uygun çıkışlar üretebilme özelliğinden dolayı çok değişkenli sistemlere kolayca uygulanabilmektedir [62,63,65].

2.1.5. Aktivasyon Fonksiyonu

Analog elektriksel sistemleri ile benzer olarak aktivasyon fonksiyonunu bir yapay nöronun lineer olmayan kazancı olarak düşünülebilir. Bu kazanç, y_{NET} 'teki küçük bir değişikliğe karşı y_{OUT} 'teki değişikliğin oranını bularak hesaplanır [43]. Dolayısıyla kazanç, eğrinin özel bir uyarım noktasındaki eğimidir. Grossberg aynı ağın hem küçük hem de büyük sinyalleri işleyebilmesini aktivasyon fonksiyonunun bu lineer olmayan karakteristiği ile açıklanabileceğini bulmuştur [43]. Bu fonksiyonun ortasındaki yüksek kazanç bölgesi küçük sinyalleri işlerken, uçlardaki kazanç düşürücü bölgeler büyük

sinyalleri işlemektedir. Böylece bir yapay nöron geniş bir giriş yelpazesi içindeki sinyalleri kazanç uydurma yolu ile işleyebilmektedir.

2.1.6. Yapay Sinir Ağı Modelleri

Günümüzde çok sayıda yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Bu modellerin geliştirilmesinde biyolojik sinir sistemlerinin prensiplerinden ve mühendislik biliminin imkanlarından faydalanılmıştır. Genel olarak yapay sinir ağları a) İleri beslemeli ağlar (Feed Forward) b) Geri beslemeli ağlar (Feed Back) olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. İleri beslemeli ağlar daha çok desen tanıma (Pattern Recognition) problemlerinin çözümünde, geri beslemeli ağlar ise daha fazla optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. İleri beslemeli ağlar işaretin ağ girişinden ağ çıkışına doğru tek yönlü olarak iletildiği ağlardır. Bir katmandaki (layer) hücreler ancak bir önceki hücrenin çıkışlarını giriş olarak alabilirler [39,63]. Bu bölümde , bu çalışmada kullanılan çok katmanlı perceptron modelinden bahsedilecektir.

2.1.6.1. Çok katmanlı Perseptron

Basit bir perseptron, sistem tanımlamasında başarı ile kullanılabilirken birçok gerçek uygulamalar lineer olmayan özellikler içerdiği için basit perseptron modelleri yetersiz kalabilir. Minsky'nin perseptronların yetersizliğini gösteren açıklamalarından sonra birçok bilgisayar bilimlileri çalışanları YSA konularını bir süre için bir kenara bıraktılar [43]. Buna rağmen birçok araştırmacı YSA teorisi çalışmalarına devam edip bu alandaki en büyük başarı olan Rosenblatt'ın çalışmalarını gerçekleştirdiler. Birçok değişik araştırmacı ardışıl çok katlı perseptronları uygun ağırlıklı birleştirme üniteleri ile çok iyi çalışan algoritmalar geliştirdiler. Geri yayılım (Back propagation) algoritması ilk önce Werbos tarafından ortaya atılsa bile bağımsız olarak daha sonra 1985 yıllarında Rumelhart ve arkadaşları ve Parker tarafından bulunmuştur.

Basit perseptronların lineer olarak araştırılamayan fonksiyonları gerçekleştirmekteki yetersizliği çok katmanlı perseptronlarda geçerli değildir. Çok katmanlı ağların kabiliyetleri çok önceleri anlaşılmış olmasına rağmen daha yakınlarda belli bir fonksiyonu “geri yayılım” veya diğer algoritmalar ile öğrenebilecekleri gösterilmiştir [66].

Geri yayılım öğrenme algoritması ile ileri beslemeli çok katmanlı ağlar kontrol ve sistem tanımlama problemlerinde çok kullanılmaktadır.

2.1.7. Geri Yayılımla (Back Propagation) Öğrenme

Uzun yıllar çok katmanlı ağlar için teorik destekli bir ağırlık adaptasyon algoritması yoktu. Dolayısıyla geri yayılım algoritmasının bulunuşu YSA’ların gelişimi üzerinde çok etkili oldu. Rumelhart , Hinton ve Williams geri yayılım algoritmasını açık bir şekilde makalelerinde ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada kısa bir süre sonra Parkes’in Rumelhart’ın çalışmasını daha önce ortaya koyduğu ortaya çıkmıştır. Bu olaydan kısa bir süre sonra da Werbos’un bu metodu onlardan daha önce tanımladığı bulunmuştur. YSA gibi disiplinler arası bir araştırma alanında böyle birden fazla aynı çalışma bağımsız olarak yapılması çok ilginçtir [39,67].

Geri yayılım algoritmasını ilk geliştiren kişi olan Paul Werbos, bu konudaki ilk sezgilerinin Sigmund Freud’tan olduğunu söylemiştir. Burada ise Freud’un psikodinamik teorisini kasetmektedir. Bu teoriye göre beyin sinir ağı olarak tanımlanmakta ve Freud zaman içinde beyin adaptasyonunun nedensel yolunu, sinirden sinire elektriksel uyarının ters yönünde olan bir kimyasal akışla izah etmektedir[67].

Bir ağı eğitmekteki amaç, bir giriş setine karşılık olarak özel bir fonksiyonel karakteristiği elde edebilmek için çıkışlar oluşturmak üzere ağırlıkların ayarlanmasıdır. Eğitmenin tam olabilmesi için her bir giriş vektörüne karşılık istenen çıkış vektörünü gösteren bir hedef çıkış vektörü olmalıdır. Bu giriş ve hedef çıkış vektörleri bir eğitim

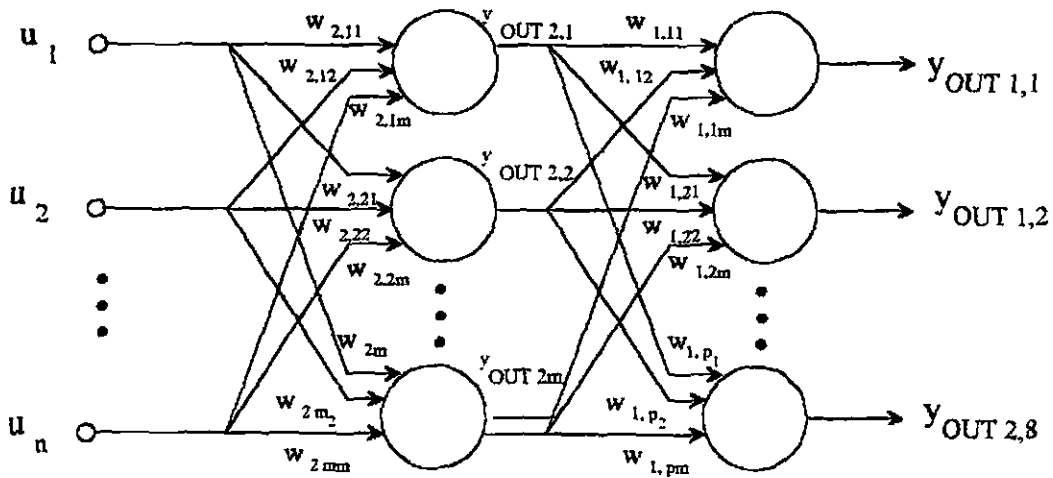
çifti oluşturur. Bir geri yayılım ağındaki öğrenme aşağıdaki basamaklardan oluşur [39,43].

1. Eğitim kümesinden bir sonraki eğitim çiftini seç ve ağ girişine giriş vektörü uygula.
2. Ağı çıkışı hesapla.
3. Ağı çıkışı ile istenen vektör (hedef vektör) arasındaki hatayı hesapla.
4. Hatayı küçültecek şekilde ağı ağırlıklarını ayarla.

Yukarıdaki basamaklar ağıdaki toplam hatanın belli bir istenen limit düzeyini aşmaması durumuna kadar tekrar edilir. Bu hata limiti elde edildiğinde ise ağ yapılacak işi “öğrendi” denilir. Ağ bir kere öğretildiği zaman elde edilen ağırlık değerleri saptanır ve bu ağırlık değerler ağı ihtiyacı durumunda tekrar kullanılır. İlerleyen uygulamalarda ağ bu öğrenilen ağırlıkları kullanacaktır.

2.1.8. Eğitim Algoritması

Burada detaylı olarak bir çok katmanlı ileri besleme ağı diyagramı ile geri yayılım algoritmasına çıkarılışı verilecektir.



Şekil 2.4. Çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı [63]

Burada şekil 2.4'teki notasyonlar kullanılmış ve notasyonu daha açık hale getirmek için çıkıştan başlayıp gizli katmana doğru giden bir notasyon kullanılmıştır. Örnek olarak $y_{OUT1,2}$ birinci çıkış katmanının ikinci çıkışıdır ve $w_{2,34}$ ise ikinci (gizli) katmanını üçüncü nöronu ile bir önceki (giriş) katmanının dördüncü nöronu arasındaki ağırlıktır.

Bir basit nöronun tanımından yararlanarak her bir katman sonundaki çıkışları şöyle yazılabilir [63].

Gizli katman:

$$\begin{aligned} y_{NET2,j} &= \sum_{i=1}^n w_{2,ji} u_i \\ y_{OUT2,l} &= f_j[y_{NET2,j}] \quad j=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (2.3)$$

Çıkış katmanı:

$$\begin{aligned} y_{NET1,k} &= \sum_{i=1}^n w_{1,kj} y_{OUT2,j} \\ y_{OUT1,k} &= f_k[y_{NET1,k}] \quad k=1,2,\dots,p \end{aligned} \quad (2.4)$$

Burada $f(x)$ aktivasyon fonksiyonudur ve

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (2.5)$$

denklemini ile ifade edilir.

2.1.9. Çıkış Katmanı Öğrenmesi

Ağırlıkların diferansiyel artış değerleri özel bir ağırlığa göre, karşı gelen hatanın gradyanını de bulunur [63].

$$\Delta w_{1,kj} = -\eta \frac{\partial e}{\partial w_{1,kj}} \quad (2.6)$$

Diferansiyelde ki zincir kuralı denklem 2.6'ya uygulanırsa ;

$$\Delta w_{1,kj} = -\eta \frac{\partial e}{\partial y_{NET1,k}} \frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial w_{1,kj}} \quad (2.7)$$

$\delta_{1,k}$;

$$\delta_{1,k} = -\frac{\partial e}{\partial y_{OUT1,k}} \frac{\partial y_{OUT1,k}}{\partial y_{NET1,k}} \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanır. $\delta_{1,k}$ 'ları oluşturmak için zincir kuralının bir kez daha kullanıldığına dikkat edilmesi gerekir. Dolayısıyla ağırlıklardaki değişim denklem 2.9'de olduğu gibi formüle edilebilir.

$$\Delta w_{1,kj} = -\eta \delta_{1,k} \frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial w_{1,kj}} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitlik hesaplanmak üzere üç tane kısmi türev içerir. İlk ikisi $\delta_{1,k}$ teriminde ve üçüncüsü ise $y_{NET1,k}$ 'nin $w_{1,kj}$ 'ye göre kısmi türevidir. Bu kısmi türevler, denklem 2.5 da verilen ve hatayı $y_{OUT1,k}$ değerine bağlayan bir hata fonksiyonu kullanarak hesaplanabilir. Hata fonksiyonunu formül 2.10 olarak seçilsin;

$$e = f_{err} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (y_{TAR1,k} - y_{OUT1,k})^2 \quad (2.10)$$

Ayrıca aktivasyon fonksiyonunun keskinlik ayarlayıcısı olan α 'da 1 olarak seçilirse 2.5 elde edilir

Bundan başka $\Delta w_{1,kj}$ ifadesinin türevsel terim içermeyecek şekilde açılması gerekir. Böylece algoritmanın uygulanabilirliği daha kolay olacaktır. Denklem 2.8'deki ilk kısmi türev formül 2.10'deki hata fonksiyonu kullanılarak şöyle açılabilir [43].

$$\begin{aligned}\frac{\partial e}{\partial y_{OUT1,k}} &= \frac{\partial}{\partial y_{OUT1,k}} \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (y_{TARI,k} - y_{OUT1,k})^2 \right) \\ &= (-1)(y_{TARI,k} - y_{OUT1,k})\end{aligned}\quad (2.11)$$

Böylece ilk türevsel ifade için bilinen değerler cinsinden basit bir eşitlik elde edilmiş olur. Formül 2.8'deki ikinci türevsel ifadedeki aktivasyon fonksiyonunun türevi alınarak denklem 2.12 elde edilebilir.

$$\frac{df_{act}[x]}{dx} = f_{act}[x](1 - f_{act}[x]) \quad (2.12)$$

Bu sonuç 2.8'deki ikinci kısmi türev için kullanılırsa 2.13 formülü elde edilir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial y_{OUT1,k}}{\partial y_{NET1,k}} &= \frac{\partial}{\partial y_{NET1,k}} (f_{act}[y_{NET1,k}]) \\ &= f_{act}[y_{NET1,k}] (1 - f_{act}[y_{NET1,k}]) \\ &= y_{OUT1,k} (1 - y_{OUT1,k})\end{aligned}\quad (2.13)$$

2.11 ve 2.13 eşitlikleri kullanılarak 2.8 tekrar yazılırsa

$$\delta_{1,k} = -(-1)(y_{TARI,k} - y_{OUT1,k})(1 - y_{OUT1,k})y_{OUT1,k} \quad (2.14.a)$$

elde edilir. Buradan sonra $\delta_{1,k}$, bilinen terimler kullanılarak yazılmak istenirse,

$$\delta_{1,k} = (y_{TARI,k} - y_{OUT1,k})(1 - y_{OUT1,k})y_{OUT1,k} \quad (2.14.b)$$

eşitliğine ulaşılır.

Böylece eşitlik 2.9'deki $\Delta w_{1,kj}$ ifadesinin ilk iki diferansiyel terimleri sadece çıkış terimlerine bağlı olarak ifade edilmiş olur. Çıkış değerleri de 2.3 ve 2.4 eşitlikleri ile kolayca bulunabilir. Ayrıca zaten ağırlık ileri yayılım esnasında bu değerler

hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla geri yayılım aşaması önceki bu bilgiyi kullanabilir. Bu aşamada 2.9 eşitliğindeki üçüncü kısmi türevin işlenmesi gerekmektedir. Bu iş için 2.3 eşitliği dikkate alınarak diferansiyel işlemi gerçekleştirilirse,

$$\frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial w_{1,kj}} = \frac{\partial}{\partial w_{1,kj}} \left(\sum w_{1,kj} y_{OUT2,j} \right) \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir.

Eşitlik 2.15 ve 2.14.b eğer 2.9 eşitliği ile birleştirildiği takdirde ağırlık değişimi ile ilgili aşağıdaki basit terimli eşitlik elde edilmiş olur.

$$\Delta w_{1,kj} = \eta (y_{TAR1,k} - y_{OUT1,k}) (1 - y_{OUT1,k}) y_{OUT1,k} y_{OUT2,j} \quad (2.16)$$

Çıkış katmanındaki öğrenme tamamlandığında yani çıkış katmanı ağırlıkları için Δw hesaplandığında kolay bir şekilde gizli katman nöronlarının eğitimine geçilebilir.

2.1.10. Gizli Katman Öğrenmesi

Çıkış katmanındaki ağırlık adaptasyonu öncelikle yapıldıktan sonra gizli katmandaki ağırlık adaptasyonuna geçilir. Dolayısıyla gizli katmandaki öğrenme aşamasında daha önceki çıkış katmanındaki ağırlık değişimi yapılırken elde edilen bazı bilgiler geriye doğru transfer edilerek kullanılır. Gizli katmandaki ağırlık değişiminin hesaplanması çıkış katmanındaki ile benzer şekilde yapılır [63].

$$\Delta w_{2,ji} = -\eta \frac{\partial e}{\partial w_{2,ji}} \quad (2.17)$$

Zincir kuralı kullanılarak 2.17 eşitliğinden;

$$\Delta w_{2,ji} = -\eta \frac{\partial e}{\partial y_{NET2,j}} \frac{\partial y_{NET2,j}}{\partial w_{2,ji}} \quad (2.18)$$

eşitliği elde edilir.

Çıkış katmanındaki benzer olarak δ tanımlaması şu şekilde yapılır.

$$\delta_{2,j} = -\frac{\partial e}{\partial y_{OUT2,j}} \frac{\partial y_{OUT2,j}}{\partial y_{NET2,j}} \quad (2.19)$$

Bu durumda diferansiyel ağırlık artışı aşağıdaki biçime gelir.

$$\Delta w_{2,ji} = \eta \delta_{2,j} \frac{\partial y_{NET2,j}}{\partial w_{2,ji}} \quad (2.20)$$

Görüldüğü gibi burada da üç adet kısmi türev ifadesi bulunmaktadır. Bu ifadeler dikkatli bir biçimde teker teker ele alınıp işe yarar hale getirilecektir. Eğer 2.19 eşitliğindeki birinci terim ile işe başlanırsa;

$$\frac{\partial e}{\partial y_{OUT2,j}} = -\sum_{k=1}^p \frac{\partial e}{\partial y_{OUT1,k}} \frac{\partial y_{OUT1,k}}{\partial y_{NET1,k}} \frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial y_{OUT2,j}} \quad (2.21)$$

Burada işaretin (-) olması çıkış katmanındaki öğrenme fazına benzerlik elde edilebilmesi içindir. Bu değer esasında $\delta_{1,k}$ 'dir. Dolayısıyla eşitlik 2.21, eşitlik 2.22'de olduğu gibi sade hale getirilebilir.

$$\frac{\partial e}{\partial y_{OUT2,j}} = -\sum_{k=1}^p \delta_{1,k} \frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial y_{OUT2,j}} \quad (2.22)$$

Daha önce verilen 2.4 eşitliği kullanılarak 2.22 eşitliğindeki toplam ifadesinde yer alan ikinci terim şöyle yazılabilir;

$$\frac{\partial y_{NET1,k}}{\partial y_{OUT2,j}} = \frac{\partial}{\partial y_{OUT2,j}} \left(\sum_{j=1}^m w_{1,kj} y_{OUT2,j} \right) = w_{1,kj} \quad (2.23)$$

Ayrıca 2.12 kullanılarak 2.19 eşitliğindeki ikinci diferansiyel terim aşağıdaki gibi değiştirilebilir :

$$\begin{aligned}\frac{\partial y_{OUT2,j}}{\partial y_{NET2,j}} &= \frac{\partial}{\partial y_{NET2,j}} \left(f_{act} \left[y_{NET2,j} \right] \right) \\ &= fact \left[y_{NET2,j} \right] \left(1 - f_{act} \left[y_{NET2,j} \right] \right) \\ &= y_{OUT2,j} \left(1 - y_{OUT2,j} \right)\end{aligned}\quad (2.24)$$

Eşitlik 2.19 ile birlikte 2.22, 2.23 ve 2.24 eşitlikleri kullanılarak $\delta_{2,j}$ ifadesi daha anlaşılır bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\delta_{2,j} = - \left(- \sum \delta_{1,k} w_{1,kj} \right) y_{OUT2,j} \left(1 - y_{OUT2,j} \right) \quad (2.25.a)$$

Eğer bu eşitlik düzenlenirse;

$$\delta_{2,j} = \left(\sum \delta_{1,k} w_{1,kj} \right) \left(1 - y_{OUT2,j} \right) y_{OUT2,j} \quad (2.25.b)$$

elde edilecektir. Son olarak eşitlik 2.20'deki son diferansiyel terim hesaplanırsa;

$$\frac{\partial y_{NET2,j}}{\partial w_{2,ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{2,ji}} \left(\sum_{i=1}^n w_{2,ji} u_i \right) = u_i \quad (2.26)$$

Yine eşitlik 2.25.b ve 2.26'deki ifadeler eşitlik 2.20'de toparlanırsa ağırlık değişimi

$$\Delta w_{2,ji} = \eta \left(\sum_{k=1}^p \delta_{1,k} w_{1,kj} \right) \left(1 - y_{OUT2,j} \right) y_{OUT2,j} u_i \quad (2.27)$$

elde edilir.

Aşağıdaki analiz geri yayılım eğitime dayalı olan YSA'ların temelini oluşturur. Hata fonksiyonu ve aktivasyon fonksiyonunun farklı olarak seçimi bu sistemi öğrenme için ileri ve geri salınım yaparak kolay işleyen bir sistem haline getiren algoritmanın temel fikri olduğuna dikkat edilmelidir. Yukarıdaki derivasyonun neticesinde aşağıdaki eğitime algoritmasına ulaşılır.

Standart geri yayılım algoritması:

1. Eşitlik 2.3, 2.4 ve 2.5 kullanılarak $y_{OUT2,j}$ ve $y_{OUT1,k}$ hesaplanır.
2. Eşitlik 2.16, 2.14.b ve 2.27 kullanılarak, $\Delta w_{1,kj}$ ve $\Delta w_{2,ji}$ hesaplanır.
3. Bir önceki aşamada hesaplanan ağırlık değişimleri kullanılarak YSA'nın yeni ağırlıkları hesaplanır.

$$w_{1,kj}(t+1) = w_{1,kj}(t) + \Delta w_{1,kj} \quad (2.28)$$

$$w_{2,ji}(t+1) = w_{2,ji}(t) + \Delta w_{2,ji} \quad (2.29)$$

Yukarıda sıralanmış basamaklar hata istenilen bir düzeye indirgeninceye kadar tekrarlanır [62].

2.1.11. Sinirlere Besleme Eklenmesi

Bir besleme girişinin kullanılma gerekliliği oldukça önemlidir. Sinir besleme girişine olan gerekliliği şu şekilde açıklamak mümkündür. Ağ içindeki her bir ünitenin girişleri N-boyutlu bir uzay oluşturur. Burada her bir ünite bir tarafı "1" öbür tarafı "0" olan bir hiper düzlem oluşturur. Ünitelerin aktivasyon fonksiyonları sigmoid fonksiyonu olduğunda oluşacak düzlemler keskin olmamakla beraber yukarıdakine benzer bir çıkarım geçerli olur. Ağırlıklar ise bu hiper düzlemin giriş uzayının neresinde olduğunu belirler.

Herhangi bir besleme girişi olmadan bu ayırıcı hiper düzlem, girişler tarafından belirlenen hiper uzayın orijininden geçmek zorundadır. Bu bazı uygulamalar için kabul edilebilir. Fakat birçok problemde bu düzlemin başka bir yerde yer alması daha kullanışlı olmaktadır. Eğer bir katmanda birden çok üniteler varsa bunların hepsi aynı giriş uzayını paylaşmakta ve besleme olmadığı takdirde hepside orijinden geçmektedir. Dolayısıyla bir YSA yapısı bazı durumlarda besleme girişine şiddetle ihtiyaç duymaktadır [44,45].

2.1.12. Geri Yayılımda Momentum

Ağ transfer fonksiyonunun yüksek derecede hassasiyet gerektirdiği pratik çok katmanlı perceptron uygulamalarında öğrenme hızı bir sınırlandırıcı etmen olarak devreye girmektedir. Bu uygulamalara örnek olarak sistem tanımlama, lineer olmayan modelleme, zaman serisi tahmini, robot uygulamaları gösterilebilir. Rumelhart [62] tarafından önerilen öğrenme algoritması sadece $\partial e/\partial w$ ile orantılı olarak bir ağırlık değişimi öngörmektedir. Doğru bir diferansiyel işlemi ise ağırlıklar için diferansiyel seviyede değişimlerin olmasını gerektirmektedir. Bu standart algoritmada oran sabiti öğrenme katsayısı (learning rate) olmaktadır. Bu katsayı ne kadar büyük olursa ağırlıklardaki değişiklikler o oranda büyük olmaktadır. Pratik uygulamalar için osilasyona sebep olmayacak en büyük öğrenme katsayısı seçilmesi, öğrenmenin daha hızlı olmasını sağlayacaktır. Osilasyona sebep olmadan öğrenme hızını artırmanın bir yolu, genel delta kuralına bir momentum terimi eklemektir. Bu şu şekilde yapılabilir.

$$\Delta w_{ji}(t+1) = \eta(\delta_j y_{OUTi}) + \alpha \Delta w_{ji}(t) \quad (2.30)$$

Burada t iterasyon sayısını, η öğrenme katsayısını ve α 'da geçmiş ağırlık değişimlerinin o anda ağırlık uzayındaki hareket yönüne etkisini belirler. Geçmiş ağırlık değişimlerinin delta kuralı içine alınması ağırlık uzayındaki, hata düzleminde oluşan yüksek frekanslı değişimleri süzer. Öğrenme katsayısı 0.01-10 arasında değişirken momentum katsayısı 0-1 aralığında değişmektedir [63].

Bu metot özellikle hata düzeyini bir minimuma indirgeyen keskin inişler için yararlıdır. Keskin inişte yapılan bir hızlı ilerleme bu minimum düzeyde osilasyonlara sebep olabilir. Buna karşı alınacak önlem küçük adımlarla ilerlemektir. Fakat bu da o keskin iniş boyunca işlemin çok yavaşlamasına sebep olur. Eklenen momentum terimi o bölgedeki keskinliği filtreleyerek daha hızlı olarak ağırlıkların değiştirilmesine olanak verir.

2.1.13. YSA'nın Uygulama Alanları

Lineer olmayan kontrol problemlerinde YSA'lar en iyi çözümlere sahiptir. VLSI donanımındaki gelişmeler sonucunda paralel işlem yapabilen entegre devreler ve özel amaçlı sinir bilgisayarlarının üretilmesi, ayrıca paket programlarının gelişmesi ile YSA'lar sadece deneysel simülasyon programları olmaktan çıkmış, endüstri ve birçok alanda uygulanabilir hale gelmiştir. YSA'ları aşağıdaki ve benzeri uygulamalarda başarılı bir biçimde kullanılmaktadır [63].

- a) Üretim: robot ve kontrol sistemlerini otomatikleştirme, üretim işlemi ve kalite kontrolü, montaj hattında parça seçimi, basınç-sıcaklık-gaz kontrolü, vb.
- b) Tıp: işitme özürüleri için ses analizi, semptom hastalıkların teşhis ve tedavisi, ameliyat görüntüleme, ilaçların yan etkilerinin analizi, x-ışınlarını okuma ve epileptik felcin nedenlerini anlama, vb.
- c) Askeri: radar sinyallerini sınıflandırma, yeni ve gelişmiş silah tasarımları, keşif yapma, kıt kaynakların kullanımını optimize etme, hedef tanıma ve izleme, zehirli savaş gazlarının saptanması ve analizi, vb.
- d) İş dünyası: petrol ve jeolojik yapı değişikliğinin tahmini, özel olarak toplumsal hareketlerin ve eğilimlerin tanım ve tahmini, veri tabanı oluşturulması, hava yollarında yer ve ücret düzenlemesi, el yazısı karakterlerini tanıma, vb.
- e) Çevre: meteorolojide hava tahmini, çeşitli numunelerin ve gazların analiz edilmesi.
- f) Finans: kredi riski değerlendirmesi, sahte para ve evrak tanıma, el yazısı formlarının değerlendirilmesi, eğilim yatırımları analizi, vb.
- g) Gıda : gıdalarda kalite kontrol için, gıdaların aromasının veya bozulma sonucu oluşan kokuların analizi, vb.

gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Uygulamaların bir çoğunda desen tanıma işi yapılmaktadır. Bir örnekler serisinde desenler bulunur. Bu desenler sınıflandırılarak örnekler serisinin bir parçasından (bir küme içinden) belli bir desenin tamamı tanımlanır veya bir desen içindeki benzetilemeyen bozuk desen değerleri temizlenerek desen tekrar tanımlanır.

2.2. Bulanık Mantık

Bu bölümde Bulanık Mantık hakkında genel bilgiler verilecektir.

2.2.1 Bulanık Mantığa Giriş

Bulanık mantık, insan düşünme ve algılamasını modellemek için kullanılan güçlü bir araçtır. İki-değerli önerme yerine bulanık sistemler, çok-değerli kümelerle sonuç verir. Bulanık sistemler kuralları saklayıp dilsel girişten dilsel çıkışa örneklenmiş fonksiyonları tahmin eder. Klasik mantığın dayandığı temel varsayım “her önerme doğru veya yanlıştır”. Bu Aristo’dan beri tartışma konusu olmuştur. Aristo “Temel varsayım” adlı tezinde gelecek şartlara bağlı olarak olayların şüpheli doğruluk durumlarından bahseder. Bahsettiği gelecek olaylar hakkındaki önermeler aslında ne doğru ve ne de yanlıştır. Fakat iki durumun da olması imkan dahilindedir. Bundan dolayı bu önermelerin doğruluk değerleri belirsiz olup en azından olaylara bağlıdır.

Günümüzde iyice anlaşılmıştır ki doğruluk değerleri kesin olmayan durumlar sadece gelecek olaylara özgü değildir. Ayrıca bazı önermelerin doğruluk değerlerinin doğal olarak ölçümlerin temel sınırlamaları yüzünden belirsiz olduğu bilinmektedir. Bu tür durum ve önermelerden bahsetmek için “belirsiz” olarak adlandırılan bir üçüncü doğruluk değerine izin vererek klasik iki değerli mantığın doğru ve yanlış olan doğruluk değerleri daha esnek hale getirilmelidir. Bunun sonucunda da bulanık mantık ortaya çıkmıştır.

Bulanık küme konusu ilk olarak Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır [49]. Zadeh’in bu çalışmasına göre, insanların bazı sistemleri makinelerden daha iyi

kontrol edebilmelerinin bir sebebi olarak insanların belirsiz, yani kesinlik ifade etmeyen bir takım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğine sahip olmalarıdır.

Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanmaktadır. Bulanık küme teorisi genel bir matematiksel yaklaşımdır. Bu yaklaşım ile çözülmesi güç olan problemler genel bir yapıya kavuşturularak daha kolay bir sonuca gidilir. Bulanık küme teorisi, bilinen klasik küme teorisinin genel bir halidir.

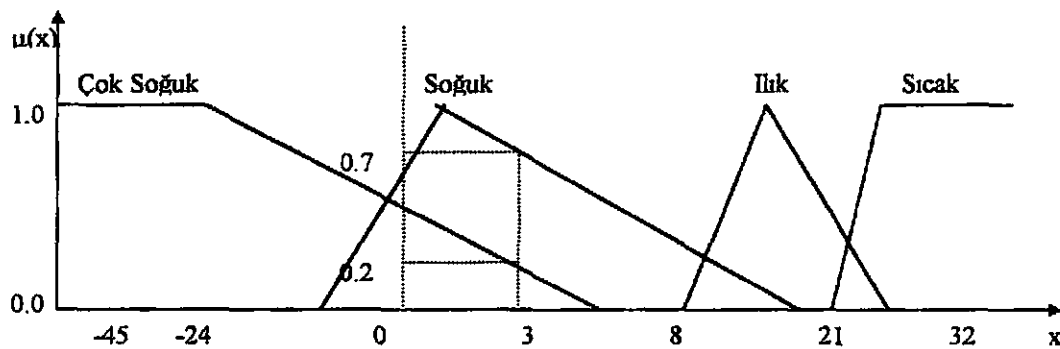
2.2.2. Bulanık Kümeler

Bir bulanık küme, nesnelere ve küme içindeki kendi üyelik derecelerinden oluşur. Bulanık kümedeki nesnenin üyelik derecesi öznel olarak tanımlı üyelik fonksiyonuyla verilir. Bir nesnenin üyelik derecesinin değeri 0 ile 1 arasında değişir. Burada 1 'in değeri tam üyeliği gösterir, 0 'a yakın değer ise bulanık kümedeki nesne üyeliğinin zayıf olduğunu belirtir. Dolayısıyla değeri 0 olan nesne bulanık kümenin üyesi değildir [68].

Bir bulanık küme $\mu_A(x)$ ile temsil edilsin. Burada $\mu_A(x)$, üyelik fonksiyonundaki bir x noktasının, A bulanık kümesindeki üyelik derecesidir. $\mu_A(x) = 1$ konumu, yukarıda da belirtildiği gibi x 'in A bulanık kümesine ait kesin bir elemanı olduğunu gösterir. $\mu_A(x) = 0$ konumu ise, x 'in A bulanık kümenin dışında olduğunu gösterir.

$0 < \mu_A(x) < 1$ arasındaki her değer, x 'in A bulanık kümesinin belirsiz bir değeridir [69].

Bu durum Şekil 2.5 'deki gibi bir örnek üzerinde sözel olarak ifade edilebilir.



Şekil 2.5. Üyelik fonksiyonu [70]

Dışarıdaki ısı; “çok soğuk” , “soğuk” , “ılık” ve “sıcak” olarak sözel bulanık terimler ile tanımlanabilir. Üyelik derecesi 0 ve 1 arasında bir değerdir. Dışarıdaki sıcaklık -45 C ise, $\mu(x)$ ‘ e göre dış ısı “çok soğuk” grubuna girecektir. Eğer sıcaklık 3°C ise, sıcaklık “soğuk” bulanık kümesinin 0.7 oranında aynı zamanda “çok soğuk” bulanık kümesinin 0.2 oranında üyesi olacaktır[71] .

A ve B olarak iki bulanık küme olduğunu varsayalım. μ_A ‘ yı A ‘nın ve μ_B ‘yi B ‘nin üyelik fonksiyonları olduğunu kabul edelim. Bulanık kümeler için birleşim, kesişim ve değil küme işlemleri aşağıdaki şekilde tanımlanır[71- 73] :

Birleşim:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x) , \mu_B(x) \} \quad (2.37)$$

Kesişim:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x) , \mu_B(x) \} \quad (2.38)$$

Değil:

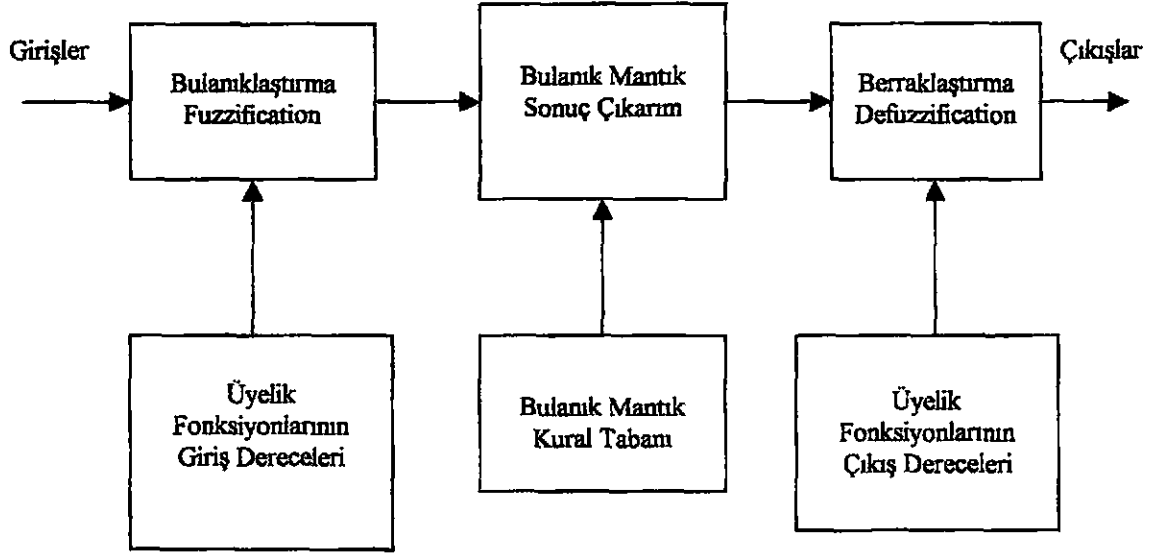
$$\mu_{\bar{A}}(x) = \{ 1 - \mu_A(x) \} \quad (2.39)$$

2.2.3. Bulanık Küme Tabanlı Sistemlerin Temel Yapısı

Bulanık küme tabanlı sistemler genel olarak,

- Bulanıklaştırma
- Bulanık kural tabanı ve çıkarım ünitesi
- Berraklaştırma

birimlerinden oluşur. Şekil 2.6 ‘da bu üç temel biriminden oluşan bulanık mantık kontrolörünün yapısını görülmektedir.

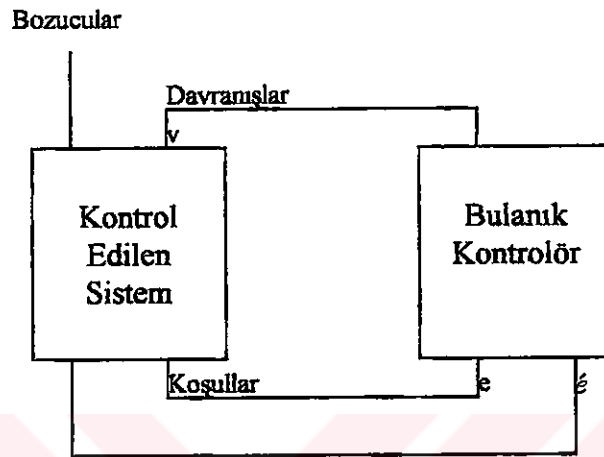


Şekil 2.6 Bulanık küme tabanlı bir sistemin genel yapısı [74]

Bulanıklaştırma birimi, giriş bilgilerini önceden belirlenmiş üyelik fonksiyonlarını kullanarak uygun sözel değerlerden oluşan bulanık ifadelerle dönüştürür. Kural tabanı, uzman kişinin kontrol yöntemini “Eğer-İse” (If-Then) kuralları şeklinde ifade eden, bulanık kurallar kümesinden oluşur. Çıkarım Ünitesi, bulanıklaştırıcı çıkışı kural tabanındaki bulanık kurallar ile eşleştirir ve bulanık uygulamayı gerçekleştirecek uygun bir yorumlama yaptıktan sonra bulanık bir kontrol davranışına karar verir. Berraklaştırıcı, kontrol edilen sisteme uygulayabilmek için sayısal kontrol işaretine çevirir. Bulanık mantık kontrolörünün tasarımındaki en önemli sorun, bulanık mantık kuralları ve uygun üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasıdır[75].

Bulanık küme tabanlı bir sistemi oluşturmak için izlenmesi gereken adımlar aşağıdaki gibi basit bir problem üzerinde incelenebilir. Problem [70]; “tek bir değişkeni çevreden gelen bozuculara rağmen istenen değerde tutmak” olsun. Bu problemi çözmek için tasarlanan bulanık kontrolörün iki giriş değişkeni vardır. Bunlar, istenen değer ile sistemden elde edilen değer arasındaki fark olan hata(e), ve hatanın değişim oranı olan (\dot{e}) dir. Bulanık küme tabanlı bir sistem olan bulanık kontrolör, e ve \dot{e} değerlerini

kullanarak, ilgili kontrol davranışını temsil eden (v) kontrol değerini üretir. Bulanık kontrolörleri oluşturan birimleri yukarıda sözünü ettiğimiz basit kontrol problemi üzerinde açıklayalım. Bu problem için oluşturulan kontrol mekanizması Şekil 2.7 ' de görülmektedir[76].



Şekil 2.7 Tek değişkenli bir sisteme ait bulanık kontrolör blok diyagramı [70]

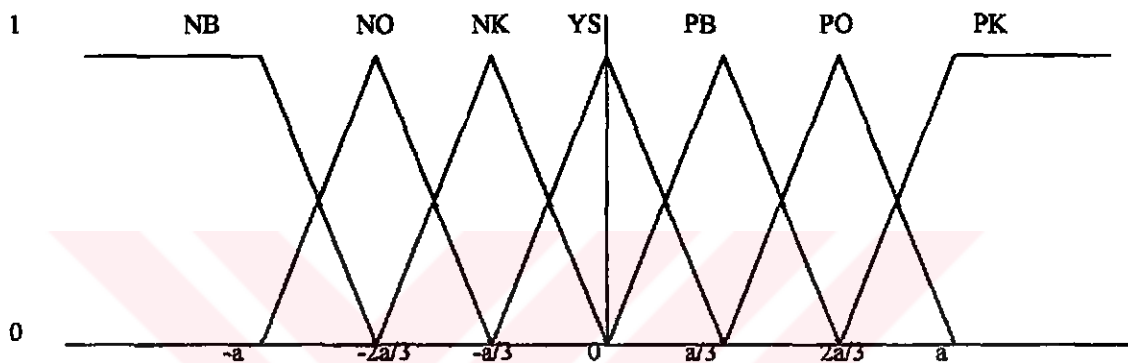
2.2.3.1. Bulanıklaştırma

Bulanık tabanlı bir sistemi oluşturmak için izlememiz gereken ilk adım, ilgili giriş ve çıkış değerlerini belirledikten sonra, her değişken için anlamlı sözel etiketler seçmek ve uygun bulanık kümeler ile ifade etmektir. Pek çok durumda bu bulanık kümeler, “yaklaşık sıfır”, “pozitif küçük”, “negatif küçük”, “pozitif orta” ve buna benzer sözel etiketleri gösteren bulanık ifadelerdir.

Bulanıklaştırma işlemini Şekil 2.7' de gösterilen basit kontrol problemi üzerinde gösterecek olursak, e ve ϵ giriş değişkenlerinin değer aralıklarını $[-a, a]$ ve $[-b, b]$ olarak alırız. v çıkış değişkeninin aralığını ise $[-c, c]$ olur. Daha sonra aşağıdaki yedi sözel durumu bu üç değişken için seçeriz.

NB : Negatif Büyük PB : Pozitif Büyük
 NO : Negatif Orta PO : Pozitif Orta
 NK : Negatif Küçük PK : Pozitif Küçük
 YS: Yaklaşık Sıfır

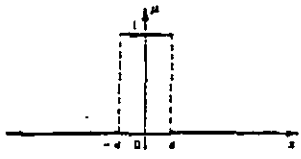
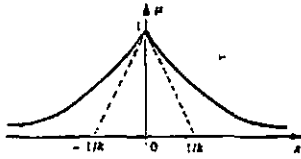
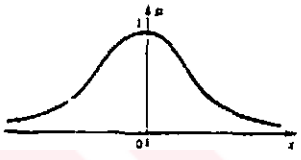
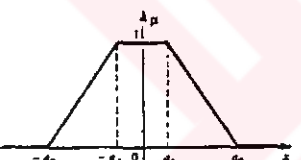

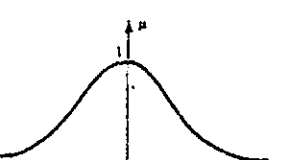
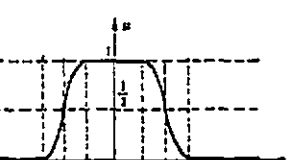
Bu sözel durumlar, eşit olarak her bir sınırdan üçgen biçimli bulanık kümelerle gösterilebilir, Şekil 2.8' de e değişkeni için örneği verilmiş bulanık kümeyi belli sayıda seviyeye ayırarak elde ederiz.



Şekil 2.8 Üçgen şeklinde üyelik fonksiyonları ile tanımlanmış bulanık küme [70].

Bazı özel uygulamalarda değişik nedenlere bağlı olarak üçgen biçimler yerine diğer üyelik fonksiyonu biçimleri tercih edilebilir. Biçimlerin simetrik olması ya da eşit ölçülerde dağılması gerekmez. Tablo 2.1 'de uygulamalarda kullanılan değişik tipte üyelik fonksiyonları görülmektedir. Bulanıklaştırma fonksiyonunun amacı, gerçek sayılarla tanımlanan giriş değişkenlerinin ölçümlerini bulanık ifadelerle çevirmektir. Bu basamakta kesin olmayan ölçümleri ifade eden her giriş değişkeni için bir bulanıklaştırma fonksiyonu tanımlanır.

Tablo 2.1 Değişik tipte üyelik fonksiyonları [77]

EĞRİ	FONKSİYON
	$\begin{aligned} \mu(x) &= 0, & -\infty < x < -a \\ &= 1, & -a \leq x \leq a, \\ &= 0, & a \leq x \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \mu(x) &= e^{kx}, & -\infty < x \leq 0, \\ &= e^{-kx}, & 0 \leq x < \infty, \\ && k > 1. \end{aligned}$
	$\mu(x) = e^{-kx^2}$
	$\begin{aligned} \mu(x) &= 0, & -\infty < x \leq -a_2, \\ &= \frac{a_2 + x}{a_2 - a_1}, & -a_2 \leq x \leq -a_1, \\ &= 1, & -a_1 \leq x \leq a_1, \\ &= \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ &= 0, & a_2 \leq x < \infty. \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \mu(x) &= 0, & -\infty < x \leq -\frac{1}{k\sqrt{a}}, \\ &= 1 - a(-x)^k, & -\frac{1}{k\sqrt{a}} \leq x \leq 0, \\ &= 1 - a(x)^k, & 0 \leq x \leq \frac{1}{k\sqrt{a}}, \\ &= 0, & \frac{1}{k\sqrt{a}} \leq x < \infty. \end{aligned}$
	$\mu(x) = \frac{1}{1+kx^2} \quad k > 1.$
	$\begin{aligned} \mu(x) &= 0, & -\infty < x \leq -b, \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left(x + \frac{a+b}{2} \right), & -b \leq x \leq -a, \\ &= 1, & -a \leq x \leq a, \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left(x - \frac{a+b}{2} \right), & a \leq x \leq b, \\ &= 0, & b \leq x < \infty. \end{aligned}$

2.2.3.2. Bulanık Mantık Kural Tabanı

Kural tabanı; bulanık tabanlı sistemin davranışını belirleyen bulanık mantık kurallarını içerir. Bu kurallarını saptamada iki temel yöntem vardır. Birinci yöntem uzman kişinin sisteme ait bilgi ve tecrübelerinden oluşturmaktadır. İkinci yöntem ise yapay sinir ağları (Neural Networks) yardımıyla uygun öğrenme metodlarından deneysel veri ile saptamaktadır [70].

e, é ve v değişkenli örneğimizde çıkarım kuralları aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\text{Eğer } e=A \text{ ve } é=B \text{ İse } v=C \quad (2.40)$$

Burada; A, B ve C bulanık sayılar olup NB, NO, NK, YS, PB, PO, ve PK sözel durumları gösteren bulanık sayılar kümesinden seçilmiştir. Örneğimizde her giriş değişkeninin yedi sözel durumu olduğu için, olası bulanık yorumlama kurallarının toplam sayısı $7^2 = 49$ dur. Bunlar Tablo 2.2 'de verildiği gibi matriks formda gösterilebilir. Bu matriks ve sözel durumların tanımları bulanık kontrolörün bulanık kural tabanını oluşturur.

Tablo 2.2 Bulanık kural tabanı tablosu [70]

		é							
		v	NB	NO	NK	YS	PK	PO	PB
e	NB	PB				PO	YS		
	NO	PB				PO	YS		
	NK	PO		PO	PK	YS	NO		
	YS			PK	YS	NK			
	PK			YS	NK	NO			
	PO	YS		NO	NB				
	PB	YS		NO	NB				

2.2.3.3. Bulanık Mantık Sonuç Çıkarım Ünitesi

Bulanık Mantık sonuç çıkarım ünitesinin amacı, bulanık tabanlı bir sistemin giriş değişkenlerini, amaca uygun olarak, ilgili bulanık bilgi kuralları ile birleştirerek bir sonuca ulaşmaktır. e , \acute{e} , v değişkenli örneğimizde aşağıdaki işlemler yapılabilir. Öncelikle denklem 2.40 'da verilen bulanık çıkarım kurallarını basit bulanık önermelere dönüştürülür [70].

Eğer (e , \acute{e}), $A \times B$ İse v, C

Burada

$$[A \times B](x, y) = \min [A(x), B(y)]$$

tüm $x \in [-a, a]$ ve tüm $y \in [-b, b]$ dir.(x kartezyen çarpımını temsil eder ve minimum işlemi ile gerçekleştirilir.) Bulanık kural tabanı n bulanık çıkarım kuralını içerdiğinde örneğimiz aşağıdaki formda olur.

Kural 1 : Eğer (e , \acute{e}), $A_1 \times B_1$ İse v , C_1

Kural 2 : Eğer (e , \acute{e}), $A_2 \times B_2$ İse v , C_2

.....
Kural n : Eğer (e , \acute{e}), $A_n \times B_n$ İse v , C_n

Sonuç : v , C dir

2.2.3.4. Berraklaştırma

Berraklaştırmada , bulanık tabanlı sistem tasarımcısı uygun bir berraklaştırma metodu seçmelidir. Berraklaştırmanın amacı, çıkarım ünitesinden elde edilen bulanık kontrol işaretini, sayısal kontrol işaretine çevirmektir [70,77].

Berraklaştırma işlemi için yaygın olarak kullanılan üç metod vardır [70,77-79];

- Alan merkezi metodu
- Maksimum berraklaştırma metodu
- Maksimum ortalama metodu

Alan merkezi metodu (Center of Area Method), ağırlıklar merkezi metodu olarakta bilinmektedir. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alan merkezi yöntemi aşağıdaki formülle ifade edilir [70,77-79].

$$d_{CA}(C) = \frac{\sum_{k=1}^n C(z_k)z_k}{\sum_{k=1}^n C(z_k)} \quad (2.41)$$

Burada, $C(z_k)$ üyelik fonksiyon değeri ile z_k her kuralın gerçekleştirme oranı çarpılarak toplamları alınır. Elde edilen bu değer , üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünmesiyle kontrol işareti bulunur.

Maksimum berraklaştırma metodunda, aktif olan kurallarının en büyük üyelik derecesi sayısal kontrol işareti olarak alınır [70,80] .

Maksimum ortalama değer metodunda, üyelik fonksiyonun maksimum seviyeye ulaştığı değerlerinin toplamının, aktif olan kural sayısına bölünmesiyle kontrol işareti bulunur [70,76] .

2.2.4. Bulanık Mantığın Avantajları

Bulanık mantık kuralları kullanılarak yapılan çalışmalar, simgesel bulanık değişkenler kullanılarak bilginin modellenmesine dayanmasına rağmen, bu, sistemde kullanılan elemanların daha düşük hızlı, ucuz algılayıcılar olması anlamına gelmemelidir. Bunun yanısıra kullanılan algılayıcıların da sayısının indirgenmesi beklenmeyebilir. Bulanık

mantığın avantajı sınıflandırılmış olan nitelikli bilginin kullanılabilir olmasında yatmaktadır. Örnek olarak bulanık mantıklı denetim uygulamalarının diğer yöntemlere göre avantajları şöyle sıralanabilir [63].

- a) Detaylı bir matematiksel model gerektirmezler,
- b) Pek çok giriş-çıkış değişkenleri eş zamanlı olarak ele alınabilir,
- c) Bulanık denetimdeki tüm kurallar eş zamanlı olarak uygulanır ve sonuçlandırılır, uyuşmayan kurallar biçimsel olarak uydurulabilir,
- d) Simgesel değişkenlerin küçük değerli rakamlar olması nedeniyle önemli bir hata indirgemesi getirilir. Giriş-çıkış değişkenlerinin tüm birleşimleri için çıkış belirleme zorunluluğu yoktur. Değişkenlerin dikkatli bir seçimi kuralların sayısını önemli ölçüde indirgeyecektir.
- e) Bulanık denetleyici içerisine yerleştirilen denetim kuralları sistem girişlerinin belirli birleşimlerinde istenilen çıkış elde edilmezse diğer girişlere dokunulmadan denetim işlemini gerçekleştiren aktif kurallar yeniden düzenlenebilir. Bulanık denetleyiciye kurallar rahatlıkla eklenebilir veya istenen belirli bir özellikteki denetim kurallarının özelliği rahatlıkla sistem davranışını bozmayacak şekilde etkin hale getirilebilir.
- f) Bulanık mantık denetleyicilerle klasik mantık denetleyicileri birbirine bağlamak suretiyle denetim performansını artırmak mümkündür.
- g) Karmaşık sistemlerde istenen kalite, nitelik ve hıza göre birden fazla bulanık denetleyici kullanılabilir.
- h) Gerçek zaman uygulamalarının denetim altına alınabildiği sistemlerde yeterli zaman sağlanabiliyorsa donanımdan ziyade yazılımın verdiği esneklikten dolayı bulanık denetim kullanılmaktadır.
- i) Farklı sistemlerde bulanık denetleyici adaptasyonu kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

BÖLÜM 3. GAZ SENSÖRLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

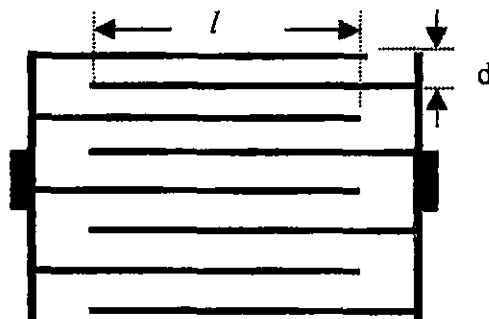
3.1. Gaz Sensörleri

Aşağıdaki bölümlerde bu çalışmada kullanılan gaz sensör tipleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

3.1.1. Interdigital Transducer (IDT)

En basit halde bir kimyasal gaz sensörü gaz molekülleri ile etkin bir şekilde etkileşecek bir arayüzey maddesi ile arayüzey olarak kullanılan algılayıcı maddenin fiziksel ya da kimyasal özelliklerindeki değişimi ölçülebilir bir sinyale (elektriksel, optik vb) dönüştürecek bir transduserden oluşur.

Arayüzey olarak kullanılan maddenin iletkenliğindeki değişimin ölçülmesi esasına dayanan sensörlerde yaygın olarak kullanılan transduser tipi interdijital transduserdir. Bir interdijital transduser iç içe geçmiş parmaklardan oluşur (Şekil 3.1.1). İnterdijital transduserlerin kullanıldığı gaz sensörlerinde kullanılan algılayıcı malzemenin iletkenliğinin gaz konsantrasyonuyla değişmesi ve bu değişimin geri dönüşebilir olması yani, ortamda gaz olmadığı durumda iletkenliğin başlangıç değerine dönmesi gerekir. IDT transduserlerin kullanıldığı sensörlerde gaz molekül/moleküllerinin algılayıcı malzeme tarafından adsorplanması filmin iletkenliğinde bir değişime neden olur. Adsorpsiyon sonucu filmin iletkenliğindeki değişim interdijital transduser vasıtasıyla kolayca ölçülebilir.



Şekil 3.1.1 İnterdijital Transduser Yapısı [81]

Ftalosyanin ve oksimler gibi iletkenliğin düşük olduğu malzemelerde iletkenliğin, hassas bir şekilde ölçülebilmesinde elektrotlar arasındaki mesafe ve elektrotların geometrisi kritik bir rol oynar. Elektrotlar arasındaki mesafe en aza, parmakların sayısı ve parmakların üstüste binme uzunluğu maksimuma çıkarılarak ölçülecek iletkenlik değeri büyük oranda yükseltilebilir. Ayrıca bu sayede ölçülebilir bir akım değeri elde edebilmek için uygulanması gereken yüksek gerilimlerin sakıncası ortadan kaldırılabilir. İnterdijital tansduserler kullanarak filmin doğasına ve gaz/gazlara verdiği cevaba bağlı olarak hem yüzey iletkenliği, hem de hacimsel (bulk) iletkenliği ölçülebilir. Filmin hacimsel iletkenliği σ ,

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{I.A}{\left(\frac{V}{d}\right)} = \frac{I.d}{V(2n-1)h} \quad (3.1.1)$$

ifadesi ile verilir [82]. Burada J akım yoğunluğu, E elektrik alan, I ölçülen akım, A elektrotlar arasının kesit alanı, V uygulanan gerilim değeri, d elektrotlar arasındaki mesafe, l elektrotların örtüşme uzunluğu, h'da elektrotların kalınlığıdır.

Filmin elektrotlar arasındaki kanalları dolduracak kadar kalın olması durumunda A, elektrotlar arasındaki kanalların sayısının ((2n-1)) elektrotların örtüşme uzunluğu l ve elektrotların kalınlığı h ile çarpımına eşit olacaktır. Film kalınlığının küçük olması durumunda h film kalınlığı olacaktır. Bu durumda filmin yüzey iletkenliği σ_s ,

$$\sigma_s = \frac{I.d}{(2n-1)l} \quad (3.1.2)$$

ile verilir. Film kalınlığının elektrot kalınlığından küçük olması durumunda film kalınlığına bağlı ölçümlere bakarak iletkenliğin yüzey iletkenliği mi yoksa bulk iletkenliği mi olduğu ayırdedilebilir.

Ortamdaki gaz moleküllerinin film tarafından adsorplanması sonucu filmin iletkenliğindeki değişim direkt olarak adsorplanan gaz moleküllerinin sayısı N ile orantılıdır. Bu durum matematiksel olarak

$$d\sigma \propto dN = p(N_0 - N)dt + p'Ndt \quad (3.1.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada N_0 yüzeydeki algılayıcı malzeme moleküllerinin sayısı, p gaz moleküllerinin birim zamanda adsorplanma ihtimali, p' ise birim zamanda gaz moleküllerinin desorpsiyon ihtimalidir. Yukarıdaki ifadeden adsorpsiyon için

$$\sigma = \sigma_0 \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (3.1.4)$$

geri dönüşüm (recovery) için de

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.1.5)$$

ifadeleri bulunur [81].

3.1.2. Quartz Kristal Microbalans (QCM)

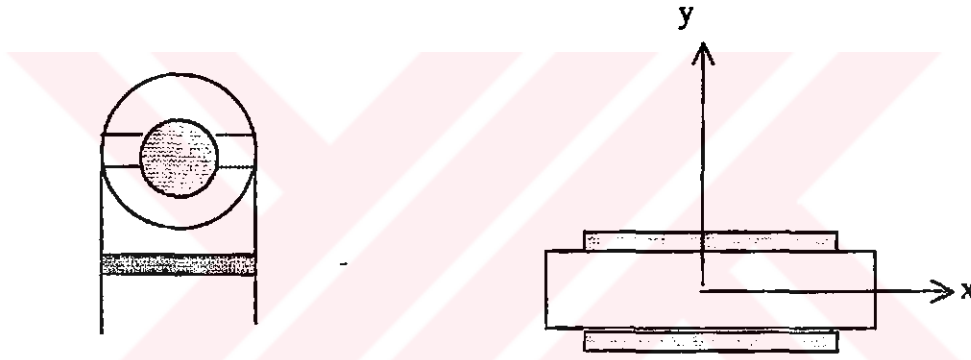
Sensör uygulamalarında kullanılan akustik dalgalar Yüzey Akustik Dalgaları (Surface Acoustic Waves, SAW) ve Bulk Akustik Dalgaları olmak üzere iki grupta toplanabilir. Her iki tür akustik dalga da yüzeylerinin birinde veya her iki yüzeyinde de metal transduserler bulunan piezoelektrik bir malzeme yardımıyla oluşturulabilir. Böyle bir aygıt ile oluşturulan akustik dalgalar ya yüzey dalgalarında olduğu gibi, piezoelektrik malzemenin bir yüzeyi tarafından kılavuzlanmış olarak, ya da düzlem (plate) dalgalarında olduğu gibi piezoelektrik malzemenin alt ve üst yüzeylerinden ardışık yansımalarla ilerler. Oluşturulacak dalganın tipi ve devrenin rezonans frekansı piezoelektrik malzemenin kalınlığına, kristal yönelimine ve transduserlerin geometrisine bağlıdır [83].

Quartz Kristal (Crystal) Rezonatör (QCR) veya Quartz Kristal (Crystal) Mikrobalans (QCM) olarak bilinen kalınlık makaslama mod (TSM) aygıt (device) yüzeylerinde simetrik olarak oluşturulmuş metal elektrotlar bulunan piezoelektrik bir malzemeden oluşur. Metal elektrotlara alternatif (AC) bir gerilim uygulandığı zaman piezoelektrik malzeme içerisinde strainler bunun sonucu olarak da akustik dalgalar oluşur.

3.1.2.1 QCM sensörlerin çalışma prensibi

Quartz kristal rezonatör elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik bir transduserdir [84]. Quartz Kristal Mikrobalans (QCM) olarak da bilinen bir kalınlık makaslama mod (TSM) quartz kristal rezonatör her iki yüzeyinde de eşit yarıçaplı dairesel metal elektrotlar bulunan AT- kesimli ince bir quartz malzemedir oluşur. Şekil 3.1.2’de tipik bir quartz kristal rezonatörün yapısı gösterilmiştir.

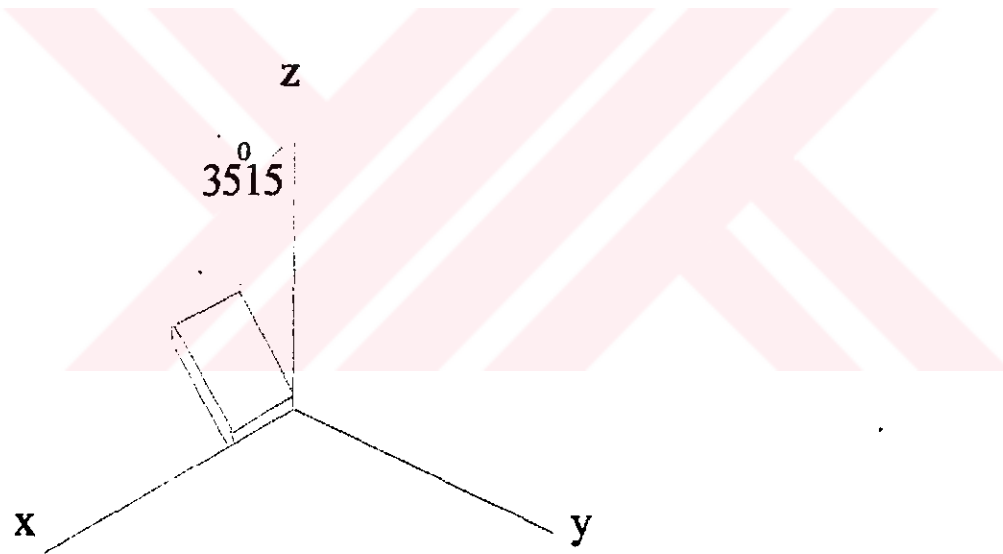
Quartz kristal rezonatörde (QCR) metal elektrotlara alternatif (ac) bir gerilim uygulandığı zaman quartzın piezoelektrik özelliği ve kristal yöneliminden dolayı metal elektrotlar arasındaki bölgede quartzın kalınlığı boyunca makaslama dalgaları oluşur.



Şekil 3.1.2 Tipik bir Quartz Kristal Rezonatörün Yapısı

Elektrotlar bir ac gerilim kaynağına bağlanacak olursa quartz, gerilim kaynağının frekansında titreşimler yapar. Gerilim kaynağının frekansı quartzın mekaniksel rezonans frekansına eşit olduğunda quartzda oluşan akustik dalgaların genliği maksimum değerine ulaşır. Titreşim hareketi yapan tüm mekanik sistemler gibi bir quartz kristal rezonatörde bir çok titreşim moduna veya duran dalga şekillenimine sahip olabilir. Bir quartz malzeme x, y, z eksenlerinin herbirinde boyuna (longitudinal, Extensional), yanıl (lateral Flexural ve Shear) ve burulma (twist) olmak üzere üç farklı tipte titreşim yapabilir. Bu temel modlara ilave olarak sistem aynı zamanda, herbir temel modun harmoniklerinde de titreşim yapabilir. Bu akustik titreşimlerin genliği elektrotlu bölgenin merkezinde maksimumdur ve elektrotlardan uzaklaştıkça titreşimlerin genliği azalır [85,86].

Çoğu zaman QCM'in sadece tek bir modda titreşmesi istenir. İstenen modun seçilip diğer tüm modların bastırılması, yani QCM'in tek bir modda titreşebilmesi için quartzın özel bir kristalografik doğrultuda kesilmiş olması ve uygun bir geometriye sahip olması gerekir. Bunların dışında yüzeylerdeki elektrotların geometrisi ve düzeni, quartz tutucularının yapısı ve osilatör devresi de titreşim modunu etkiler. Sensör uygulamaları için seçilecek titreşim modunun quartzın kütleindeki değişimlere duyarlı olması gerekir. Quartzın kütleindeki değişimlere en duyarlı titreşim modu kalınlık-shear moddur. Bir quartz malzemenin kalınlık shear modda titreşebilmesi için quartzın, kristal eksenine göre özel bir doğrultuda kesilmiş olması gerekir. Bu kesimler döndürülmüş y-kesimler ailesi, AT ve BT kesimlerdir. Şekil 3.1.3' de AT-kesilmiş bir quartz gösterilmektedir. Buna göre AT kesilmiş bir quartz kristal kalınlığı y eksenine doğrultusunda uzunluğu x eksenine doğrultusunda olan ve uzunluğu doğrultusunda (x-ekseni) saat ibrelerinin tersi yönünde $35^{\circ} 15'$ döndürülmüş bir tabakayı temsil eder.



Şekil 3.1.3 AT- Kesilmiş Quartz Kristal Tabaka.

Kalınlık shear modda titreşen bir QCM' de oluşan akustik dalgalar kristal yüzeyine dik doğrultuda hareket eden dalgalardır. Bu dalgalar piezoelektrik kaynak teriminin uzaysal olarak değiştiği tek bölge olan elektrotlar arasındaki bölgede oluşur. Bu esnada kristaldaki parçacık yer değiştirmesi U_x aşağıdaki gibi verilir.

$$U_x(y,t) = (Ae^{iky} + Be^{-iky})e^{i\omega t} \quad (3.1.6)$$

Burada A ve B sabitler, $\omega=2\pi f$ olup açısal frekans, k da dalga sayısıdır. Kalınlık shear modda titreşen bir QCM'in rezonans frekansı quartz malzemenin boyutları ve metal elektrotların kütlesi (kalınlığı) tarafından belirlenir. Böyle bir QCM için rezonans şartı shear dalganın quartz içindeki tam bir gidiş-gelişinde katettiği yoldan belirlenebilir. Şöyle ki dalganın üst elektrottan başladığı düşünülürse, dalga quartz kristali geçtikten sonra alt yüzeyden $\phi = \pi$ kadarlık bir faz kaymasıyla yansır. Yansıyan dalga üst yüzeye ulaştığında tekrar bir $\phi = \pi$ kadarlık faz kayması ile yansıyacaktır. Böylece dalganın tam bir gidiş-gelişte gördüğü toplam faz kayması 2ϕ dir. Toplam faz kayması 2π 'nin tam katlarına eşit ise gelen ve yansıyan dalgalar yapıcı girişim oluşturur ve bu durumda kristal rezonanstadır. Bu durum,

$$h_s = \frac{N\lambda}{2} \quad \text{veya} \quad (3.1.7a)$$

$$f = \frac{Nv_s}{2h_s} \quad (3.1.7b)$$

ile verilen rezonans şartına götürür. Burada h_s quartz malzemenin kalınlığı, N tamsayı, λ shear dalganın dalgaboyu v_s de shear dalganın quartz içindeki hızı olup aşağıdaki gibi verilir,

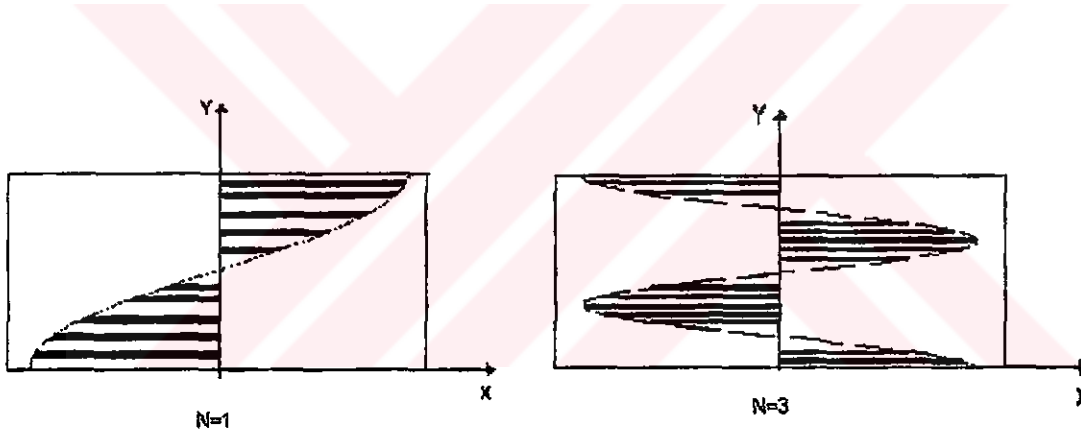
$$v_s = \left(\frac{\mu_q}{\rho_q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.7c)$$

Burada μ_q quartzın shear stiffnessi ρ_q da kütle yoğunluğudur. Denklem (3.1.7a) açıkça göstermektedir ki quartz malzemenin kalınlığı akustik dalga boyunun yarısının tam katlarına eşit olduğu zaman rezonansa ulaşılır. Quartz yüzeyindeki metal elektrotlardan dolayı elektrotlu bölge ile elektrotsuz bölgeler farklı rezonans frekansına sahiptirler. Elektrotlu bölgedeki rezonans frekansı elektrotsuz bölgedeki rezonans frekansından küçüktür. Metal elektrotların kalınlığı arttıkça bölgeler arasındaki frekans farkı da artar. Denklem (3.1.7b)'den görülebileceği gibi bir QCM N'in değişik değerlerine karşılık gelen birçok rezonans durumuna uyarılabilir. Ancak çalışmalar göstermektedir ki yüzey elektrotları ile ancak N'in tek sayı değerlerine karşılık gelen rezonans durumları elde edilebilir[87]. Bu rezonans koşulu, QCM için rezonans durumunda parçacık yer değiştirmesinin dağılımını hesaplama imkanı verir. QCM havada veya vakumda

çalıştırıldığında , kristalin yüzeyleri gerilme tensöründen (stresden) bağımsız sınır olarak düşünülebilir. Bu kristalin alt ve üst yüzeylerinde $\partial U_x / \partial y = 0$ olmasını gerektirir. Bu sınır koşulunun Denklem (3.1.6)'ya uygulanması ile kristaldeki shear yerdeğiştirme profili

$$U_x(y,t) = U_{x0} \cos(k_N y) e^{i\omega t} \quad (3.1.8)$$

olarak elde edilir. Burada U_{x0} yüzeydeki parçacık yer değiştirme genliği, $k = N\pi/h$ dir. Denklem (3.1.8) maximumları kristal yüzeyinde olan bir duran shear dalgalar ailesini temsil eder. Aşağıdaki şekilde temel ($N=1$) ve üçüncü ($N=3$) harmonikler için mod şekillenimleri gösterilmiştir. Bu modlara kalınlık shear mod denmesinin nedeni shear yer değiştirmesinin quartzın kalınlığı boyunca değişmesinden dolayıdır.



Şekil 3.1.4 $N=1$ ve $N=3$ için shear dalgalar [88]

3.1.2.2 QCM sensörlerin kütle duyarlılığı

Kristal yüzeyinde parçacık yer değiştirmesinin maksimum olması kalınlık makaslama modu yüzeydeki kütle değişimlerine oldukça duyarlı yapar. Kristal yüzeyine kuvvetli olarak bağlanan kütle kristal yüzeyi ile birlikte senkronize olarak hareket eder. Kristal yüzeyindeki kütle artışı QCM'in rezonans frekansını etkiler. Yüzeydeki kütle artışı ile rezonans frekansındaki değişim arasındaki ilişki Rayleigh [89] prensibinden çıkarılabilir. Rayleigh prensibi ; mekanik bir sistemde rezonansın maksimum kinetik

enerji U_k nın maksimum potansiyel enerji U_p tarafından tam olarak dengelendiği frekansta elde edilebileceğini söyler. Bu prensip enerjinin kinetik ve potansiyel enerji arasında periyodik olarak değişmesinin bir sonucudur. Kalınlık shear modda titreşen sonsuz kalınlıklı olduğu varsayılan bir quartz kristalde parçacık yer değiştirmesi tüm kristal yüzeyi boyunca düzgün olarak dağılmıştır [90]. Dolayısı ile sonsuz kalınlıklı quartz için resonatörün kütle duyarlılığı tüm aygıt yüzeyi boyunca sabit olarak kabul edilebilir. Sonsuz kalınlıklı quartz kristal yüzeyinde ideal (yeterince ince ve kuvvetli bağlanmış) bir kütle tabakasının yığılması sistemin kinetik enerjisini artırırken potansiyel enerjisinde bir değişikliğe neden olmaz. Rayleigh hipotezi kristal yüzeyinde bir kütle yığılması olduğu zaman rezonans frekansının, kinetik ve potansiyel enerjiyi dengelemek için değişmesini gerektirir. Kalınlık shear modda titreşen bir rezonatörde maksimum kinetik enerji yoğunluğu (Birim yüzey alanı başına enerji) parçacık hızının maksimum yer değiştirmenin ise sıfır olduğu anda elde edilir. Bu enerji

$$U_k = \frac{\omega^2}{2} \left(\rho_s U_{x0}^2 + \rho_q \int_0^h |U_x(y)|^2 dy \right) \quad (3.1.9)$$

ile verilir. Burada, ρ_s kütle tabakasının birim alanının alansal kütle yoğunluğu (kütle/alan) ρ_q da quartz malzemenin birim alanının hacimsel kütle yoğunluğudur (kütle/hacim). Denklem (3.1.8) denklem (3.1.9)'da yerine yazılırsa maksimum kinetik

$$U_k = \frac{\omega^2 U_{x0}^2}{2} \left(\rho_s + \frac{\rho_q h_s}{2} \right) \quad (3.1.10)$$

enerji yoğunluğu U_k

olarak bulunur.

Kalınlık shear modda titreşen bir QCM'de maksimum potansiyel enerji yoğunluğu U_p parçacık hızının sıfır yer değiştirmenin ise maksimum olduğu anda elde edilir. Bu maksimum potansiyel enerji yoğunluğu U_p

$$U_p = \frac{\mu_q k^2 U_{x0}^2}{2} \int_0^h \sin^2(ky) dy \quad (3.1.11a)$$

$$= \frac{\mu_q k^2 U_{x0}^2 h_s}{4} \quad (3.1.11b)$$

olarak verilir. Denklem (3.1.10) ve denklem (3.1.11) rezonans frekansı ω ile yüzey kütle yoğunluğu ρ_s arasındaki ilişkiyi verir. Bu ilişki

$$\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = 1 + \frac{2\rho_s}{h_s \rho_q} \quad (3.1.12)$$

olarak bulunur. Burada $\omega_0 = (N\pi/h_s)(\mu_q/\rho_q)^{1/2}$ olup rezonatörün yüzeyinde kütle yığılmasının olmadığı durumdaki rezonans frekansıdır. $\rho_s \ll h_s \rho_q$ olması durumunda Denklem (3.1.12)

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\rho_s}{h_s \rho_q} \quad (3.1.13)$$

ifadesine indirgenir. Denklem (3.1.13) göstermektedir ki rezonans frekansındaki değişim oranı kütle tabakasının neden olduğu kütle değişim oranına eşittir. Bu ifade, ilave olunan kütle tabakasının quartzın kütlesine oranı %2 den küçük olduğu sürece geçerlidir [84]. Denklem (3.1.10), (3.1.11) ve (3.1.13)'in birleştirilmesiyle QCM'in rezonans frekansındaki değişim Δf

$$\Delta f = -C_f \Delta m \quad (3.1.14)$$

olarak bulunur. Burada Δm ilave olunan kütle C_f de sonsuz kalınlıktaki quartz tabakanın sensitivity (duyarlık) sabiti olup

$$C_f = \frac{f_0^2}{\rho_q N_{AT}} \quad (3.1.15)$$

ile verilir. Burada f_0 quartzın rezonans frekansı, ρ_q quartzın yoğunluğu (2649 kg/m^3), N_{AT} de AT kesilmiş quartz için frekans sabitidir ve quartzın kalınlığı doğrultusunda yayılan shear horizontal dalgalar için dalga hızının yarısına eşittir [91,92]. Kalınlığı rezonans dalga boyunun yarısına eşit quartz kristal için N_{AT} ,

$$N_{AT} = \frac{v}{2} = 2h_s f_0 \quad (3.1.16)$$

ile verilir. Denklem (3.1.14) Sauerbrey denklemi olarak bilinir.

Ancak, sonlu kalınlıklı quartz kristal için parçacık yer değiştirmesi genliği QCM sensör yüzeyi boyunca düzgün bir dağılım göstermez. Bu durumda QCM'in kütle duyarlılığı diferansiyel kütle duyarlılığının integrali alınarak bulunur. Sonlu kalınlıklı quartz kristal için, yüzeydeki kütle ilavesi sonucu rezonans frekansındaki değişim Δf ,

$$\Delta f = -S_f(r, \theta) \Delta m(r, \theta) \quad (3.1.17)$$

ile verilir. Burada $\Delta m(r, \theta)$ ilave edilen kütle, $S_f(r, \theta)$ 'da kütle duyarlık fonksiyonu olup,

$$S_f(r, \theta) = \frac{|U_I(r, \theta)|^2}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} r |U_I(r, \theta)|^2 d\theta dr} C_f \quad (3.1.18)$$

ile verilir. Denklem (3.1.18)'de $U_I(r, \theta)$ QCM yüzeyi boyunca parçacık yer değiştirme fonksiyonudur. Temel rezonans frekansında çalıştırılan QCM için parçacık yer değiştirme genliği değişmezdir (invariant). Dolayısıyla temel rezonans frekansında çalıştırılan QCM için duyarlık (sensitivity) fonksiyonu $S_f(r)$,

$$S_f = \frac{|U_I(r)|^2}{2\pi \int_0^{\infty} r |U_I(r)|^2 dr} C_f \quad (3.1.19)$$

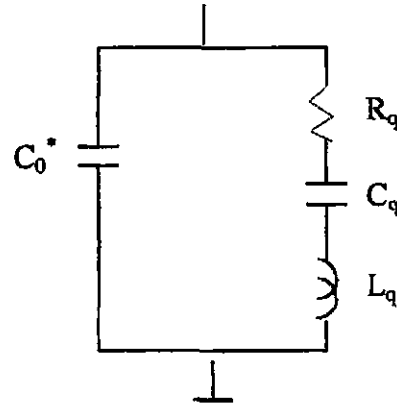
ile verilir. Burada C_f Sauerbrey sensitivite sabiti olup birimi $\text{Hz}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ dir. Denklem (3.1.19)'dan görülebileceği gibi duyarlık (sensitivity) fonksiyonu radyal doğrultudaki parçacık yer değiştirme genliği ile orantılıdır. Parçacık yer değiştirme genliği radyal doğrultu boyunca değiştiği için duyarlık fonksiyonu da QCM' in yüzeyinde radyal doğrultu boyunca değişecektir.

Bazı pratik uygulamalar için, QCM sensör yüzeyindeki özellikle bir bölgedeki yüzey alan kütle duyarlığının bilinmesi gerekir. Mesela kütle ilavesinin çok küçük olması veya QCM yüzeyinin belli bir bölgesine ince film kaplanması durumunda yüzey alan kütle duyarlığının bilinmesi gerekir. Bu durumda yüzey alan kütle duyarlığı diferansiyel kütle duyarlığının ilgililenen alan üzerinden integrali alınarak bulunur. Yüzey alan kütle duyarlığı S_{alan} aşağıdaki gibi verilir.

$$S_{alan} = \int_{r_1}^{r_2} S_f 2\pi r dr \quad (3.1.20)$$

3.1.2.3 QCM sensörlerin elektriksel karakterizasyonu

QCM resonatörün elektriksel özelliklerini inceleyebilmek için mekanik olarak titreşim hareketi yapan sistemin elektriksel bir eşdeğer devre ile temsil edilmesi gerekir. Rezonans durumunda QCM basit bir eşdeğer devre ile temsil edilir. Böylece değişik kritik frekanslar tanımlanabilir ve bu frekanslar eşdeğer devre modeli üzerinde analiz edilebilir. Dedeksiyon esnasında bu frekanslardaki değişimler ölçülerek eşdeğer devre elemanlarına bağlanabilir. Butterworth [93] elektromanyetik bir alan tarafından sürülmek suretiyle titreşim hareketleri yapan QCM sensörün elektriksel bir eşdeğer devre ile temsil edilebileceğini göstermiştir. Van-Dyke [94] eşdeğer devre elemanlarını piezoelektrik kristal resonatörün fiziksel özelliklerine bağlamıştır. Rezonans durumundaki QCM sensörü temsil eden bu elektriksel eşdeğer devre aynı zamanda Butterworth-Van Dyke eşdeğer devresi olarak ta bilinir. Rezonans halindeki QCM sensörü temsil eden elektriksel eşdeğer devre Şekil 3.1.5 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.5 Rezonans durumundaki QCM Rezonatörün Elektriksel Eşdeğer Devresi [81]

Eşdeğer devredeki her bir devre elemanı quartz malzemenin bir fiziksel özelliğine karşılık gelir. Eşdeğer devredeki L_q induktansı quartzın kütleini, C_q kapasitesi quartzın titreşimlere uyumluluğunu, R_q direnci de iç sirtünmelerden dolayı kaybolan enerjiyi temsil eder. Paralel durumdaki C_0^* kapasitörü ise ölçüm sisteminden kaynaklanan parazitik kapasite C_p ile quartzın, iki metal elektrot arasında bulunmasından kaynaklanan statik C_0 kapasitesinden oluşur. Rezonans durumunda sistemin elektriksel davranışını mekanik kol, rezonanstan uzak durumlarda da elektriksel koldaki C_0 kapasitesi belirler. Eşdeğer devre elemanları L_q , R_q , C_q ve C_0^* aşağıdaki gibi verilir [95].

$$C_0^* = \frac{\epsilon_{22} A}{h_s} \quad (3.1.21a)$$

$$C_q = \frac{8K^2 C_0}{(N\pi)^2} \quad (3.1.21b)$$

$$L_q = \frac{1}{\omega_s^2 C_q} \quad (3.1.21c)$$

$$R_q = \frac{\eta_q}{\mu_q C_q} \quad (3.1.21d)$$

Burada A metal elektrotların yüzey alanını, h_s quartz malzemenin kalınlığını, K quartzın elektromekanik koplaj katsayısını, ϵ_{22} quartzın dielektrik geçirgenliğini, μ_q quartzın

makaslama sertliğini, η_q da quartzın etkin vizkositesini göstermektedir. $\omega_s = 2\pi f_s$ olup f_s rezonatörün seri rezonans frekansıdır.

Genelde QCM sensörün elektriksel karakteristiği eşdeğer devrenin Admitansından belirlenir. Şekil 3.1.5'deki devrenin toplam admitansı $Y(\omega)$

$$Y(\omega) = j\omega C_0^* + \frac{1}{Z_m} \quad (3.1.22)$$

Burada Z_m mekanik kolun empedansı olup

$$Z_m = R_q + j\omega L_q + \frac{1}{j\omega C_q} \quad (3.1.23)$$

ile verilir. Seri rezonans frekansı f_s mekaniksel kolun reaktansının sıfır olduğu andaki frekans olarak tanımlanır. Buna göre f_s

$$f_s = \frac{1}{2\pi(L_q C_q)^{1/2}} \quad (3.1.24)$$

olarak bulunur. Paralel rezonans frekansı eşdeğer devrenin toplam reaktansının (mekanik kolun reaktansı ile elektriksel kolun reaktansının toplamı) sıfır olduğu andaki frekans olarak tanımlanır. Bu tanıma dayanarak paralel rezonans frekansı f_p

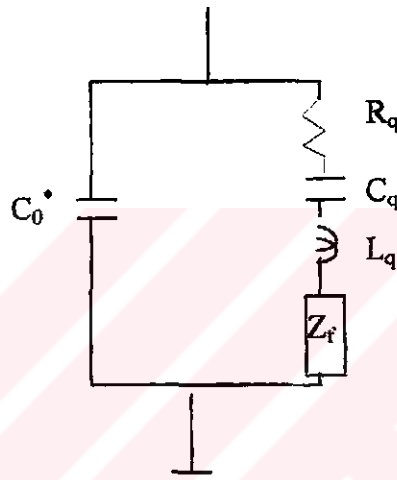
$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{L_q} \left(\frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_0^*} \right) \right]^{1/2} \quad (3.1.25)$$

olarak bulunur.

3.1.2.4 Algılayıcı malzeme kaplı QCM sensörlerin elektriksel karakterizasyonu

QCM sensörün kimyasal sensör uygulamalarında aygıt yüzeyinin kimyasal olarak duyarlı ve seçici bir filmle kaplanması gerekir. Dolayısı ile yüzeyi polimer film kaplanmış rezonatörün elektriksel davranışının anlaşılması gerekir. QCM sensörün

yüzeyi bir filmle kaplandığı zaman, Quartz malzemede mekaniksel yer değiştirme ile elektriksel potansiyel arasındaki kuplaj yüzeydeki filmin QCM sensör ile mekaniksel etkileşmesine neden olur. Bu da QCM sensörün elektriksel karakteristiğini (Admitans ve Empedansı) etkiler. Bu durumda süreklilik modeli yardımıyla QCM' in elektriksel karakteristiği yüzeydeki filmin özelliklerine bağlanabilir [96] ve rezonans durumunda yüzeyi film kaplı QCM sensörü temsil eden bir eşdeğer devre elde edilebilir [95,97]. QCM sensörün yüzeyi bir filmle kaplandığı zaman aygıtın mekaniksel empedansı artar. Bu yüzeyi kaplanmamış QCM'in eşdeğer devresine bir Z_f empedansının eklenmesini gerektirir. Bu durumda yeni eşdeğer devre Şekil 3.1.6 deki gibi olacaktır.



Şekil 3.1.6. Yüzeyi İnce bir Filmle Kaplanmış QCM Rezonatörün Elektriksel Eşdeğer Devresi [81]

Eşdeğer devreden görüleceği gibi , yüzeydeki filmin neden olduğu Z_f empedansı

$$Z_f = \frac{N\pi}{4K^2 \omega_s C_0} \left(\frac{Z_s}{Z_q} \right) \quad (3.1.26)$$

ile verilir[93]. Burada $Z_q = (\rho_q \mu_q)^{1/2}$ olup quartzın shear dalga karakteristik empedansı, Z_s ise rezonatör yüzeyinde makaslama mekaniksel empedansı olup aşağıdaki gibi verilir [98]

$$Z_s = \frac{T_{xy}}{v_x} \Big|_{y=0} \quad (3.1.27)$$

Burada T_{xy} QCM sensör yüzeyi tarafından filme uygulanan sinusal shear gerilme tensörü, v_x de x-doğrultusundaki yüzey shear parçacık hızıdır. Shear mekanik empedansı Z_s kompleks bir niceliktir. Bunun gerçel kısmı olan $\text{Re}(Z_s)$ yüzey gerilme tensörünün yüzey parçacık hızı ile aynı fazda olan bileşenine, sanal kısmı olan $\text{Im}(Z_s)$ ise gerilme tensörünün parçacık hızı ile 90° 'lik faz farkına sahip bileşenine karşılık gelir ve yüzeydeki mekanik enerji depolanmasını temsil eder.

Yüzeydeki filmin neden olduğu Z_f empedansı en genel halde $Z_f = R_f + j\omega L_f$ olarak yazılabilir. Denklem (3.1.26) kullanılarak hareketssel empedans elemanları olan R_f ve L_f yüzey mekaniksel empedansının bileşenlerine bağlanabilir [99]. R_f , L_f ile yüzey mekaniksel empedansının bileşenleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$R_f = \frac{N\pi}{4K^2\omega_s C_0} \frac{\text{Re}(Z_s)}{Z_q} \quad (3.1.28a)$$

$$L_f = \frac{N\pi}{4K^2\omega_s^2 C_0} \frac{\text{Im}(Z_s)}{Z_q} \quad (3.1.28b)$$

Yüzeyi ince bir filmle kaplı QCM sensör artık Şekil 3.1.7' deki gibi bir eşdeğer devre ile gösterilebilir. Yüzeyi kaplanmış rezonatörde elektriksel admitans kaplanmamış rezonatör ile aynıdır ve Denklem (3.1.23) ile verilir. Ancak hareketssel empedans Z_m

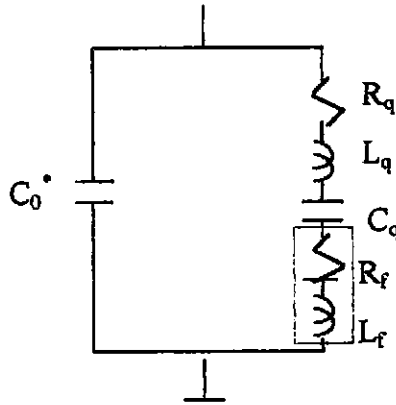
$$Z_m = (R_q + R_f) + j\omega(L_q + L_f) + \frac{1}{j\omega C_q} \quad (3.1.29)$$

olarak değişmiştir. Denklem (3.1.29)'dan görülebileceği gibi hareketssel indüktans L_f 'nin ilavesi ile devrenin seri rezonans frekansı kaplanmamış duruma göre değişmiştir. Seri rezonans frekansındaki bu Δf_s kayması

$$\Delta f_s = -\frac{L_f f_s}{2(L_q + L_f)} \approx -\frac{L_f f_s}{2L_q} \quad (3.1.30)$$

ile verilir. İdeal bir kütle tabakası sonsuz ince kalınlıklı ve içindeki faz kayması ϕ 'nin $\pi/2$ den çok küçük olduğu tabaka olarak tanımlanır. Yüzeydeki filmin ideal bir kütle tabakası olması durumunda; ideal kütle tabakasını harmonik olarak ivmelendirmek için gerekli yüzey gerilme tensörü T_{xy}

$$T_{xy} = \rho_s v_{x0} = j\omega \rho_s v_{x0} \quad (3.1.31)$$



Şekil 3.1.7 Yüzeyi İnce Film Kaplı QCM sensörün Elektriksel Eşdeğer Devresi. [81]

ile verilir [99]. Burada ρ_s kütle tabakasının neden olduğu alansal kütle yoğunluğu ($\rho_s = \rho h$, ρ filmin yoğunluğu, h 'de kalınlığıdır.) v_{x0} ise yüzey parçacık hızıdır. Denklem (3.1.27)'den kütle tabakası ile ilgili yüzey mekaniksel impedansı $Z_s^{küt.tab}$,

$$Z_s^{küt.tab} = \frac{T_{xy}}{v_x} \Big|_{y=0} = j\omega \rho_s \quad (3.1.32)$$

ile verilir. Denklem (3.1.26) ile Denklem (3.1.32)'nin birleştirilmesiyle ideal bir kütle tabakasının neden olduğu empedans elemanları (L_f , R_f) bulunabilir. İdeal bir kütle tabakası için

$$L_f = \frac{2\omega_s L_q \rho_s}{N\pi \sqrt{\mu_q \rho_q}} = \frac{N\pi \rho_s}{4K^2 \omega_s C_0 \sqrt{\mu_q \rho_q}} \quad (3.1.33a)$$

$$R_f = 0 \quad (3.1.33b)$$

olarak bulunur. Denklem (3.1.33a ve 3.1.33b)'den görülebileceği gibi ideal bir kütle tabakası enerji depolanmasına neden olurken enerji kaybına neden olmaz ($R_f = 0$). Bunun nedeni rezonatör yüzeyi ile uyumlu olarak hareket eden ideal kütle tabakasının kinetik enerjisinden dolayıdır. İdeal bir kütle tabakasının neden olduğu frekans kayması denklem (3.1.30) dan çıkarılabilir. Bu frekans kayması Δf_s ,

$$\Delta f_s \approx -\frac{L_f f_s}{2L_q} = -\frac{2f_s^2 \rho_s}{N \sqrt{\mu_q \rho_q}} \quad (3.1.34)$$

olarak bulunur. Denklem (3.1.34)'un Sauerbrey denklemi olduğuna dikkat edilmelidir. Bu sonuç gösteriyorki Sauerbrey ifadesi ideal durum için geçerlidir. QCM sensörün yüzeyine bir kütle tabakası ilave edildiği zaman aygıtın elektriksel karakteristiği L_f 'den dolayı değişir.

3.2. Algılayıcı Malzeme –Gaz etkileşmeleri

Algılama mekanizmasına bakmaksızın bir akustik dalga sensörün cevap karakteristiği analyte molekülleri ile arayüzey olarak kullanılan algılayıcı madde arasındaki etkileşmenin doğasına bağlıdır. Bu etkileşmelerin türünün bilinmesi arayüzey maddesi tasarımı için önemlidir. Algılayıcı madde ile analyte molekülleri arasındaki etkileşmeler fiziksel ve kimyasal etkileşmeler olmak üzere iki grupta toplanabilir.

Adsorpsiyon durumunda bu etkileşmelere sırasıyla fiziksel adsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyon denir.

Fiziksel adsorpsiyon çok küçük aktivasyon enerjisine sahiptir ve nispeten zayıf olan van der Waals etkileşmelerini kapsar. Dolayısıyla küçük enerjili bir prosestir (5-12 kCal/mol, 0.217-0.521 eV). Fiziksel adsorpsiyon genelde oda sıcaklığında geri dönüşümlüdür (reversibledir) fakat seçici değildir.

Kimyasal adsorpsiyon genelde 10 kCal/mol'den daha fazla enerjilerle, elektron yoğunluğunun yeniden dağılımıyla ve 25-100 kCal/mol (1.086-4.346 eV) ve daha büyük enerjili kimyasal bağların oluşumuyla karakterize edilirler. Kimyasal adsorpsiyon durumunda analite molekülleri arasındaki kimyasal bağlar bozularak arayüzey olarak kullanılan algılayıcı madde ile reaksiyona girebilir ve yeni bağlar oluşabilir. Böylece arayüzey olarak kullanılan algılayıcı madde orijinal özelliğini kaybeder. Fiziksel ve Kimyasal adsorpsiyon birbirlerinden aşağıdaki özellikler sayesinde ayırdedilebilirler [100].

1. Fiziksel adsorpsiyon durumunda adsorpsiyon ısısı küçük, kimyasal adsorpsiyon durumunda ise büyüktür.

2. Fiziksel adsorpsiyon durumunda adsorplanan moleküller yüzeyden kolayca uzaklaştırılabilir, kimyasal adsorpsiyon durumunda bu çok zordur.

3. Fiziksel adsorpsiyon durumunda, uygun sıcaklık ve basınç koşullarında kalınlığı adsorplanan moleküllerin çapının bir kaç katı olan bir adsorplanmış tabaka oluşur. Kimyasal adsorpsiyon durumunda ise monomoleküler bir tabaka oluşur.

Absorpsiyon durumunda, adsorplanan madde ile arayüzey olarak kullanılan algılayıcı maddenin moleküller seviyede karışması söz konusudur. Adsorpsiyon durumunda adsorplanan moleküller arayüzey maddesi içerisinde çözünürler. Diğer bir deyişle adsorpsiyon etkileşmeleri adsorpsiyonda olduğu gibi sadece, yüzeydeki aktif adsorpsiyon merkezleri ile sınırlı değildir.

Denge durumunda soğurulmuş madde miktarına o maddenin çözünürlüğü denir. Arayüzey olarak kullanılan maddenin bir polimer olması durumunda, difüze eden maddenin çözünürlüğü polimerdeki zincirler arasındaki ve zincir-difüze olan madde arasındaki etkileşmelerce belirlenir.

BÖLÜM 4. GAZ SENSÖRÜ YAPILARI VE YÖNTEM

Bu bölümde, deneysel çalışmalar esnasında kullanılan malzemeler (Quartz, ftalosyanin vd.) ve metodlar tanıtılacaktır. IDT sensörler ve quartz kristal rezonatör ölçümlerinde kullanılan deneysel düzenekler tanıtılacaktır.

4.1. Gaz Sensörleri

Bu bölümde deneysel çalışmalar esnasında kullanılan gaz sensörlerinin imalat metodları ve sensörler için kaplamada kullanılan kimyasal kaplama malzemeleri hakkında bilgi verilecektir.

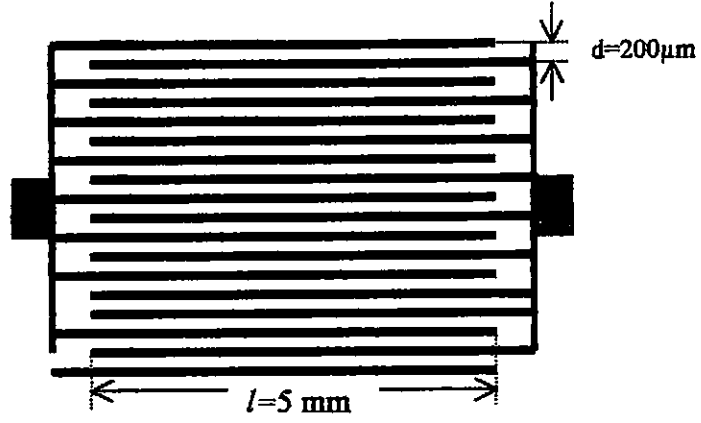
4.1.1. IDT (Interdijital Transduser) Sensörler

Ftalosyanin ince filmlerinin çeşitli gaz/gazlar varlığında iletkenliklerindeki değişim interdijital transduserler yardımıyla ölçülmüştür. İletkenlik değişimi ölçümlerinde kullanılan interdijital transduser'in yapısı ve boyutları Şekil 4.1.1'de gösterilmiştir. Interdijital transduser'lar TÜBİTAK-MAM kimya bölümünden sağlanmıştır [81].

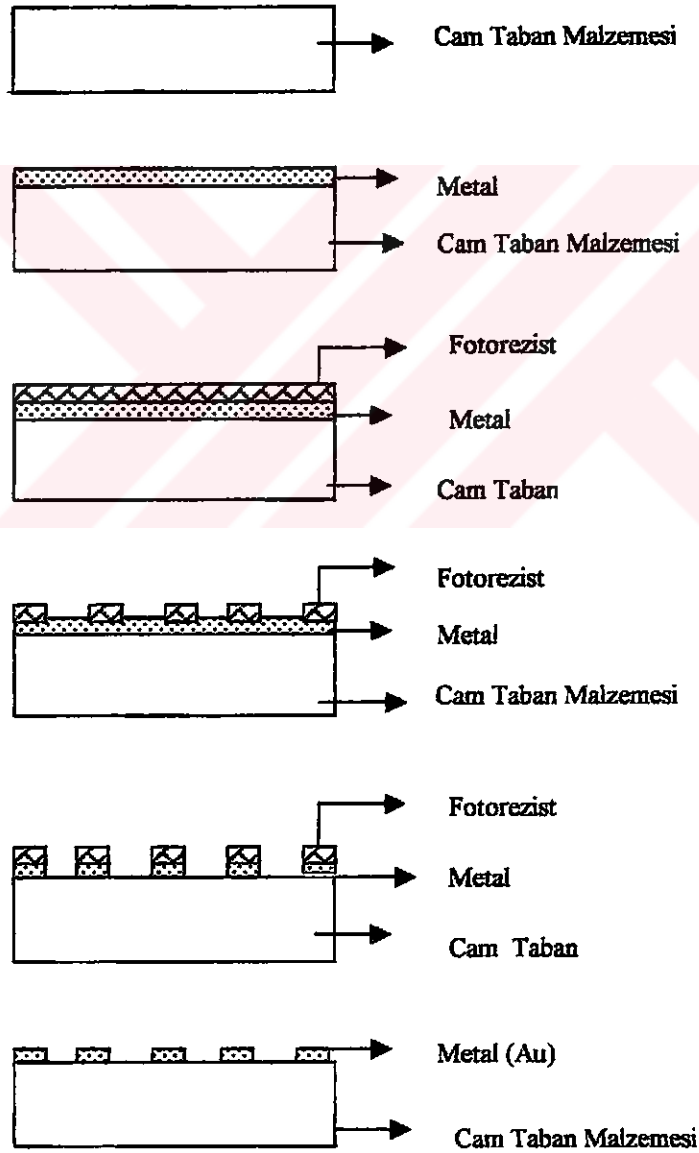
İnterdijital transduserlerin imalinde kullanılan metot aşağıdaki işlemleri kapsamaktadır.

- a.) Taban malzemesinin temizlenmesi
- b.) Metal Kaplama
- c.) Fotoresist Kaplama
- d.) Pozlama ve Banyo
- e.) Metal Aşındırma

Bu işlemlerin toz ve yağ filtreleri ile donatılmış bir "temiz oda" da yapılması gerekir. İnterdijital transduserlerin laboratuvarında oluşturulma işlem basamakları Şekil 4.1.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1.1. İnterdijital Transduser Yapısı ve Boyutları



Şekil 4.1.2 İnterdijital Elektrot yapısının eldesindeki işlem basamakları [81]

4.1.2. QCM Sensörler

Çalışmalarımız sırasında her iki yüzeyinde altın elektrotlar bulunan 10 Mhz'lik quartz kristalleri kullanılmıştır. Bu malzemeler Dage Corp. ve ICM Corp. isimli firmalardan satın alınmıştır.

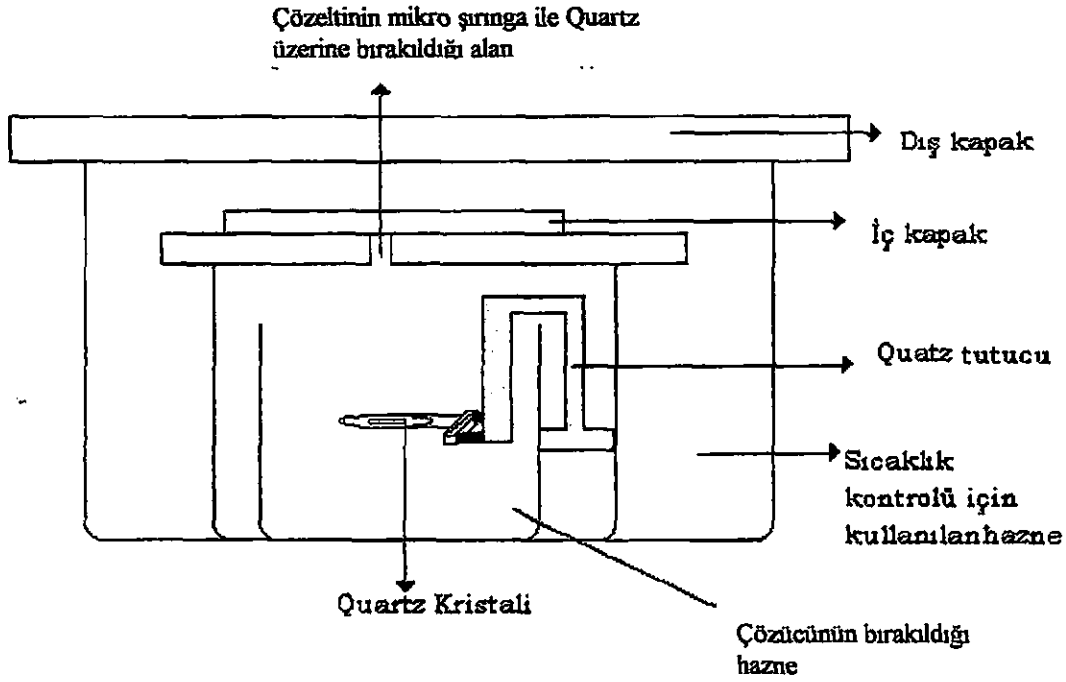
4.1.3. Sensörlerin kaplanması

Kimyasal ara yüzeyli gaz sensör teknolojisi açısından kaplama yöntemlerinin oldukça önemli bir yere sahip olduğunu daha önceki bölümlerde belirtmiştik. Özellikle elde edilen filmin yüzey üzerindeki homojenliğinin ve kalınlığının duyarlılığın en yüksek olduğu noktada olması istenen bir durumdur. Bu sebeple kaplanmak istenen molekülün yapısı da dikkate alınarak uygun kaplama teknikleri seçilmeli veya geliştirilmelidir.

Bu tez çalışmamız bünyesinde kaplamak istediğimiz molekülün özellikleri de dikkate alınarak iki tip kaplama tekniği denenmiştir. Bunlardan birincisi smearing olarak bilinen teknik ve ikincisi ise TÜBİTAK MAM Kimya bölümünü bünyesinde geliştirilen ve jetsprey olarak isimlendirilen tekniktir.

4.1.3.1.Smearing

Oldukça popüler bir kaplama yöntemi olması sebebiyle çalışmalarımız sırasında kullanılmıştır. Bu yöntemle yapılan kaplamalarda kaplamanın yapıldığı ortamın elde edilecek filme etkisinin oldukça yüksek olacağı aşikar olduğundan bu etkiyi en aza indirmek için basit bir düzenek hazırlanmıştır. Bu düzenek yardımıyla film hazırlama işleminin çevreye ve filmi hazırlayan kişiye bağlılığı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.1.3 ' de bu düzenek görülmektedir



Şekil 4.1.3 Smearing kaplama sistemi

Kaplamalar -10°C kaplama ortamı sıcaklığında elde edilmiştir. Kaplama malzemesi olarak kullanılacak kimyasal önce 10^{-4} grama hassas terazide tartılmış ve istenilen yoğunlukta çözelti elde etmek için gerektiği kadar kloroform eklenmiştir.

Oda sıcaklığında kaplama yapılmaya çalışılmış fakat kloroform hızlı buharlaşması nedeniyle homojen bir film elde edilememiştir. Bu nedenle kaplamalar düşük sıcaklıklarda yapılmıştır. Kloroform içinde çözülmüş olan çözeltiden $5\mu\text{l}$ alınmış ve yatay durumda tutucuya tutturulmuş quartz üzerine bırakılmıştır. Bir miktar kloroform da solvent haznesine bırakılmıştır. Bu amaçla ortam solvent buharına doyurulmaya çalışılmış ve quartz üzerinden buharlaşarak ayrılan kloroformun yavaş buharlaşması sağlanmıştır. Böylece homojen bir film elde edilmeye çalışılmıştır. Kaplama işlemi oda sıcaklığının altında yani -10°C yapılmak istendiğinden sıcaklık kontrolü haznesine buz, tuz karışımı konarak ortam sıcaklığının -10°C olması sağlanmış ve bu değer termometre ile kontrol edilmiştir.

IDT sensörü ve 46 nolu QCM sensörü bu yöntemle üretilmiştir.

4.1.3.2. Airbrush (Jetsprey)

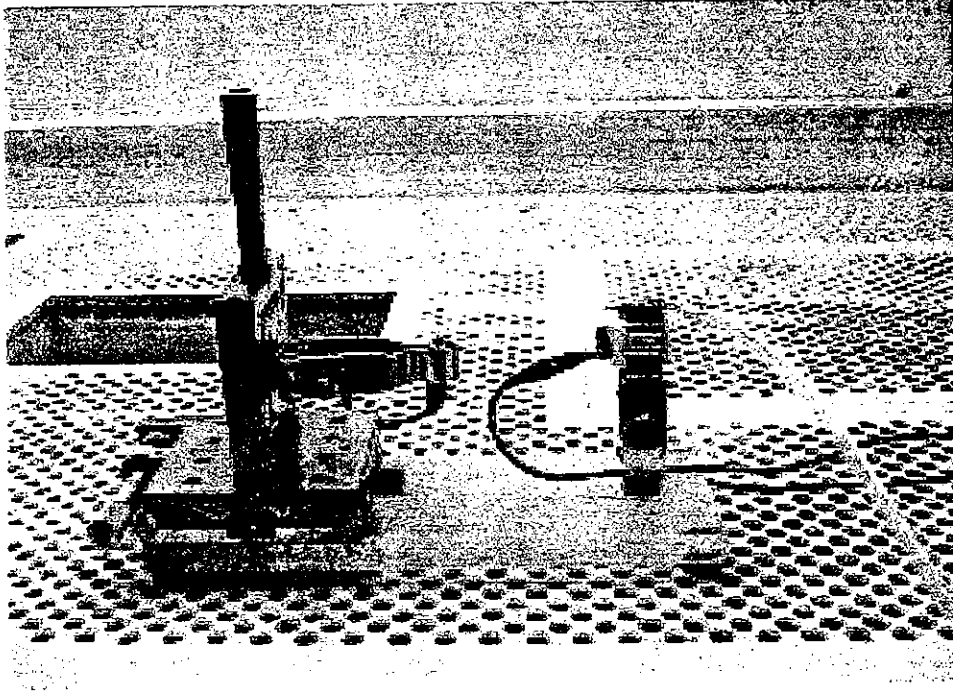
Oldukça yeni olan bu metot kimyasal ara yüzeyli gaz sensör teknolojisine önemli katkıları bulunan bir yöntemdir. Elde edilen film kalitesinin yükseldiği, kişiye bağlılığı tamamen ortadan kalktığı bu yöntem, Tübingen Üniversitesi Sensör Araştırma Merkezi enstitüsü ile eş zamanlı olarak geliştirilmiştir [101].

Smearing yönteminden elde edilen sonuçlar doğrultusunda kaplama parametrelerinden film kalınlığı ve homojenliğinin algılamaya etkisi kesin olarak gözlenmiş ve bu parametre üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışma sonucu jetsprey olarak isimlendirdiğimiz yöntem Tübitak MAM Kimya Bölümü bünyesinde Gaz Sensör Prototipi Geliştirme Projesi [102] kapsamında geliştirilmiştir.

Bu sistemin çalışması şu şekilde açıklanabilir. Belli bir basıncla gelen hava çok basit bir sistemle kaplanmak istenen sıvının havaya karışması sağlanır. Mikrometreler yardımıyla quartz yüzeyine hedeflenerek gönderilir. Bu işlem sırasında sistem kaplama yapılan yüzey ile kimyasal çözeltinin gönderildiği boru arasına yüksek gerilim uygulama imkanı da vermektedir. Sistem mikrometreler ile kontrol edildiğinden kaplanmak istenen yüzey dışına kimyasal gönderilmemektedir. Bir başka avantajı ise film yüzeyde homojen olarak oluştuğu için film kalınlığı yüzeye gönderilen madde miktarı ile orantılı olmakta bu durum ise film kalınlığının kontrolünü kolaylaştırmaktadır.

Şekil 4.1.4 ' de Jetsprey kaplama sisteminin fotoğrafı görülmektedir.

12, 24 ve 36 no'lu QCM sensörleri Jetsprey kaplama sistemi kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 4.1.4. Jetsprey (airbrush) kaplama sistemi

Bu metod, özellikle kimyasal ara yüzeyli gaz sensör teknolojisi açısından algılayıcı filmlerin hazırlanmasında belli bir standardizasyona ulaşılmış olması elde edilen sensörlerin her birinin ayrı ayrı kalibrasyonunun yapılması gibi problemleri de ortadan kaldırmış bulunmaktadır. Bu sebeple sensör fabrikasyonu açısından da bir yenilik olarak görülebilir.

Tübitak MAM bünyesinde geliştirilen bu yöntemle [102] farklı gerilimlerde ve kalınlıkta kaplama yapılmıştır. Tablo 4.1.1 ' de 10, 20, 30 μl hacimlerinde 4000 volt gerilim uygulanarak jet sprej metodu ile hazırlanan kaplanmış quartzların listesi görülmektedir. (Tablo içerisindeki rakamlardan birinci sutun uygulanan gerilimi ikinci ve üçüncü sutunlar quartz kodlarını göstermektedir.)

Tablo 4.1.1. 10, 20, 30 μ hacimlerinde 4000 volt gerilim uygulanarak jet sprej metodu ile hazırlanan kaplanmış quartzların listesi

Volt/ mikrolitre	10 μ	20 μ	30 μ
4000	12	24	36

4.1.4. Kimyasal kaplama malzemeleri

Sensör özelliği gösteren birçok moleküller kimyasal algılayıcı film olarak kullanılabilir. Özellikle kaplama malzemesinin kaplanabilir ve gaz molekülleri ile etkileşimleri sonunda kimyasal bir bozulmaya uğramadan kalabilmesi, ölçülmek istenen gaz molekülleri ortamdan uzaklaştırıldığı zaman tekrar eski haline gelebilmesi(reversible) olması aranan bir durumdur. Bununla birlikte belli gazlara duyarlı ve bunun dışındaki gazlardan pek fazla etkilenmemesi önemli parametreler arasındadır.

Yukarıda anlatılan özellikleri gösterebilen moleküller algılayıcı film olarak kullanılabilir. Bu moleküller sıklıkla kimyasal sensör çalışmalarında kullanılan büyük moleküllü kimyasallardan olan ftalosiyaninler ve oksimlerdir.

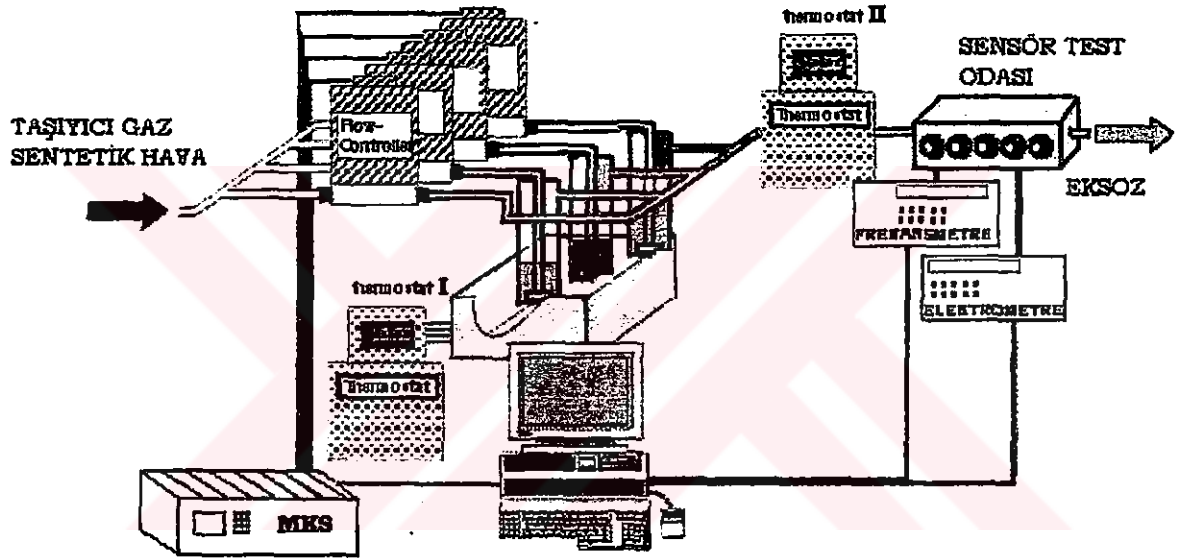
Çalışmalarımız sırasında kaplama malzemeleri olarak Cu^{++} (Bakır kompleksi) olarak bilinen oksim (IDT ve 12, 24 ve 36 nolu QCM sensörler için) molekülü ve ftalosiyanin (46 no'lu QCM sensör için) kullanılmıştır.

4.2. Gaz Ölçüm Sistemi

Bu bölümde Quartz Kristali ve inter dijital Transduser üzerine yapılan ince film çalışmalarının gaz algılama özelliklerinin test edildiği deneysel düzenek tanıtılacak, Sistemin Kalibrasyon edilme çalışmaları hakkında bilgi verilecektir.

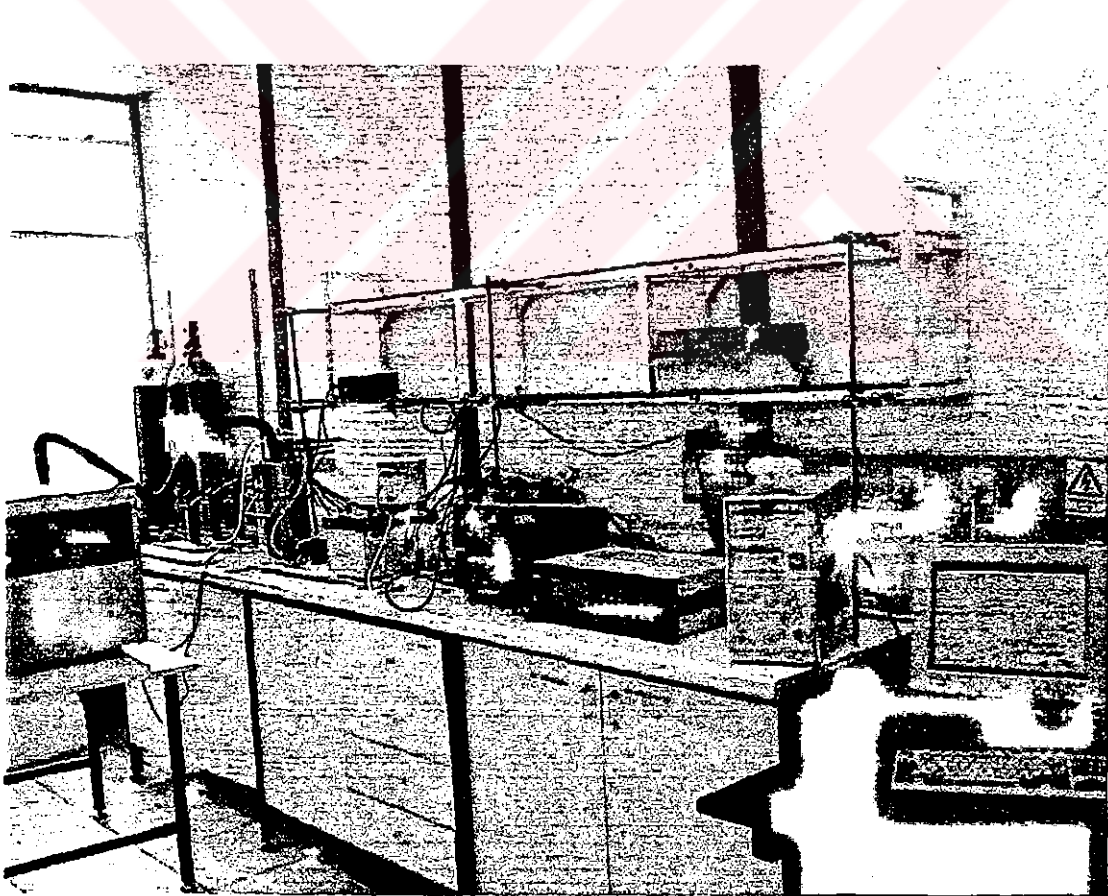
4.2.1. Ölçüm sistemi

Sensör çalışmalarında ince film hazırlama yöntemlerinin yanında hiç şüphesiz önemli bir parametre de ölçüm sistemidir. Elde edilen sonuçların güvenilirliği ölçüm sisteminin hassasiyeti ve çevre faktörlerinden en az etkilenirliği ile yakından ilişkilidir. Özellikle çok geniş bir skalada ölçüm yapılmak istendiği zaman hiç şüphesiz belli konsantrasyonda gazları elde etmek bile problem oluşturmaktadır. Bu ve benzeri problemleri en aza indirmek için oluşturduğumuz ölçüm sisteminin şeması şekil 4.2.1' de görülmektedir.



Şekil 4.2.1. Ölçüm Sisteminin Şeması

Şekilde de görüldüğü gibi taşıyıcı gaz olarak sentetik kuru hava kullanılmıştır. Dört ayrı kanala ayrılan hava flow kontrollerden belli debilerle geçirilmektedir. Bu kanallardan üç tanesi gazların sıvı hallerinin bulunduğu cam kaplara bir tanesi de bu kaplardan çıkan kanallarla birleşmektedir. Son kanalda ise istenilen konsantrasyonda gaz elde edilmiş olmaktadır. Ancak bir numaralı termostat ile cam kapların örneğin CCl_4 için -10°C ye ve diğer gazlar için ise başka eksi değerlere indirilmesi gerekmektedir [88]. Çünkü istenilen konsantrasyon ancak bu şekilde sağlanabilmektedir. Bu sebeple son hale gelmiş ölçülmek istenen gaz numunesi ölçüm esnasında; ölçüm ortamının ölçmeye etkisini kaldırmak için iki numaralı termostat gaz numune sıcaklığını oda sıcaklığına ulaştırmaktadır. İki numaralı termostat dan çıkan gaz numunesi ölçülmek üzere sensör test odasına girer ve burada iki adet quartz kristal ve bir adet IDT tipi üç adet sensör tarafından ölçümü yapılarak eksoz vasıtası ile ortam dışına atılır. Eğer eksoz gazı çevreye zararlı ise dekontamine edilerek dış ortama bırakılır.



Şekil 4.2.2. Ölçüm sistemi ölçüm anında (MAM Kimya Bölümü)

4.2.2. Ölçüm sisteminin otomasyonu

Gaz konsantrasyon değerlerini ve gaz karışımlarını kontrol etmek ve sensör sinyal datalarını ölçmek için, IEEE 448 kartını kullanan bilgisayar kontrollü bir ölçüm ve otomasyon sistemi kurulmuştur. Sensör test odasından alınan sinyaller Keithley 617 elektrometre ve Keithley 776 frekans sayıcı ile ölçülmüştür.

Ölçüm sisteminde gazların debisinin kontrolünde MKS Instrument kullanılmıştır. Sistemde gaz akışının kontrolü ve sensör sinyal datalarının ölçülmesi için EK A ' da verilen program Pascal programlama lisansı kullanılarak yazılmıştır. Bu program ile sistem aynı anda dört gaz flow kontrol valfini kontrol edebilecek şekilde düzenlenmiş ve taşıyıcı gaz olarak kullanılan kuru hava dışında üç farklı gazı karıştıracak kapasiteye sahip hale getirilmiştir. Program kullandığı IEEE 488 kartı vasıtasıyla MKS Instrument ile gaz akışını kontrol ederken, eş zamanlı olarak Keithley 617 elektrometre ile bir IDT sensörü akım değerini ve Keithley 776 frekansmetre ile iki QCM sensör frekans değerini ölçebilmektedir. Pascal ile yazılan bu program kullanılarak bir defada verilen gaz veya gaz karışımları için değişik konsantrasyonlarla arka arkaya belirli periyotlar da 7 adet ölçüm ayarlanabilen süreler için yapılabilmektedir. Bir ölçüm, bir yıkama ve bir de gaz geçiş aşamasını içermektedir.

4.2.3. Ölçüm sisteminin kalibrasyonu

Sensör çalışmaları sırasında hiç şüphesiz önemli bir unsur da ölçüm sisteminin kalibrasyonudur. Elde edilen verilerin değerlendirilebilmesi ve sonuçların anlamlı olabilmesi için ölçüm sistemlerinde ölçülmek üzere sensör üzerine gönderilen gazın kaç ppm olduğunun bilinmesi gerekir. Bu bilgiye göre de sensör cevabı değerlendirilebilir. Bu sebeple tez çalışmamız sırasında ölçümleri gerçekleştirdiğimiz ölçüm sistemi çalışmalarımız sırasında kalibre edilmiştir. Bu işlem için için TÜBİTAK-MAM-EAL laboratuvarlarında bulunan mass kütle spektrometresinden faydalanılmıştır.

Özellikle sensör çalışmalarında kullanılan gazların çoğu ölçülmek istenen gazın sıvısından elde edilebilmektedir. Bu işlem için sıcaklığa bağlı olarak bazı sıvıların atmosfer basıncı altında kaç ppm olabileceğini söyleyebilen Antoine kanunundan faydalanılmaktadır. Antoine kanununa göre sıcaklığa bağlı olarak sıvının buhar basıncı [88];

$$\text{Log } P = A - \frac{B}{(t + C)} \quad \text{dır}$$

Burada A,B,C ilgilenilen sıvı için sabitlerdir t ise santigrad derece cinsinden gaz sıvısının bulunduğu ortamın sıcaklığıdır [88] . P ise torr biriminden ilgilenilen gazın kısmi basıncını ifade eder.

Buhar basıncının birimi paskal birimine çevrilip 10 ile çarpılması ise ilgilenilen gaz için ortamda kaç ppm olduğu bulunmuş olmaktadır.

Kalibrasyon işlemi için 5000 ve 10000 ppm CCl_4 gazı hazırlanmış ve bu gaz için mass spektrometresi alınmıştır. Daha sonra Antoine formülünden faydalanılarak ölçüm sisteminden ayrı ayrı olmak üzere 500, 5000, ve 10000 ppm geçtiğini kabul ettiğimiz hallerde çok uzun süreli gaz akışını bir tüp içinden geçirilerek örnekler alınmış ve bu örneklerinde mass spektrometreleri alınmıştır. Bu değerler tablo 4.2.1' de görülmektedir.

Tablo 4.2.1. Mass spektrometresinden alınan sonuçlar

	Şahit Madde 5000 ppm	Şahit Madde 10000 ppm	Sistemden alınan numune 500 ppm	Sistemden alınan numune 5000 ppm	Sistemden alınan numune 10000 ppm
Mass kütle Spektrometresinden alınan cevap	52 493 348 birim	103 699 464 birim	4 020 227 birim	48 493 348 birim	98 280 592 birim

Tablo 4.2.1' den de anlaşılacağı üzere 5000 ve 10000 ppm lik şahit maddeden alınan mass cevabı ile sistemden alınan numuneler den alınan mass cevapları arasından doğru

orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Ancak 500 ppm için elde edilen değerlerde görülen sapma düşük konsantrasyonlarda çalışmanın zorluğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıda anlatıldığı gibi kalibre edilen ölçüm sistemi ile Antoine kanununa göre hesapları yapılabilen toluen, metanol, CCl_4 ve CHCl_3 gibi solventlerin ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.



BÖLÜM 5. SENSÖR SİNYAL DATALARININ HAZIRLANMASI, ALGORİTMA KURMASI VE DEĞERLENDİRMESİ

5.1. Sensör Sinyal Datalarının Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan sensör sinyal dataları bölüm 4' te izah edilen ölçüm sistemi ve pascal programlama lisansı ile yazılan program kullanılarak ölçülmüştür. QCM sensörleri ile ölçülen frekans değerlerinden 0 ppm gaz konsantrasyonu frekansına göre sapma değeri ve IDT sensörleri ile ölçülen akım değerlerinden 0 ppm gaz konsantrasyonu akımına göre sapma değeri bulunmuştur.

Frekans sapma değeri;

$$\Delta f = f - f_0 \quad \text{Hz} \quad (5.1.1)$$

Akım sapma değeri;

$$\Delta I = I - I_0 \quad \text{A} \quad (5.1.2)$$

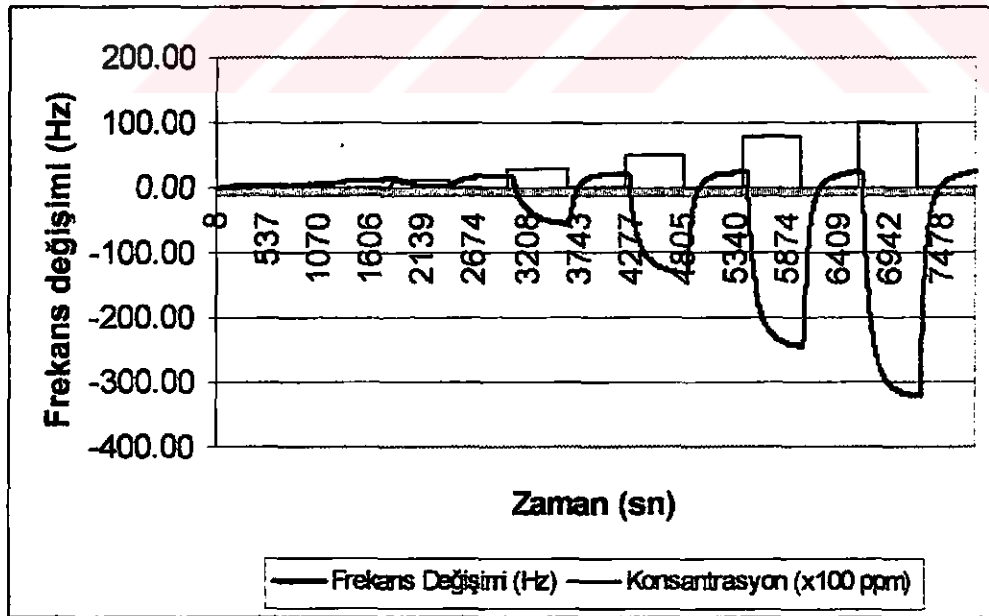
Burada, f_0 (= 10 MHz) 0 ppm gaz konsantrasyonundaki frekans değeri, f ölçülen konsantrasyon için frekans değeri, I_0 0 ppm gaz konsantrasyonundaki akım değeri, I ölçülen konsantrasyon için akım değeridir.

Ölçülen gazların ve gaz karışımlarının 12, 24, 36, 46 no'lu QCM ve IDT sensörleri ile elde edilen Δf ve ΔI değerleri aşağıdaki kısımlarda verilmiştir.

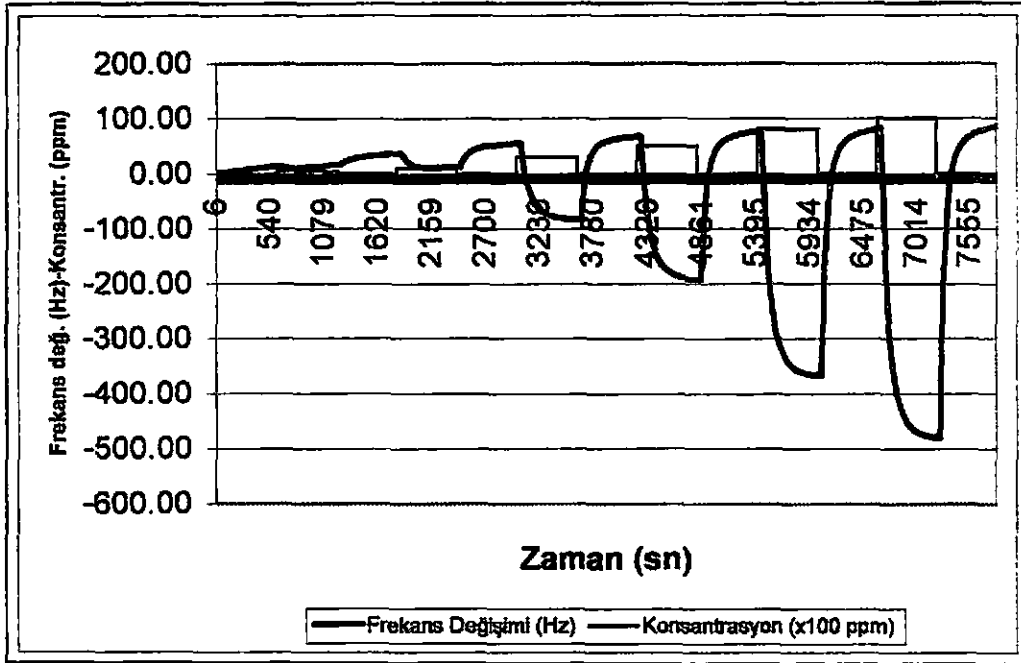
5.1.1. CCl₄ gazı ölçüm dataları

Bölüm 4' te izah edilen 12, 24, 36, 46 no'lu QCM sensörleri ile CCl₄ gazı için ölçülen Δf değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Bu şekillerde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika CCl₄ gaz akışı süresi olacak

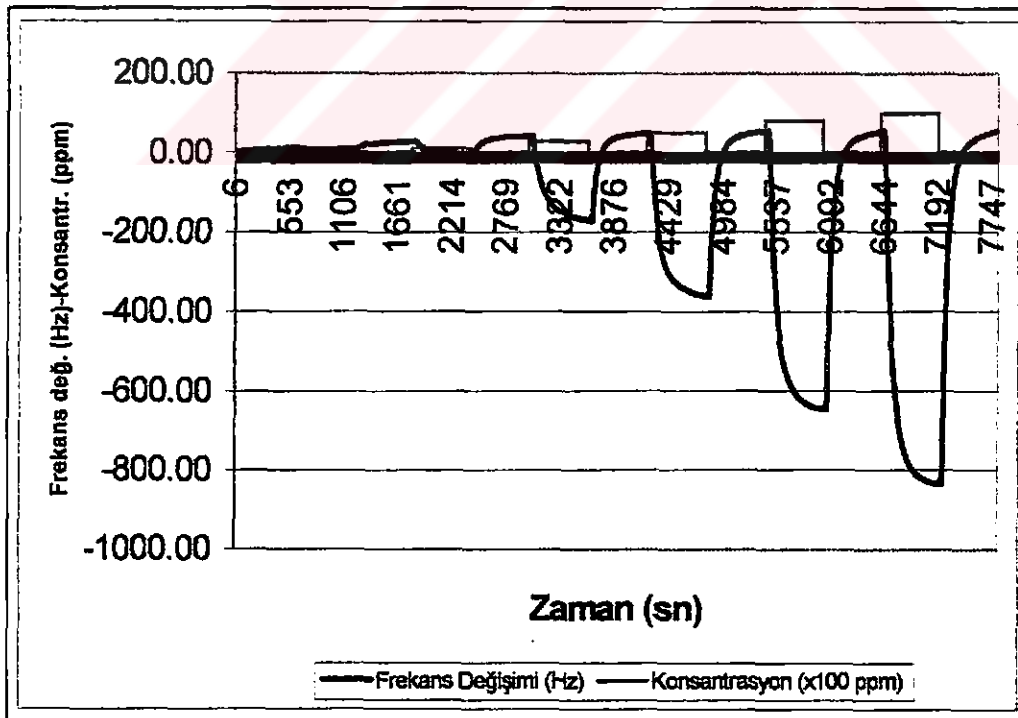
şekilde 6 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ölçüm periyotlarında sırası ile 500, 1000, 3000, 5000, 8000 ve 10000 ppm CCl_4 gazı geçirilmiştir. Farklı konsantrasyon geçişleri arasında sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi CCl_4 gazı geçişlerinde QCM sensörlerin verdikleri cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre CCl_4 gazı için 12, 24, 36 ve 46 nolu QCM sensörlerde yaklaşık 250-300 saniye kadardır. Sensörlerde özellikle 12 nolu QCM sensörde 500 ppm CCl_4 gazı için sensör cevapları belirgin değildir ve bu durum şekil 5.1.12 de net bir şekilde 12 nolu sensör için oldukça net bir şekilde görülmektedir. 500 ppm için görülen bu belirsiz cevap, sensörlerin özellikle 12 nolu QCM sensörün CCl_4 gazına karşı düşük konsantrasyonlar için zayıf duyarlılığı olduğunu göstermektedir. Kuru hava ile yıkama sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde başlangıç değerine dönmektedir, bununla birlikte 12, 24 ve 36 nolu sensörlerde belirgin bir kayma vardır. 46 nolu QCM sensör kaplama malzemesinin ftalosiyanın ve 12, 24, ve 36 nolu sensörler için kaplama malzemesinin oksim olduğu düşünülse, CCl_4 gazı için ftalosiyanın kaplama malzemesinin daha kararlı sonuçlar verdiği görülmektedir.



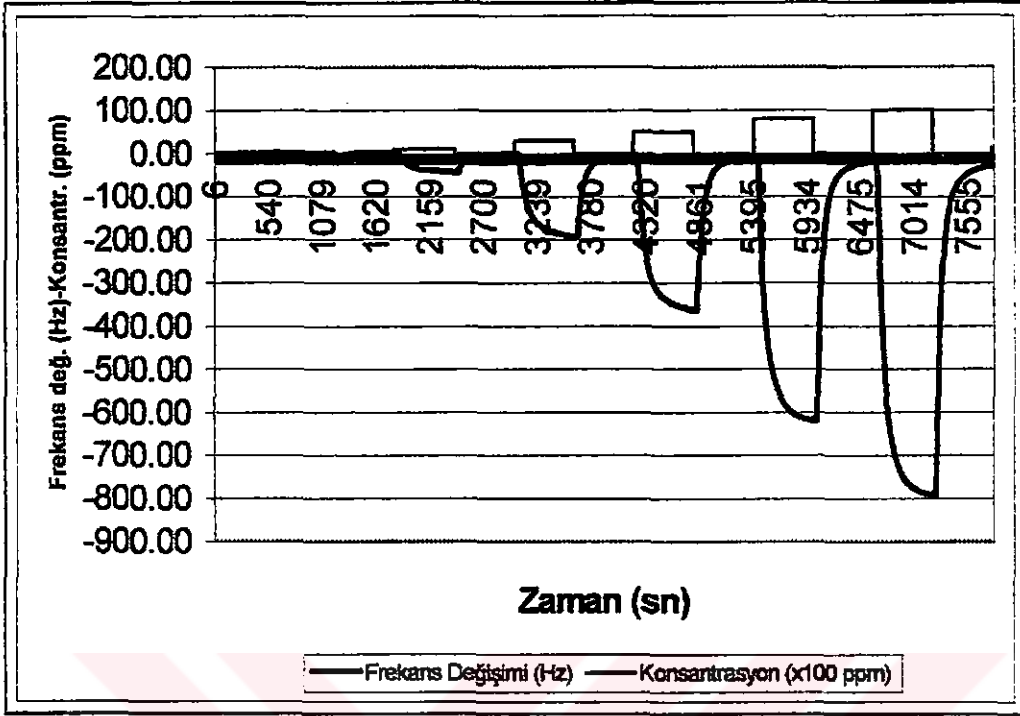
Şekil 5.1.1. 12 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ölçülen Δf değerleri



Şekil 5.1.2. 24 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ölçülen Δf değerleri



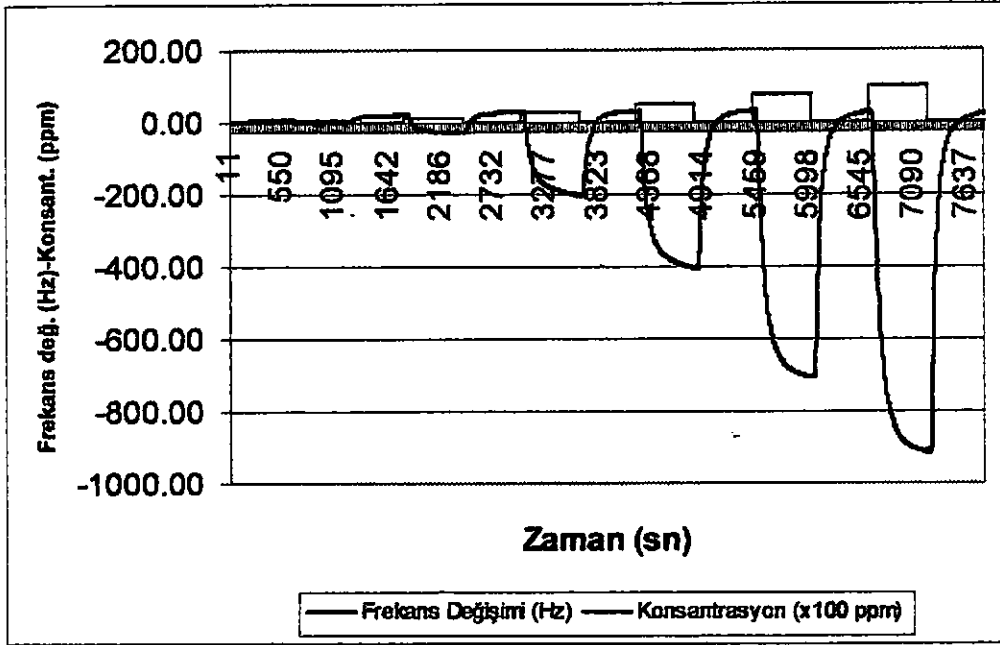
Şekil 5.1.3. 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ölçülen Δf değerleri



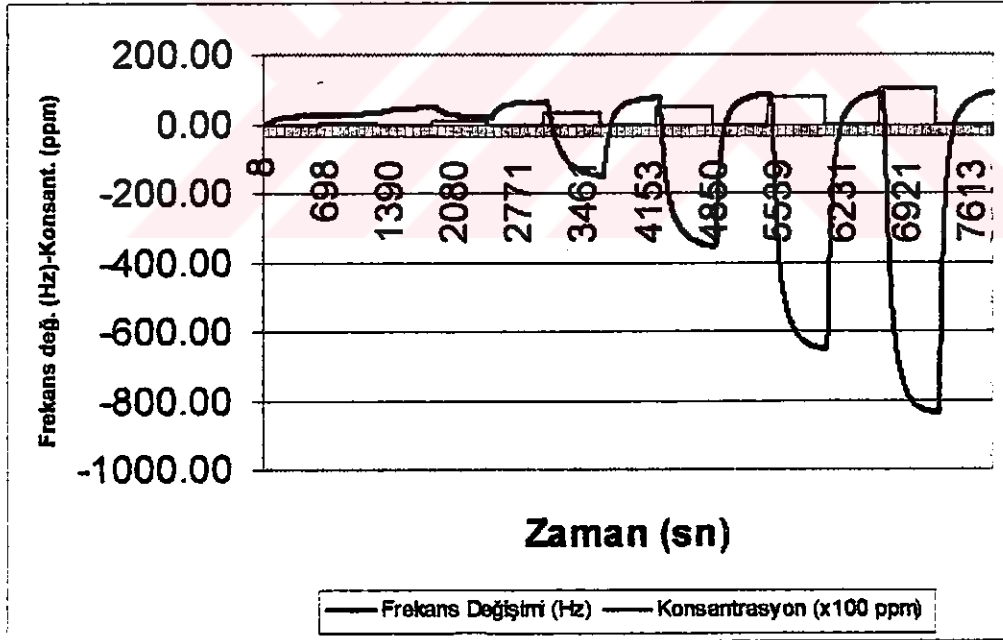
şekil 5.1.4. 46 no'lu QCM sensörü ile CCl₄ gazı için ölçülen Δf değerleri

36 nolu QCM sensörü ile CCl₄ gazı için ilk ölçümden 15 gün, 1 ay , 6 ay ve 8 ay sonra ölçülen Δf değerleri sırasıyla şekil 5.1.5 , 5.1.6, 5.1.7 ve 5.1.8' de verilmiştir.

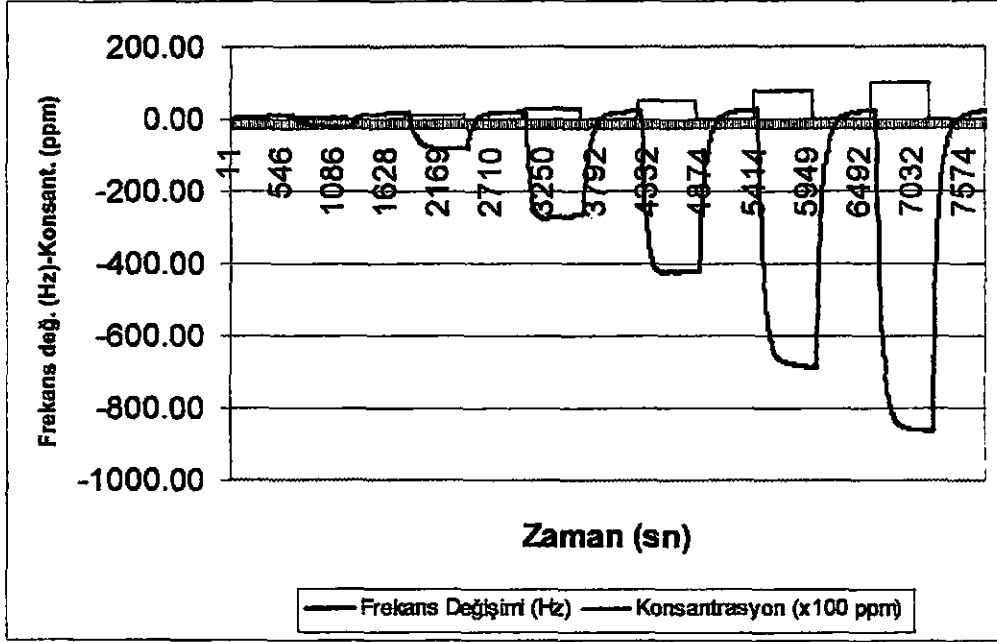
Yaşlanma ölçümleri adını verebileceğimiz bu ölçümlerde, 36 nolu QCM sensörü ile CCl₄ gazı için yapılan ilk ölçüm ile aynı konsantrasyonlar kullanılmış ve ölçüm periyotları aynı şekilde düzenlenmiştir. Değişik zamanlarda yapılan ölçümlerde, şekillerde de görüldüğü gibi frekans farklarında sapmalar bulunmaktadır.



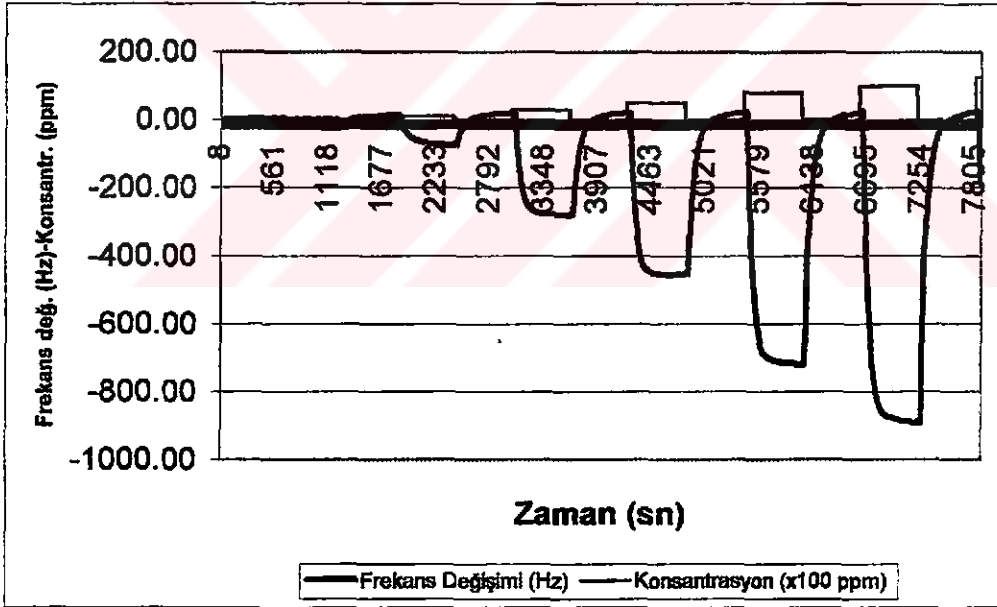
Şekil 5.1.5 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 15 gün sonra ölçülen Δf değerleri



Şekil 5.1.6 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 1 ay sonra ölçülen Δf değerleri



Şekil 5.1.7 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 6 ay sonra ölçülen Δf değerleri

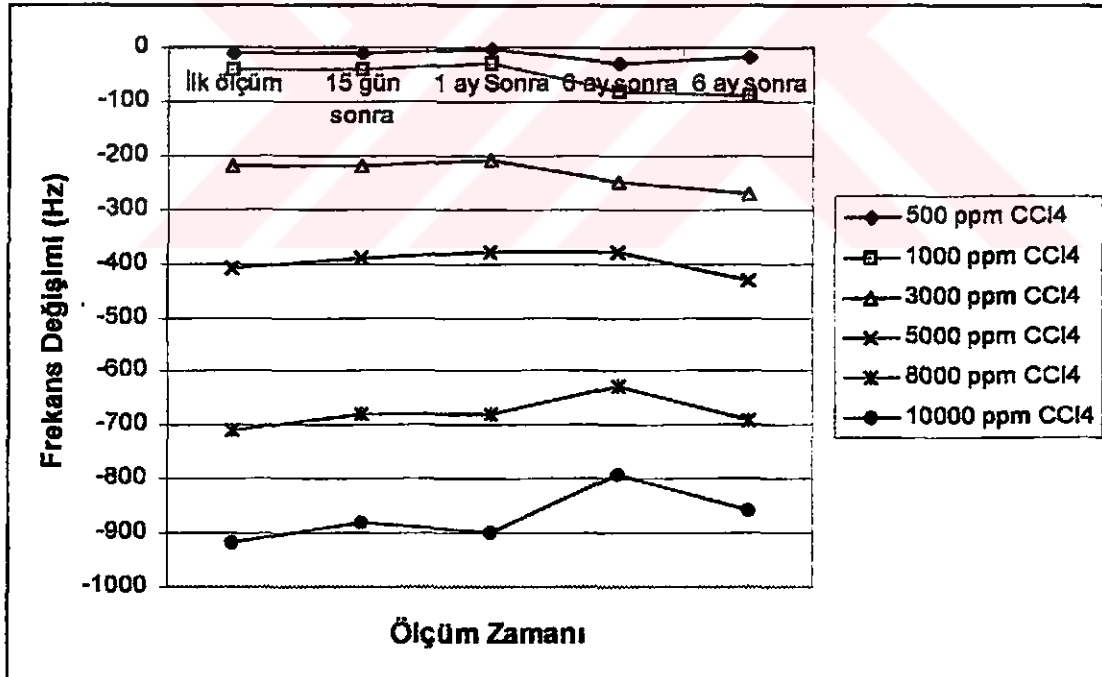


Şekil 5.1.8 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 8 ay sonra ölçülen Δf değerleri

Yaşlanma ölçümlerindeki sapmaları net bir şekilde görebilmek için 36 nolu QCM sensörün farklı zamanlardaki frekans değişimlerinin kararlı hal değerleri tablo 5.1.1 'de ve şekil 5.1.9 'da verilmiştir. Tablo ve şekilden de görüldüğü gibi özellikle küçük konsantrasyonlarda önemli sapmalar görülmektedir.

Tablo 5.1.1 36 no'lu QCM sensörün farklı zamanlardaki frekans değişimlerinin kararlı hal değerleri ve sapma oranları

Konsantrasyon (ppm)	Kararlı hal frekans değişimi (Hz)					Kararlı hal frekans değişimi sapması (%)			
	İlk ölçüm	15 gün sonra	1 ay Sonra	6 ay sonra	8 ay sonra	15 gün sonra	1 ay Sonra	6 ay sonra	8 ay sonra
500	-10	-10	-2	-30	-20	0	80	200	100
1000	-40	-40	-30	-80	-90	0	25	100	125
3000	-220	-220	-210	-250	-270	0	5	14	23
5000	-410	-390	-380	-380	-430	5	7	7	5
8000	-710	-680	-680	-630	-690	4	4	11	3
10000	-920	-880	-900	-790	-860	4	2	14	7
Ortalama						2	21	58	44

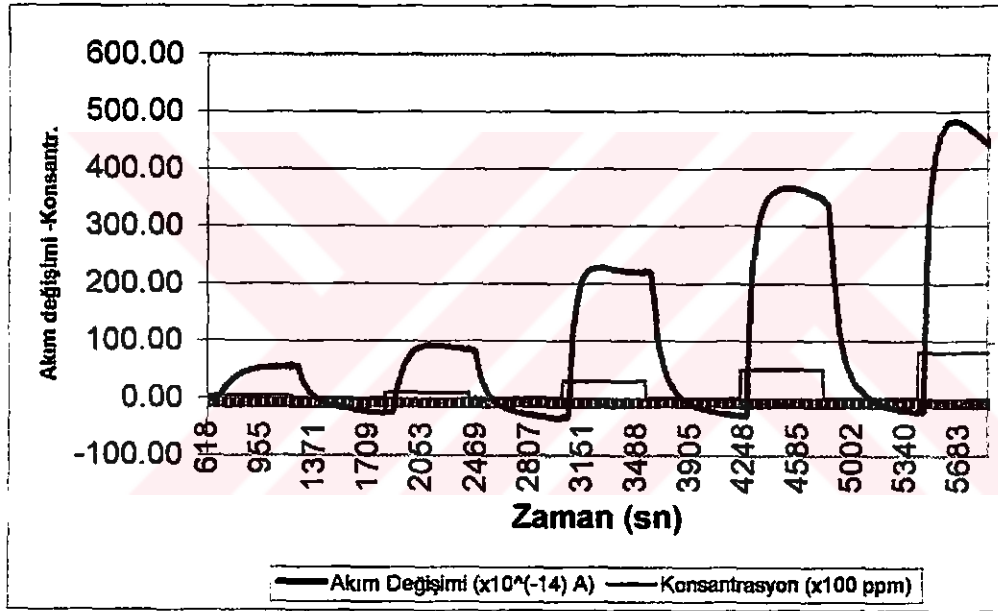


Şekil 5.1.9 36 no'lu QCM sensörün farklı zamanlardaki frekans değişimlerinin kararlı hal değerleri

Bölüm 4'te izah edilen IDT sensörü ile CCl_4 gazı için ölçülen ΔI değerleri şekil 5.1.10 'da verilmiştir.

IDT sensörü ile CCl_4 gazı için yapılan ölçümlerde, QCM sensörleri ile CCl_4 gazı için yapılan ölçümler ile aynı konsantrasyonlar (10000 ppm hariç) kullanılmış ve ölçüm periyotları aynı şekilde düzenlenmiştir.

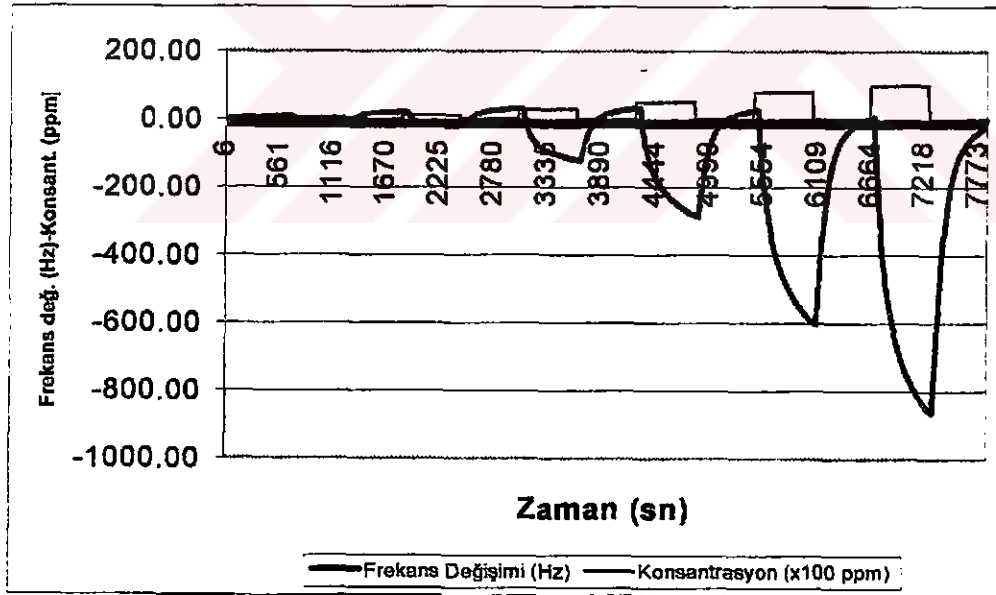
Şekil 5.1.10 'da görüldüğü gibi CCl_4 gazı geçişlerinde IDT sensörünün verdiği cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre CCl_4 gazı için IDT sensöründe yaklaşık 150-200 saniye kadardır.



Şekil 5.1.10 IDT sensörü ile CCl_4 gazı için ölçülen ΔI değerleri

5.1.2. CHCl_3 gazı ölçüm dataları

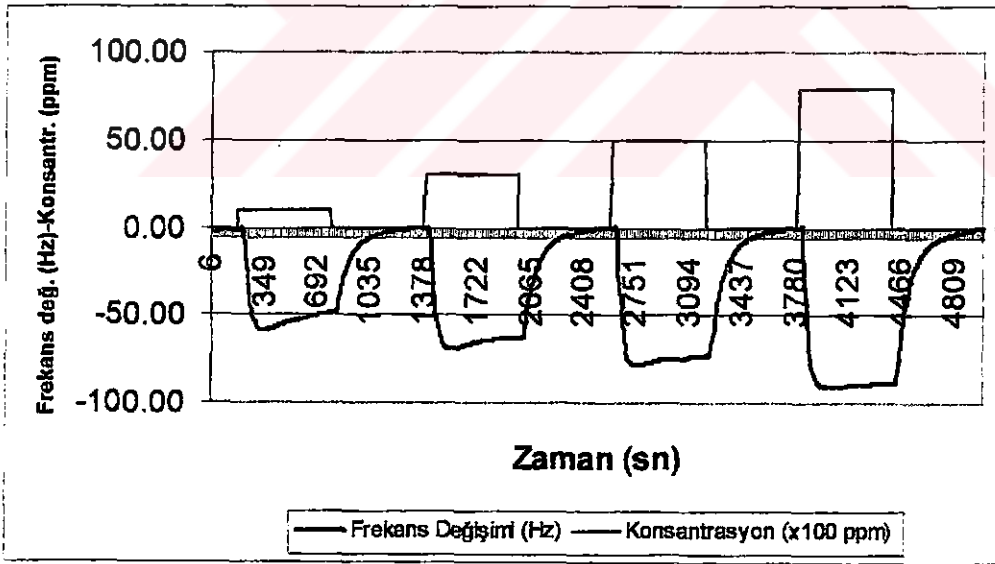
Bölüm 4'te izah edilen 36 no'lu QCM sensörü ile CHCl_3 gazı için ölçülen Δf değerleri şekil 5.1.11' de verilmiştir. . Bu şekilde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika CCl_4 gaz akışı süresi olacak şekilde 6 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ölçüm periyotlarında sırası ile 500, 1000, 3000, 5000, 8000 ve 10000 ppm CHCl_3 gazı geçirilmiştir. Farklı konsantrasyon geçişleri arasında sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi CHCl_4 gazı geçişlerinde 36 nolu QCM sensörün verdiği cevaplar gaz geçiş süresi boyunca kararlı hale ulaşmamaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu kararlı hale ulaşma süresinin CHCl_3 gazı için 36 nolu QCM sensörde 10 dakikadan büyük olduğu görülmektedir. Kuru hava ile yıkama sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde yaklaşık olarak başlangıç değerine dönmektedir



Şekil 5.1.11 36 no'lu QCM sensörleri ile CHCl_3 gazı için ölçülen Δf değerleri

5.1.3. Metanol gazı ölçüm dataları

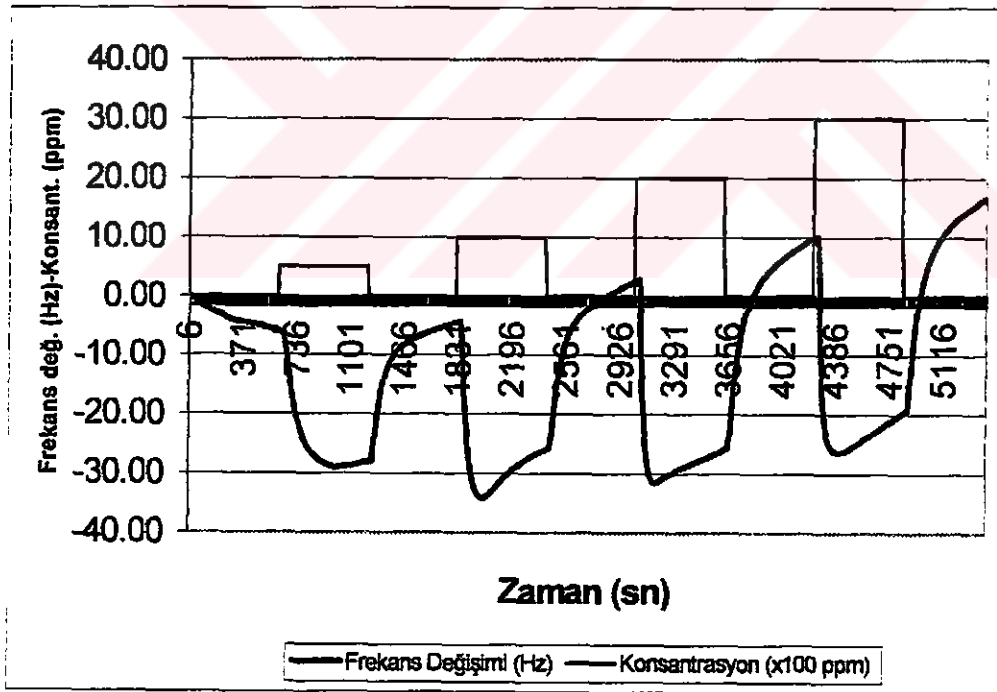
Bölüm 4'te izah edilen 24 no'lu QCM sensörü ile Metanol gazı için ölçülen Δf değerleri şekil 5.1.12' de verilmiştir. . Bu şekilde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika Metanol gaz akışı süresi olacak şekilde 4 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ölçüm periyotlarında sırası ile 1000, 3000, 5000 ve 8000 ppm Metanol gazı geçirilmiştir. Farklı konsantrasyon geçişleri arasında sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi Metanol gazı geçişlerinde 24 nolu QCM sensörün verdiği cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre Metanol gazı için 24 nolu QCM sensöründe yaklaşık 150-200 saniye kadardır. Kuru hava ile yıkama sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde başlangıç değerine dönmektedir



Şekil 5.1.12 24 no'lu QCM sensörleri ile Metanol gazı için ölçülen Δf değerleri

5.1.4. Toluen gazı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 24 no'lu QCM sensörü ile Toluen gazı için ölçülen Δf değerleri şekil 5.1.13' de verilmiştir. . Bu şekilde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika Toluen gaz akışı süresi olacak şekilde 4 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ölçüm periyotlarında sırası ile 500, 1000, 2000 ve 3000 ppm Toluen gazı geçirilmiştir. Farklı konsantrasyon geçişleri arasında sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi Toluen gazı geçişlerinde 24 nolu QCM sensörün verdiği cevaplar belirli bir süre sonra (150-200 sn) bir maksimum fark değerlerine ulaşmaktadır. Fakat bu değerlerde kararlı bir şekilde devam etmemektedir. Kuru hava ile yıkama sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları başlangıç değerine dönmekte ve kaymalar görülmektedir. Bu durumda bu sensörün Toluen gazına karşı kararlı bir tepki gösterdiği söylenemez.



Şekil 5.1.13 24 no'lu QCM sensörü ile Toluen gazı için ölçülen Δf değerleri

5.1.5. CCl₄ - Metanol gaz karışımı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Metanol gaz karışımı (CCl₄ : 500..2000 ppm - Metanol : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.14' de verilmiştir.

12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Metanol gaz karışımı (CCl₄ : 500..2000 ppm - Metanol : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.15' de verilmiştir.

12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Metanol gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Metanol : 4000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.16' de verilmiştir.

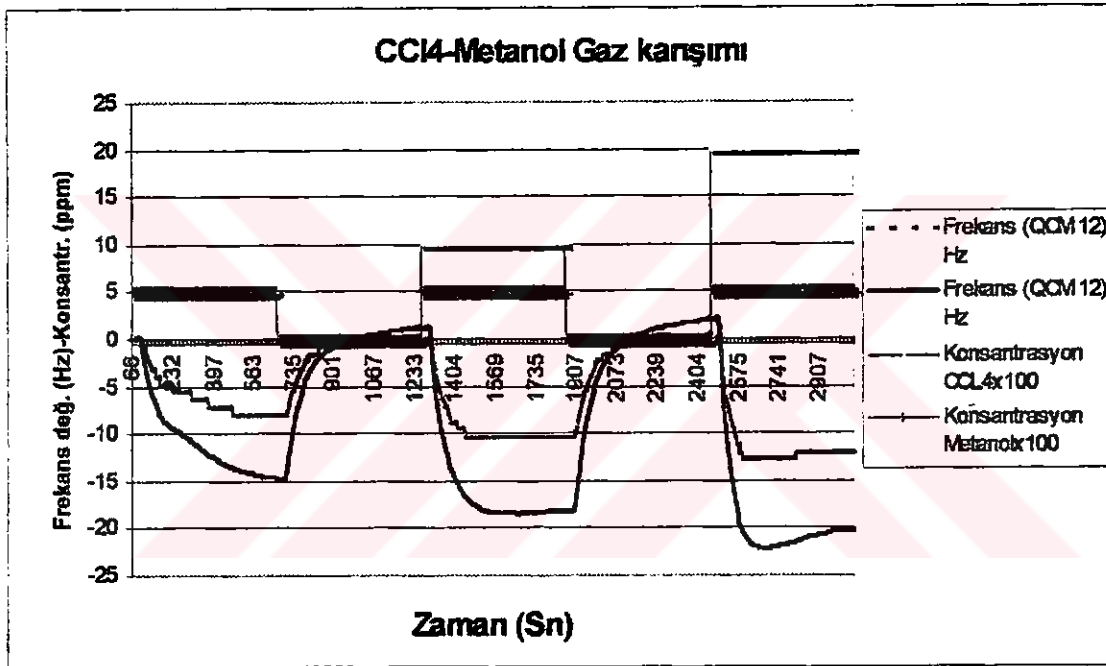
Bu şekillerde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika CCl₄ – Metanol gaz karışımı akışı süresi olacak şekilde 9 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ilk üç ölçüm periyotlarında sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 2000 ppm - Metanol : 500 ppm sabit olacak şekilde, daha sonraki üç ölçüm periyotlarında sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 2000 ppm - Metanol : 1000 ppm sabit olacak şekilde, sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 3000 ppm - Metanol : 4000 ppm sabit olacak şekilde CCl₄ - Metanol gaz karışımı geçirilmiştir.

Bu periyotlar şekillere bakıldığında da anlaşılacağı gibi kolay anlaşılması için bir grafikte üçer periyot olacak şekilde gösterilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki CCl₄ - Metanol gaz karışımı geçişleri arasında 12 ve 24 nolu QCM sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır.

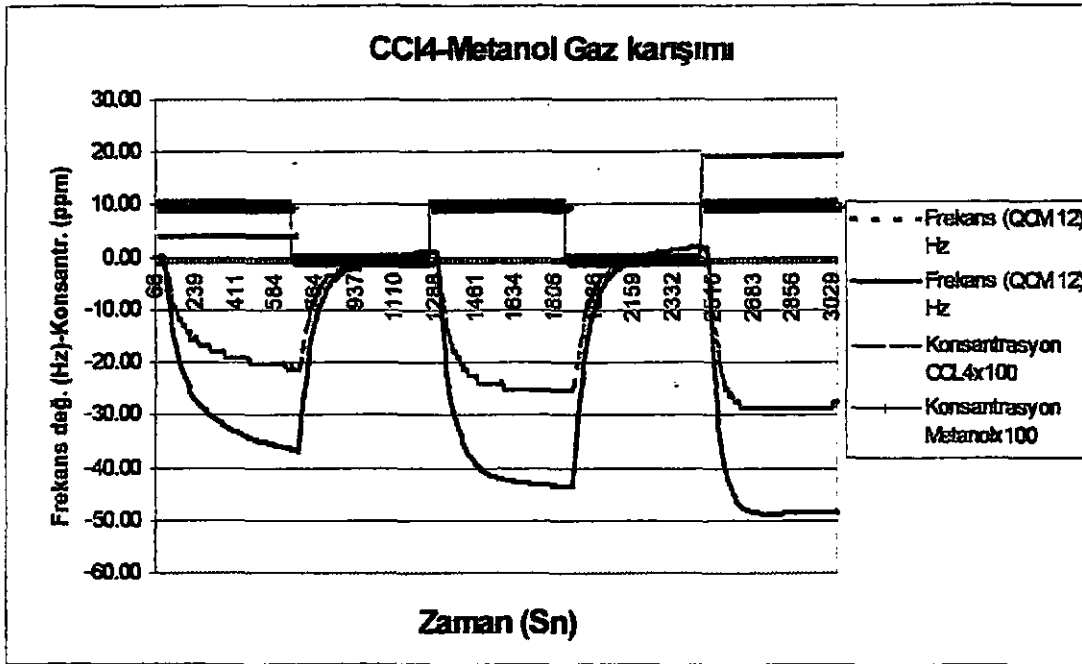
Şekillerde görüldüğü gibi CCl₄ - Metanol gaz karışımı geçişlerinde 12 ve 24 nolu QCM sensörlerin verdiği cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmamaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre CCl₄ - Metanol gaz karışımı için 12 ve 24 nolu QCM sensörlerde yaklaşık 250-300 saniye kadardır. Kuru hava ile yıkama

sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde başlangıç değerine dönmektedir.

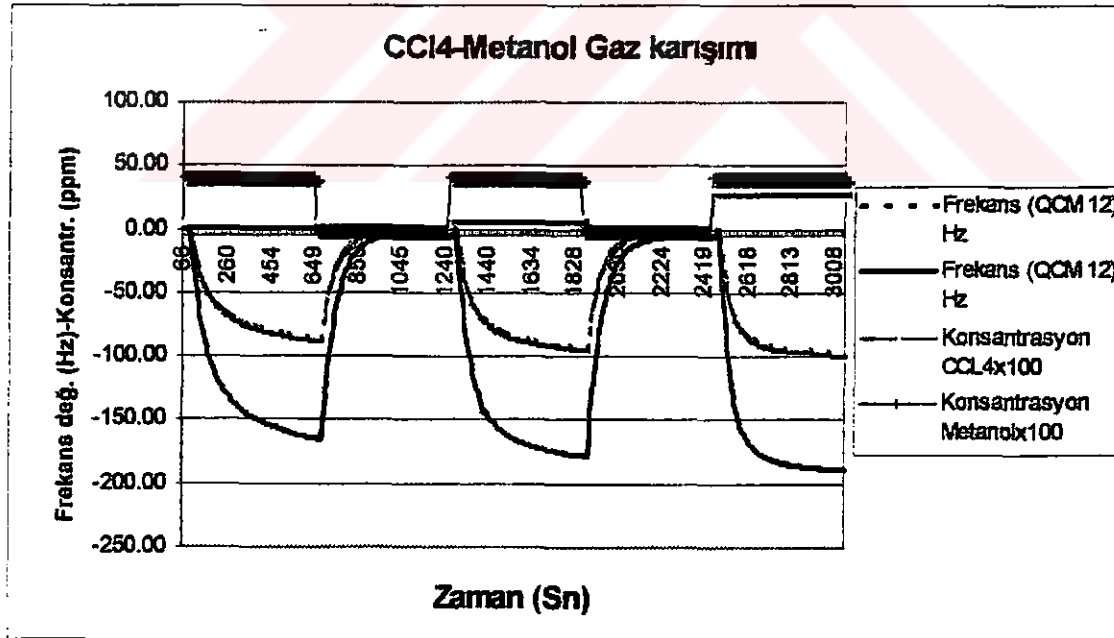
Şekil 5.1.14 , şekil 5.1.15 ve şekil 5.1.16' lerde görüldüğü gibi CCl_4 gazının karışımdaki konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no'lu QCM sensörünün frekans değerlerinde ki değişimler çok net bir şekilde görülmektedir. Metanol gazının karışımdaki konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans değerlerine etkisi daha azdır.



Şekil 5.1.14 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl_4 - Metanol gaz karışımı (CCl_4 : 500..2000 ppm - Metanol : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.15 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Metanol gaz karışımı (CCl₄ : 500..2000 ppm - Metanol : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.16 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Metanol gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Metanol : 4000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

5.1.6. CCl₄ - Toluen gaz karışımı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Toluen gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Toluen : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.17' de verilmiştir.

12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Toluen gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.18' de verilmiştir.

12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Toluen gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.19' da verilmiştir.

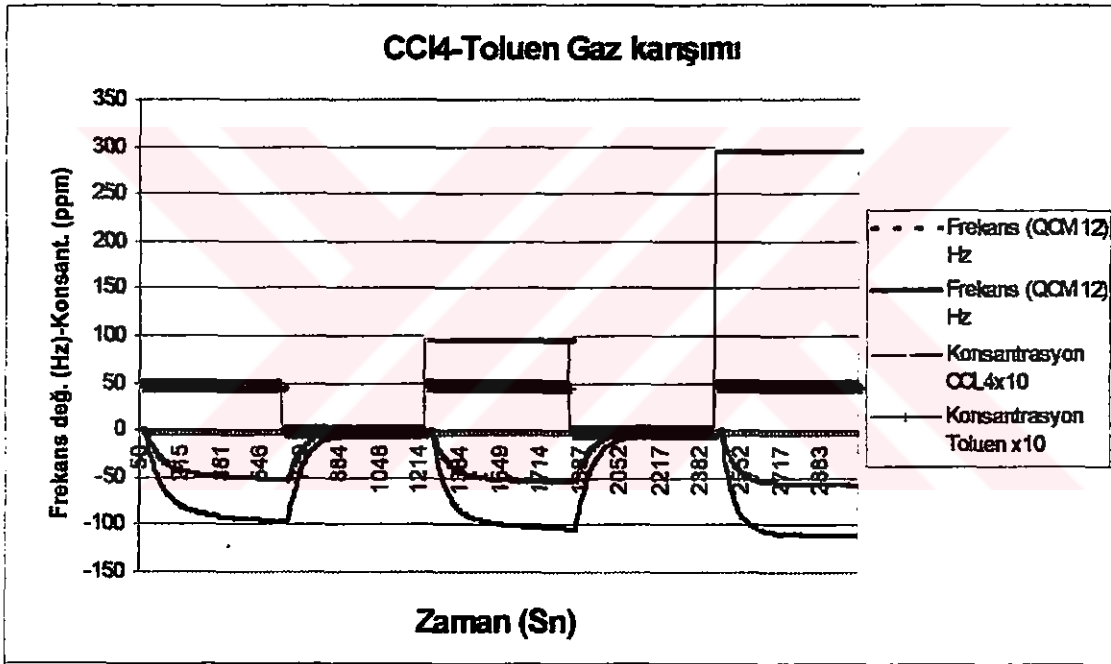
Bu şekillerde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika CCl₄ - Toluen gaz karışımı akışı süresi olacak şekilde 9 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ilk üç ölçüm periyotlarında sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 500 ppm sabit olacak şekilde, daha sonraki üç ölçüm periyotlarında sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit olacak şekilde, sırası ile CCl₄ : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit olacak şekilde CCl₄ - Toluen gaz karışımı geçirilmiştir.

Bu periyotlar şekillere bakıldığında da anlaşılacağı gibi kolay anlaşılması için bir grafikte üçer periyot olacak şekilde gösterilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki CCl₄ - Toluen gaz karışımı geçişleri arasında 12 ve 24 nolu QCM sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır.

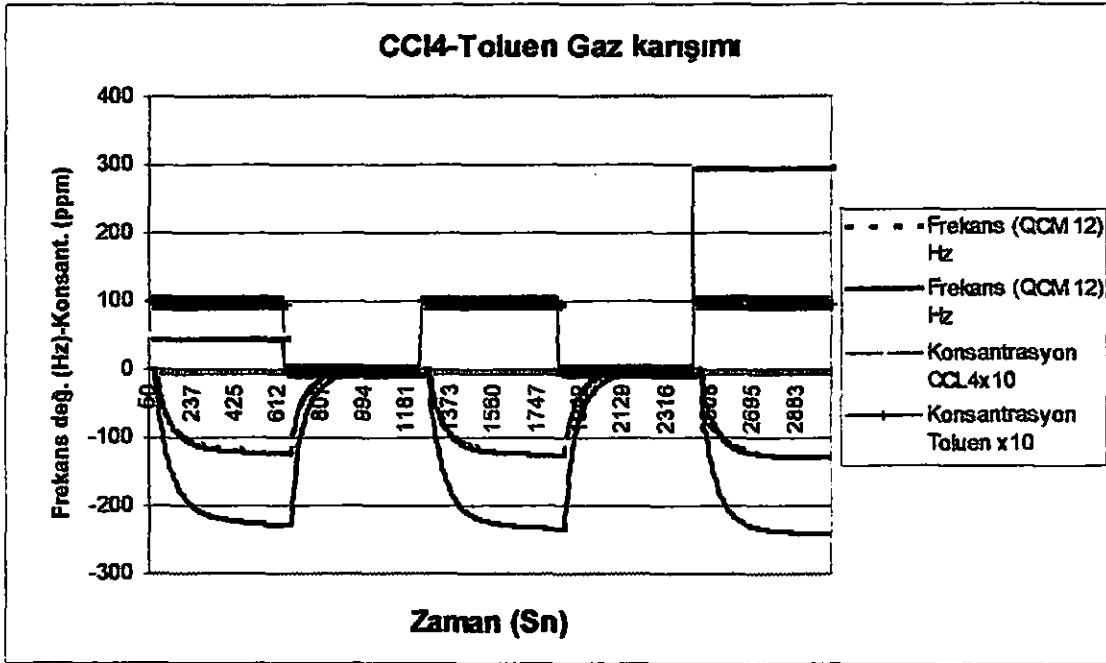
Şekillerde görüldüğü gibi CCl₄ - Toluen gaz karışımı geçişlerinde 12 ve 24 nolu QCM sensörlerin verdiği cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmamaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre CCl₄ - Toluen gaz karışımı için 12 ve 24 nolu QCM sensörlerde yaklaşık 250-300 saniye kadardır. Kuru hava ile yıkama sırasında

şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde başlangıç değerine dönmektedir.

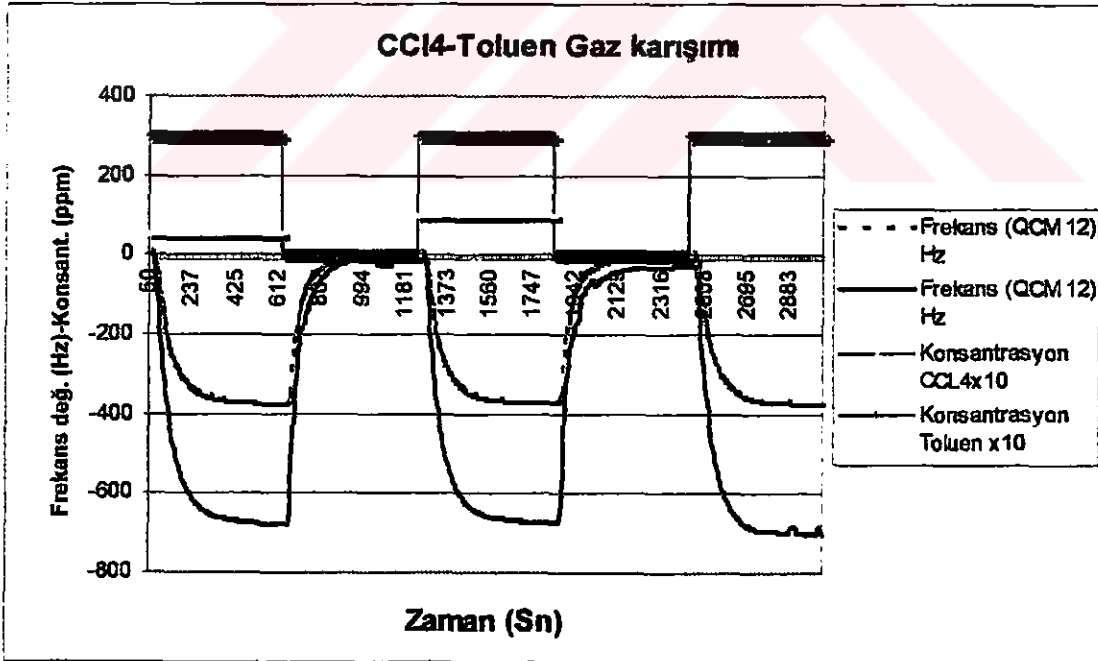
Şekil 5.1.17 , şekil 5.1.18 ve şekil 5.1.19' larda görüldüğü gibi CCl_4 gazının karışımdaki konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no'lu QCM sensörünün frekans değerlerinde ki değişimler çok net bir şekilde görülmektedir. Toluen gazının karışımdaki konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans değerlerine etkisi zorlukla görülebilmektedir. Toluen gazının bu etkisi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin etkisi tarzında doğru orantıya benzer bir şekilde değildir.



Şekil 5.1.17 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl_4 - Toluen gaz karışımı (CCl_4 : 500..3000 ppm - Toluen : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.18 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Toluen gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.19 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile CCl₄ - Toluen gaz karışımı (CCl₄ : 500..3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

5.1.7. Metanol –Toluen gaz karışımı ölçüm dataları

Bölüm 4’te izah edilen 12, 24 no’lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Metanol : 500..3000 ppm – Toluen : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.20’ de verilmiştir.

12, 24 no’lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Metanol : 500..3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.21’ de verilmiştir.

12, 24 no’lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Metanol : 500..3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.1.22’ de verilmiştir.

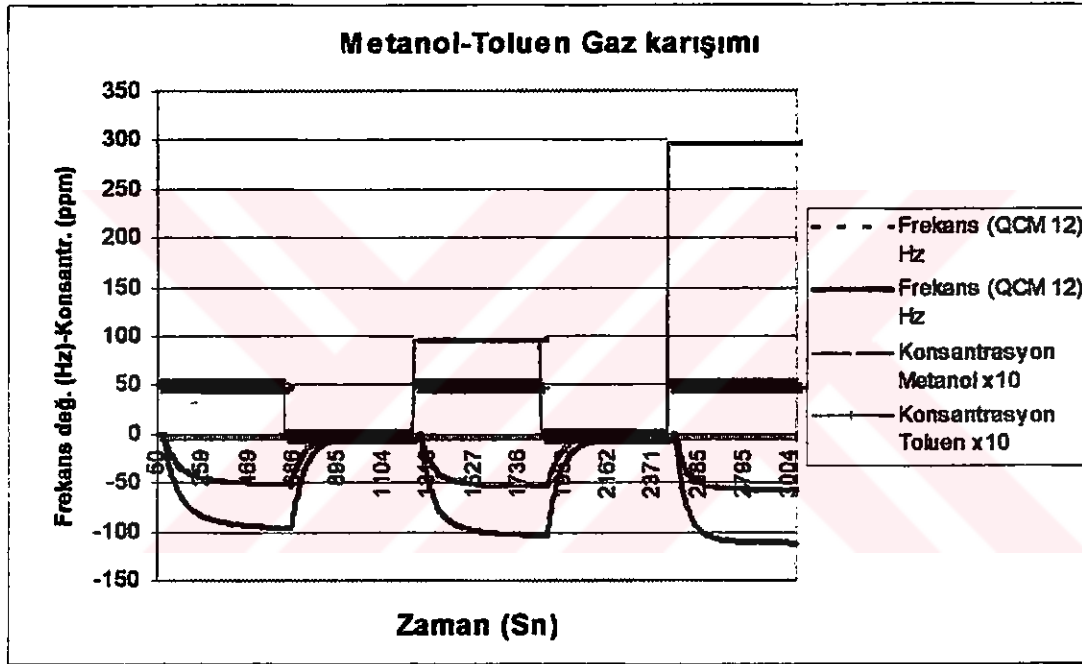
Bu şekillerde de görüldüğü gibi ölçümler 10 dakika kuru hava ile yıkama ve 10 dakika Metanol – Toluen gaz karışımı akışı süresi olacak şekilde 9 adet periyottan oluşmaktadır. İlk periyottan önce sensörler kuru hava ile yıkanmış ve daha sonra ilk üç ölçüm periyotlarında sırası ile Metanol : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 500 ppm sabit olacak şekilde, daha sonraki üç ölçüm periyotlarında sırası ile Metanol : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit olacak şekilde, sırası ile Metanol : 500, 1000 ve 3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit olacak şekilde Metanol - Toluen gaz karışımı geçirilmiştir.

Bu periyotlar şekillere bakıldığında da anlaşılacağı gibi kolay anlaşılması için bir grafikte üçer periyot olacak şekilde gösterilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki Metanol - Toluen gaz karışımı geçişleri arasında 12 ve 24 nolu QCM sensörler 10 ar dakika kuru hava ile yıkanmıştır.

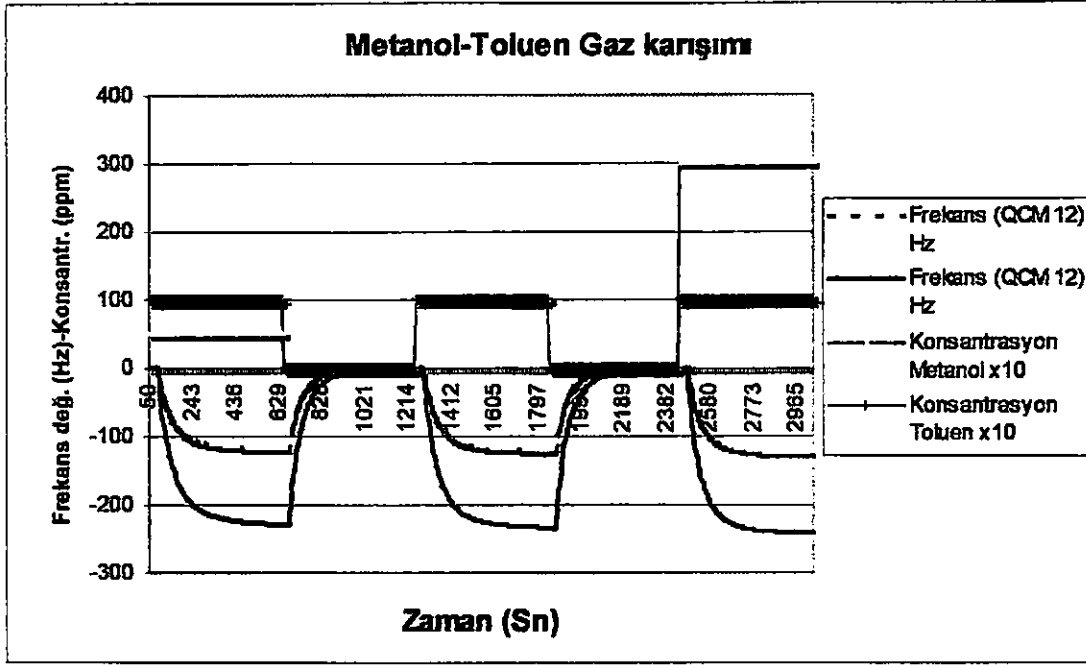
Şekillerde görüldüğü gibi Metanol - Toluen gaz karışımı geçişlerinde 12 ve 24 nolu QCM sensörlerin verdiği cevaplar belirli bir süre sonra kararlı hale ulaşmamaktadır. Cevap süresi olarak da bilinen bu süre Metanol - Toluen gaz karışımı için 12 ve 24 nolu QCM sensörlerde yaklaşık 250-300 saniye kadardır. Kuru hava ile yıkama

sırasında şekillerde de görüldüğü gibi sensör cevapları belli bir süre içinde başlangıç değerine dönmektedir.

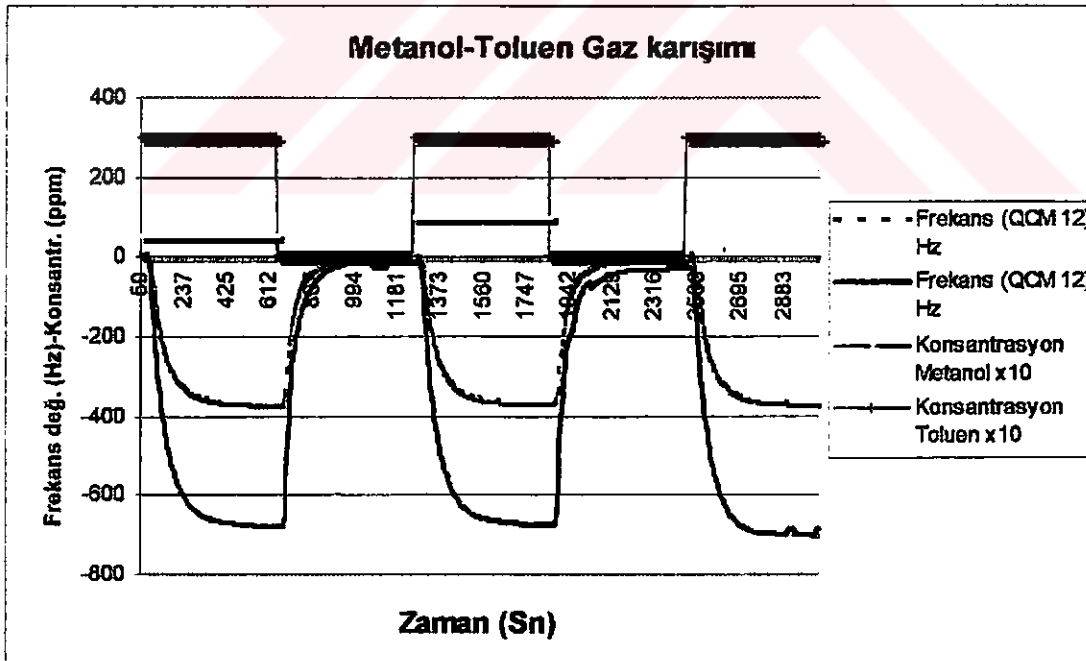
Şekil 5.1.20 , şekil 5.1.21 ve şekil 5.1.22' lerde görüldüğü gibi Metanol gazının karışımdaki konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no'lu QCM sensörünün frekans değerlerinde ki değişimler çok net bir şekilde görülmektedir. Toluen gazının karışımdaki konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans değerlerine etkisi zorlukla görülebilmektedir. Toluen gazının bu etkisi Metanol gazının konsantrasyon değişiminin etkisi tarzında doğru orantıya benzer bir şekilde değildir.



Şekil 5.1.20 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Toluen : 500...3000 ppm - Toluen : 500 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.21 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Toluen : 500..3000 ppm - Toluen : 1000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri



Şekil 5.1.22 12, 24 no'lu QCM sensör kombinasyonu ile Metanol - Toluen gaz karışımı (Toluen : 500..3000 ppm - Toluen : 3000 ppm sabit) için ölçülen Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

5.2. Dataların Normalize Edilmesi

Ölçülen Δf ve ΔI dataları, YSA ve bulanık mantık algoritmalarında kullanılmak üzere 0..1 aralığında lineer olarak normalize edilmiştir. Normalizasyon yapmak amacı ile maksimum değerler olarak konsantrasyon için 10000 ppm , frekans için 1000 Hz ve akım için 10^{-11} alınmıştır.

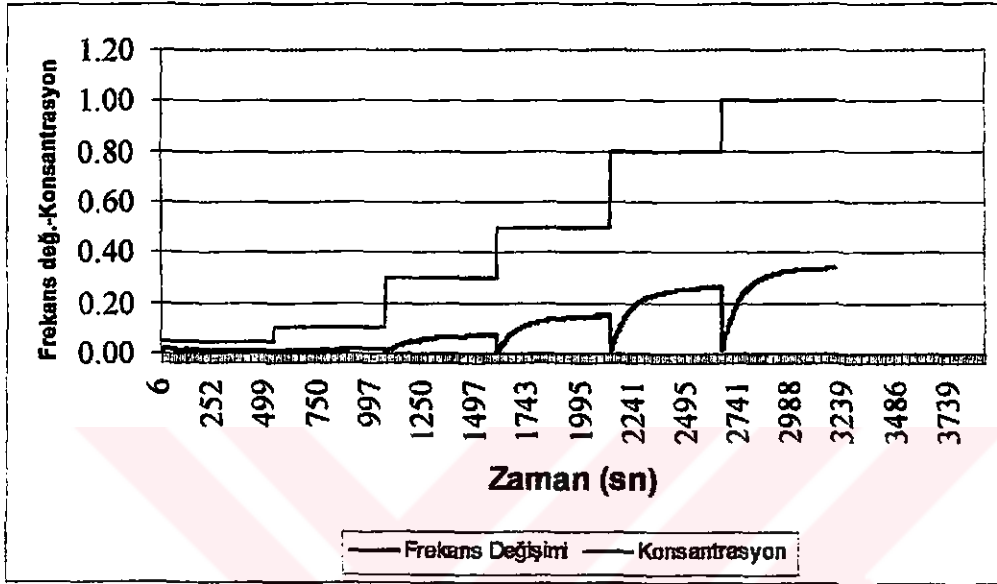
Deneyle sırasında daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi gazların geçiş zamanlarının yanı sıra kuru hava ile yapılan yıkama zamanlarında da ölçüm alınmaya devam edilmiştir. Yıkama işlemi sadece sensörleri temizlemek için yapıldığı için bu zamanlarda yapılan ölçümler normalizasyon işleminde hesaba katılmamış ve YSA yapılarının öğrenmesinde de kullanılmıştır. Ayrıca bölüm 4 'te izah edilen gaz akış ve ölçüm sisteminde gaz geçiş periyotlarının ilk 45-50 saniyesi gazların sensörlere ulaşma süreleri olduğu için normalizasyon işleminde kullanılmamıştır. Aşağıdaki bölümlerde CCl_4 , $CHCl_3$, Metanol ve Toluen gazların çeşitli sensörler ile ölçülen değerlerinin ve CCl_4 – Metanol, CCl_4 – Toluen ve Metanol - Toluen gaz karışımlarının 12 ve 24 nolu QCM sensörleri ile ölçülen değerlerinin normalize edilmiş değerleri grafikler halinde verilmiştir.

5.2.1. Normalize edilmiş CCl_4 gazı ölçüm dataları

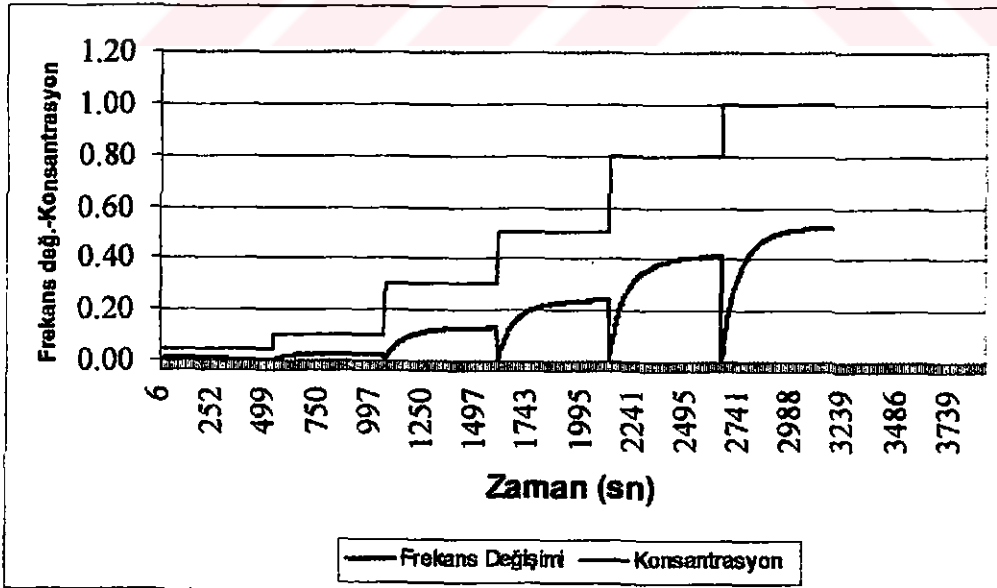
12, 24, 36, 46 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Bu değerlerden frekans değerlerinin önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal ve geçiş bölgesi zamanları konsantrasyon saptama işleminde YSA yapısında giriş ve konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır. Bulanık mantık kullanılarak yapılan konsantrasyon saptama işleminde frekans değerlerinin sadece kararlı hal cevapları ve bunlara karşı gelen konsantrasyon değerleri kullanılmıştır.

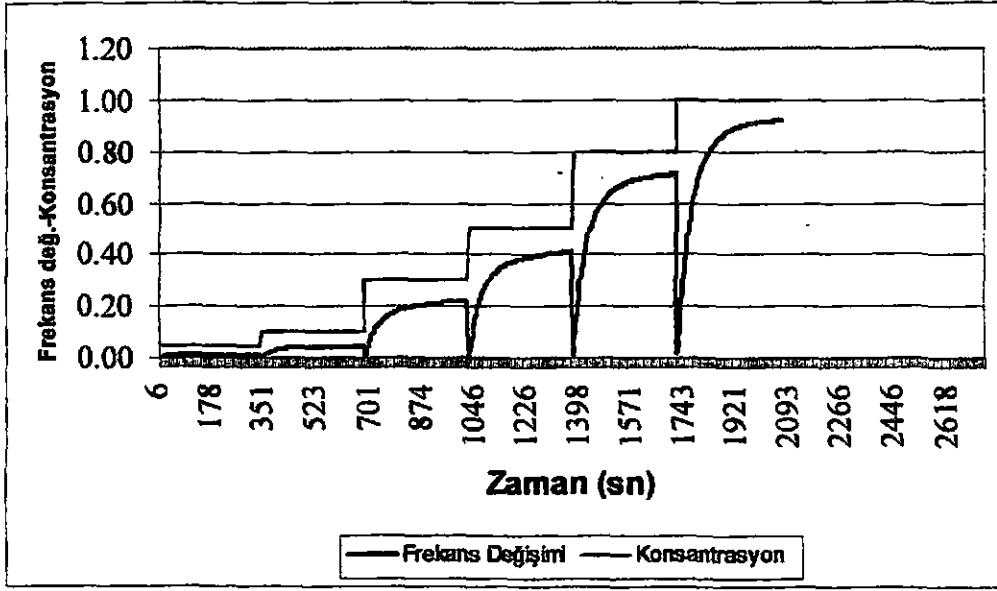
Şekil 5.2.1-5.2.8 'lerde görüldüğü gibi konsantrasyon değişimlerinin frekans değişimlerine olan etkileri normalizasyon grafiklerinde daha net bir şekilde görülmektedir. 12 nolu QCM sensörün CCl_4 gazının düşük konsantrasyonları için verdiği frekans değişimi tepkisinde olan belirsizlik normalize edilmiş değerlerde daha belirgindir (şekil 5.2.1).



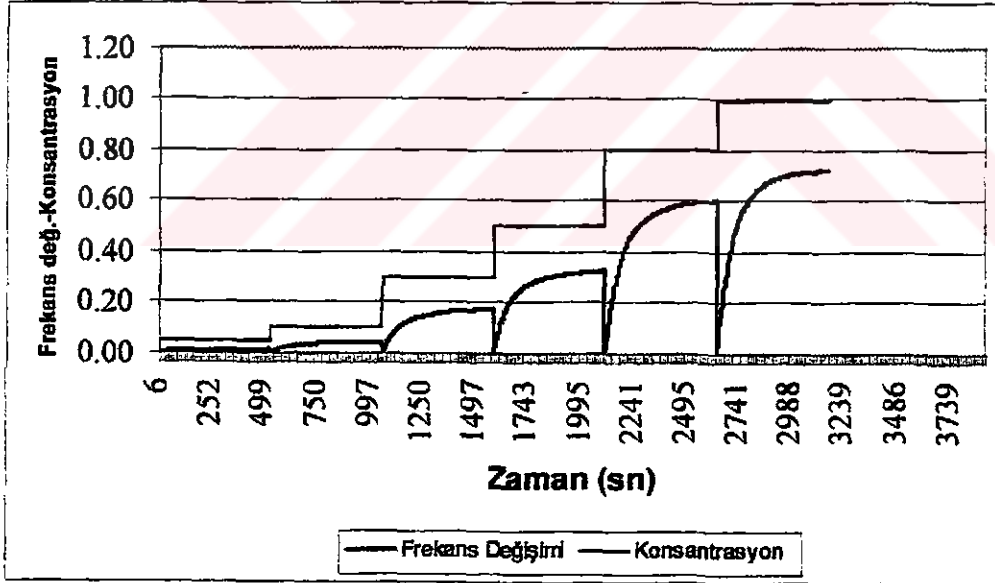
Şekil 5.2.1 12 no'lu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri



Şekil 5.2.2 24 no'lu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri

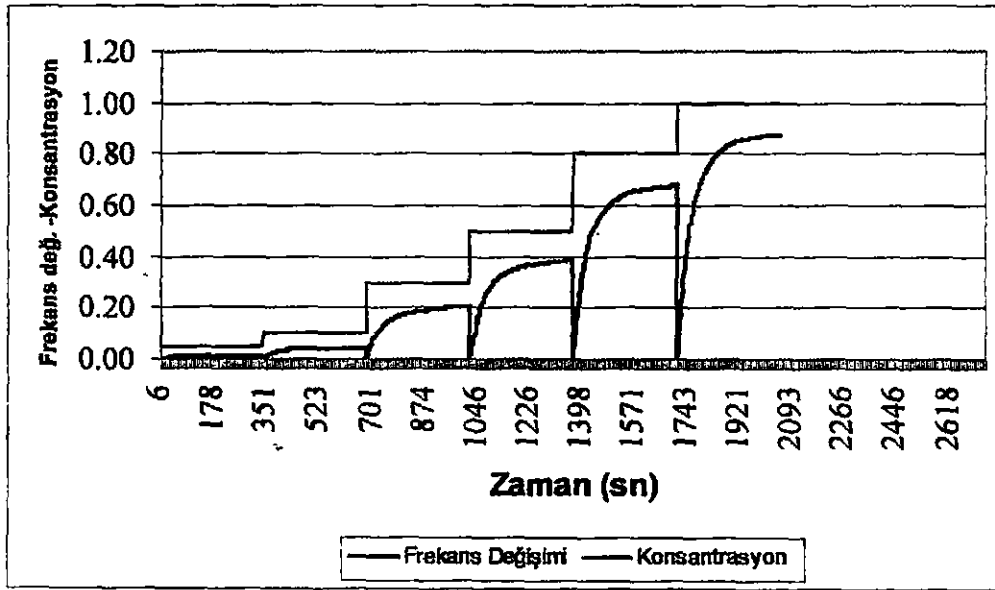


Şekil 5.2.3 36 no'lu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri

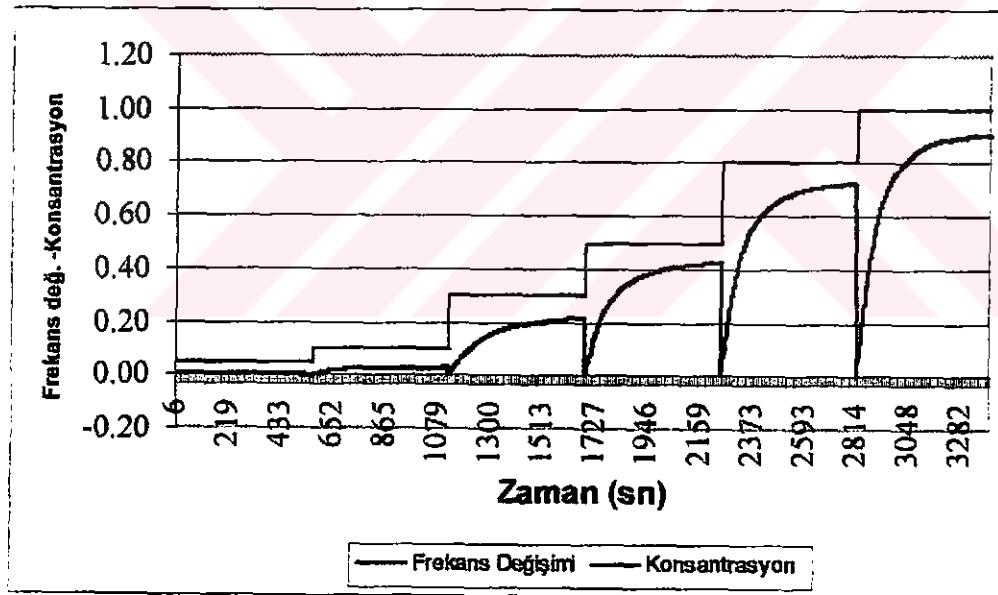


Şekil 5.2.4 46 no'lu QCM sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri

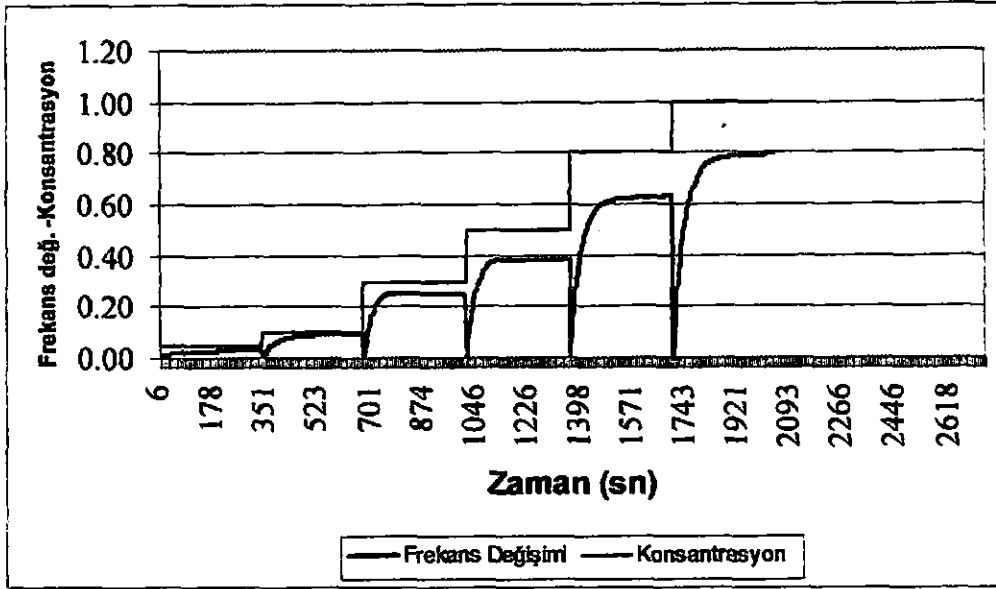
36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri sırası ile şekil 5.2.5, şekil 5.2.6, şekil 5.2.7. e şekil 5.2.8 ' de verilmiştir.



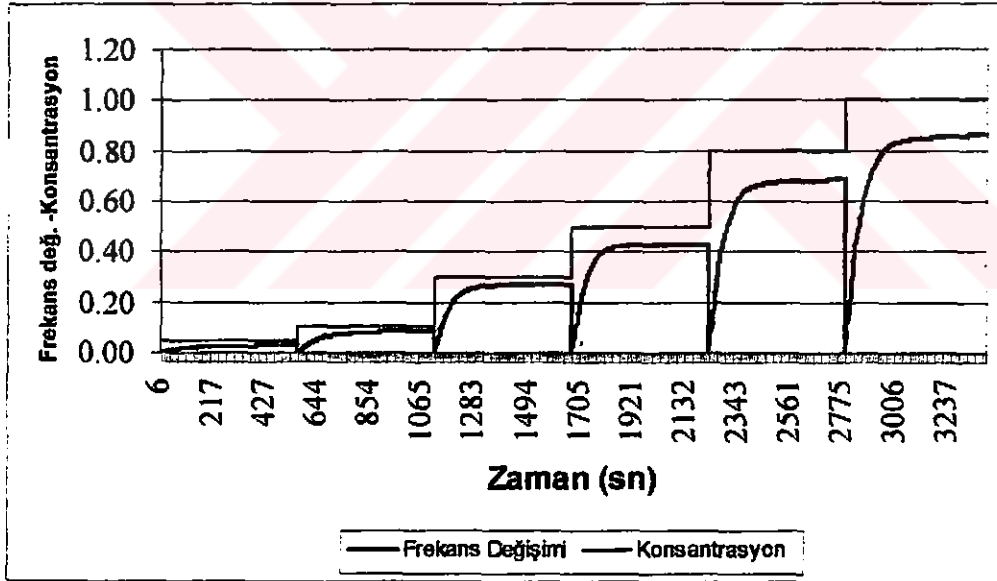
şekil 5.2.5 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 15 gün sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri



şekil 5.2.6 36 no'lu QCM sensörü ile CCl_4 gazı için ilk ölçümden 1 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri



Şekil 5.2.7 36 no'lu QCM sensörü ile CCl₄ gazı için ilk ölçümden 6 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri

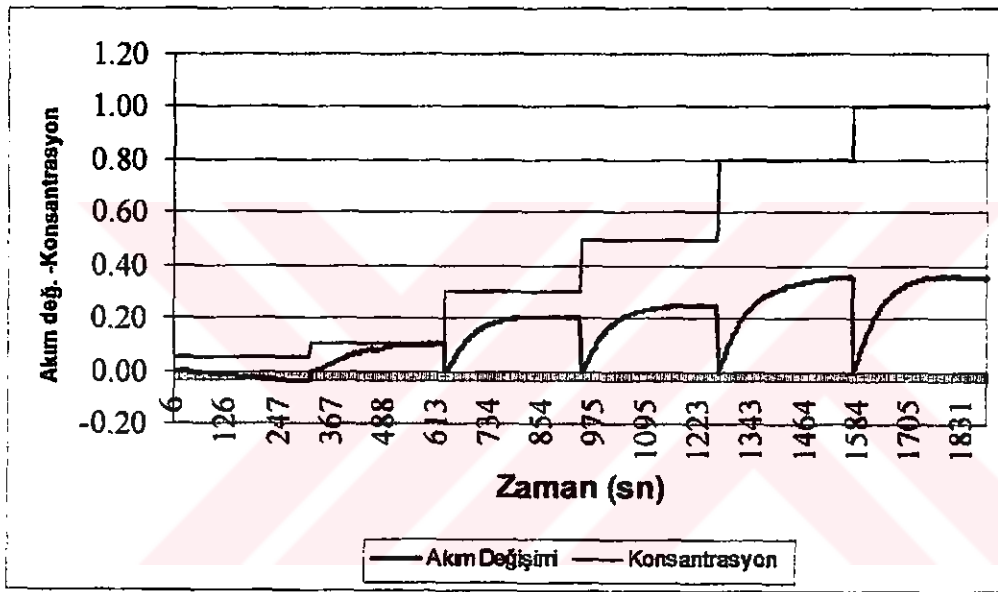


Şekil 5.2.8 36 no'lu QCM sensörü ile CCl₄ gazı için ilk ölçümden 8 ay sonra ölçülen normalize edilmiş Δf değerleri

Bölüm 4'te izah edilen IDT sensörünün normalize edilmiş Δf değerleri Şekil 5.2.9'da verilmiştir.

Bu değerlerden akım değerlerinin önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal ve geçiş bölgesi zamanları konsantrasyon saptama işleminde YSA yapısında giriş ve konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.

Şekil 5.2.9 'da görüldüğü gibi konsantrasyon değişimlerinin akım değişimlerine olan etkileri normalizasyon grafiklerinde daha net bir şekilde görülmektedir. IDT sensörün CCl_4 gazının düşük konsantrasyonları için verdiği akım değişimi tepkisinde olan belirsizlik normalize edilmiş değerlerde daha belirgindir .



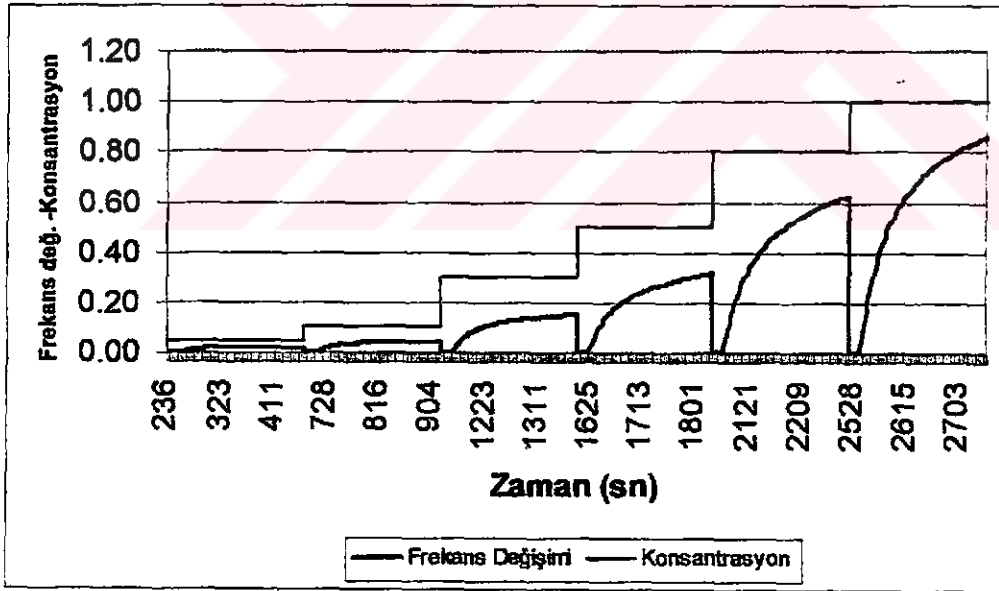
Şekil 5.2.9 IDT sensörünün normalize edilmiş ΔI değerleri

5.2.2. Normalize edilmiş CHCl_3 gazı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 36 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri şekil 5.2.10' da verilmiştir.

Bu değerlerden frekans değerlerinin önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal ve geçiş bölgesi zamanları konsantrasyon saptama işleminde YSA yapısında giriş ve konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır. Bulanık mantık kullanılarak yapılan konsantrasyon saptama işleminde frekans değerlerinin sadece kararlı hal cevapları ve bunlara karşı gelen konsantrasyon değerleri kullanılmıştır.

Şekil 5.2.10 'da görüldüğü gibi konsantrasyon değişimlerinin frekans değişimlerine olan etkileri normalizasyon grafiklerinde daha net bir şekilde görülmektedir.

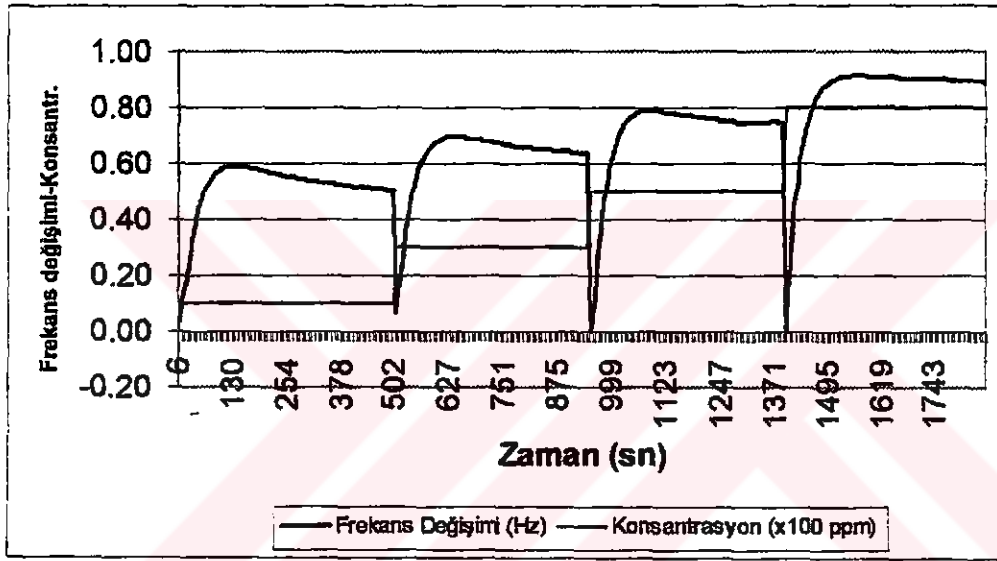


Şekil 5.2.10 36 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri

5.2.3. Normalize edilmiş Metanol gazı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 24 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri şekil 5.2.11' de verilmiştir.

Bu değerlerden frekans değerlerinin önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal ve geçiş bölgesi zamanları konsantrasyon saptama işleminde YSA yapısında giriş ve konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.

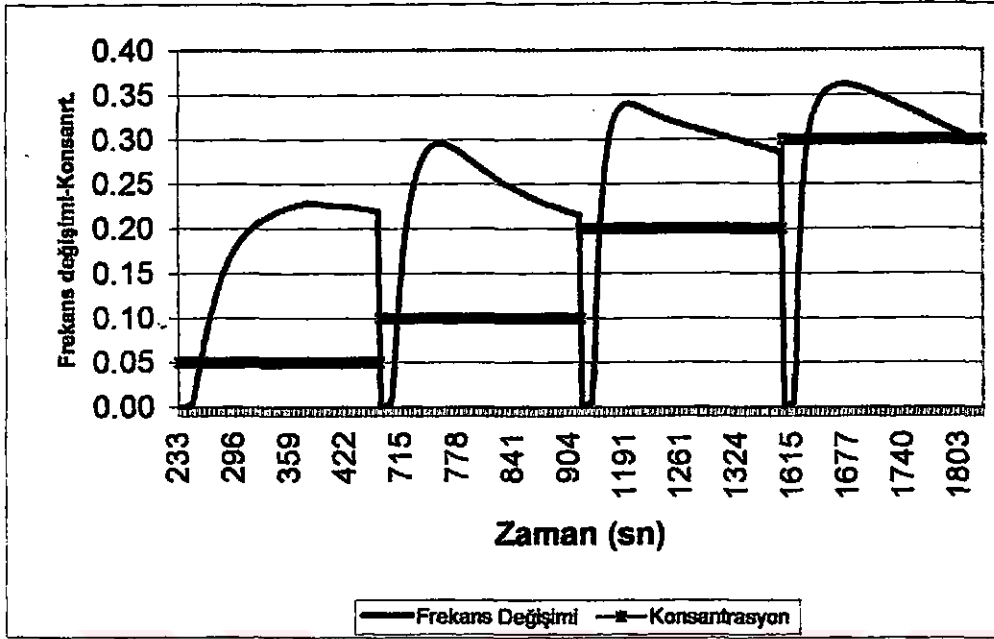


Şekil 5.2.11 24 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri

5.2.4. Normalize edilmiş Toluen gazı ölçüm dataları

Bölüm 4'te izah edilen 24 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri şekil 5.2.12' de verilmiştir

Bu değerlerden frekans değerlerinin önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal ve geçiş bölgesi zamanları konsantrasyon saptama işleminde YSA yapısında giriş ve konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.2.12 24 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri

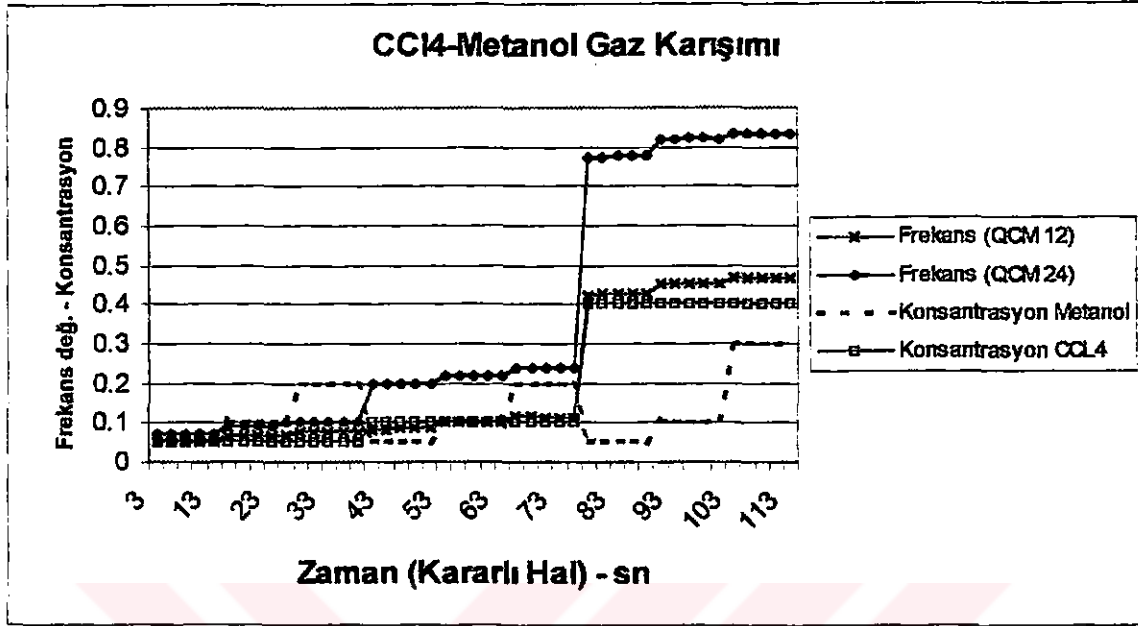
5.2.5. Normalize edilmiş CCl_4 - Metanol gaz karışımı ölçüm dataları

CCl_4 - Metanol gaz karışımı için 12 ve 24 no'lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri Şekil 5.2.13'de verilmiştir. Sensörlerin cevap süresi içindeki geçiş bölgesi frekans cevapları normalizasyon için alınmamıştır. Sensörlerin sadece kararlı hal cevapları normalize edilerek miktarsal sınıflandırma amacı ile kullanılmıştır.

12 ve 24 nolu QCM sensörlerin frekans sapma değerlerinden önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal değerleri miktarsal sınıflandırma işleminde YSA yapılarında giriş ve CCl_4 ve Metanol gazlarının konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.

Şekilde de görüldüğü gibi CCl_4 gazının konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no'lu QCM sensörünün frekans değerlerinde değişimler çok net bir şekilde

görülmektedir. Metanol gazının konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans değerlerine etkisi daha azdır.



Şekil 5.2.13 CCl₄ - Metanol gaz karışımı için normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

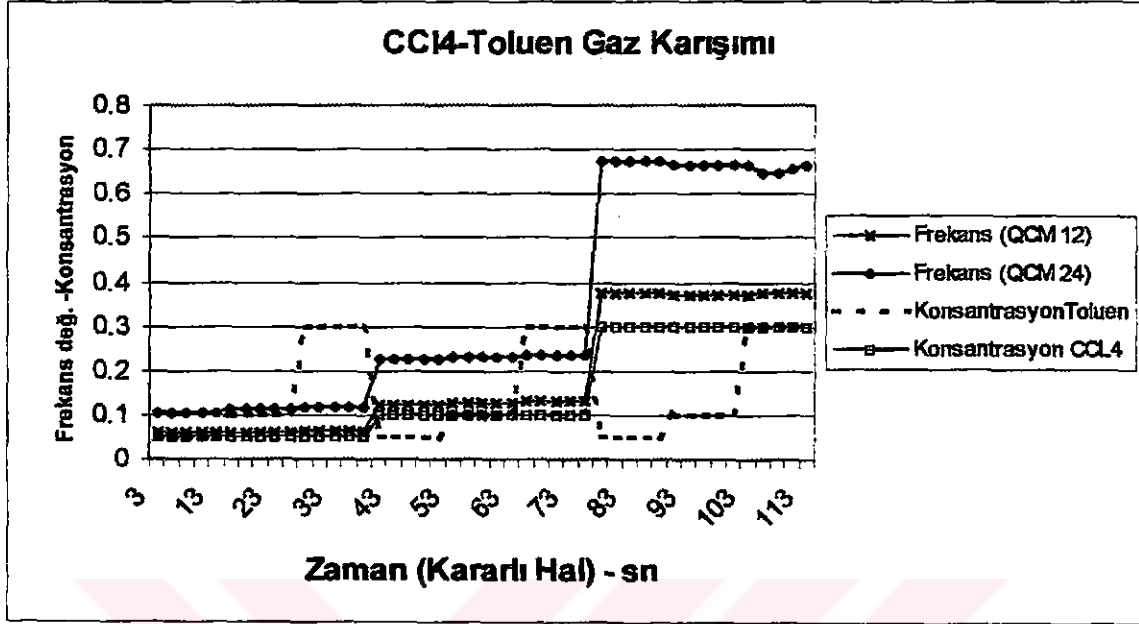
5.2.6. Normalize edilmiş CCl₄ - Toluen gaz karışımı ölçüm dataları

CCl₄ – Toluen gaz karışımı için normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.2.14'de verilmiştir. Sensörlerin cevap süresi içindeki geçiş bölgesi frekans cevapları normalizasyon için alınmamıştır. Sensörlerin sadece kararlı hal cevapları normalize edilerek miktarsal sınıflandırma amacı ile kullanılmıştır.

12 ve 24 nolu QCM sensörlerin frekans sapma değerlerinden önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal değerleri miktarsal sınıflandırma işleminde YSA yapılarında giriş ve CCl₄ ve Toluen gazlarının konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.

Şekilde de görüldüğü gibi CCl₄ gazının konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no'lu QCM sensörünün frekans değerlerinde değişimler çok net bir şekilde görülmektedir. Toluen gazının konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans değerlerine etkisi zorlukla görülebilmektedir. Toluen gazının konsantrasyon

değişiminin bu etkisi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin etkisi şeklinde doğru orantıya benzer bir tarzda değildir.



Şekil 5.2.14 CCl_4 - Toluen gaz karışımı için normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

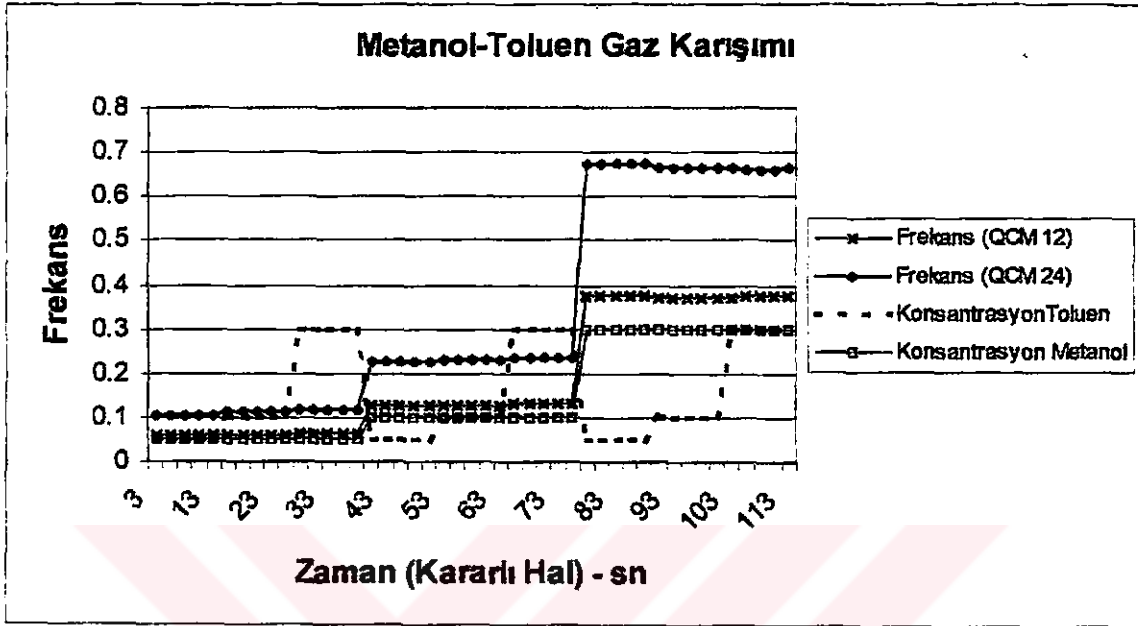
5.2.7. Normalize edilmiş Metanol – Toluen gaz karışımı ölçüm dataları

Metanol - Toluen gaz karışımı için normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri şekil 5.2.15’de verilmiştir. Sensörlerin cevap süresi içindeki geçiş bölgesi frekans cevapları normalizasyon için alınmamıştır. Sensörlerin sadece kararlı hal cevapları normalize edilerek miktarsal sınıflandırma amacı ile kullanılmıştır.

12 ve 24 nolu QCM sensörlerin frekans sapma değerlerinden önceki bölümlerde izah edilen kararlı hal değerleri miktarsal sınıflandırma işleminde YSA yapılarında giriş ve Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyon değerleri YSA yapısında öğretilen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.

Şekilde de görüldüğü gibi Metanol gazının konsantrasyon değişimlerinde özellikle 24 no’lu QCM sensörünün frekans değerlerinde değişimler çok net bir şekilde görülmektedir. Toluen gazının konsantrasyon değişiminin sensörlerin frekans

değerlerine etkisi zorlukla görülebilmektedir. Toluene gazının konsantrasyon değişiminin bu etkisi Metanol gazının konsantrasyon değişiminin etkisi şeklinde doğru orantıya benzer bir tarzda değildir.



Şekil 5.2.15 Metanol - Toluene gaz karışımı için normalize edilmiş kararlı hal Δf_{12} , Δf_{24} değerleri

5.3. Algoritmaların Oluşturulması

Bu çalışmada ölçülen CCl_4 , $CHCl_3$, Toluen ve Metanol gazlarının YSA ve bulanık mantık yapı ve algoritmaları yardımıyla konsantrasyonlarının saptanması ve miktarsal sınıflandırılması üzerinde çalışılmıştır. Aşağıdaki kısımlarda bu yapı ve algoritmalarından detaylı olarak bahsedilecektir.

Gazların ileri beslemeli YSA ile sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının tespiti için kullanılan geriye yayımlı öğrenme algoritması aşağıdaki basamakları içermektedir. Bu öğrenme algoritmasının akış diyagramı şekil 5.3.1 'deki gibidir.

Basamak 1. Normalize edilmiş deneysel öğrenme setini hazırla.

Basamak 2. Giriş, çıkış ve gizli katman sinir adedini belirle.

Basamak 3. Öğrenme (η) ve momentum (α) katsayısını tayin et.

Basamak 4. Rasgele başlangıç ağırlık ve besleme değerlerini ata.

Basamak 5. Girilen her bir data grubu için çıkış değerlerini hesapla.

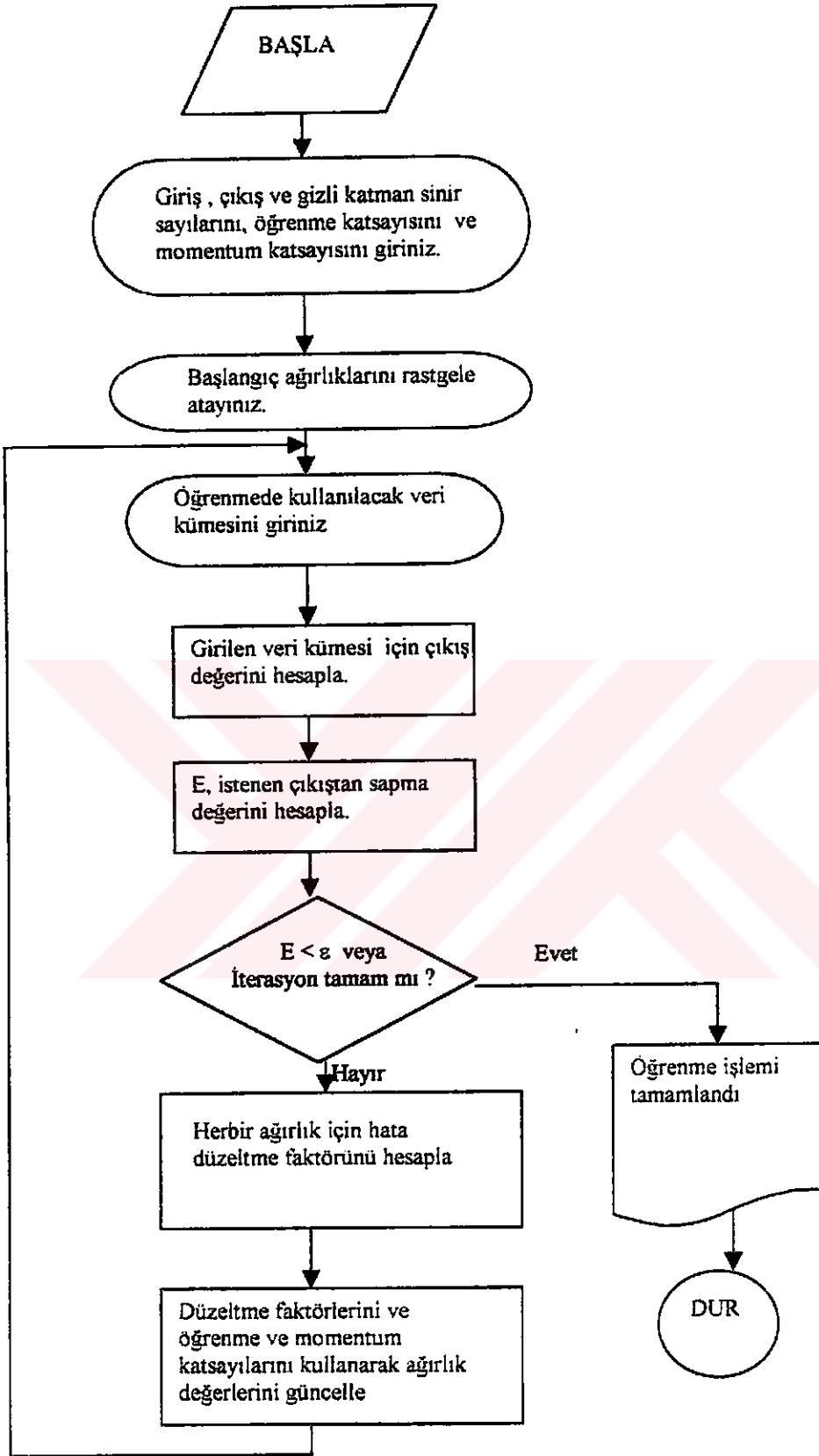
Basamak 6. $e = y_d - y$ eşitliği ile hata miktarını bularak, $E = \sum (1/2)e^2$ ifadesinden toplam hatayı hesapla. Burada y_d : arzu edilen çıkış ve y : çıkış değeridir.

Basamak 7. Her bir ağırlık için gradyant ($\partial E/\partial w$) hesabını yap.

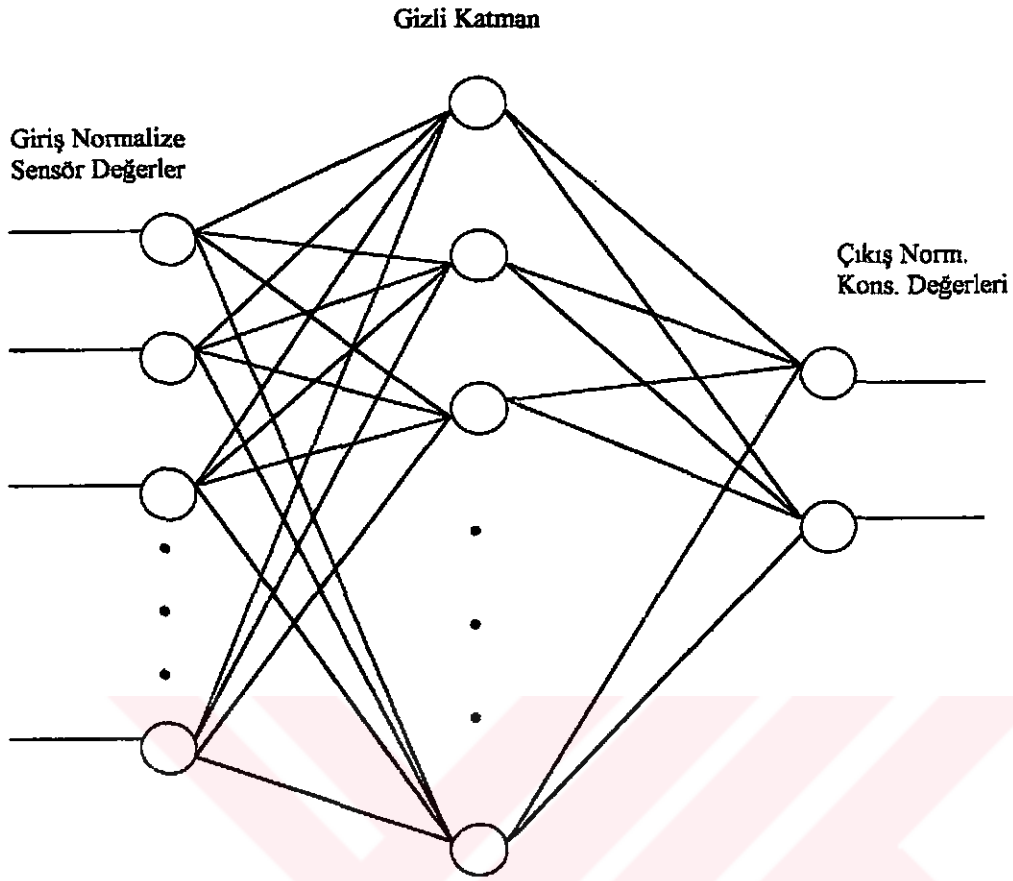
Basamak 8. $w(i+1) = w(i) + \eta(\partial E/\partial w(i)) + \alpha\Delta w(i)$ ifadesini kullanarak yeni ağırlıkları güncelle.

Basamak 9. Basamak 5 ile basamak 8 arasını istenilen hata değerine veya iterasyon sayısına ulaşmıca kadar tekrarla.

Şekil 5.3.2 'de bu çalışmada kullanılan ileri beslemeli YSA yapısı görülmektedir. Bu YSA yapısı bir giriş, bir çıkış ve bir gizli katmana sahip bir yapıdır. Normalize edilmiş sensör sinyal dataları bu yapıda giriş olarak kullanılmıştır. Ölçülen gazların konsantrasyon değerleri çıkış katında öğrenme için istenen çıkış değerleri olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.3.1. Çalışmalarda kullanılan YSA geri yayılım öğrenme algoritması akış diyagramı



Şekil 5.3.2. Çalışmada kullanılan ileri beslemeli YSA yapısı

YSA ile yapılan gaz konsantrasyonu saptama ve sınıflandırma çalışmalarımızda gizli katmanda 10-15 sinir kullanma sonucunda iyi sonuçlar alındığı [103] için, gizli katmandaki sinir sayısı bu aralıkta alınmıştır. Kullanılan bu YSA yapısında öğrenme (η) katsayısı 0.25 ve momentum (α) katsayısı 0.75 alınmıştır. Bu değerler YSA konusundaki deneyimlerimiz [103-109] sonucu bölüm 2.1.12 'de izah edilen kriterlere uygun olarak seçilmiştir.

5.3.1. YSA ile CCl_4 , CHCl_3 , Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyonlarının saptanması

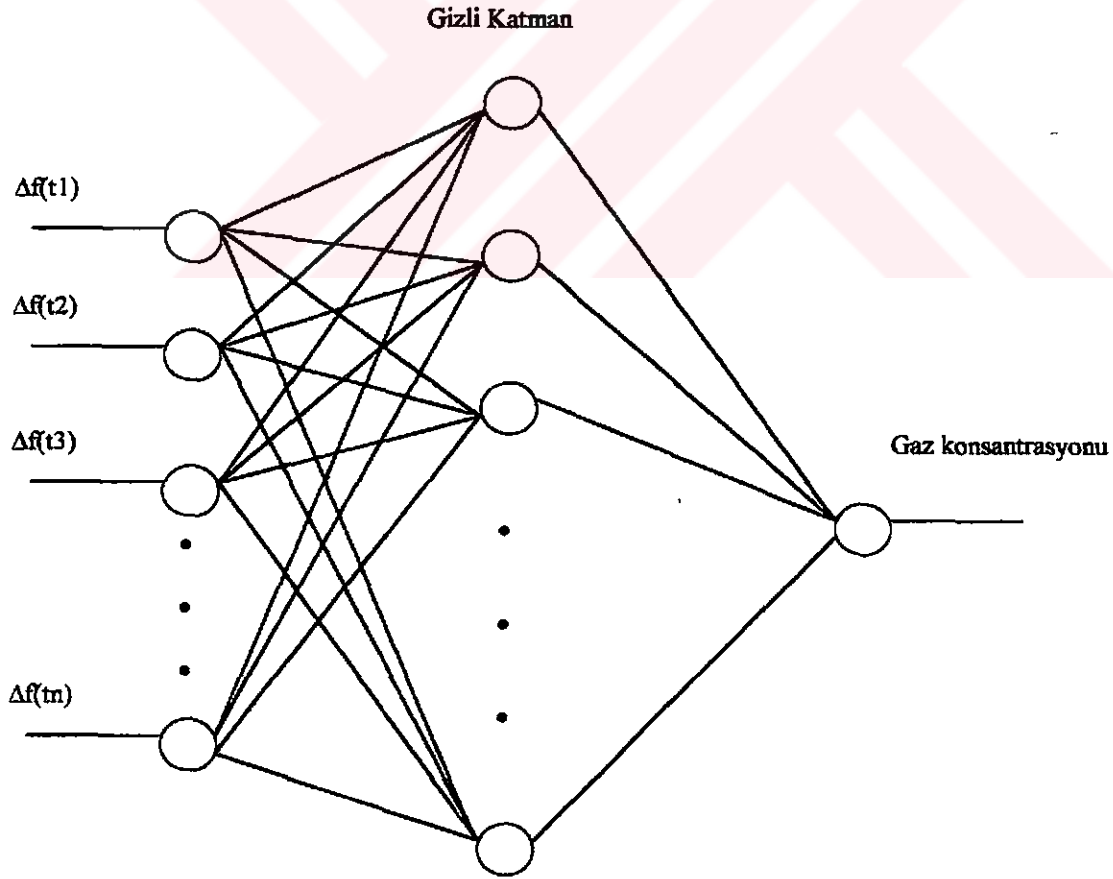
Bu kısımda yapay sinir ağı yardımı ile CCl_4 , CHCl_3 , Metanol ve Toluen gazlarının konsantrasyonlarının saptanması üzerinde çalışılmıştır.

Konsantrasyonların back propagation (geri yayılım) algoritması kullanılarak saptanılmasına çalışılmıştır. İki katmalı bir ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısı oluşturulmuştur.

YSA ile konsantrasyon saptaması yapılırken, bölüm 5.1 ve bölüm 5.2 'de izah edildiği gibi sensör cevabı olarak sadece kararlı hal cevabı değil aynı zamanda sensör cevap süresi kabul edilen geçiş bölgesi (transient) cevabı da kullanılmıştır.

Bunun amacı, sensör cevap süresi tamamlanmadan önce konsantrasyon tahminini yapmaktır.

Bu amaçla oluşturulan YSA yapısında 15 gizli katman ve 1 çıkış siniri kullanılmıştır. Giriş katmanı için ise alternatif olarak 3, 5, 8 ve 10 giriş siniri kullanılmıştır. Girişler için $\{\Delta f(t_1), \Delta f(t_2), \dots, \Delta f(t_n)\}$ değeri kullanıldı. n , kullanılan YSA yapısına göre sırasıyla 3, 5, 8 ve 10 alınmıştır. $\Delta f(t_1)$, t_1 anındaki frekans farkını ifade etmektedir. Şekil 5.3.3' de Kullanılan YSA yapısı görülmektedir.



Şekil 5.3.3 Gaz konsantrasyonu saptanmasında kullanılan YSA yapısı.

Şekil 5.3.3'te görülen YSA yapısı için kullanılan öğrenme ve test kümesi tablo 5.3.1' de gösterildiği şekilde düzenlenmiştir. Öğrenme ve test kümeleri bölüm 5.1 ve bölüm 5.2' de şekillerle ifade edildiği ve bu kümeler çok fazla veri içerdiği için örnek olarak Ek B' de sadece CCl_4 gazının 10000 ppm değeri için oluşturulan öğrenme ve test kümesi verilmiştir.

Tablo 5.3.1 YSA ile yapılan konsantrasyon tahmini için kullanılan öğrenme ve test kümesi

Girişler	Çıktılar
$\Delta f(t_1), \Delta f(t_2), \dots, \Delta f(t_n)$	Ppm
$\Delta f(t_2), \Delta f(t_3), \dots, \Delta f(t_{n+1})$	Ppm
$\Delta f(t_3), \Delta f(t_4), \dots, \Delta f(t_{n+2})$	Ppm
.....
.....

5.3.2. Bulanık mantık algoritması kullanılarak CCl_4 ve CHCl_3 gazlarının konsantrasyonlarının saptanması

Bu kısımda bulanık mantık yardımı ile CCl_4 ve CHCl_3 gazlarının konsantrasyonlarının saptanması üzerinde çalışılmıştır. Bu amaç ile bulanıklaştırma aşamasında Δf ve PPM üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.

İlk aşamada Δf üyelik fonksiyonu için küçük, orta ve büyük, PPM üyelik fonksiyonu için düşük, normal ve yüksek üyelik kümeleri kullanılmıştır.

Gaz konsantrasyonu tespitinde aşağıdaki bulanık mantık kuralları kullanılmıştır;

Eğer Δf küçük ise PPM düşüktür.

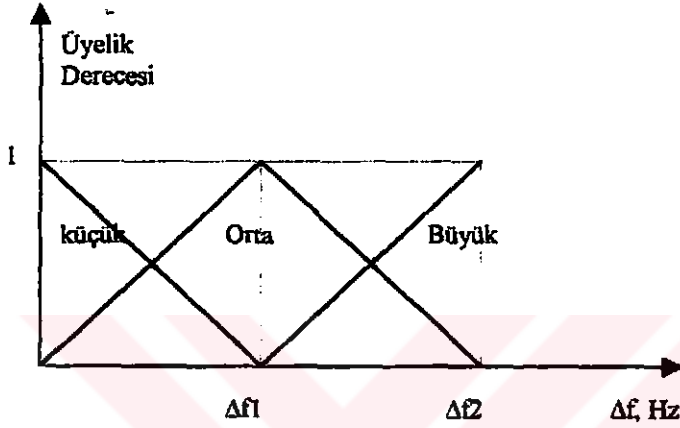
Eğer Δf orta ise PPM normaldir.

Eğer Δf büyük ise PPM yüksektir.

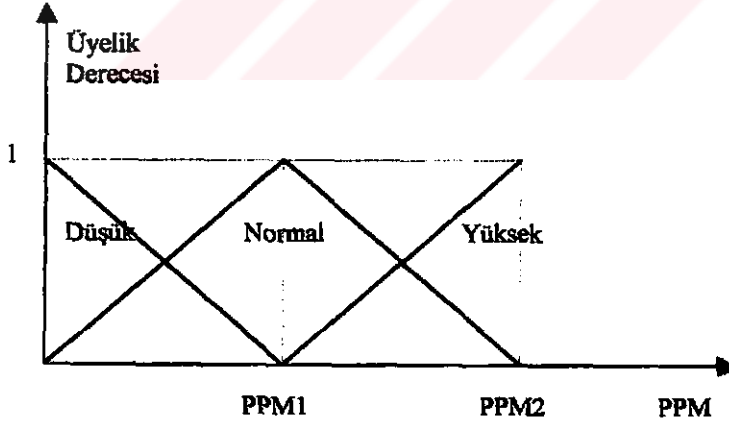
Bulanık mantık ile konsantrasyon saptaması yapılırken, sensörlerin sadece kararlı hal cevapları kullanılmıştır. Geçiş bölgesi cevapları hesaba katılmamıştır. Kararlı hal

cevapları uygulanan konsantrasyonlar için maksimum frekans değerinin %90 'ına ulaştığı değerlerdir ve bölüm 5.1 ve bölüm 5.2' de şekillerde net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 5.3.4 'de CCl_4 ve CHCl_3 gazları için kullanılan Δf üyelik fonksiyonu ve şekil 5.3.5' de PPM üyelik fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 5.3.4. CCl_4 ve CHCl_3 gazları için kullanılan Δf üyelik fonksiyonu



Şekil 5.3.5. CCl_4 ve CHCl_3 gazları için kullanılan PPM üyelik fonksiyonu

Şekil 5.3.4 'de görülen Δf_1 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 160 Hz, 24 nolu QCM sensörde 250 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 410 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM

sensörde 410 Hz ve Δf_2 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 320 Hz, 24 nolu QCM sensörde 500 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 820 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM sensörde 820 Hz alınmıştır.

Şekil 5.3.5 'de görülen PPM1 değeri CCl_4 için 5000 ppm, CHCl_3 için 5000 ppm ve PPM2 değeri CCl_4 için 10000 ppm, CHCl_3 için 10000 ppm, alınmıştır.

İkinci aşamada Δf üyelik fonksiyonu çok küçük ve çok büyük, PPM üyelik fonksiyonu çok düşük ve çok yüksek üyelik kümeleri ile genişletilmiştir.

Bulanık mantık kurallarına da aşağıdaki kurallar eklenmiştir;

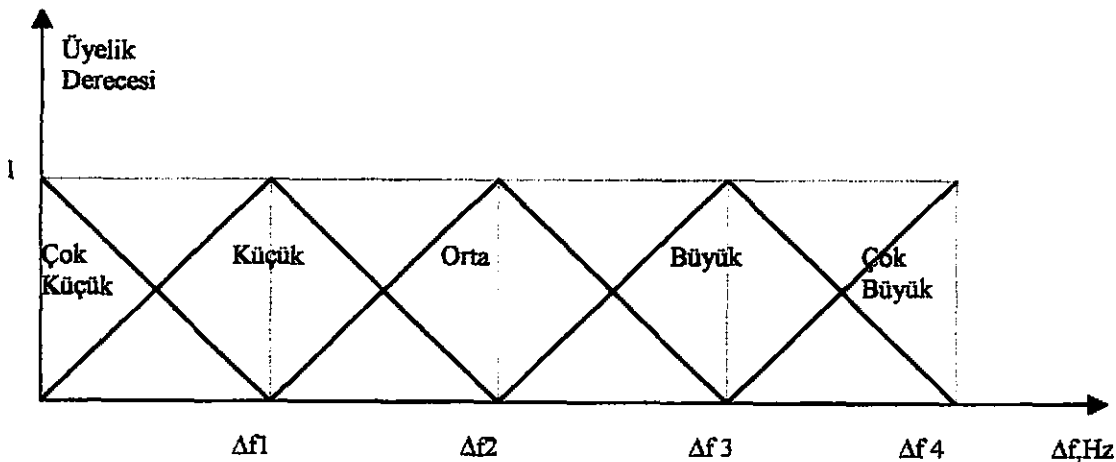
Eğer Δf çok küçük ise PPM çok düşüktür.

Eğer Δf çok büyük ise PPM çok yüksektir.

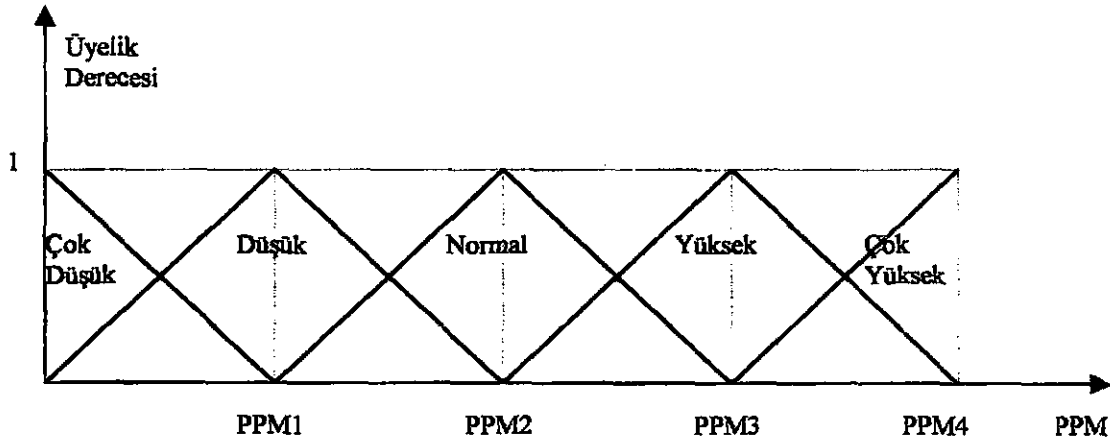
Berraklaştırma (defuzzyfication) aşamasında değer olarak gaz konsantrasyonu saptamak için ağırlık merkezi metodu kullanılmıştır ;

$$\text{PPM} = \frac{\mu(\text{çok düşük}).\text{PPM}(\text{çok düşük}) + \dots + \mu(\text{çok yüksek}).\text{PPM}(\text{çok yüksek})}{\mu(\text{çok düşük}) + \mu(\text{düşük}) + \dots + \mu(\text{çok yüksek})}$$

Şekil 5.3.6' da CCl_4 ve CHCl_3 gazları için genişletilmiş Δf üyelik fonksiyonu ve şekil 5.3.7' de genişletilmiş PPM üyelik fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 5.3.6. CCl_4 ve CHCl_3 gazları için kullanılan genişletilmiş Δf üyelik fonksiyonu



Şekil 5.3.7. CCl_4 ve CHCl_3 gazları için kullanılan genişletilmiş PPM üyelik fonksiyonu

Şekil 5.3.6 'da görülen Δf_1 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 30 Hz, 24 nolu QCM sensörde 50 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 80 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM sensörde 80 Hz, Δf_2 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 90 Hz, 24 nolu QCM sensörde 130 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 220 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM sensörde 220 Hz, Δf_3 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 160 Hz, 24 nolu QCM sensörde 250 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 420 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM sensörde 420 Hz ve Δf_3 değeri CCl_4 için 12 nolu QCM sensörde 320 Hz, 24 nolu QCM sensörde 500 Hz ve 36 nolu QCM sensörde 820 Hz, CHCl_3 için 36 nolu QCM sensörde 820 Hz alınmıştır.

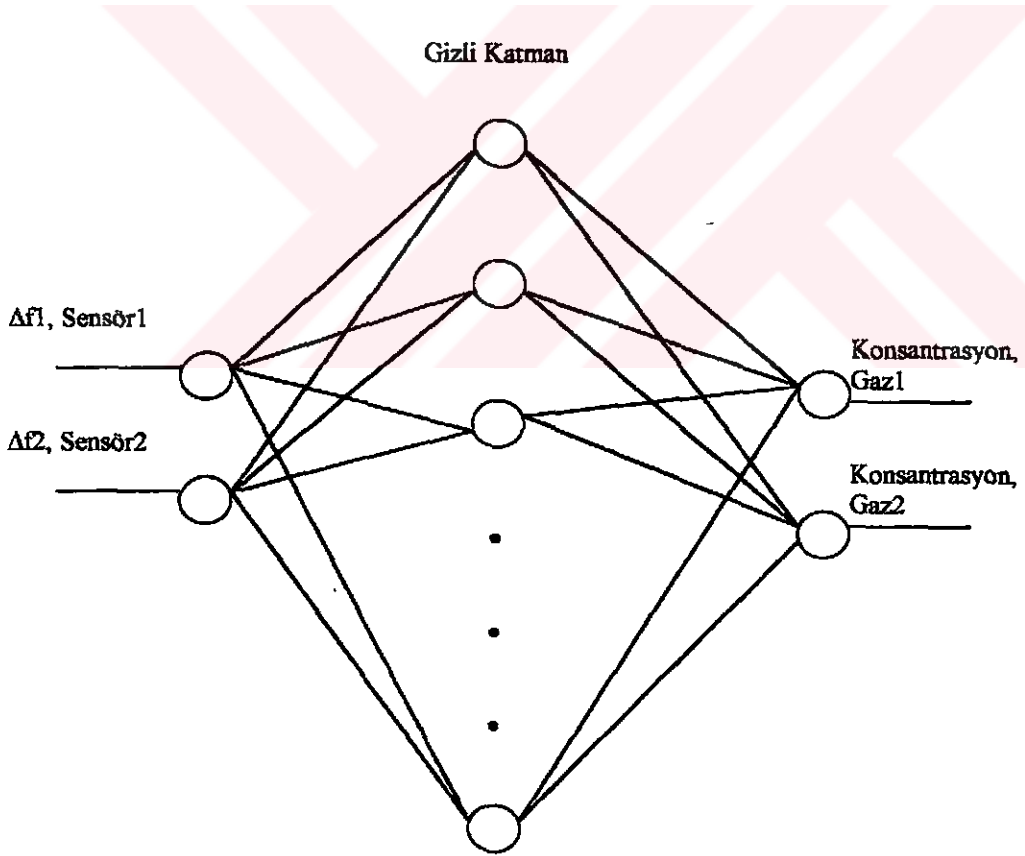
Şekil 5.3.7 'de görülen PPM1 değeri CCl_4 ve CHCl_3 için 2000 ppm, PPM2 değeri CCl_4 ve CHCl_3 için 5000 ppm, PPM3 değeri CCl_4 ve CHCl_3 için 8000 ppm ve PPM4 değeri CCl_4 ve CHCl_3 için 10000 ppm alınmıştır.

5.3.3. YSA ile CCl_4 - Metanol , CCl_4 - Toluen ve Toluen - Metanol gaz karışımlarının sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının saptanması

Bu bölümde birinci aşama olarak YSA yardımıyla CCl_4 ve Metanol gaz karışımının miktarsal olarak sınıflandırılması üzerinde çalışılmıştır. Bunun için 12 ve 24 nolu QCM sensörler kullanılmıştır.

Bu işlem yapılırken QCM sensörlerin sadece kararlı hal cevapları kullanılmıştır. YSA yapısı olarakta 2 girişli 2 çıkışlı ve gizli katmanı 10 sinirli olan bir ağ kullanılmıştır.

Kullanılan YSA yapısı Şekil 5.3.8' de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.3.8. Miktarasal sınıflandırma için kullanılan YSA yapısı

5.3.4. Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak CCl_4 - Metanol , CCl_4 – Toluen ve Toluen - Metanol gaz karışımlarının sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının saptanması

Bu bölümde ikinci aşama olarak paralel YSA ve Bulanık mantık karar algoritması kullanılarak CCl_4 ve Metanol gaz karışımının miktarsal olarak sınıflandırılması üzerinde çalışılmıştır. Yine 12 ve 24 no'lu QCM sensörlerin sadece kararlı hal cevapları kullanılmıştır. 2 giriş, 10 gizli sinir ve 2 çıkışlı 3 tane YSA ile paralel ağ yapısı oluşturulmuştur (Şekil 5.3.9).

Paralel yapıda Bulanık mantık 24 no'lu QCM sensörün cevaplarını kullanan karar mekanizmasını oluşturmuştur. Bu işlemde Δf üyelik fonksiyonu için küçük, orta ve büyük üyelik kümeleri tanımlanmıştır (şekil 5.3.10).

Çıkışı kullanılacak YSA'nın tespitinde aşağıdaki bulanık mantık kuralları kullanılmıştır;

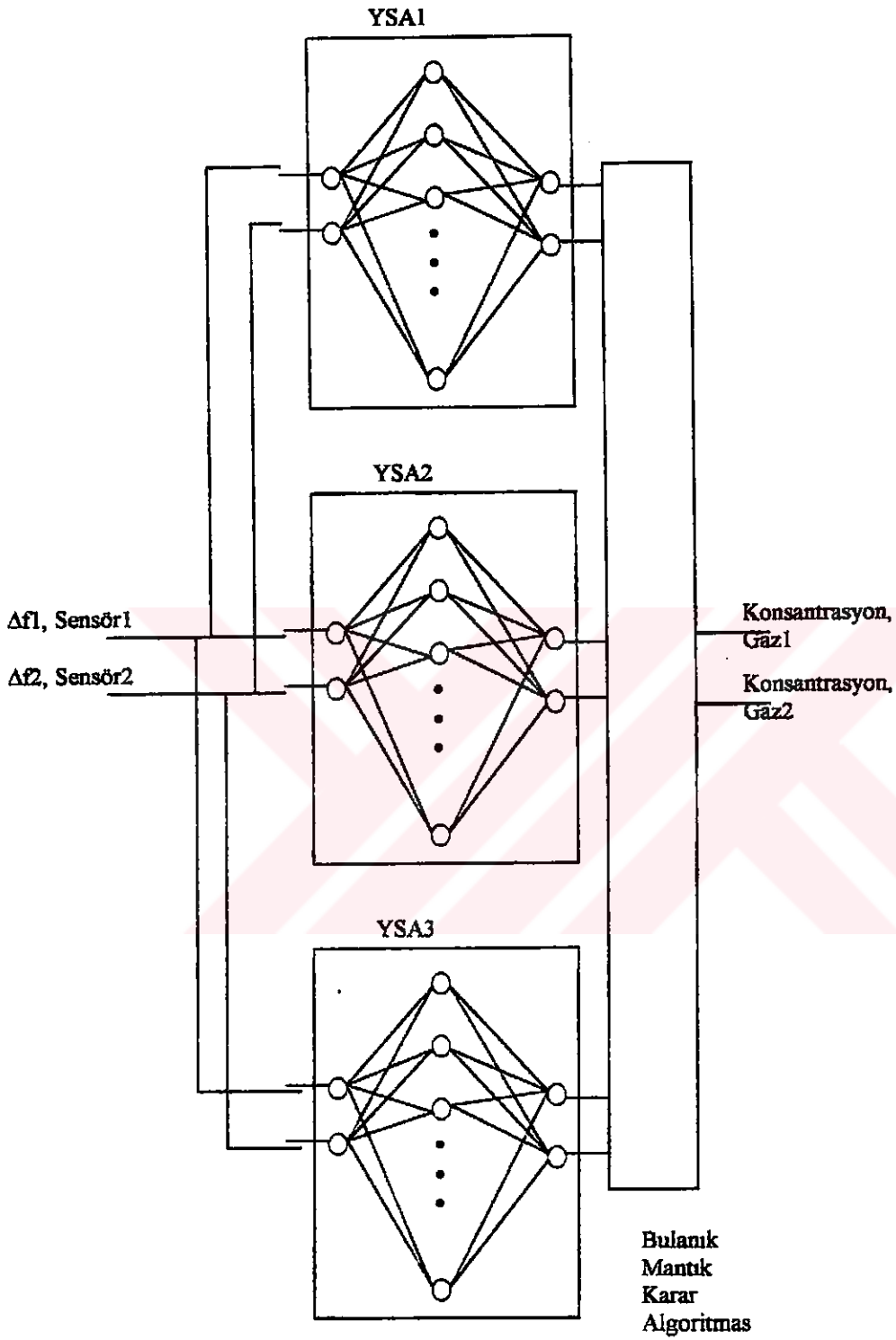
Eğer Δf küçük ise YSA1' i kullan.

Eğer Δf orta ise YSA2' yi kullan.

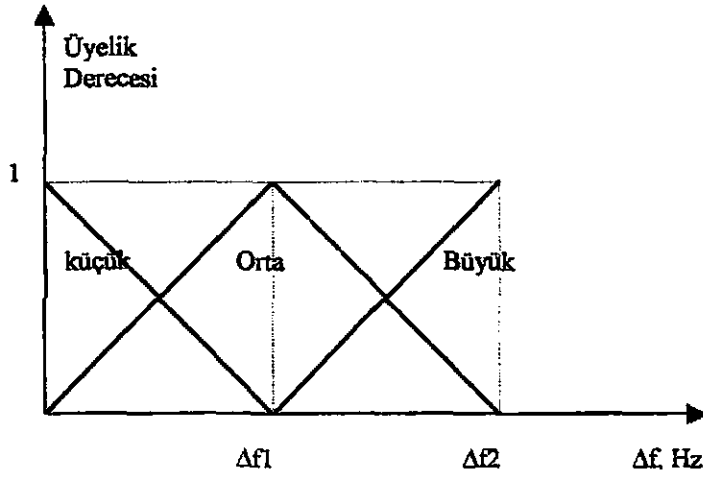
Eğer Δf büyük ise YSA3'ü kullan.

Bu amaç için şekil 5.3.11'de görülen YSA olarak adlandırılan üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

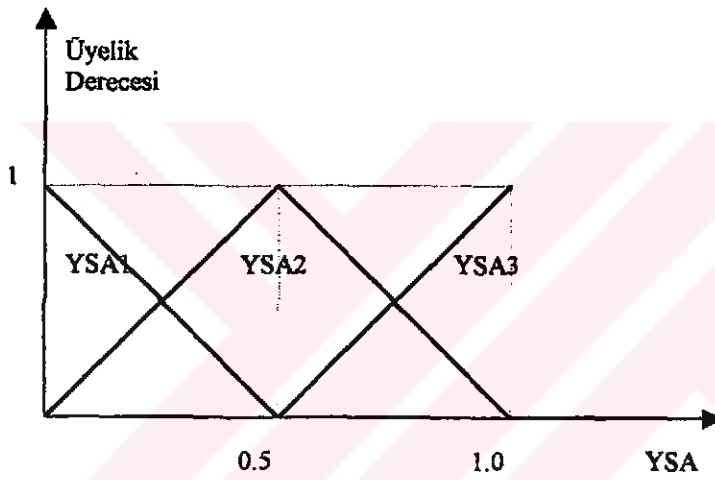
Berraklaştırma aşamasında , maksimum berraklaştırma metodu kullanılmıştır.



Şekil 5.3.9. Miktersal sınıflandırma için kullanılan paralel YSA yapısı



Şekil 5.3.10. Bulanık karar mekanizmasında kullanılan Δf üyelik fonksiyonu



Şekil 5.3.11. Bulanık karar mekanizmasında kullanılan YSA üyelik fonksiyonu

Şekil 5.3.10' da görülen Δf_1 değeri CCl_4 – Toluan karışımı için 40 Hz, CCl_4 – Metanol için 250 Hz ve Metanol - Toluen için 250 Hz ve Δf_2 CCl_4 – Toluan karışımı için 200 Hz, CCl_4 – Metanol için 700 Hz ve Metanol - Toluen için 700 Hz alınmıştır.

5.4. Değerlendirme

Bu çalışmada performans değerlendirmesi için, ortalama mutlak hata $E(RAE)$ ve maksimum hata $\max(RAE)$ değerleri kullanılmıştır [38] ;

$$E(RAE) = \frac{1}{n_{test}} \sum_{testset} \left(\frac{(P_{predicted} - P_{true})}{P_{true}} \right) \quad \forall P_{true} \neq 0$$

$$\max(RAE) = \max_{testset} \left(\frac{(P_{predicted} - P_{true})}{P_{true}} \right) \quad \forall P_{true} \neq 0$$

Burada , $P_{predicted}$, YSA tarafından tahmin edilen değerler, P_{true} , gerçek değerler ve n_{test} , test için kullanılan değerlerin sayısıdır.

Bu hata değerlerinden ortalama görel mutlak hata $E(RAE)$, sistemin istenilen tahmin değerlerinden ortalama sapma oranını gösterir. Maksimum hata $\max(RAE)$, sistemin istenilen tahmin değerlerinden görülen en büyük sapmasını ifade eder.

Sistemin performansını göstermesi açısından ortalama görel mutlak hata $E(RAE)$ daha önemlidir çünkü sistemin genel performansını göstermektedir. Maksimum görel hata ise sistemdeki uç sapmaları gösterir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Gazların miktarsal sınıflandırılması ve konsantrasyonlarının belirlenmesi için oluşturulan algoritmalar bölüm 5’ te izah edilen ölçülmüş deneysel sensör sinyal data setleri kullanılarak eğitilmişlerdir. Böylece uygun ağırlık değerleri oluşturulan YSA yapıları ve bulanık mantık algoritmaları ölçülmüş deneysel sensör sinyal data setleri kullanılarak test edilmişlerdir.

6.1 YSA ile elde edilen CCl₄ gaz konsantrasyon saptama sonuçları

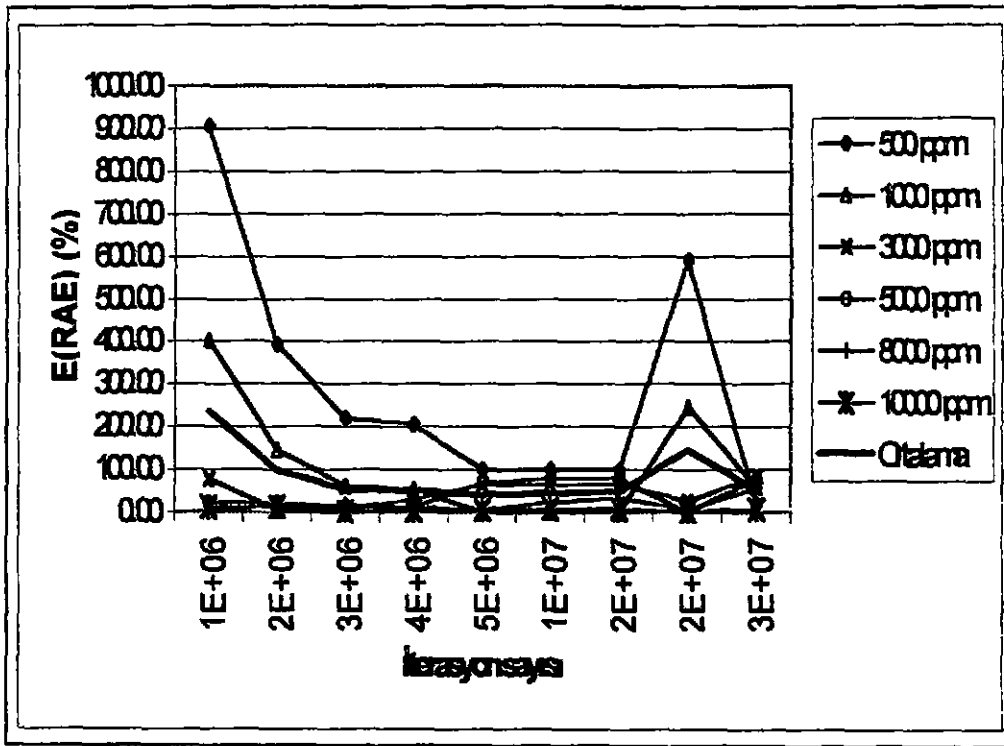
12, 24 ve 36 no’lu QCM sensörlerinin normalize edilmiş Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir. Burada verilen “Ortalama” sistemin tüm konsantrasyonlar için genel performansını ifade etmektedir.

CCl₄ gazı için, 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde % 40’ın üzerinde bir ortalama hata ile öğrenme yapabilmıştır (Tablo 6.1.1). 12 nolu QCM sensör ile yapılan ölçümlerde şekil 5.1.1’de ki grafikte görülen düşük konsantrasyonlardaki belirsizlik YSA’nın öğrenmesini zorlaştırmıştır.

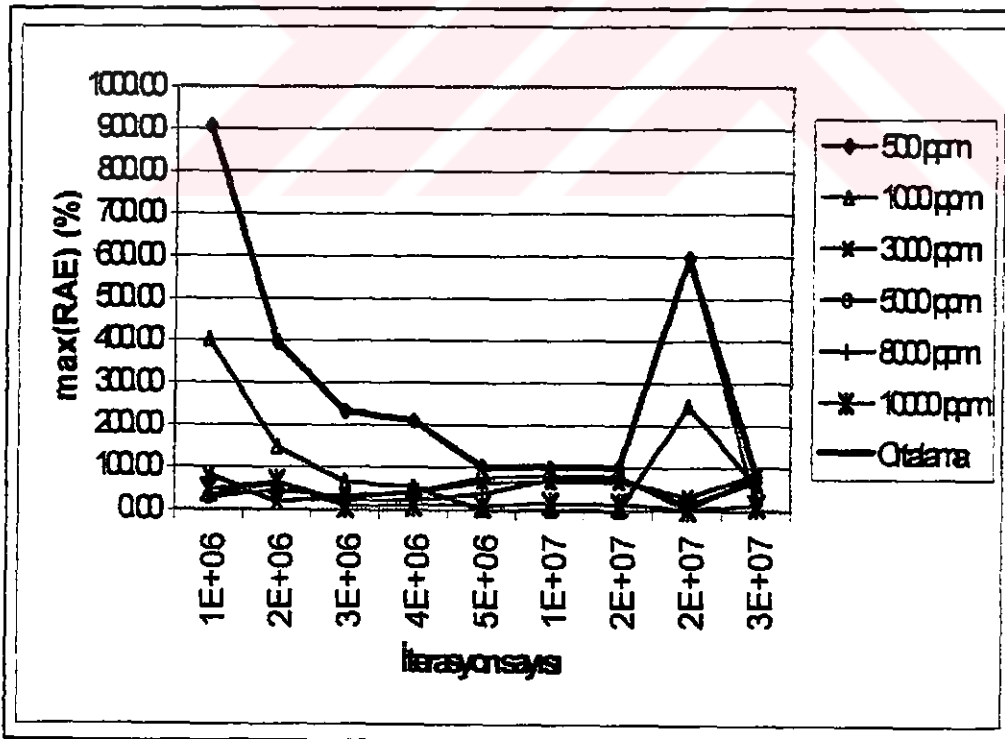
Tablo 6.1.1 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.1 ve şekil 6.1.2 ‘de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır. 20 milyon itarasyonda hata bölüm 5.1.12 ‘de bahsedildiği gibi bir osilasyona girmiş ve bir kısmi maksimuma çıkmıştır. Öğrenme işlemine devam edince hata daha sonra tekrar eski seviyesine düşmüştür.

Tablo 6.1.1. 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon ↓ Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	5026	5026	5368	6121	7860	8934	
	E(RAE) (%)	905.30	402.58	78.93	22.41	1.75	10.66	236.94
	max(RAE) (%)	906.79	403.51	83.30	29.09	34.11	45.30	906.79
2000000	ANN tahmini (ppm)	2463	2464	2882	3907	6778	8623	
	E(RAE) (%)	392.57	146.35	3.93	21.85	15.27	13.77	98.96
	max(RAE) (%)	394.98	147.47	16.52	45.75	61.81	65.00	394.98
3000000	ANN tahmini (ppm)	1603	1617	2760	5649	9390	9922	
	E(RAE) (%)	220.54	61.66	7.99	12.99	17.37	0.78	53.55
	max(RAE) (%)	232.78	65.12	30.25	26.58	20.65	7.02	232.78
4000000	ANN tahmini (ppm)	1529	1535	2106	4450	8954	9624	
	E(RAE) (%)	205.85	53.48	29.79	11.00	11.92	3.76	52.63
	max(RAE) (%)	210.81	54.89	42.09	42.68	21.13	12.12	210.81
5000000	ANN tahmini (ppm)	999	1000	1044	1568	8403	9415	
	E(RAE) (%)	99.89	0.02	65.22	68.64	5.04	5.85	40.78
	max(RAE) (%)	100.17	0.13	66.14	75.24	38.53	9.74	100.17
10000000	ANN tahmini (ppm)	1000	1000	1003	1065	6146	9172	
	E(RAE) (%)	100.00	0.00	66.58	78.71	23.17	8.28	46.12
	max(RAE) (%)	100.00	0.01	66.64	79.47	71.55	14.58	100.00
15000000	ANN tahmini (ppm)	1000	1000	1001	1032	5284	9227	
	E(RAE) (%)	100.00	0.00	66.63	79.35	33.95	7.73	47.94
	max(RAE) (%)	100.00	0.01	66.66	79.74	76.09	14.10	100.00
20000000	ANN tahmini (ppm)	3459	3465	3826	4988	8471	9880	
	E(RAE) (%)	591.83	246.47	27.52	0.25	5.89	1.20	145.53
	max(RAE) (%)	596.12	247.59	30.85	4.51	12.69	2.07	596.12
25000000	ANN tahmini (ppm)	405	406	483	1005	3291	9280	
	E(RAE) (%)	19.02	59.40	83.91	79.90	58.86	7.20	51.38
	max(RAE) (%)	19.74	59.59	84.44	81.51	69.80	11.28	84.44



Şekil 6.1.1. 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



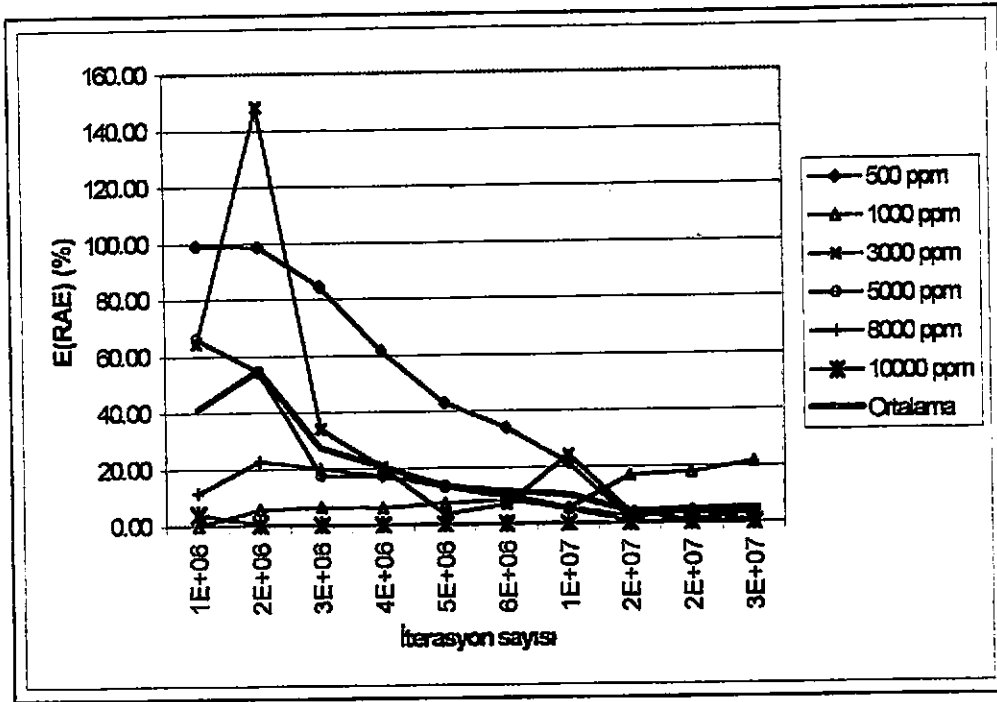
Şekil 6.1.2. 12 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

CCL₄ gazı için 24 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2’de de görüldüğü gibi % 4 civarında çok iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA’nın performansı 24 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

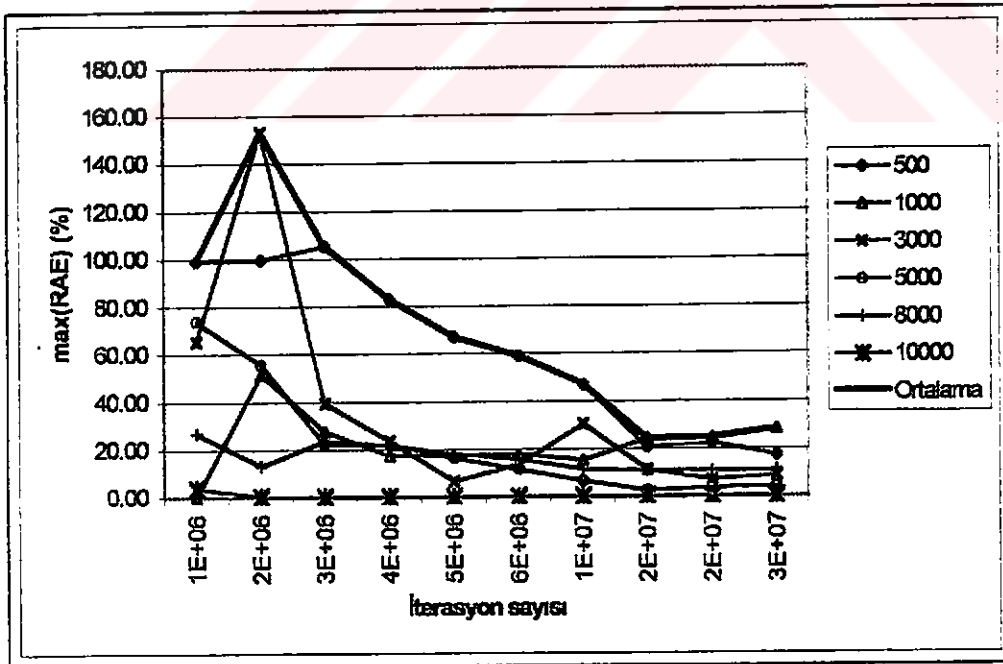
Tablo 6.1.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	996	1000	1060	1688	8938	9596	
	E(RAE) (%)	99.26	0.00	64.68	66.25	11.72	4.04	40.99
	max(RAE) (%)	99.34	0.26	65.63	74.13	27.04	3.75	99.34
2000000	ANN tahmini (ppm)	6	1059	7451	7719	9814	9964	
	E(RAE) (%)	98.86	5.89	148.37	54.38	22.68	0.36	55.09
	max(RAE) (%)	99.72	51.51	153.22	55.67	13.29	0.36	153.22
3000000	ANN tahmini (ppm)	923	1065	1975	4108	9593	9995	
	E(RAE) (%)	84.55	6.48	34.17	17.83	19.91	0.05	27.17
	max(RAE) (%)	105.56	27.32	39.31	22.22	23.62	0.05	105.56
4000000	ANN tahmini (ppm)	808	1061	2391	4120	9391	9999	
	E(RAE) (%)	61.55	6.10	20.31	17.60	17.38	0.01	20.50
	max(RAE) (%)	83.13	17.48	23.36	21.81	21.43	0.01	83.13
5000000	ANN tahmini (ppm)	715	1075	2892	4332	9082	9999	
	E(RAE) (%)	42.96	7.51	3.59	13.35	13.52	0.01	13.49
	max(RAE) (%)	67.01	17.36	6.55	16.33	18.27	0.01	67.01
10000000	ANN tahmini (ppm)	607	1056	3727	5244	8440	9998	
	E(RAE) (%)	21.35	5.58	24.25	4.89	5.50	0.02	10.26
	max(RAE) (%)	46.77	15.29	30.33	6.55	11.47	0.02	46.77
15000000	ANN tahmini (ppm)	508	832	3108	4969	7800	9999	
	E(RAE) (%)	1.58	16.78	3.62	0.62	2.50	0.01	4.18
	max(RAE) (%)	20.41	24.16	11.22	2.58	10.61	0.01	24.16
20000000	ANN tahmini (ppm)	522	821	2974	4964	7721	10000	
	E(RAE) (%)	4.34	17.86	0.86	0.71	3.49	0.00	4.54
	max(RAE) (%)	22.09	24.80	6.91	3.53	10.79	0.00	24.80

Tablo 6.1.2 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.3 ve şekil 6.1.4 ‘de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır.



Şekil 6.1.3. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



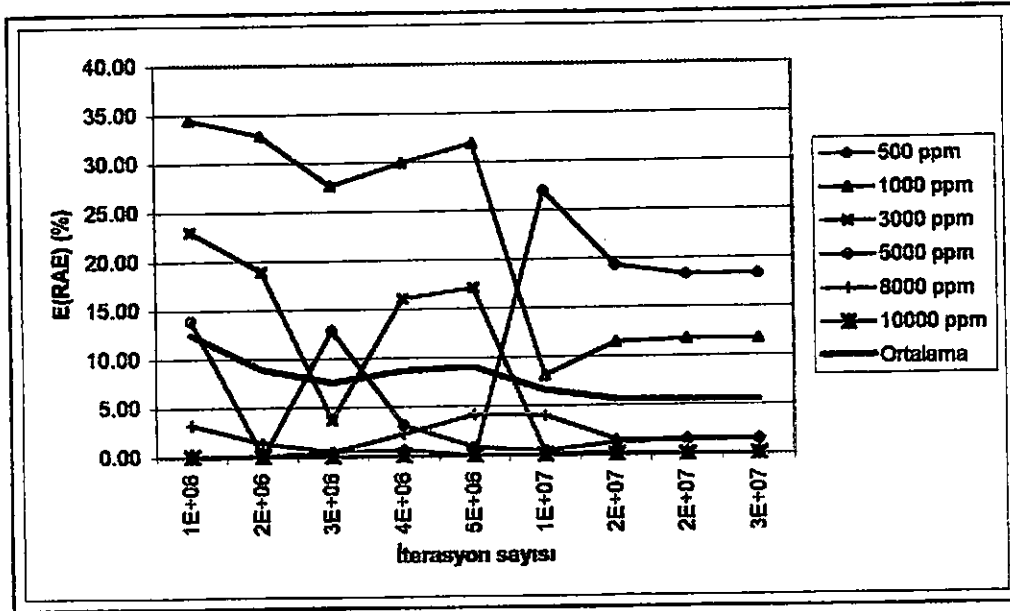
Şekil 6.1.4. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

CCl₄ gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2'de de görüldüğü gibi % 5.5 civarında çok iyi ortalama bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA'nın performansı 36 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

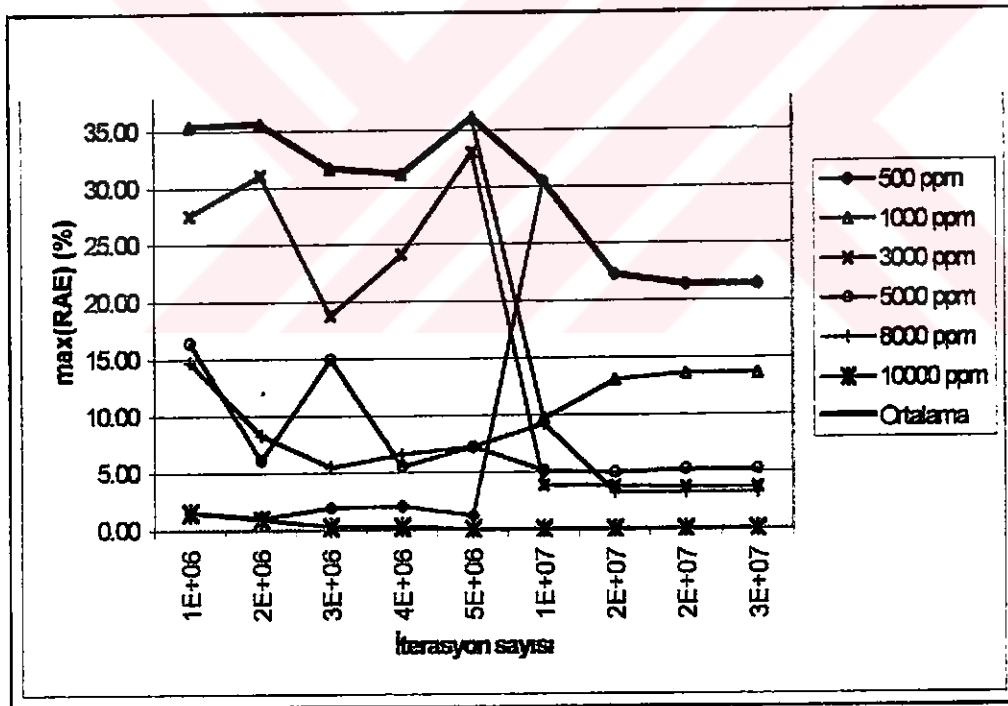
Tablo 6.1.3. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	499	655	2310	4304	8262	9994	
	E(RAE) (%)	0.11	34.47	23.01	13.92	3.27	0.06	12.47
	max(RAE) (%)	1.61	35.41	27.59	16.40	14.70	1.53	35.41
2000000	ANN tahmini (ppm)	500	671	2432	5004	7887	9998	
	E(RAE) (%)	0.04	32.88	18.95	0.07	1.41	0.02	8.89
	max(RAE) (%)	1.06	35.60	31.09	6.08	8.28	0.91	35.60
3000000	ANN tahmini (ppm)	503	723	2887	5644	7960	10000	
	E(RAE) (%)	0.52	27.67	3.78	12.88	0.50	0.00	7.56
	max(RAE) (%)	1.99	31.73	18.76	14.99	5.51	0.26	31.73
4000000	ANN tahmini (ppm)	503	701	2517	5158	7817	10000	
	E(RAE) (%)	0.67	29.93	16.11	3.17	2.28	0.00	8.69
	max(RAE) (%)	2.08	31.17	24.16	5.56	6.60	0.27	31.17
5000000	ANN tahmini (ppm)	500	681	2486	4957	7664	10000	
	E(RAE) (%)	0.00	31.93	17.14	0.85	4.21	0.00	9.02
	max(RAE) (%)	1.20	36.10	33.08	7.23	7.24	0.07	36.10
10000000	ANN tahmini (ppm)	635	919	2993	4977	7679	10000	
	E(RAE) (%)	26.99	8.11	0.22	0.45	4.01	0.00	6.63
	max(RAE) (%)	30.50	9.69	3.84	5.12	9.24	0.00	30.50
15000000	ANN tahmini (ppm)	597	885	2994	4937	7878	10000	
	E(RAE) (%)	19.32	11.48	0.19	1.27	1.52	0.00	5.63
	max(RAE) (%)	22.27	13.05	3.72	4.96	3.19	0.00	22.27
20000000	ANN tahmini (ppm)	592	883	2999	4927	7875	10000	
	E(RAE) (%)	18.32	11.71	0.03	1.47	1.56	0.00	5.52
	max(RAE) (%)	21.42	13.61	3.64	5.24	3.20	0.00	21.42

Tablo 6.1.3 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.5 ve şekil 6.1.6 'da görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır.



Şekil 6.1.5. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



Şekil 6.1.6. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

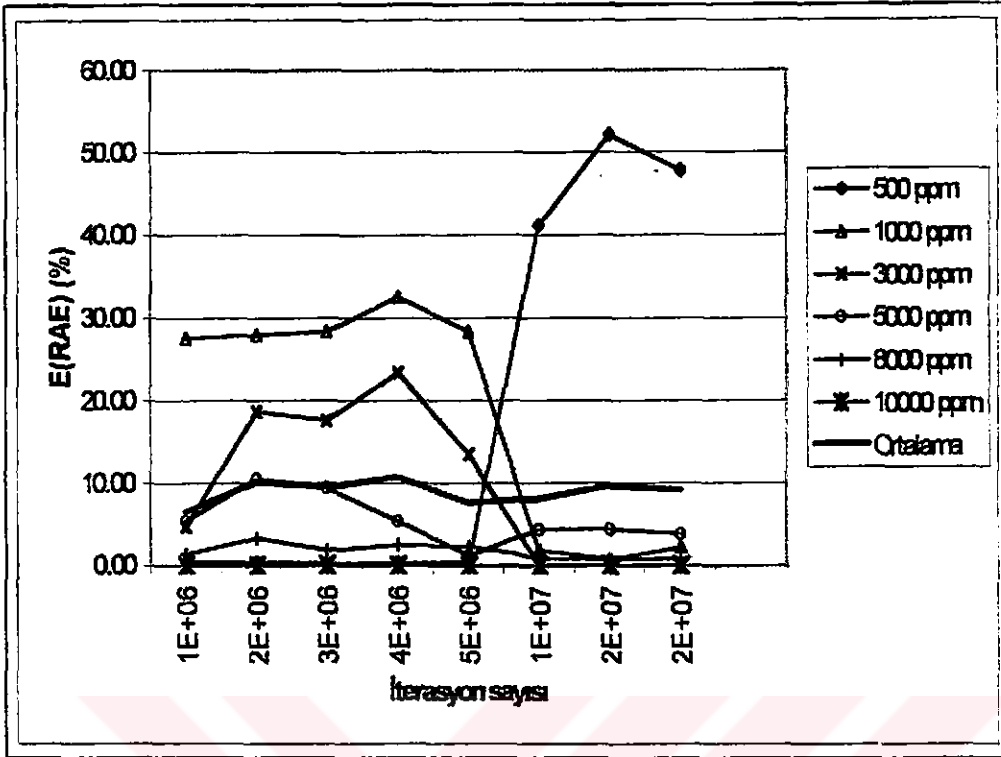
CCl_4 gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (8 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2'de de görüldüğü gibi ortalama % 6.5 civarında iyi bir öğrenme sonucu

elde edilmiştir. YSA'nın performansı 36 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

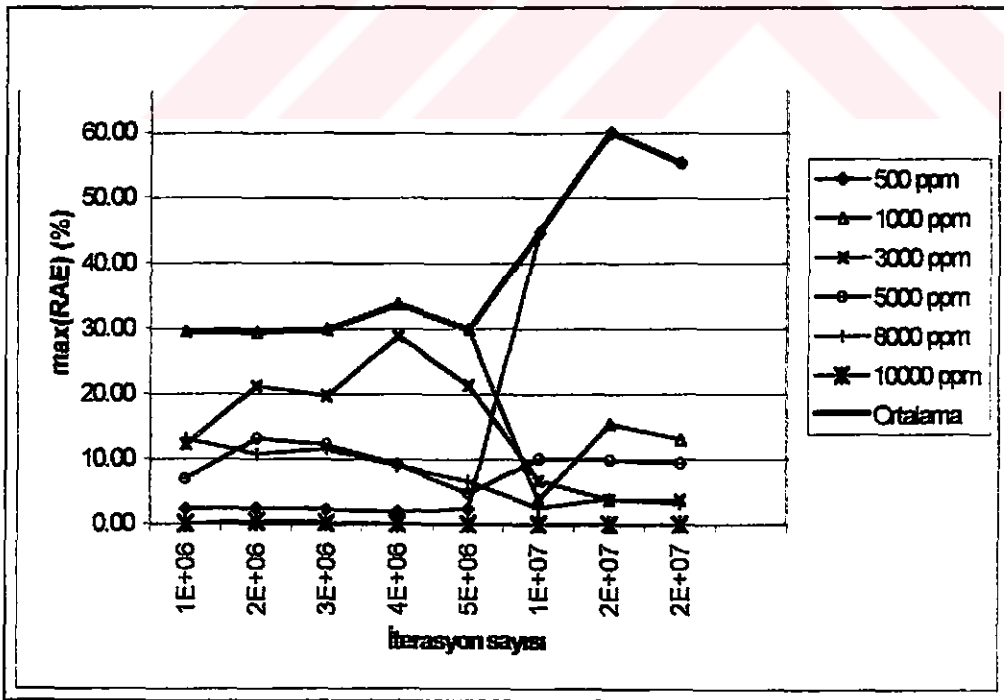
Tablo 6.1.4. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (8 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	502	725	2858	4727	8111	9999	
	E(RAE) (%)	0.49	27.47	4.72	5.45	1.39	0.01	6.59
	max(RAE) (%)	2.41	29.64	12.28	7.03	13.13	0.05	29.64
2000000	ANN tahmini (ppm)	502	721	2441	4471	8270	9998	
	E(RAE) (%)	0.43	27.94	18.63	10.58	3.37	0.02	10.16
	max(RAE) (%)	2.51	29.55	21.18	13.16	10.79	0.44	29.55
3000000	ANN tahmini (ppm)	501	717	2472	4525	8149	9996	
	E(RAE) (%)	0.28	28.33	17.61	9.50	1.86	0.04	9.60
	max(RAE) (%)	2.32	29.90	19.72	12.18	11.53	0.32	29.90
4000000	ANN tahmini (ppm)	501	675	2299	4729	7798	9999	
	E(RAE) (%)	0.26	32.53	23.37	5.42	2.53	0.01	10.69
	max(RAE) (%)	1.92	33.79	28.93	9.29	9.02	0.13	33.79
5000000	ANN tahmini (ppm)	502	716	2595	5063	7815	10000	
	E(RAE) (%)	0.45	28.36	13.49	1.26	2.31	0.00	7.64
	max(RAE) (%)	2.39	29.90	21.28	4.74	6.70	0.02	29.90
10000000	ANN tahmini (ppm)	706	982	2999	5220	7924	10000	
	E(RAE) (%)	41.28	1.83	0.04	4.40	0.95	0.00	8.08
	max(RAE) (%)	44.81	3.83	6.83	10.15	2.56	0.00	44.81
15000000	ANN tahmini (ppm)	761	992	3002	5221	7945	10000	
	E(RAE) (%)	52.13	0.77	0.06	4.41	0.69	0.00	9.68
	max(RAE) (%)	60.08	15.51	3.81	9.96	3.87	0.00	60.08
20000000	ANN tahmini (ppm)	739	978	3003	5193	7929	10000	
	E(RAE) (%)	47.81	2.20	0.09	3.86	0.89	0.00	9.14
	max(RAE) (%)	55.35	13.10	3.84	9.47	3.27	0.00	55.35

Tablo 6.1.4 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.7 ve şekil 6.1.8 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve görelî mutlak ortalama hata ortalama olarak 9-10 civarında bir osilasyona girmiş gibi görülmektedir.



Şekil 6.1.7. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (8 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



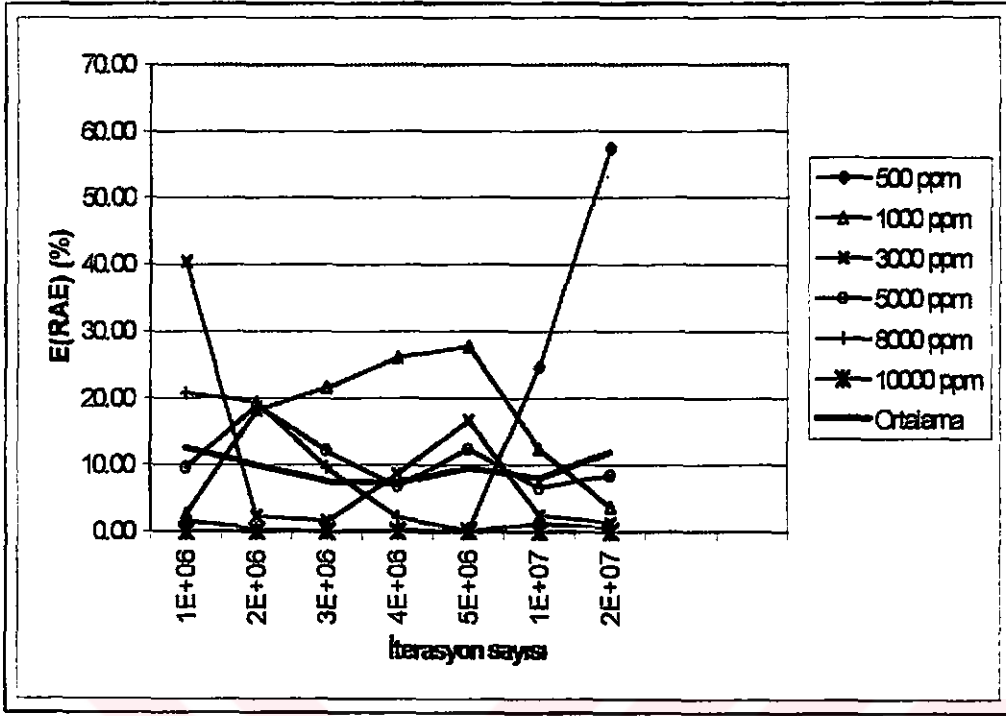
Şekil 6.1.8. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (8 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

CCl_4 gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (5 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2’de de görüldüğü gibi ortalama % 7.4 civarında iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA’nın performansı 36 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

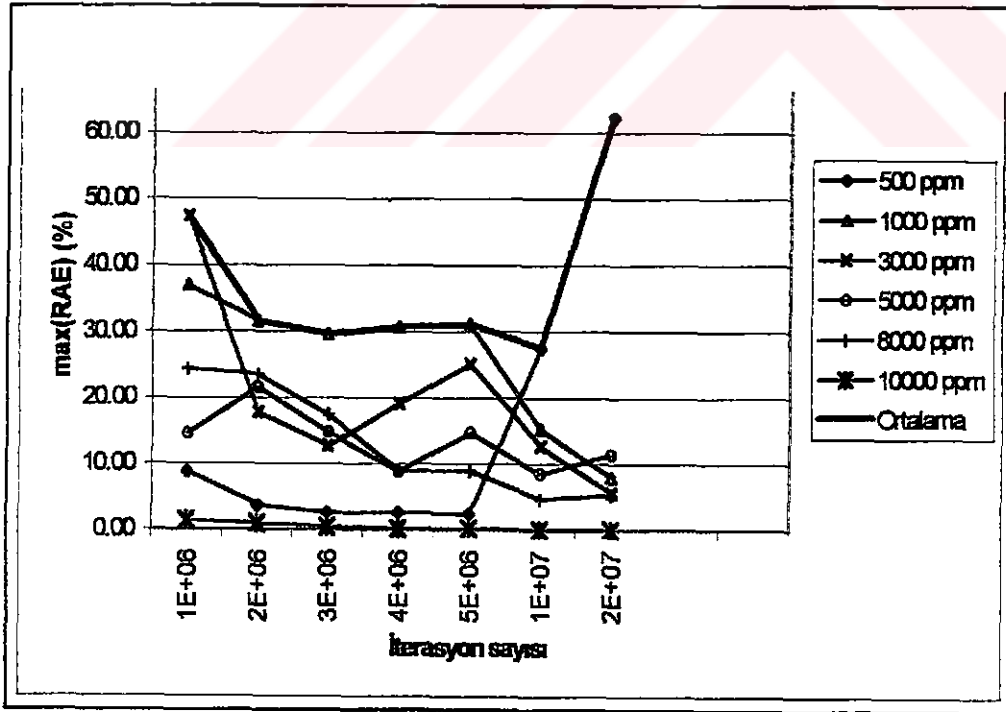
Tablo 6.1.5. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (5 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	492	973	4212	4517	9658	9997	
	E(RAE) (%)	1.59	2.67	40.39	9.67	20.73	0.03	12.51
	max(RAE) (%)	8.92	37.00	47.42	14.66	24.36	1.42	47.42
2000000	ANN tahmini (ppm)	498	818	2929	4053	9551	9995	
	E(RAE) (%)	0.39	18.21	2.37	18.94	19.39	0.05	9.89
	max(RAE) (%)	3.72	31.58	17.80	21.61	23.50	0.93	31.58
3000000	ANN tahmini (ppm)	500	784	2951	4395	8773	9995	
	E(RAE) (%)	0.02	21.61	1.64	12.10	9.67	0.05	7.51
	max(RAE) (%)	2.54	29.60	12.73	14.70	17.34	0.44	29.60
4000000	ANN tahmini (ppm)	502	738	2740	4658	8174	9997	
	E(RAE) (%)	0.33	26.16	8.65	6.83	2.18	0.03	7.36
	max(RAE) (%)	2.63	30.63	19.06	8.89	9.05	0.22	30.63
5000000	ANN tahmini (ppm)	501	722	2498	4380	8009	9997	
	E(RAE) (%)	0.25	27.76	16.73	12.40	0.11	0.03	9.55
	max(RAE) (%)	2.50	31.11	25.16	14.66	8.97	0.26	31.11
10000000	ANN tahmini (ppm)	624	876	2925	5330	7900	10000	
	E(RAE) (%)	24.77	12.42	2.51	6.59	1.25	0.00	7.92
	max(RAE) (%)	27.46	15.21	12.70	8.46	4.67	0.01	27.46
15000000	ANN tahmini (ppm)	788	1037	2959	5426	8048	10000	
	E(RAE) (%)	57.52	3.69	1.35	8.53	0.60	0.00	11.95
	max(RAE) (%)	62.30	8.03	5.60	11.47	5.30	0.00	62.30

Tablo 6.1.5 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.9 ve şekil 6.1.10 ‘da görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve görelî mutlak ortalama hata ortalama olarak 10 civarında bir osilasyona girmiş gibi görülmektedir.



Şekil 6.1.9. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (5 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri



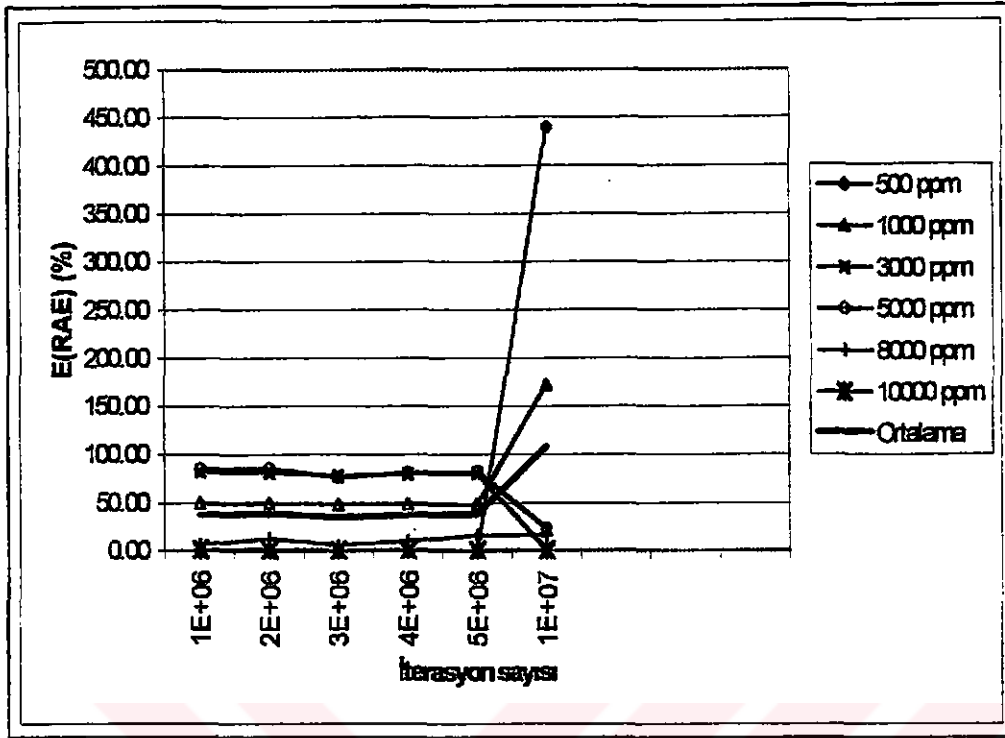
Şekil 6.1.10. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (5 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri

CCL₄ gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (3 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2'de de görüldüğü gibi ortalama % 34 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA'nın performansı tatmin edici görülmemektedir.

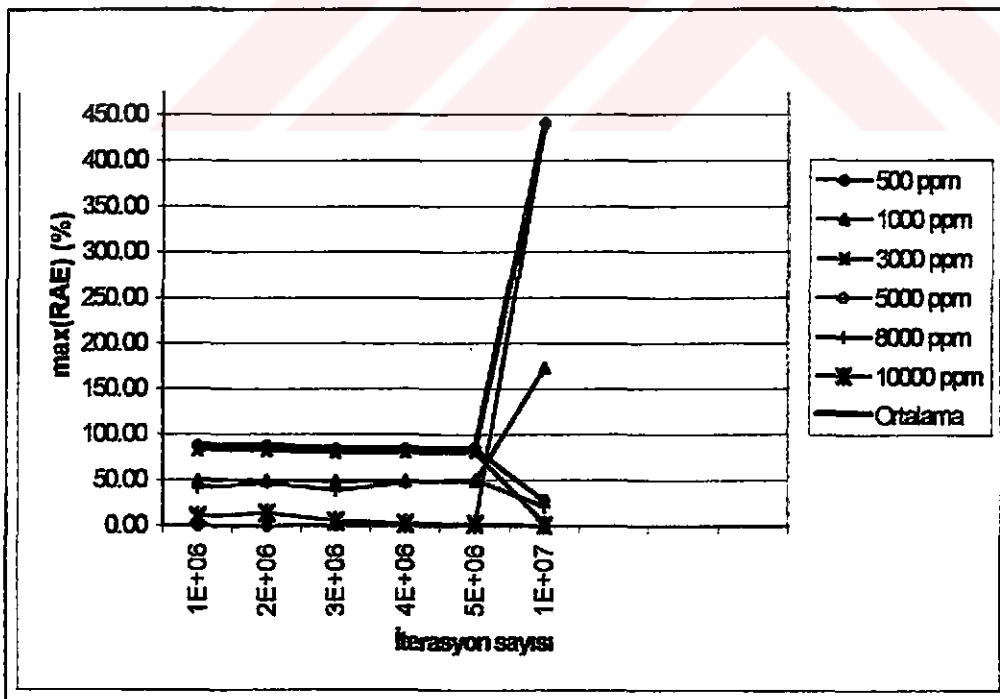
Tablo 6.1.6. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (3 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	501	504	533	746	7495	9886	
	E(RAE) (%)	0.29	49.62	82.22	85.07	6.31	1.14	37.44
	max(RAE) (%)	0.32	49.71	82.64	87.05	41.44	9.47	87.05
2000000	ANN tahmini (ppm)	501	504	536	710	6961	9843	
	E(RAE) (%)	0.28	49.57	82.15	85.79	12.99	1.57	38.72
	max(RAE) (%)	0.30	49.74	82.77	87.76	46.98	13.94	87.76
3000000	ANN tahmini (ppm)	501	518	662	1189	8417	9976	
	E(RAE) (%)	0.22	48.24	77.94	76.23	5.21	0.24	34.68
	max(RAE) (%)	0.42	48.91	80.40	83.64	39.03	4.58	83.64
4000000	ANN tahmini (ppm)	501	513	610	939	7176	9983	
	E(RAE) (%)	0.25	48.74	79.67	81.22	10.31	0.17	36.73
	max(RAE) (%)	0.44	49.02	80.76	84.17	47.43	2.20	84.17
5000000	ANN tahmini (ppm)	501	510	590	866	6670	9986	
	E(RAE) (%)	0.26	48.96	80.32	82.69	16.62	0.14	38.17
	max(RAE) (%)	0.42	49.15	81.12	84.79	50.63	1.76	84.79
10000000	ANN tahmini (ppm)	2699	2727	2981	3854	9325	10000	
	E(RAE) (%)	439.89	172.67	0.62	22.92	16.56	0.00	108.78
	max(RAE) (%)	440.39	173.10	2.90	28.26	21.39	0.06	440.39

Tablo 6.1.6 da verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.11 ve şekil 6.1.12 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve göreceli mutlak ortalama hata ortalama olarak 36 – 38 civarında bir seyir izlemekte iken 10 milyon iterasyonda bir tepe değerine ulaşmıştır.



Şekil 6.1.11. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (3 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



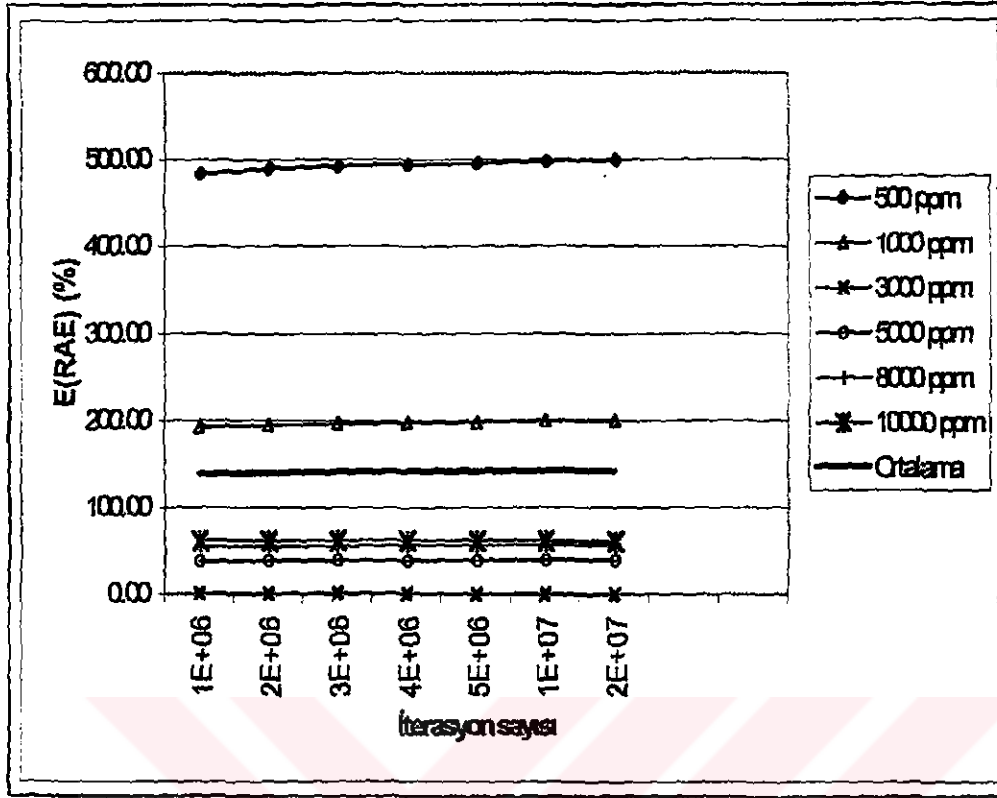
Şekil 6.1.12. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (3 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

CCl_4 gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (1 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.2’de de görüldüğü gibi ortalama % 138 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA’nın performansı tatmin edici olmaktan çok uzaktır.

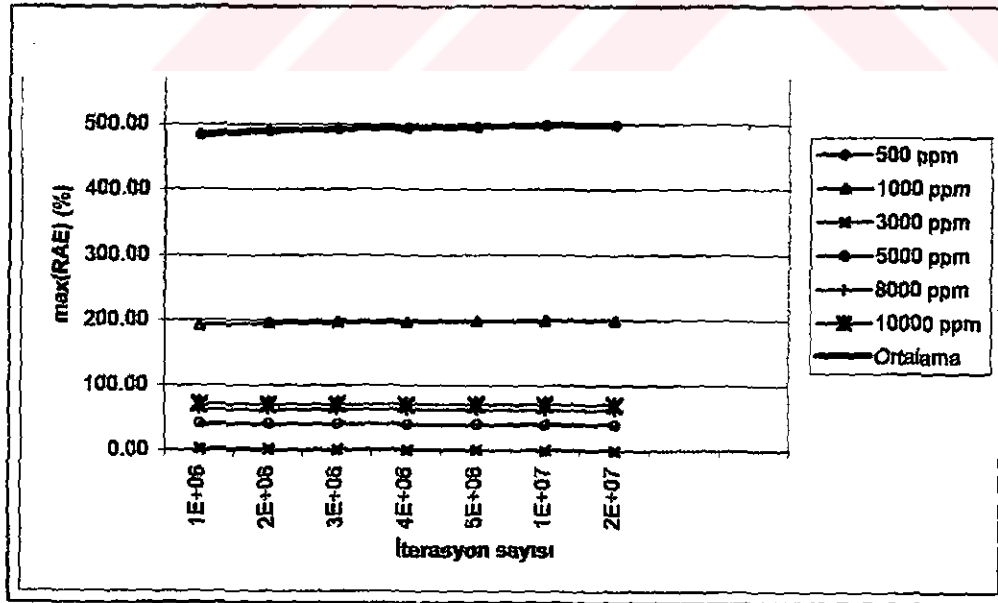
Tablo 6.1.7. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (1 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	2917	2922	2966	3106	3528	3898	
	E(RAE) (%)	483.38	192.16	1.15	37.87	55.90	61.02	138.58
	max(RAE) (%)	483.43	192.33	2.81	41.69	63.54	70.82	483.43
2000000	ANN tahmini (ppm)	2950	2952	2978	3093	3527	3892	
	E(RAE) (%)	489.99	195.21	0.73	38.15	55.91	61.08	140.18
	max(RAE) (%)	490.01	195.30	1.69	41.01	63.13	70.50	490.01
3000000	ANN tahmini (ppm)	2964	2966	2984	3080	3515	3887	
	E(RAE) (%)	492.86	196.57	0.54	38.40	56.06	61.13	140.93
	max(RAE) (%)	492.88	196.62	1.20	40.72	62.95	70.35	492.88
4000000	ANN tahmini (ppm)	2973	2974	2987	3071	3505	3886	
	E(RAE) (%)	494.56	197.38	0.42	38.59	56.18	61.14	141.38
	max(RAE) (%)	494.57	197.42	0.91	40.55	62.84	70.27	494.57
5000000	ANN tahmini (ppm)	2978	2979	2990	3063	3498	3886	
	E(RAE) (%)	495.69	197.92	0.34	38.74	56.28	61.14	141.68
	max(RAE) (%)	495.70	197.94	0.72	40.43	62.77	70.21	495.70
10000000	ANN tahmini (ppm)	2994	2994	2999	3044	3480	3897	
	E(RAE) (%)	498.83	199.44	0.04	39.12	56.50	61.03	142.49
	max(RAE) (%)	498.83	199.45	0.20	40.12	62.57	70.06	498.83
15000000	ANN tahmini (ppm)	2998	2998	3000	3031	3469	3903	
	E(RAE) (%)	499.50	199.76	0.01	39.38	56.64	60.97	142.71
	max(RAE) (%)	499.50	199.76	0.08	40.05	62.53	70.02	499.50

Tablo 6.1.7 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.13 ve şekil 6.1.14 ‘de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve görece mutlak ortalama hata ortalama olarak 140 civarında bir seyir izlemektedir.



Şekil 6.1.13. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (1 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



Şekil 6.1.14. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (1 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

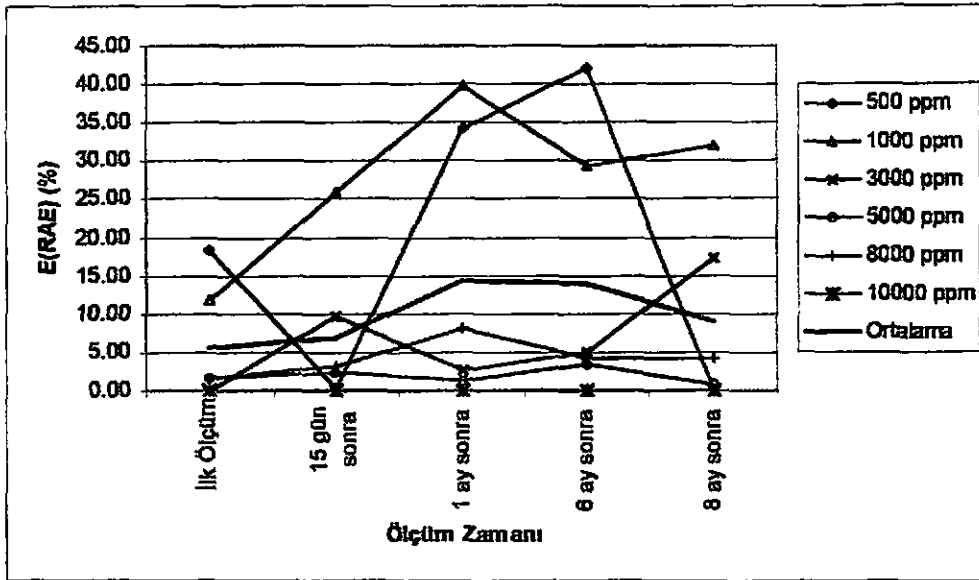
CCl₄ gazı için 36 nolu QCM sensör yaşlanma ölçümleri sonucu elde edilen sensör sinyal dataları bölüm 5' te anlatıldığı şekilde normalize edildikten sonra, 36 nolu QCM sensörün normalize edilmiş ilk ölçüm sensör sinyal dataları ile eğitilen 10 girişli YSA yapısında test edilmişlerdir. Ölçülen sinyal sensör frekans değerleri için verilen konsantrasyonlar tahmin edilmeye çalışılmıştır.

CCl₄ gazı için 36 nolu sensör yaşlanma ölçümleri kullanılarak yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmin sonuçları tablo 6.1.8 , şekil 6.1.15 ve şekil 6.1.16' da verilmiştir. YSA konsantrasyon tahmininde aylar sonra yapılan ölçümlerde bile oldukça iyi öğrenme sonuçları elde edilmiştir.

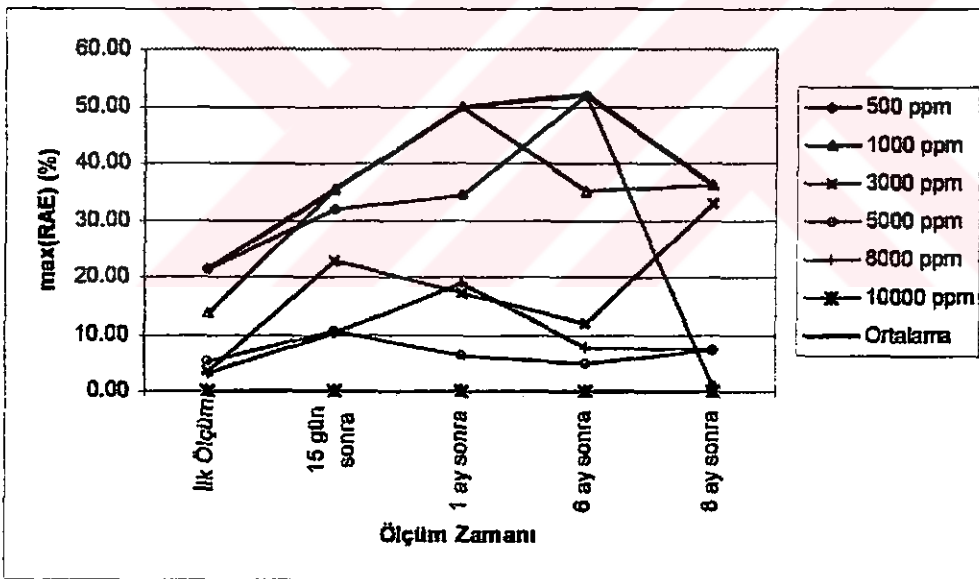
Tablo 6.1.8. İlk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

ÖLÇÜM	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
İlk ölçüm	ANN tahmini (ppm)	592	883	2999	4927	7875	10000	
	E(RAE) (%)	18.32	11.71	0.03	1.47	1.56	0.00	5.52
	max(RAE) (%)	21.42	13.61	3.64	5.24	3.20	0.00	21.42
15 Gün	ANN tahmini (ppm)	501	742	2713	4888	7750	10000	
	E(RAE) (%)	0.19	25.82	9.57	2.24	3.13	0.00	6.82
	max(RAE) (%)	31.86	35.30	22.74	10.35	10.32	0.02	35.30
1 Ay	ANN tahmini (ppm)	328	602	2925	4941	8657	10000	
	E(RAE) (%)	34.35	39.80	2.51	1.18	8.21	0.00	14.34
	max(RAE) (%)	34.35	49.80	17.27	6.27	19.07	0.01	49.80
6 Ay	ANN tahmini (ppm)	290	706	3145	4831	7673	10000	
	E(RAE) (%)	42.00	29.36	4.84	3.38	4.08	0.00	13.95
	max(RAE) (%)	51.78	35.21	12.09	4.88	7.89	0.03	51.78
8 Ay	ANN tahmini (ppm)	500	681	2486	4957	7664	10000	
	E(RAE) (%)	0.00	31.93	17.14	0.85	4.21	0.00	9.02
	max(RAE) (%)	1.20	36.10	33.08	7.23	7.24	0.07	36.10

Tablo 6.1.8 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.15 ve şekil 6.1.15 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerde görülen YSA performansı ve elde edilen hata değerleri ve bu değerlerin ilk ölçümden olan sapması, bölüm 5.1 ' de yaşlanma ölçümleri sonuçlarında ilk ölçüm değerine göre olan sapma sonuçlarına göre daha düşüktür. YSA tahminleri ölçümlerdeki sapmaya göre daha az sapmıştır.



Şekil 6.1.15 . İlk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



Şekil 6.1.16 . İlk ölçümden 15 gün, 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

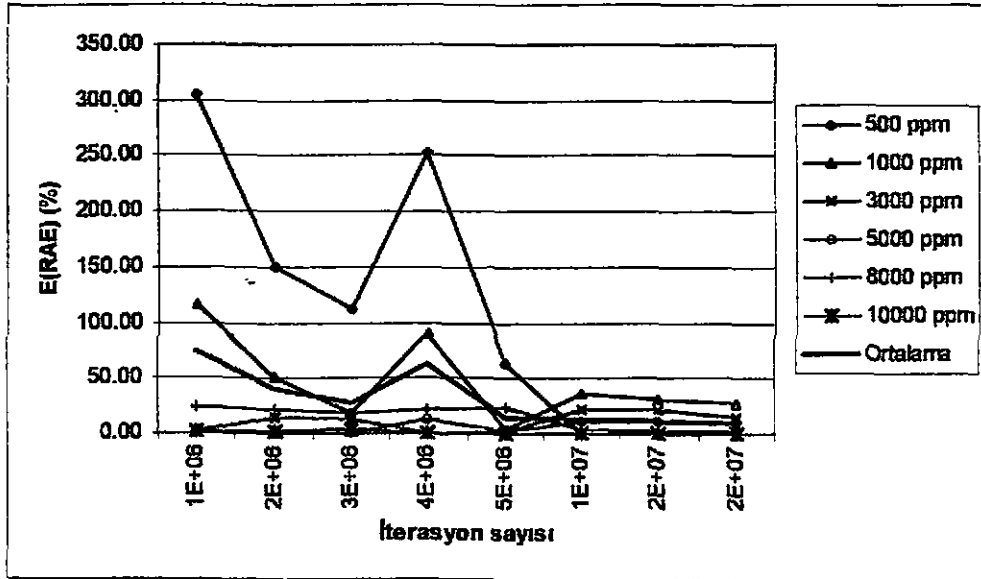
CCl₄ gazı için 46 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.9, şekil 6.1.17, şekil 6.1.18' de de görüldüğü gibi ortalama % 8.9 civarında iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA'nın performansı 24 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

Tablo 6.1.9. 46 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

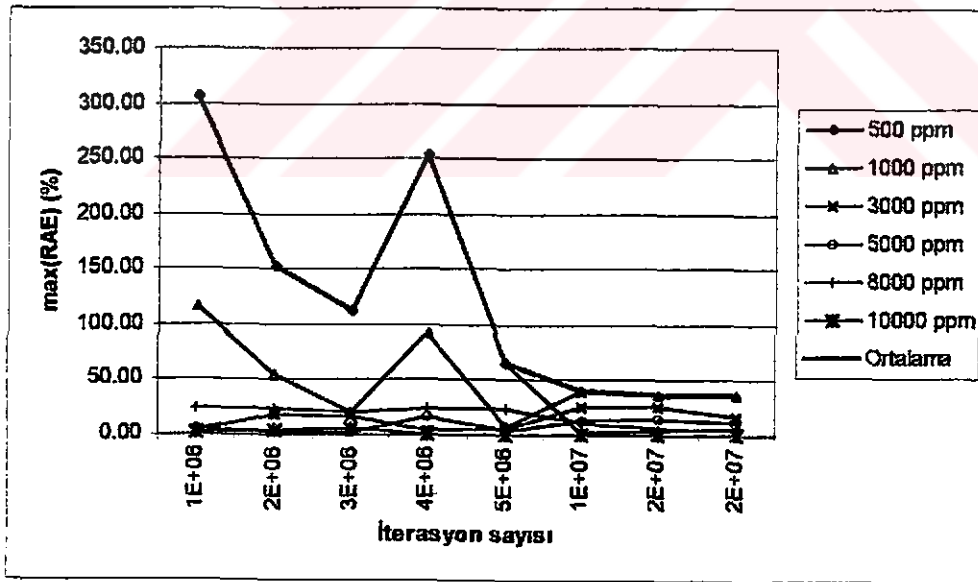
İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	2023	2148	3035	5045	9894	9820	
	E(RAE) (%)	304.58	114.77	1.18	0.90	23.67	1.80	74.48
	max(RAE) (%)	307.24	116.56	3.24	4.56	23.76	1.97	307.24
2000000	ANN tahmini (ppm)	1250	1507	3416	5017	9773	9738	
	E(RAE) (%)	150.10	50.73	13.88	0.34	22.16	2.62	39.97
	max(RAE) (%)	152.85	54.29	17.65	1.13	22.94	3.28	152.85
3000000	ANN tahmini (ppm)	1056	1189	2641	5031	9392	9648	
	E(RAE) (%)	111.30	18.85	11.98	0.62	17.40	3.52	27.28
	max(RAE) (%)	112.91	20.78	16.49	2.38	19.91	4.61	112.91
4000000	ANN tahmini (ppm)	1758	1904	3013	5667	9775	9993	
	E(RAE) (%)	251.69	90.38	0.42	13.34	22.19	0.07	63.02
	max(RAE) (%)	254.54	92.49	2.94	17.16	23.32	0.08	254.54
5000000	ANN tahmini (ppm)	816	971	3033	5064	9839	10000	
	E(RAE) (%)	63.30	2.87	1.09	1.28	22.98	0.00	15.25
	max(RAE) (%)	65.14	7.70	5.64	3.24	24.20	0.00	65.14
10000000	ANN tahmini (ppm)	500	639	2353	4481	8338	10000	
	E(RAE) (%)	0.09	36.06	21.56	10.39	4.22	0.00	12.05
	max(RAE) (%)	2.34	40.64	26.07	12.23	11.65	0.00	40.64
15000000	ANN tahmini (ppm)	499	697	2356	4427	7821	10000	
	E(RAE) (%)	0.27	30.28	21.47	11.46	2.24	0.00	10.96
	max(RAE) (%)	3.96	37.06	24.63	13.92	4.83	0.00	37.06
20000000	ANN tahmini (ppm)	495	727	2580	4540	7846	10000	
	E(RAE) (%)	0.97	27.28	13.99	9.21	1.93	0.00	8.90
	max(RAE) (%)	5.66	35.65	17.15	11.36	4.36	0.00	35.65

Tablo 6.1.9 da verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.17 ve şekil 6.1.18 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır. 4 milyon itarasyonda hata bölüm 5.1.12 'de bahsedildiği gibi bir

osilasyona girmiş ve bir kısmi maksimuma çıkmıştır. Öğrenme işlemine devam edince hata daha sonra tekrar düşmeye devam etmiştir.



Şekil 6.1.17. 46 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



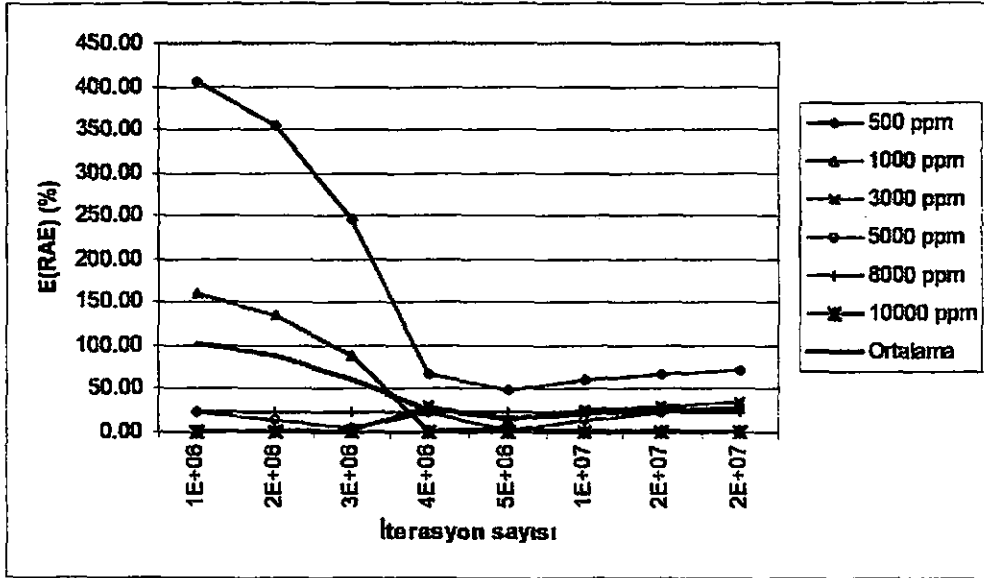
Şekil 6.1.18. 46 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

CCl₄ gazı için IDT sensörü ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.1.10, şekil 6.1.19, şekil 6.1.20' de de görüldüğü gibi % 15 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA'nın performansı IDT sensörü için düşük konsantrasyonlar da oldukça iyi görülmektedir.

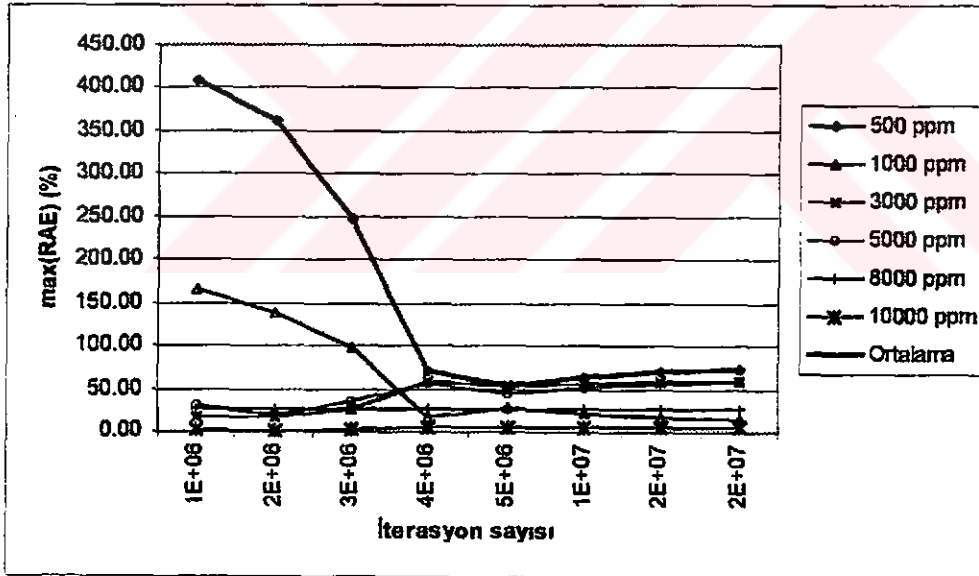
Tablo 6.1.10. IDT no' lu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	2533	2611	3070	3785	9888	9987	
	E(RAE) (%)	406.60	161.08	2.32	24.29	23.59	0.13	103.00
	max(RAE) (%)	408.77	164.53	15.51	29.42	25.00	1.49	408.77
2000000	ANN tahmini (ppm)	2278	2336	3061	4247	9930	9989	
	E(RAE) (%)	355.51	133.64	2.03	15.05	24.13	0.11	88.41
	max(RAE) (%)	362.19	137.32	15.99	19.78	24.99	0.85	362.19
3000000	ANN tahmini (ppm)	1728	1892	3056	4757	9917	9984	
	E(RAE) (%)	245.68	89.21	1.86	4.86	23.96	0.16	60.95
	max(RAE) (%)	247.90	97.42	26.56	34.42	24.98	3.32	247.90
4000000	ANN tahmini (ppm)	836	977	2066	3865	9887	9974	
	E(RAE) (%)	67.18	2.28	31.15	22.69	23.58	0.26	24.52
	max(RAE) (%)	68.96	17.18	58.04	55.17	24.95	5.19	68.96
5000000	ANN tahmini (ppm)	741	965	2563	4916	9923	9982	
	E(RAE) (%)	48.27	3.53	14.58	1.68	24.04	0.18	15.38
	max(RAE) (%)	51.31	27.21	54.31	45.35	24.96	3.53	54.31
10000000	ANN tahmini (ppm)	802	973	2246	4266	9903	9978	
	E(RAE) (%)	60.38	2.73	25.15	14.67	23.79	0.22	21.16
	max(RAE) (%)	62.61	20.78	56.68	51.58	24.96	4.45	62.61
15000000	ANN tahmini (ppm)	836	977	2066	3865	9887	9974	
	E(RAE) (%)	67.18	2.28	31.15	22.69	23.58	0.26	24.52
	max(RAE) (%)	68.96	17.18	58.04	55.17	24.95	5.19	68.96
20000000	ANN tahmini (ppm)	857	980	1949	3592	9873	9971	
	E(RAE) (%)	71.44	2.00	35.04	28.16	23.41	0.29	26.73
	max(RAE) (%)	72.96	14.93	58.95	57.54	24.95	5.77	72.96

Tablo 6.1.10 da verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.1.19 ve şekil 6.1.20 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır.



Şekil 6.1.19. IDT sensörü ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri



Şekil 6.1.20. IDT sensörü ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($max(RAE)(\%)$) değerleri

6.2. Bulanık Mantık ile elde edilen CCl₄ gaz konsantrasyon saptama sonuçları

12, 24 ve 36 no'lu QCM sensörün normalize edilmiş kararlı hal Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Burada "Ortalama" bulanık mantığın bütün konsantrasyonlar için genel performansını verir.

CCl₄ gazı için 12 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.2.1'de de görüldüğü gibi % 19 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.2.2'de de görüldüğü gibi % 7.6 civarında daha iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir.

Tablo 6.2.1. 12 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	333	33.33	33.33
1000	411	58.89	60.00
3000	2389	20.37	21.11
5000	4967	0.66	1.32
8000	7961	0.49	0.60
10000	9991	0.09	0.27
Ortalama		18.97	60.00

Tablo 6.2.2. 12 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	571	14.29	14.29
1000	705	29.52	31.43
3000	2981	0.63	1.21
5000	5018	0.50	0.67
8000	8013	0.16	0.47
10000	9957	0.43	0.52
Ortalama		7.59	31.43

CCl_4 gazı için 24 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.2.3'de de görüldüğü gibi ortalama % 23 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.2.4' te de görüldüğü gibi % 5.6 civarında daha iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir.

Tablo 6.2.3. 24 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	229	54.17	54.17
1000	477	52.29	52.50
3000	2673	10.90	10.90
5000	4980	0.60	0.79
8000	7272	9.10	9.13
10000	8742	12.58	12.60
Ortalama		23.27	54.17

Tablo 6.2.4. 24 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	464	7.11	7.11
1000	967	3.31	3.73
3000	3025	0.82	0.82
5000	4674	6.52	6.57
8000	8809	10.11	14.94
10000	9401	5.99	8.02
Ortalama		5.64	14.94

CCl_4 gazı için 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.2.5'de de görüldüğü gibi ortalama % 19 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon

tahmininde Tablo 6.2.6' da da görüldüğü gibi ortalama % 5.1 civarında daha iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir.

Tablo 6.2.5. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	227	54.58	57.50
1000	531	46.92	47.00
3000	2749	8.37	8.42
5000	4963	2.35	2.43
8000	7909	1.14	1.17
10000	10086	0.86	0.91
Ortalama		19.04	57.50

Tablo 6.2.6. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	454	9.17	15.00
1000	1062	6.17	6.50
3000	2971	0.98	1.00
5000	4773	13.51	13.54
8000	8050	0.75	1.06
10000	9979	0.21	0.23
Ortalama		5.13	15.00

6.3. YSA ile elde edilen CHCl₃ gaz konsantrasyon saptama sonuçları

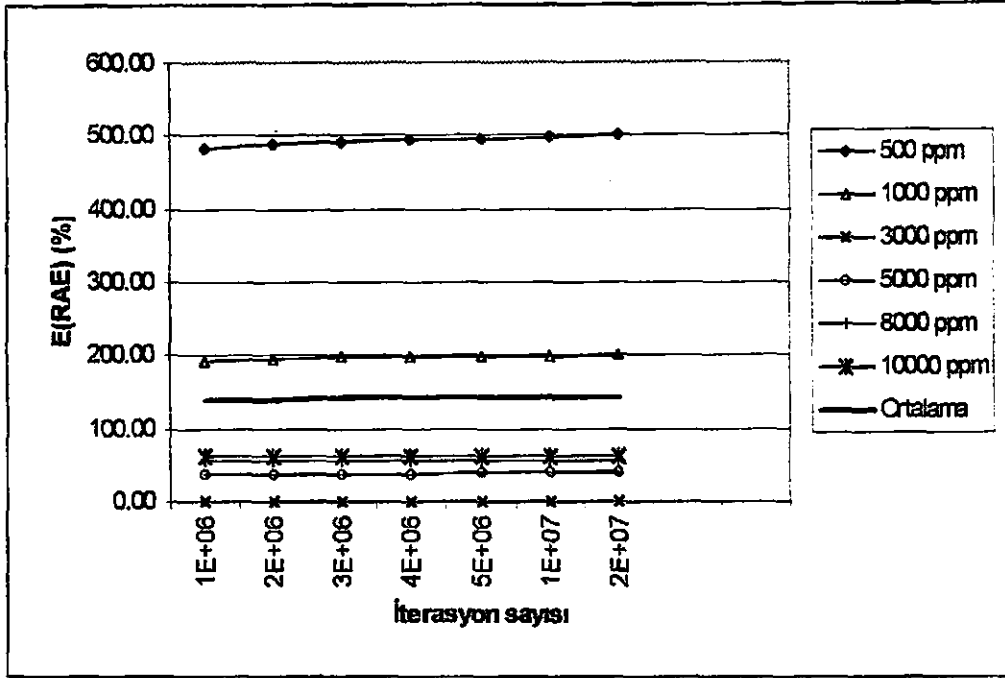
36 no'lu QCM sensörün normalize edilmiş Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir.

CHCl₃ gazı için 36 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.3.1'de de görüldüğü gibi % 3 civarında çok iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. YSA'nın performansı 36 nolu sensör için düşük konsantrasyonlarda da oldukça iyi görülmektedir.

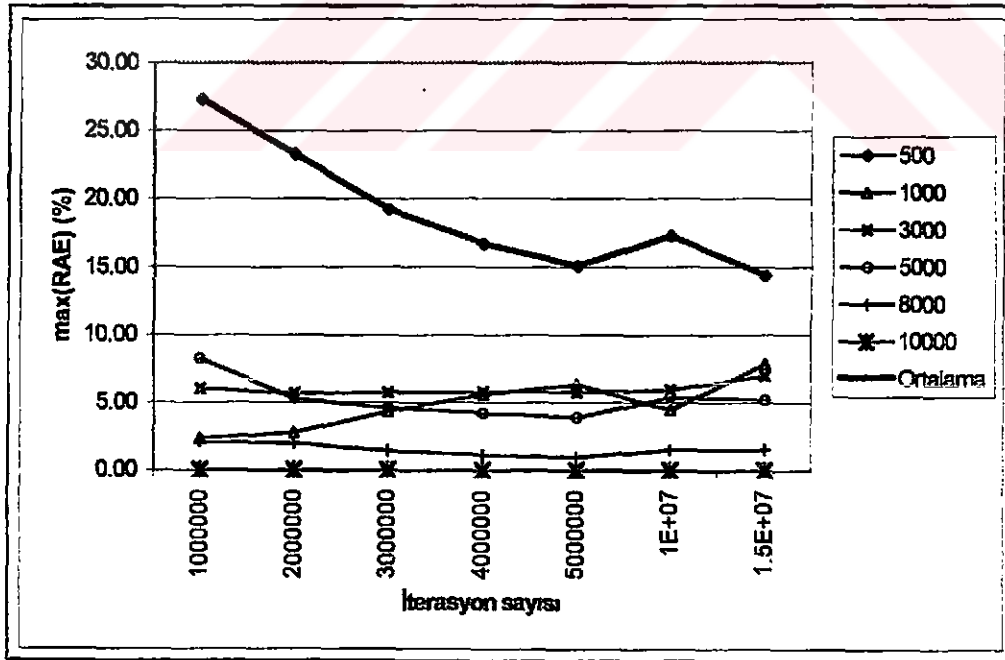
Tablo 6.3.1. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	3000	5000	8000	10000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	628	984	3000	5074	8012	9999	
	E(RAE) (%)	25.63	1.60	0.01	1.48	0.14	0.01	4.81
	max(RAE) (%)	27.31	2.32	6.03	8.26	2.15	0.01	27.31
2000000	ANN tahmini (ppm)	608	980	2938	5047	8008	10000	
	E(RAE) (%)	21.69	2.03	2.08	0.95	0.10	0.00	4.48
	max(RAE) (%)	23.27	2.77	5.67	5.30	1.99	0.01	23.27
3000000	ANN tahmini (ppm)	589	977	2931	5041	7992	10000	
	E(RAE) (%)	17.79	2.30	2.31	0.82	0.10	0.00	3.89
	max(RAE) (%)	19.22	4.33	5.71	4.60	1.42	0.00	19.22
4000000	ANN tahmini (ppm)	575	978	2927	5036	7991	10000	
	E(RAE) (%)	15.10	2.17	2.43	0.72	0.11	0.00	3.42
	max(RAE) (%)	16.71	5.60	5.76	4.20	1.12	0.00	16.71
5000000	ANN tahmini (ppm)	567	980	2926	5033	7988	10000	
	E(RAE) (%)	13.36	2.03	2.48	0.65	0.15	0.00	3.11
	max(RAE) (%)	15.08	6.33	5.77	3.90	0.94	0.00	15.08
10000000	ANN tahmini (ppm)	579	992	2921	5043	8040	10000	
	E(RAE) (%)	15.78	0.83	2.62	0.87	0.50	0.00	3.43
	max(RAE) (%)	17.26	4.49	5.93	5.39	1.50	0.00	17.26
15000000	ANN tahmini (ppm)	565	991	2987	5011	8047	10000	
	E(RAE) (%)	13.01	0.86	0.43	0.23	0.59	0.00	2.52
	max(RAE) (%)	14.35	7.88	6.99	5.21	1.55	0.00	14.35

Tablo 6.3.1 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.3.1 ve şekil 6.3.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmaktadır. 1 milyon iterasyonda bile sonuçlar oldukça iyi görülmektedir.



Şekil 6.3.1. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri



Şekil 6.3.2. 36 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($\max(RAE)(\%)$) değerleri

6.4. Bulanık Mantık ile elde edilen CHCl_3 gaz konsantrasyon saptama sonuçları

36 no'lu QCM sensörün normalize edilmiş kararlı hal Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

CHCl_3 gazı için 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.4.1'de de görüldüğü gibi % 19.6 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir. 5 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmininde Tablo 6.4.2'de de görüldüğü gibi % 7.6 civarında daha iyi bir öğrenme sonucu elde edilmiştir.

Tablo 6.4.1. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	296	40.89	41.00
1000	652	34.78	34.83
3000	2272	24.26	24.56
5000	5108	5.57	6.03
8000	7063	11.71	13.03
10000	9935	0.65	1.17
Ortalama		19.64	41.00

Tablo 6.4.1. 36 nolu sensör çıktıları kullanılarak 3 Bulanık küme kullanan Bulanık Mantık algoritması ile yapılan konsantrasyon tahmini

Gerçek Konsan. (ppm)	Bulanık Mantık tahmini (ppm)	E(RAE) (%)	max(RAE) (%)
500	443	11.33	11.50
1000	978	2.17	2.25
3000	2763	7.89	8.07
5000	4735	15.34	15.62
8000	8398	4.97	5.09
10000	9729	2.71	2.87
Ortalama		7.40	15.62

6.5. YSA ile elde edilen Metanol gaz konsantrasyon saptama sonuçları

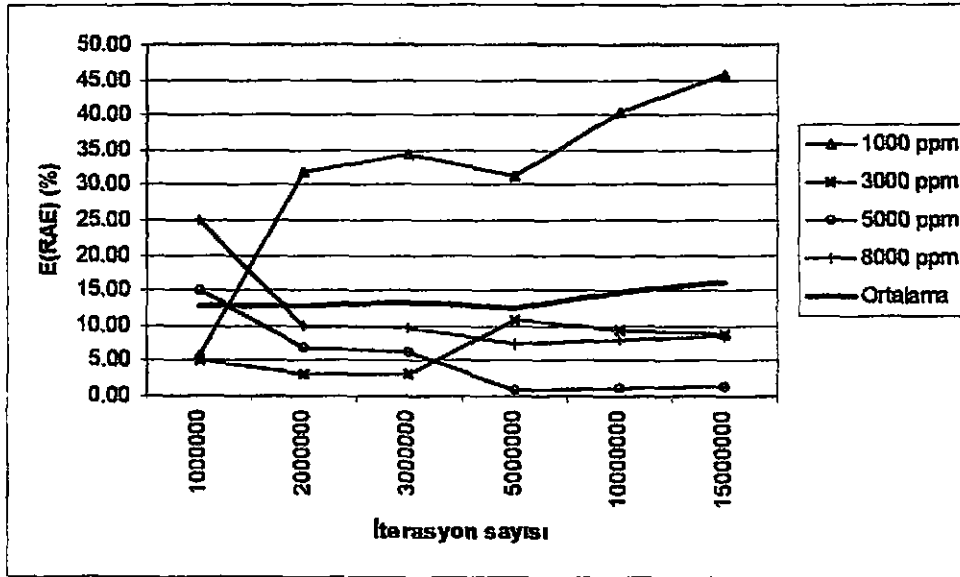
24 no'lu QCM sensörün normalize edilmiş Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Metanol gazı için 24 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.5.1'de de görüldüğü gibi % 13 civarında bir öğrenme sonucu elde edilmiştir.

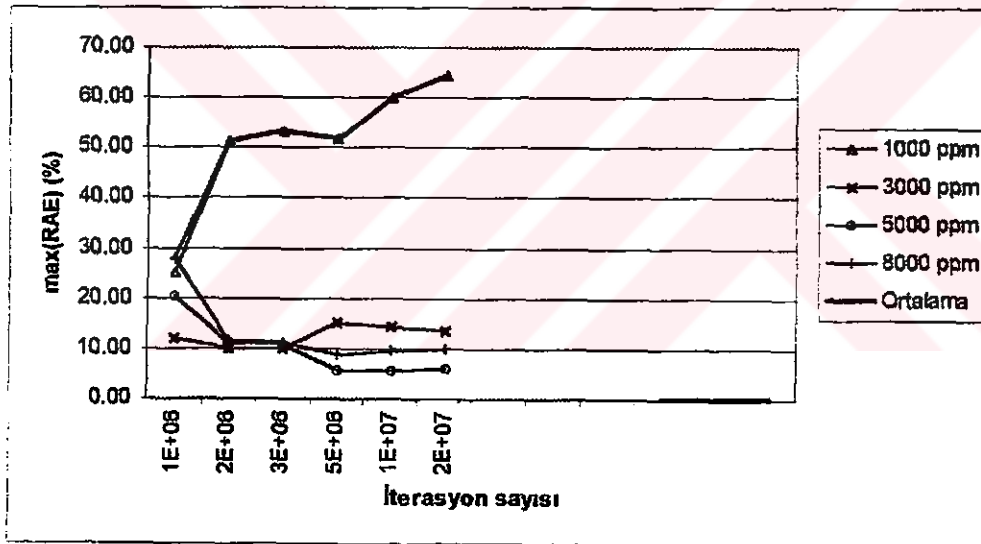
Tablo 6.5.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	1000	3000	5000	8000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	1056	3156	4246	5998	
	E(RAE) (%)	5.58	5.21	15.08	25.02	12.72
	max(RAE) (%)	24.96	12.03	20.22	27.73	27.73
2000000	ANN tahmini (ppm)	681	3092	4666	7214	
	E(RAE) (%)	31.90	3.08	6.68	9.82	12.87
	max(RAE) (%)	51.22	10.07	11.07	11.52	51.22
3000000	ANN tahmini (ppm)	656	3092	4684	7234	
	E(RAE) (%)	34.36	3.08	6.31	9.58	13.33
	max(RAE) (%)	53.37	10.08	10.76	11.26	53.37
5000000	ANN tahmini (ppm)	688	3320	4953	7412	
	E(RAE) (%)	31.19	10.68	0.94	7.35	12.54
	max(RAE) (%)	51.75	15.31	5.44	8.93	51.75
10000000	ANN tahmini (ppm)	595	3285	4947	7368	
	E(RAE) (%)	40.47	9.51	1.05	7.90	14.74
	max(RAE) (%)	59.94	14.25	5.63	9.45	59.94
15000000	ANN tahmini (ppm)	542	3262	4935	7321	
	E(RAE) (%)	45.78	8.74	1.30	8.49	16.08
	max(RAE) (%)	64.50	13.52	5.90	10.01	64.50

Tablo 6.5.1 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.5.1 ve şekil 6.5.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça ortalama hata azalmamakta ve 13-16 aralığında yatay bir seyir izlemektedir.



Şekil 6.5.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata ($E(RAE)(\%)$) değerleri



Şekil 6.5.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata ($max(RAE)(\%)$) değerleri

6.6. YSA ile elde edilen Toluen gaz konsantrasyon saptama sonuçları

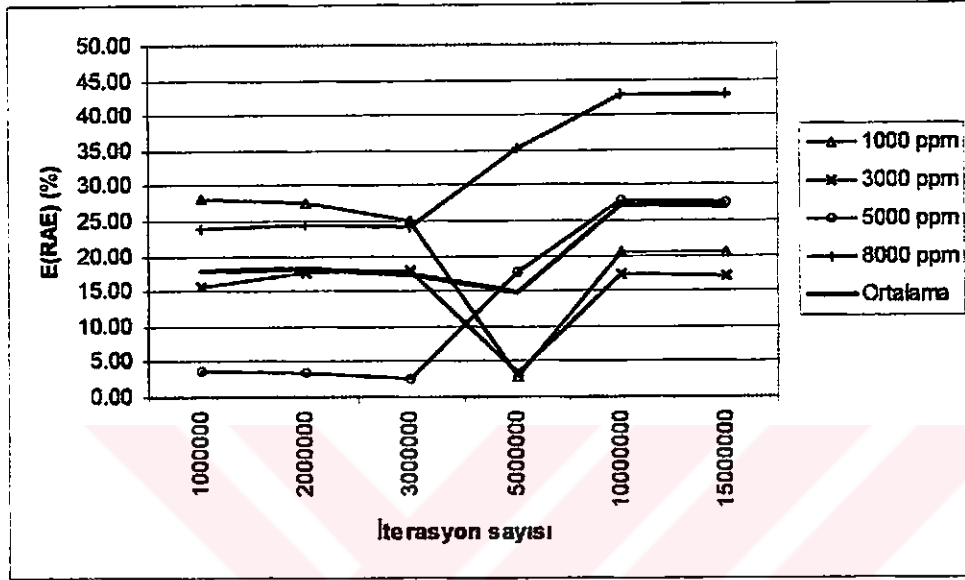
24 no'lu QCM sensörün normalize edilmiş Δf değerleri kullanılarak elde edilmiş konsantrasyon ve hata değerleri aşağıdaki tablo ve şekillerde verilmiştir.

Toluen gazı için 24 nolu sensör ile yapılan YSA (10 girişli) konsantrasyon tahmininde Tablo 6.6.1'de de görüldüğü gibi 5 milyon itersayonda % 15 civarında bir hata ile öğrenme yapabilmektedir. YSA'nın performansı Toluen gazı için diğerlerine göre özellikle CCl_4 ve CHCl_3 ile kıyaslandığında biraz daha düşük görülmektedir. 3000 ppm 'in üstündeki değerlerde öğretilmemiştir. Bunun sebebi , bölüm 5.1.4 'de de izah edildiği gibi 24 QCM sensörünün Toluen gazına karşı özellikle yüksek konsantrasyonlarda kararlı tepki göstermemesidir.

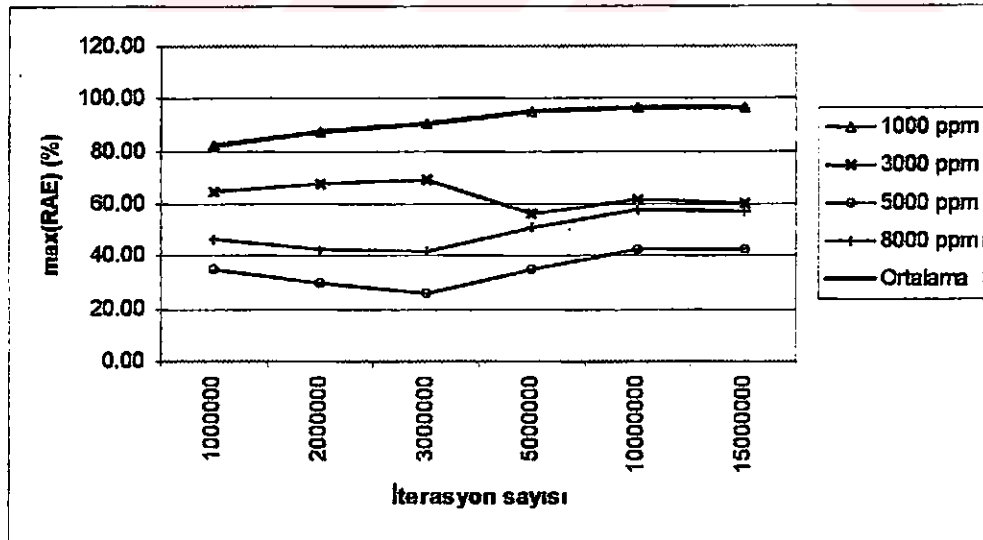
Tablo 6.6.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA (10 giriş) konsantrasyon tahmin sonuçları

İterasyon Sayısı	Gerçek Konsan. (ppm)	500	1000	2000	3000	Ortalama
1000000	ANN tahmini (ppm)	641	1156	1924	2287	
	E(RAE) (%)	28.16	15.60	3.82	23.76	17.84
	max(RAE) (%)	82.36	64.64	35.25	46.58	82.36
2000000	ANN tahmini (ppm)	638	1176	1934	2266	
	E(RAE) (%)	27.61	17.62	3.32	24.47	18.26
	max(RAE) (%)	87.71	67.23	29.73	42.69	87.71
3000000	ANN tahmini (ppm)	625	1179	1949	2276	
	E(RAE) (%)	24.94	17.90	2.57	24.12	17.38
	max(RAE) (%)	90.41	68.74	25.98	41.50	90.41
5000000	ANN tahmini (ppm)	485	965	1649	1942	
	E(RAE) (%)	2.94	3.47	17.55	35.28	14.81
	max(RAE) (%)	94.61	56.24	34.95	50.97	94.61
10000000	ANN tahmini (ppm)	398	825	1445	1710	
	E(RAE) (%)	20.41	17.47	27.75	43.01	27.16
	max(RAE) (%)	96.60	61.32	42.75	57.37	96.60
15000000	ANN tahmini (ppm)	398	828	1450	1713	
	E(RAE) (%)	20.45	17.19	27.50	42.89	27.01
	max(RAE) (%)	96.70	59.79	42.52	57.22	96.70

Tablo 6.6.1 de verilen değerler daha kolay anlaşılma amacı ile Şekil 6.6.1 ve Şekil 6.6.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu Şekillerden de rlebileceği gibi iterasyon sayısı (ğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıka hata baŐlangıa azalmakta ve en iyi sonuç elde edile 5 milyon iterasyondan sonra artmaktadır.



Şekil 6.6.1. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için ortalama hata (E(RAE)(%)) değerleri



Şekil 6.6.2. 24 nolu sensör ile yapılan ölçümler kullanılarak YSA (10 giriş) ile elde edilen çeşitli konsantrasyon tahmin sonuçları için maksimum hata (max(RAE)(%)) değerleri

6.7. YSA ile elde edilen CCl₄ ve Metanol gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.7.1 'de CCl₄ ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.3'te izah edilen YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Karışımda, miktarsal sınıflandırma sonuçları Tablo 6.7.1 'de ve Şekil 6.7.1 ve Şekil 6.7.2 'de görüldüğü gibi CCl₄ gazı için 100.000 iterasyonda % 22 ortalama hata ve % 62 maksimum hata ile ve Metanol gazı için 1.000.000 iterasyonda % 90 ortalama hata ve % 350 maksimum hata ile elde edilmiştir. Sonuçlar genel olarak çok tatmin edici değildir ve Metanol gazı içinde oldukça kötüdür.

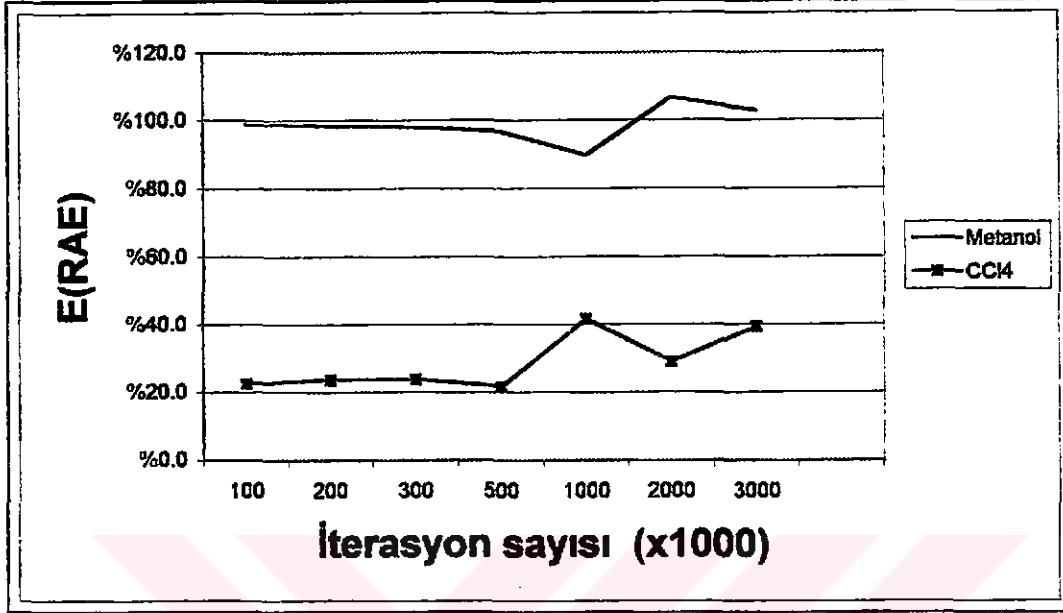
Tablo 6.7.1. CCl₄ ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)	
	Metanol	CCl ₄	Metanol	CCl ₄	Metanol	CCl ₄	Metanol	CCl ₄
	500	500	834	384	%66.7	%23.3	%66.8	%23.6
	1000	500	1017	611	%1.7	%22.2	%1.7	%22.4
	2000	500	1117	761	%44.1	%52.2	%44.2	%52.8
	500	1000	1234	959	%146.8	%4.1	%148.3	%6.9
100000	1000	1000	1429	1339	%42.9	%33.9	%42.9	%33.9
	2000	1000	1547	1598	%22.7	%59.8	%23.1	%62.4
	500	4000	2496	4072	%399.2	%1.8	%399.2	%1.8
	1000	4000	2502	4081	%150.2	%2.0	%150.2	%2.0
	3000	4000	2504	4083	%16.5	%2.1	%16.5	%2.1
	Toplam ortalama				%99.0	%22.4	%399.2	%62.4
	500	500	813	361	%62.7	%27.7	%62.8	%28.0
	1000	500	1014	604	%1.4	%20.9	%1.4	%21.0
	2000	500	1127	772	%43.6	%54.5	%43.7	%55.0
	500	1000	1249	979	%149.9	%2.1	%151.8	%6.0
200000	1000	1000	1453	1379	%45.3	%37.9	%45.3	%37.9
	2000	1000	1577	1654	%21.1	%65.4	%21.7	%69.0
	500	4000	2480	4047	%396.0	%1.2	%396.0	%1.2
	1000	4000	2484	4055	%148.4	%1.4	%148.4	%1.4
	3000	4000	2486	4057	%17.1	%1.4	%17.1	%1.4
	Toplam ortalama				%98.4	%23.6	%396.0	%69.0
	500	500	802	351	%60.5	%29.8	%60.5	%30.0
	1000	500	1008	596	%0.8	%19.2	%0.8	%19.3
	2000	500	1129	775	%43.5	%54.9	%43.6	%55.3
	500	1000	1251	980	%150.2	%2.3	%152.7	%7.1
300000	1000	1000	1458	1385	%45.8	%38.5	%45.8	%38.5
	2000	1000	1586	1669	%20.7	%66.9	%21.4	%71.5
	500	4000	2473	4031	%394.7	%0.8	%394.7	%0.8
	1000	4000	2477	4039	%147.7	%1.0	%147.7	%1.0

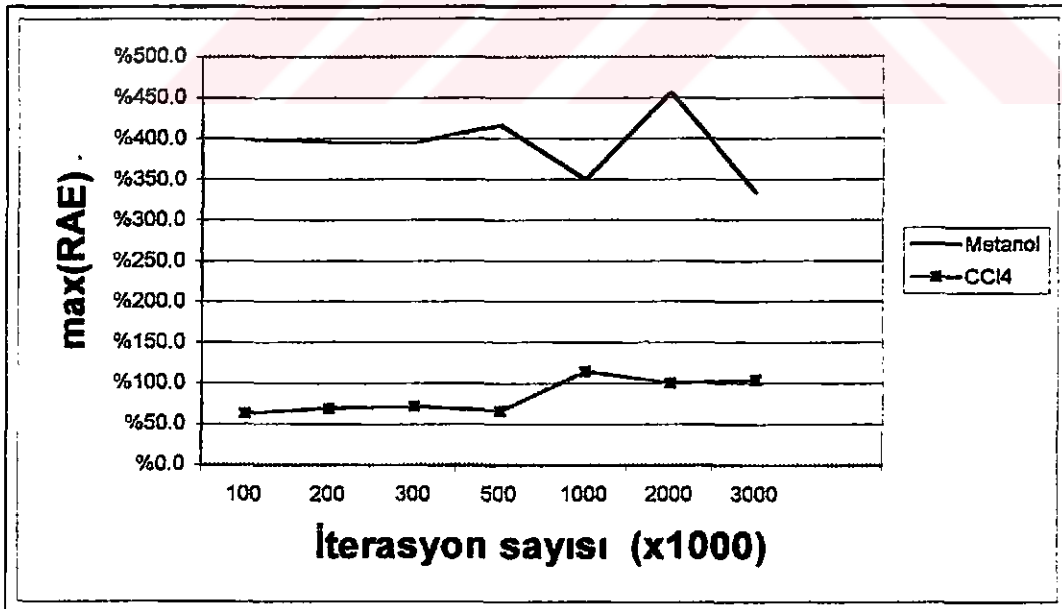
	3000	4000	2478	4041	%17.4	%1.0	%17.4	%1.0
	Toplam ortalama				%97.9	%23.8	%394.7	%71.5
	500	500	657	173	%31.5	%65.3	%31.5	%65.4
	1000	500	866	328	%13.4	%34.4	%13.4	%34.5
	2000	500	1007	464	%49.7	%7.1	%49.7	%7.1
	500	1000	1133	612	%126.5	%38.8	%130.4	%44.4
500000	1000	1000	1366	942	%36.6	%5.8	%36.6	%5.8
	2000	1000	1522	1206	%23.9	%20.6	%25.1	%26.7
	500	4000	2583	3708	%416.5	%7.3	%416.6	%7.3
	1000	4000	2586	3718	%158.6	%7.1	%158.6	%7.1
	3000	4000	2588	3721	%13.7	%7.0	%13.7	%7.0
	Toplam ortalama				%96.7	%21.5	%416.6	%65.4
	500	500	783	477	%56.6	%4.6	%56.9	%4.7
	1000	500	973	767	%2.7	%53.5	%2.7	%54.0
	2000	500	1121	1038	%43.9	%107.7	%44.0	%107.8
	500	1000	1215	1236	%143.1	%23.6	%148.7	%29.4
1000000	1000	1000	1408	1679	%40.8	%67.9	%40.8	%67.9
	2000	1000	1546	2026	%22.7	%102.6	%24.3	%114.1
	500	4000	2245	4184	%349.0	%4.6	%349.5	%4.6
	1000	4000	2247	4192	%124.7	%4.8	%124.8	%4.8
	3000	4000	2253	4196	%24.9	%4.9	%24.9	%4.9
	Toplam ortalama				%89.8	%41.6	%349.5	%114.1
	500	500	761	339	%52.1	%32.2	%53.7	%32.4
	1000	500	978	573	%2.2	%14.5	%2.4	%15.7
	2000	500	1263	864	%36.8	%72.7	%37.3	%73.1
	500	1000	1336	1017	%167.2	%10.1	%184.6	%17.5
2000000	1000	1000	1609	1442	%60.9	%44.2	%60.9	%44.2
	2000	1000	1891	1826	%8.2	%82.6	%11.6	%99.7
	500	4000	2709	3944	%441.7	%1.4	%456.6	%1.4
	1000	4000	2873	3950	%187.3	%1.2	%190.3	%1.2
	3000	4000	3095	3951	%3.2	%1.2	%3.4	%1.2
	Toplam ortalama				%106.6	%28.9	%456.6	%99.7
	500	500	631	460	%26.1	%8.0	%29.1	%8.1
	1000	500	1022	751	%2.2	%50.3	%4.6	%50.8
	2000	500	1750	1017	%12.5	%103.4	%14.1	%103.6
	500	1000	1889	1209	%277.7	%20.9	%333.4	%26.2
3000000	1000	1000	2607	1629	%160.7	%62.9	%160.7	%62.9
	2000	1000	3543	1931	%77.1	%93.1	%112.4	%101.5
	500	4000	1423	4374	%184.6	%9.3	%292.1	%13.8
	1000	4000	2351	4210	%135.1	%5.3	%164.7	%6.5
	3000	4000	4428	3967	%47.6	%0.8	%50.3	%1.0
	Toplam ortalama				%102.6	%39.3	%333.4	%103.6

Tablo 6.7.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.7.1 ve şekil 6.7.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve inişli çıkışlı bir yatay hareket yapmaktadır. Şekillerden görüldüğü gibi CCl_4 gazı için elde edilen sonuçlar Metanol gazı için elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin QCM

sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Metanol gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.5).



Şekil 6.7.1. CCl₄ ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları (E(RAE))



Şekil 6.7.2. CCl₄ ve Metanol gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları (max(RAE))

6.8. YSA ile elde edilen CCl₄ ve Toluen gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.8.1 'de CCl₄ ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.3'te izah edilen YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Karışımında, miktarsal sınıflandırma sonuçları Tablo 6.8.1 'de ve Şekil 6.8.1 ve Şekil 6.8.2 'de görüldüğü gibi CCl₄ gazı için 1.000.000 iterasyonda % 11.8 ortalama hata ve % 29.1 maksimum hata ile ve Toluen gazı için 2.000.000 iterasyonda % 73.5 ortalama hata ve % 259.5 maksimum hata ile elde edilmiştir. Sonuçlar CCl₄ gazı için iyi gibi görülmesine rağmen, genel olarak çok tatmin edici değildir ve Toluen gazı içinde oldukça kötüdür.

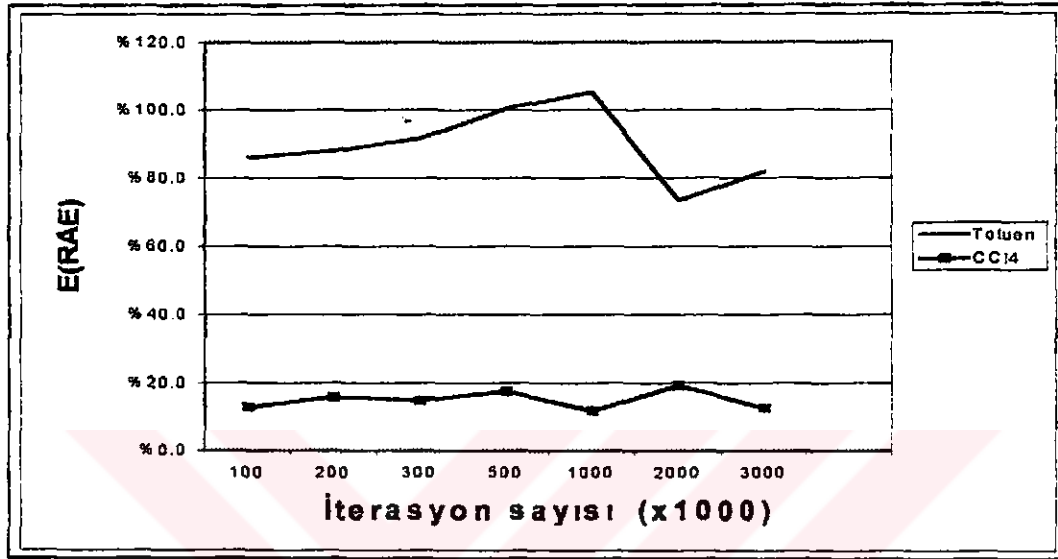
Tablo 6.8.1. CCl₄ ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)	
	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄
x103	500	500	1004	355	%100.8	%29.0	%100.9	%29.1
	1000	500	1024	376	%2.4	%24.7	%2.4	%24.8
	3000	500	1045	400	%65.2	%20.0	%65.2	%20.0
100	500	1000	1390	961	%178.0	%3.9	%178.1	%4.1
	1000	1000	1398	980	%39.8	%2.0	%39.9	%2.1
	3000	1000	1411	1007	%53.0	%0.7	%53.0	%0.8
	500	3000	1629	2645	%225.8	%11.8	%225.9	%11.9
	1000	3000	1638	2636	%63.8	%12.1	%63.9	%12.1
	3000	3000	1657	2625	%44.8	%12.5	%45.2	%12.8
Toplam ortalama					%85.9	%13.0	%225.9	%29.1
	500	500	971	364	%94.2	%27.3	%94.2	%27.3
	1000	500	995	385	%0.5	%23.1	%0.6	%23.1
	3000	500	1020	408	%66.0	%18.5	%66.0	%18.5
200	500	1000	1447	910	%189.4	%9.0	%189.6	%9.2
	1000	1000	1458	926	%45.8	%7.4	%45.8	%7.4
	3000	1000	1474	950	%50.9	%5.0	%50.9	%5.1
	500	3000	1671	2505	%234.2	%16.5	%234.4	%16.5
	1000	3000	1698	2482	%69.8	%17.3	%69.8	%17.3
	3000	3000	1750	2445	%41.7	%18.5	%42.9	%19.4
Toplam ortalama					%88.1	%15.8	%234.4	%27.3
	500	500	965	424	%92.9	%15.2	%93.0	%15.3
	1000	500	993	444	%0.7	%11.2	%0.7	%11.3
	3000	500	1023	466	%65.9	%6.9	%65.9	%6.9
300	500	1000	1539	884	%207.8	%11.6	%207.9	%11.7
	1000	1000	1552	896	%55.2	%10.4	%55.2	%10.4

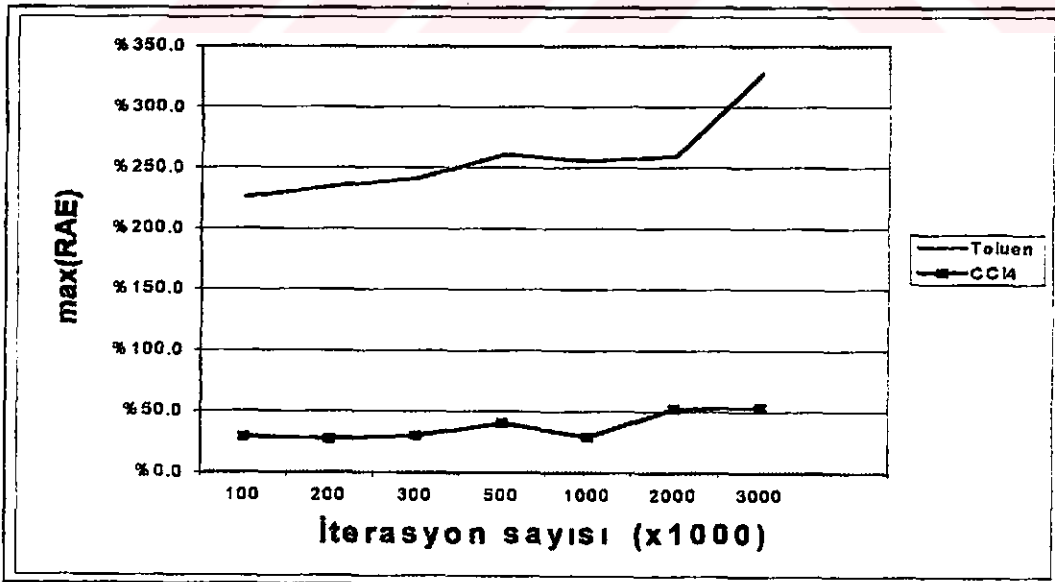
	3000	1000	1572	914	%47.6	%8.6	%47.6	%8.7
	500	3000	1702	2389	%240.5	%20.4	%241.0	%20.5
	1000	3000	1768	2312	%76.8	%22.9	%76.9	%23.0
	3000	3000	1890	2191	%37.0	%27.0	%39.8	%29.7
	Toplam ortalama				%91.6	%14.9	%241.0	%29.7
	500	500	1179	609	%135.7	%21.8	%135.8	%21.8
	1000	500	1211	625	%21.1	%25.0	%21.1	%25.0
	3000	500	1245	642	%58.5	%28.4	%58.5	%28.4
	500	1000	1803	901	%260.6	%9.9	%260.7	%10.0
500	1000	1000	1816	907	%81.6	%9.3	%81.7	%9.3
	3000	1000	1838	916	%38.7	%8.4	%38.8	%8.4
	500	3000	1526	2821	%205.1	%6.0	%206.6	%6.5
	1000	3000	1695	2482	%69.5	%17.3	%69.8	%17.4
	3000	3000	1978	2052	%34.1	%31.6	%40.5	%40.3
	Toplam ortalama				%100.6	%17.5	%260.7	%40.3
	500	500	1247	599	%149.4	%19.9	%149.5	%19.9
	1000	500	1287	622	%28.7	%24.5	%28.8	%24.6
	3000	500	1326	645	%55.8	%29.0	%55.8	%29.1
	500	1000	1774	929	%254.8	%7.1	%255.1	%7.2
1000	1000	1000	1793	943	%79.3	%5.7	%79.4	%5.8
	3000	1000	1821	963	%39.3	%3.7	%39.3	%3.7
	500	3000	1570	2824	%214.1	%5.9	%218.9	%5.9
	1000	3000	2135	2835	%113.5	%5.5	%114.3	%5.5
	3000	3000	2900	2848	%12.5	%5.1	%19.6	%5.3
	Toplam ortalama				%105.3	%11.8	%255.1	%29.1
	500	500	700	240	%40.1	%51.9	%41.6	%52.4
	1000	500	1144	501	%14.4	%0.6	%15.0	%1.0
	3000	500	1487	749	%50.4	%49.7	%50.5	%50.5
	500	1000	1797	1116	%259.4	%11.6	%259.5	%11.6
2000	1000	1000	1791	1115	%79.1	%11.5	%79.2	%11.5
	3000	1000	1785	1115	%40.5	%11.5	%40.5	%11.5
	500	3000	943	3359	%88.5	%12.0	%93.0	%12.0
	1000	3000	1621	3362	%62.1	%12.1	%63.2	%12.1
	3000	3000	3104	3387	%26.5	%12.9	%34.8	%13.6
	Toplam ortalama				%73.5	%19.3	%259.5	%52.4
	500	500	771	236	%54.3	%52.8	%56.5	%53.4
	1000	500	1426	524	%42.6	%4.8	%43.5	%5.7
	3000	500	1855	749	%38.2	%49.8	%38.2	%50.5
	500	1000	2137	986	%327.4	%1.4	%327.6	%1.4
3000	1000	1000	2148	992	%114.8	%0.8	%114.9	%0.8
	3000	1000	2172	1002	%27.6	%0.2	%27.6	%0.2
	500	3000	807	3038	%61.4	%1.3	%65.3	%1.3
	1000	3000	1441	3031	%44.1	%1.0	%45.3	%1.0
	3000	3000	3023	3062	%27.3	%2.1	%34.2	%2.9
	Toplam ortalama				%82.0	%12.7	%327.6	%53.4

Tablo 6.8.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.8.1 ve şekil 6.8.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve inişli çıkışlı bir yatay hareket yapmaktadır. Şekillerden görüldüğü

gibi CCl_4 gazı için elde edilen sonuçlar Toluen gazı için elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Toluen gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.6).



Şekil 6.8.1. CCl_4 ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları (E(RAE))



Şekil 6.8.2. CCl_4 ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları (max(RAE))

6.9. YSA ile elde edilen Metanol ve Toluen gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.9.1 'de Metanol ve Toluen gazı karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.3'te izah edilen YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları verilmiştir.

Karışımında, miktarsal sınıflandırma sonuçları Tablo 6.9.1 'de ve Şekil 6.9.1 ve Şekil 6.9.2 'de görüldüğü gibi Toluen gazı için 1.000.000 iterasyonda % 12.1 ortalama hata ve % 30.3 maksimum hata ile ve Metanol gazı için 2.000.000 iterasyonda % 72.2 ortalama hata ve % 255.5 maksimum hata ile elde edilmiştir. Sonuçlar Toluen gazı için iyi gibi görülmesine rağmen, genel olarak çok tatmin edici değildir ve Metanol gazı içinde oldukça kötüdür.

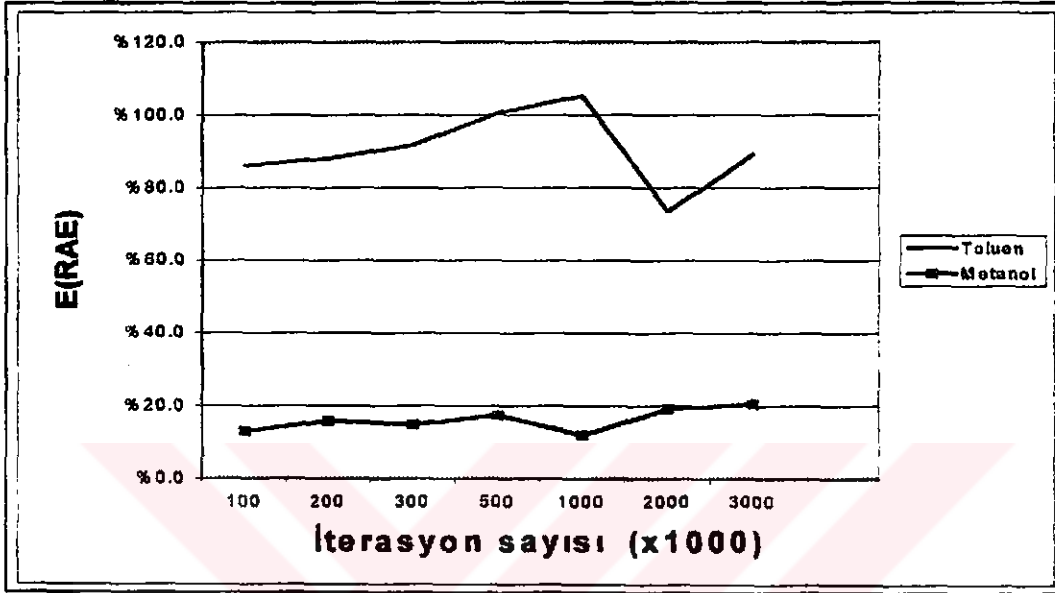
Tablo 6.9.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)		
	x103	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol
	500	500	1004	355	%100.8	%29.0	%100.9	%29.1	
	1000	500	1024	376	%2.4	%24.7	%2.4	%24.8	
	3000	500	1045	400	%65.2	%20.0	%65.2	%20.0	
	500	1000	1390	961	%178.0	%3.9	%178.1	%4.1	
100	1000	1000	1398	980	%39.8	%2.0	%39.9	%2.1	
	3000	1000	1411	1007	%53.0	%0.7	%53.0	%0.8	
	500	3000	1629	2645	%225.8	%11.8	%225.9	%11.9	
	1000	3000	1638	2636	%63.8	%12.1	%63.9	%12.1	
	3000	3000	1657	2625	%44.8	%12.5	%45.2	%12.8	
	Toplam ortalama				%85.9	%13.0	%225.9	%29.1	
	500	500	971	364	%94.2	%27.3	%94.2	%27.3	
	1000	500	995	385	%0.5	%23.1	%0.6	%23.1	
	3000	500	1020	408	%66.0	%18.5	%66.0	%18.5	
	500	1000	1447	910	%189.4	%9.0	%189.6	%9.2	
200	1000	1000	1458	926	%45.8	%7.4	%45.8	%7.4	
	3000	1000	1474	950	%50.9	%5.0	%50.9	%5.1	
	500	3000	1671	2505	%234.2	%16.5	%234.4	%16.5	
	1000	3000	1698	2482	%69.8	%17.3	%69.8	%17.3	
	3000	3000	1750	2445	%41.7	%18.5	%42.9	%19.4	
	Toplam ortalama				%88.1	%15.8	%234.4	%27.3	
	500	500	965	424	%92.9	%15.2	%93.0	%15.3	
	1000	500	993	444	%0.7	%11.2	%0.7	%11.3	
	3000	500	1023	466	%65.9	%6.9	%65.9	%6.9	
	500	1000	1539	884	%207.8	%11.6	%207.9	%11.7	
300	1000	1000	1552	896	%55.2	%10.4	%55.2	%10.4	
	3000	1000	1572	914	%47.6	%8.6	%47.6	%8.7	

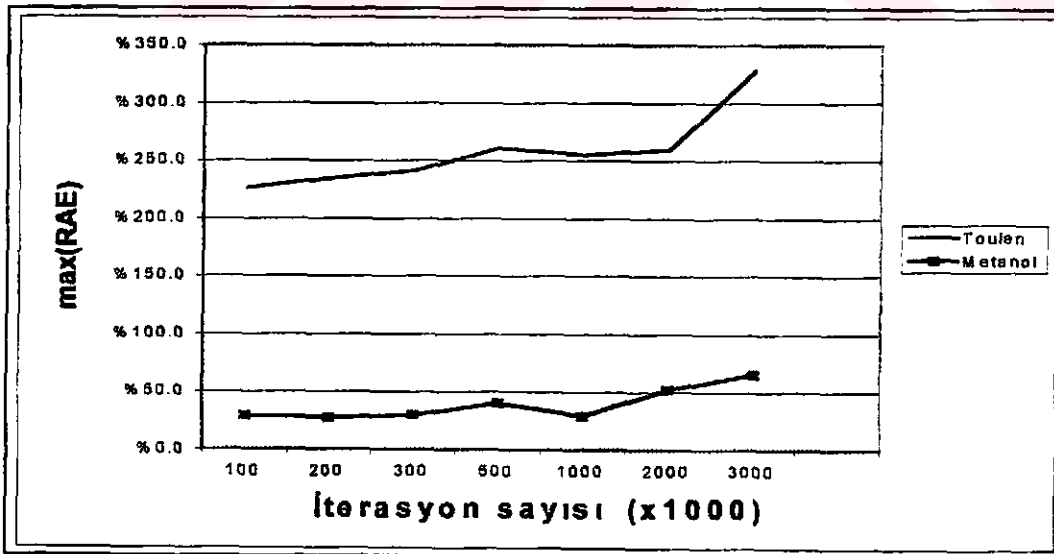
	500	3000	1702	2389	%240.5	%20.4	%241.0	%20.5
	1000	3000	1768	2312	%76.8	%22.9	%76.9	%23.0
	3000	3000	1890	2191	%37.0	%27.0	%39.8	%29.7
	Toplam ortalama				%91.6	%14.9	%241.0	%29.7
	500	500	1179	609	%135.7	%21.8	%135.8	%21.8
	1000	500	1211	625	%21.1	%25.0	%21.1	%25.0
	3000	500	1245	642	%58.5	%28.4	%58.5	%28.4
	500	1000	1803	901	%260.6	%9.9	%260.7	%10.0
500	1000	1000	1816	907	%81.6	%9.3	%81.7	%9.3
	3000	1000	1838	916	%38.7	%8.4	%38.8	%8.4
	500	3000	1526	2821	%205.1	%6.0	%206.6	%6.5
	1000	3000	1695	2482	%69.5	%17.3	%69.8	%17.4
	3000	3000	1978	2052	%34.1	%31.6	%40.5	%40.3
	Toplam ortalama				%100.6	%17.5	%260.7	%40.3
	500	500	1247	599	%149.4	%19.9	%149.5	%19.9
	1000	500	1287	622	%28.7	%24.5	%28.8	%24.6
	3000	500	1326	645	%55.8	%29.0	%55.8	%29.1
	500	1000	1774	929	%254.8	%7.1	%255.1	%7.2
1000	1000	1000	1793	943	%79.3	%5.7	%79.4	%5.8
	3000	1000	1821	963	%39.3	%3.7	%39.3	%3.7
	500	3000	1570	2824	%214.1	%5.9	%218.9	%5.9
	1000	3000	2135	2835	%113.5	%5.5	%114.3	%5.5
	3000	3000	2900	2848	%12.5	%5.1	%19.6	%5.3
	Toplam ortalama				%105.3	%12.1	%255.1	%30.3
	500	500	700	240	%40.1	%51.9	%41.6	%52.4
	1000	500	1144	501	%14.4	%0.6	%15.0	%1.0
	3000	500	1487	749	%50.4	%49.7	%50.5	%50.5
	500	1000	1797	1116	%259.4	%11.6	%259.5	%11.6
2000	1000	1000	1791	1115	%79.1	%11.5	%79.2	%11.5
	3000	1000	1785	1115	%40.5	%11.5	%40.5	%11.5
	500	3000	943	3359	%88.5	%12.0	%93.0	%12.0
	1000	3000	1621	3362	%62.1	%12.1	%63.2	%12.1
	3000	3000	3104	3387	%26.5	%12.9	%34.8	%13.6
	Toplam ortalama				%72.1	%19.3	%253.5	%52.4
	500	500	774	263	%54.8	%47.4	%57.0	%48.0
	1000	500	1425	580	%42.5	%16.0	%43.4	%16.9
	3000	500	1851	825	%38.3	%64.9	%38.3	%65.7
	500	1000	2141	1082	%328.3	%8.2	%328.4	%8.3
3000	1000	1000	2153	1089	%115.3	%8.9	%115.3	%8.9
	3000	1000	2178	1099	%27.4	%9.9	%27.4	%10.0
	500	3000	979	3294	%95.7	%9.8	%100.5	%9.8
	1000	3000	1713	3285	%71.3	%9.5	%72.7	%9.5
	3000	3000	3339	3315	%29.3	%10.5	%43.5	%11.4
	Toplam ortalama				%89.2	%20.6	%328.4	%65.7

Tablo 6.9.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.9.1 ve şekil 6.9.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata azalmamakta ve inişli çıkışlı bir yatay hareket yapmaktadır. Şekillerden görüldüğü gibi Metanol gazı için elde edilen sonuçlar Toluen gazı için elde edilen sonuçlara

göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi Metanol gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Toluen gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.7).



Şekil 6.9.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hataları (E(RAE))



Şekil 6.9.2. Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 nolu sensörler ile yapılan ölçümler ve YSA algoritması kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hataları (max(RAE))

6.10.Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen CCl₄ ve Metanol gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.10.1’de CCl₄ ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no’lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.6’ da izah edilen paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sonuçlar verilmiştir.

Karışım için elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma Tablo 6.10.1’ de ve Şekil 6.10.1 ve 6.10.2’ de görüldüğü gibi CCl₄ gazı için 3.000.000 iterasyonda % 0 ortalama hata ve % 0,1 maksimum hata ile ve Metanol gazı için 3.000.000 iterasyonda % 6,4 ortalama hata ve % 74 maksimum hatadır. Sonuçlar oldukça tatmin edicidir ve Tablo 6.7.1’ deki sonuçlarla kıyaslandığında oldukça iyi bir gelişme görülmektedir.

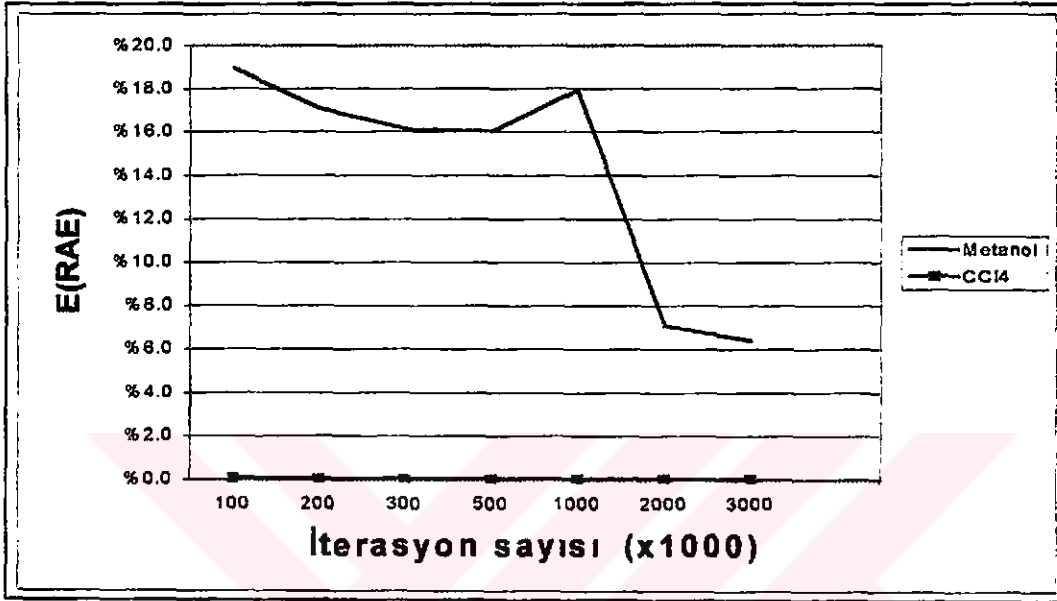
Tablo 6.10.1. CCl₄ ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no’lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)	
	Metanol	CCl4	Metanol	CCl4	Metanol	CCl4	Metanol	CCl4
	500	500	504	499	%0.8	%0.3	%0.9	%0.3
	1000	500	1109	501	%10.9	%0.3	%11.1	%0.3
	2000	500	1714	501	%14.3	%0.2	%14.5	%0.2
	500	1000	502	1000	%2.0	%0.0	%3.0	%0.0
100000	1000	1000	1071	1000	%7.1	%0.0	%7.1	%0.0
	2000	1000	1826	1000	%8.7	%0.0	%11.6	%0.0
	500	4000	228	4000	%54.4	%0.0	%64.6	%0.0
	1000	4000	1392	4000	%39.2	%0.0	%42.4	%0.0
	3000	4000	2004	4000	%33.2	%0.0	%33.5	%0.0
	Toplam ortalama				%18.9	%0.1	%64.6	%0.3
	500	500	482	500	%3.7	%0.0	%4.1	%0.1
	1000	500	1074	501	%7.4	%0.2	%7.7	%0.2
	2000	500	1864	499	%6.8	%0.1	%7.1	%0.1
	500	1000	491	1000	%1.9	%0.0	%4.5	%0.0
200000	1000	1000	1038	1000	%3.8	%0.0	%3.8	%0.0
	2000	1000	1936	1000	%4.1	%0.0	%6.8	%0.0
	500	4000	231	4000	%53.8	%0.0	%65.1	%0.0
	1000	4000	1406	4000	%40.6	%0.0	%43.1	%0.0
	3000	4000	2040	4000	%32.0	%0.0	%32.2	%0.0
	Toplam ortalama				%17.1	%0.0	%65.1	%0.2
	500	500	484	500	%3.2	%0.1	%3.6	%0.1
	1000	500	1053	501	%5.3	%0.2	%5.6	%0.2
	2000	500	1913	499	%4.4	%0.1	%4.6	%0.1
	500	1000	493	1000	%1.5	%0.0	%3.9	%0.0
300000	1000	1000	1024	1000	%2.4	%0.0	%2.4	%0.0
	2000	1000	1965	1000	%3.9	%0.0	%5.5	%0.0
	500	4000	227	4000	%54.5	%0.0	%66.5	%0.0

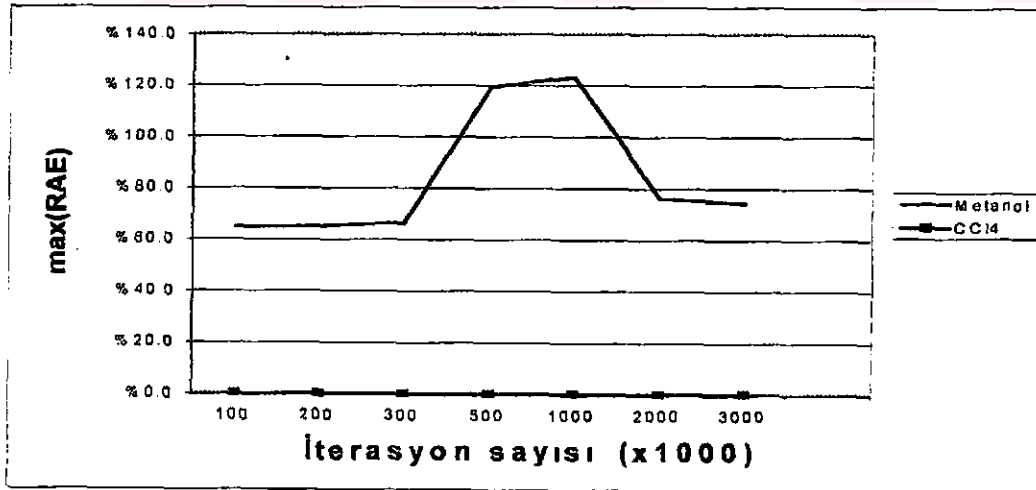
	1000	4000	1388	4000	%38.8	%0.0	%40.7	%0.0
	3000	4000	2057	4000	%31.4	%0.0	%31.6	%0.0
	Toplam ortalama				%16.2	%0.0	%66.5	%0.2
	500	500	498	500	%0.4	%0.1	%0.7	%0.1
	1000	500	1049	501	%4.9	%0.2	%5.2	%0.2
	2000	500	1992	500	%0.7	%0.1	%0.8	%0.1
	500	1000	501	1000	%1.2	%0.0	%2.0	%0.0
500000	1000	1000	1027	1000	%2.7	%0.0	%2.7	%0.0
	2000	1000	2008	1000	%3.6	%0.0	%5.0	%0.0
	500	4000	475	4000	%7.3	%0.0	%30.8	%0.0
	1000	4000	2190	4000	%119.0	%0.0	%119.4	%0.0
	3000	4000	3131	4000	%4.4	%0.0	%4.4	%0.0
	Toplam ortalama				%16.0	%0.0	%119.4	%0.2
	500	500	499	500	%0.1	%0.1	%0.4	%0.1
	1000	500	1012	501	%1.2	%0.2	%1.5	%0.2
	2000	500	1999	500	%0.5	%0.1	%1.2	%0.1
	500	1000	501	1000	%1.1	%0.0	%1.7	%0.0
1000000	1000	1000	1017	1000	%1.7	%0.0	%1.7	%0.0
	2000	1000	2008	1000	%3.3	%0.0	%4.7	%0.0
	500	4000	507	4000	%17.1	%0.0	%39.0	%0.0
	1000	4000	2152	4000	%115.2	%0.0	%123.3	%0.0
	3000	4000	3644	4000	%21.5	%0.0	%22.3	%0.0
	Toplam ortalama				%18.0	%0.0	%123.3	%0.2
	500	500	500	500	%0.1	%0.1	%0.3	%0.1
	1000	500	1000	501	%0.5	%0.1	%1.2	%0.1
	2000	500	1999	500	%0.6	%0.1	%1.2	%0.1
	500	1000	498	1000	%0.8	%0.0	%1.9	%0.0
2000000	1000	1000	1005	1000	%0.5	%0.0	%0.5	%0.0
	2000	1000	1997	1000	%3.0	%0.0	%3.6	%0.0
	500	4000	312	4000	%37.5	%0.0	%76.4	%0.0
	1000	4000	887	4000	%13.6	%0.0	%29.2	%0.0
	3000	4000	2777	4000	%7.4	%0.0	%11.9	%0.0
	Toplam ortalama				%7.1	%0.0	%76.4	%0.1
	500	500	500	500	%0.1	%0.1	%0.3	%0.1
	1000	500	1000	501	%0.5	%0.1	%1.3	%0.1
	2000	500	1999	500	%0.5	%0.1	%1.3	%0.1
	500	1000	499	1000	%0.7	%0.0	%1.6	%0.0
3000000	1000	1000	1003	1000	%0.3	%0.0	%0.3	%0.0
	2000	1000	1998	1000	%2.7	%0.0	%3.3	%0.0
	500	4000	339	4000	%34.3	%0.0	%74.3	%0.0
	1000	4000	914	4000	%12.2	%0.0	%27.2	%0.0
	3000	4000	2812	4000	%6.3	%0.0	%10.8	%0.0
	Toplam ortalama				%6.4	%0.0	%74.3	%0.1

Tablo 6.10.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.10.1 ve şekil 6.10.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata genel olarak azalmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi bir milyon iterasyon civarında bir yükselme görülmesine rağmen öğrenmeye devam edince hata tekrar

düşmüştür. Şekillerden görüldüğü gibi CCl_4 gazı için elde edilen sonuçlar oldukça güzel ve Metanol gazı için elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Metanol gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.5).



Şekil 6.10.1. CCl_4 ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE))



Şekil 6.10.2. CCl_4 ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE))

6.11.Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen CCl₄ ve Toluen gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.11.1'de CCl₄ ve Toluen gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.6' da izah edilen paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sonuçlar verilmiştir.

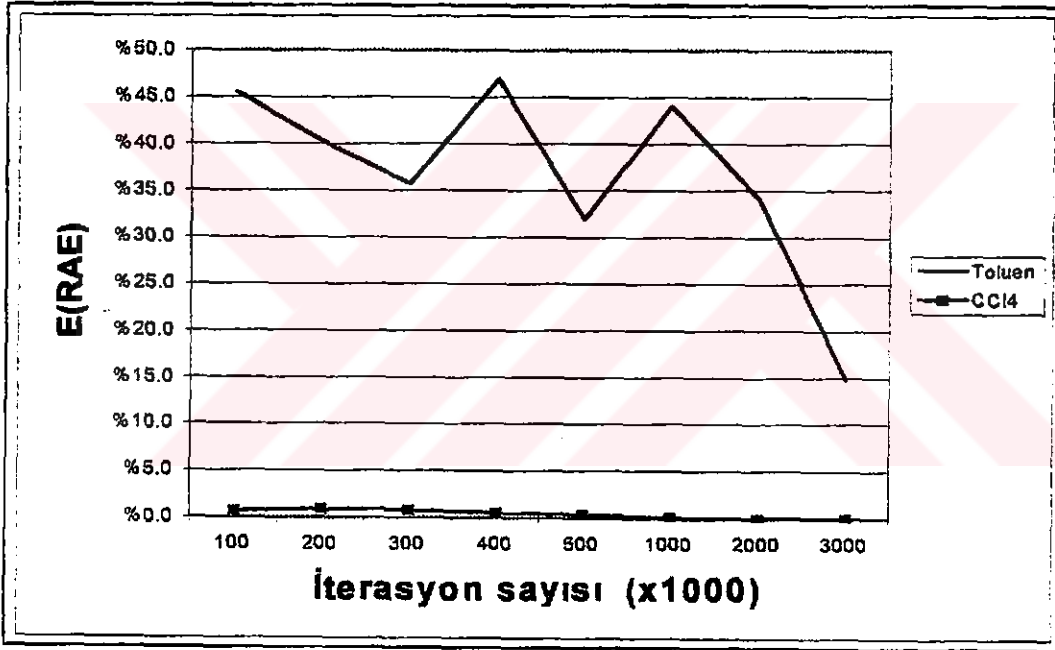
Karışım için elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma Tablo 6.11.1' de ve Şekil 6.11.1 ve 6.11.2' de görüldüğü gibi CCl₄ gazı için 3.000.000 iterasyonda % 0 ortalama hata ve % 0 maksimum hata ile ve Toluen gazı için 3.000.000 iterasyonda % 14,9 ortalama hata ve % 51.3 maksimum hatadır. Sonuçlar oldukça tatmin edicidir ve Tablo 6.8.1'deki sonuçlarla kıyaslandığında oldukça iyi bir gelişme görülmektedir.

Tablo 6.11.1. CCl₄ ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

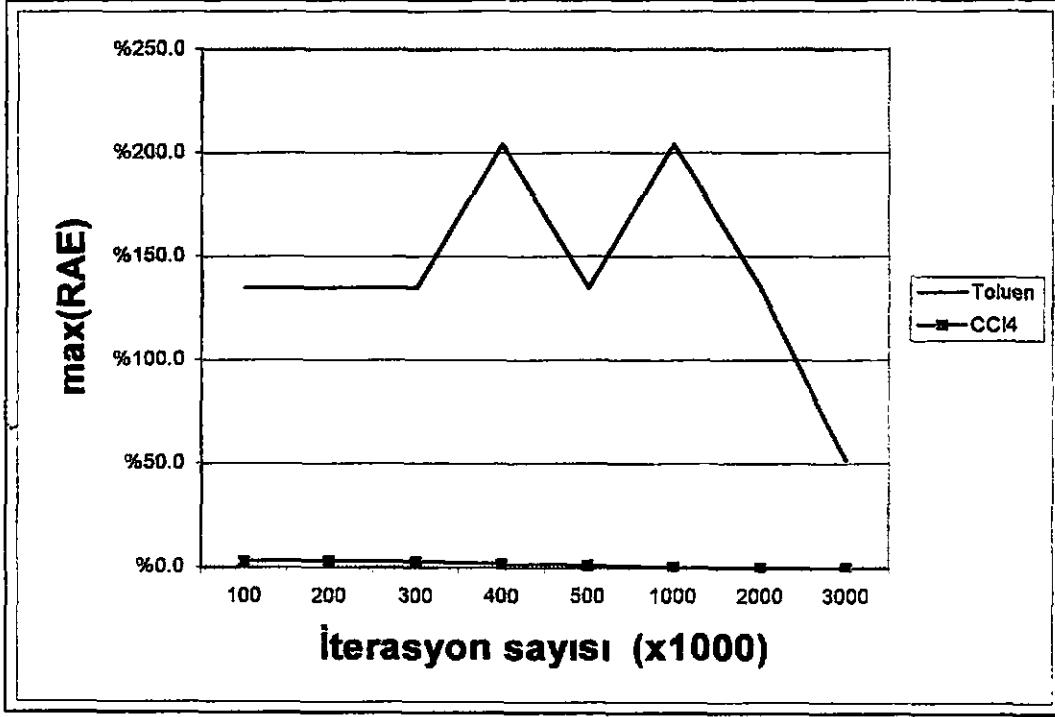
İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)	
	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄	Toluen	CCl ₄
x103	500	500	392	486	%21.6	%2.8	%22.5	%2.9
	1000	500	1056	499	%5.6	%0.2	%7.2	%0.2
	3000	500	2443	512	%18.6	%2.4	%18.9	%2.4
100	500	1000	954	998	%99.9	%0.2	%119.5	%0.2
	1000	1000	1124	999	%12.4	%0.1	%12.4	%0.1
	3000	1000	1165	1000	%61.2	%0.0	%61.2	%0.0
	500	3000	1017	3000	%112.3	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1173	3000	%17.3	%0.0	%17.3	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%45.5	%0.6	%134.8	%2.9
	500	500	273	484	%45.4	%3.2	%52.0	%3.2
	1000	500	855	497	%14.5	%0.5	%15.5	%0.6
	3000	500	2422	510	%19.3	%2.0	%19.6	%2.0
200	500	1000	476	986	%5.7	%1.4	%22.5	%1.4
	1000	1000	733	993	%26.7	%0.7	%27.2	%0.7
	3000	1000	1216	1001	%59.5	%0.1	%59.8	%0.1
	500	3000	1017	3000	%112.3	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%40.2	%0.9	%134.8	%3.2
	500	500	212	486	%57.6	%2.8	%67.0	%2.9
	1000	500	721	497	%27.9	%0.6	%28.9	%0.6
	3000	500	2358	507	%21.4	%1.5	%21.8	%1.5
300	500	1000	430	991	%13.9	%0.9	%22.5	%1.0
	1000	1000	1025	1000	%2.5	%0.0	%4.8	%0.0
	3000	1000	2773	1012	%7.6	%1.2	%8.8	%1.2
	500	3000	1017	3000	%112.3	%0.0	%134.8	%0.0

	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%35.7	%0.8	%134.8	%2.9
	500	500	489	495	%6.7	%0.9	%22.5	%1.0
	1000	500	1819	502	%81.9	%0.5	%85.0	%0.5
	3000	500	4339	509	%44.6	%1.8	%46.5	%1.8
	500	1000	452	994	%9.7	%0.6	%22.5	%0.7
400	1000	1000	1100	999	%10.0	%0.1	%12.5	%0.1
	3000	1000	2983	1007	%0.9	%0.7	%1.9	%0.7
	500	3000	1293	3000	%167.6	%0.0	%203.9	%0.0
	1000	3000	1519	3000	%51.9	%0.0	%51.9	%0.0
	3000	3000	1519	3000	%49.4	%0.0	%49.4	%0.0
	Toplam ortalama				%47.0	%0.5	%203.9	%1.8
	500	500	262	494	%47.6	%1.1	%54.9	%1.2
	1000	500	928	500	%7.2	%0.1	%8.4	%0.1
	3000	500	2660	504	%11.3	%0.9	%11.7	%0.9
	500	1000	397	996	%20.6	%0.4	%23.7	%0.4
500	1000	1000	973	1000	%2.7	%0.0	%4.2	%0.0
	3000	1000	2777	1005	%7.5	%0.5	%8.7	%0.5
	500	3000	1016	3000	%112.3	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1174	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%31.9	%0.3	%134.8	%1.2
	500	500	438	499	%12.3	%0.2	%22.5	%0.2
	1000	500	1520	500	%52.0	%0.1	%54.4	%0.1
	3000	500	3534	502	%17.8	%0.3	%19.3	%0.3
	500	1000	474	1000	%7.3	%0.0	%22.5	%0.0
1000	1000	1000	1234	1000	%23.4	%0.0	%26.3	%0.0
	3000	1000	3451	1000	%15.0	%0.0	%16.5	%0.0
	500	3000	1293	3000	%167.6	%0.0	%203.8	%0.0
	1000	3000	1519	3000	%51.9	%0.0	%51.9	%0.0
	3000	3000	1519	3000	%49.4	%0.0	%49.4	%0.0
	Toplam ortalama				%44.1	%0.1	%203.8	%0.3
	500	500	308	500	%38.3	%0.1	%43.4	%0.1
	1000	500	1074	500	%7.4	%0.0	%9.2	%0.0
	3000	500	2755	500	%8.2	%0.1	%8.5	%0.1
	500	1000	304	1000	%39.2	%0.0	%46.4	%0.0
2000	1000	1000	822	1000	%17.8	%0.0	%19.3	%0.0
	3000	1000	2819	1000	%6.0	%0.0	%7.4	%0.0
	500	3000	1016	3000	%112.3	%0.0	%134.7	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1174	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%34.2	%0.0	%134.7	%0.1
	500	500	311	500	%37.7	%0.0	%42.6	%0.0
	1000	500	1084	500	%8.4	%0.0	%10.1	%0.0
	3000	500	2760	500	%8.0	%0.0	%8.3	%0.0
	500	1000	450	1000	%9.9	%0.0	%22.5	%0.0
3000	1000	1000	1017	1000	%1.7	%0.0	%3.8	%0.0
	3000	1000	2847	1000	%5.1	%0.0	%6.3	%0.0
	500	3000	337	3000	%32.6	%0.0	%36.8	%0.0
	1000	3000	987	3000	%1.3	%0.0	%3.1	%0.0
	3000	3000	2510	3000	%28.9	%0.0	%51.3	%0.0
	Toplam ortalama				%14.9	%0.0	%51.3	%0.0

Tablo 6.11.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.11.1 ve şekil 6.11.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata genel olarak azalmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi hata başlangıçta osilasyon hareketine benzer bir seyir izlese de öğrenmeye devam edince hata tekrar düşmüştür. Şekillerden görüldüğü gibi CCl_4 gazı için elde edilen sonuçlar oldukça güzel ve Toluen gazı için elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi CCl_4 gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Toluen gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.6).



Şekil 6.11.1. CCl_4 ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE))



Şekil 6.11.2. CCl_4 ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE))

6.12.Paralel YSA yapısı ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen Toluen ve Metanol gaz karışımının sınıflandırılma ve konsantrasyon saptama sonuçları

Tablo 6.12.1’de Toluen ve Metanol gaz karışımları için 12 ve 24 no’lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Bölüm 5.3.6’ da izah edilen paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sonuçlar verilmiştir.

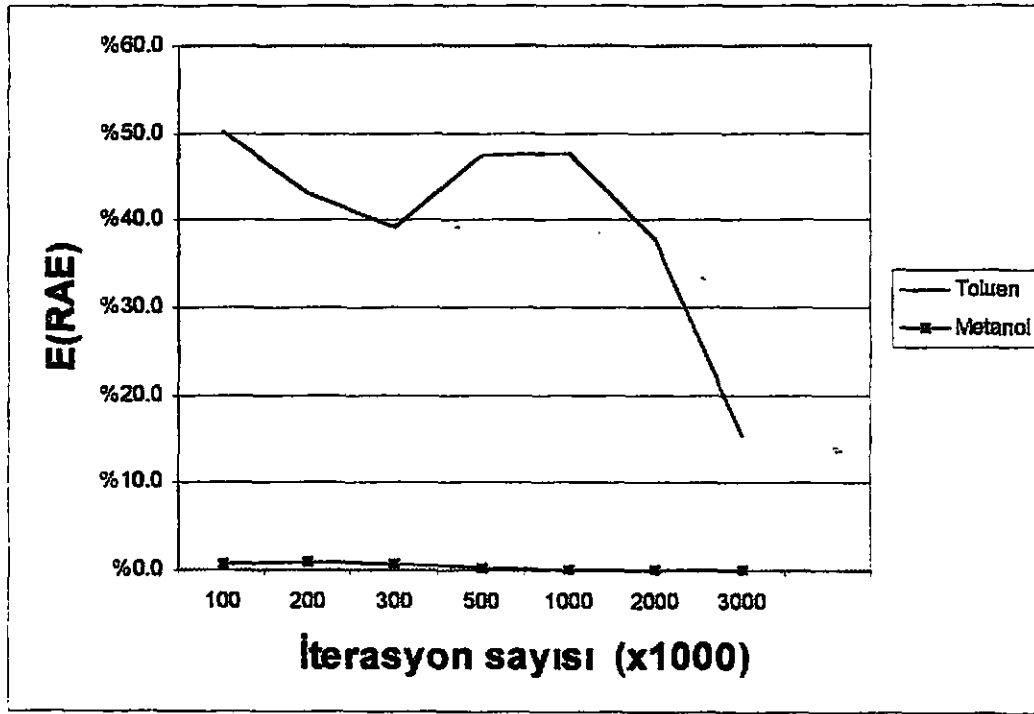
Karışım için elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma Tablo 6.11.1’ de ve Şekil 6.11.1 ve 6.11.2’ de görüldüğü gibi CCl_4 gazı için 3.000.000 iterasyonda % 0 ortalama hata ve % 0 maksimum hata ile ve Toluen gazı için 3.000.000 iterasyonda % 15,3 ortalama hata ve % 51.3 maksimum hatadır. Sonuçlar oldukça tatmin edicidir ve Tablo 6.7.1’deki sonuçlarla kıyaslandığında oldukça iyi bir gelişme görülmektedir.

Tablo 6.12.1. Metanol ve Toluen gaz karışımları için 12 ve 24 no'lu sensörler ile yapılan ölçümler ve Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları

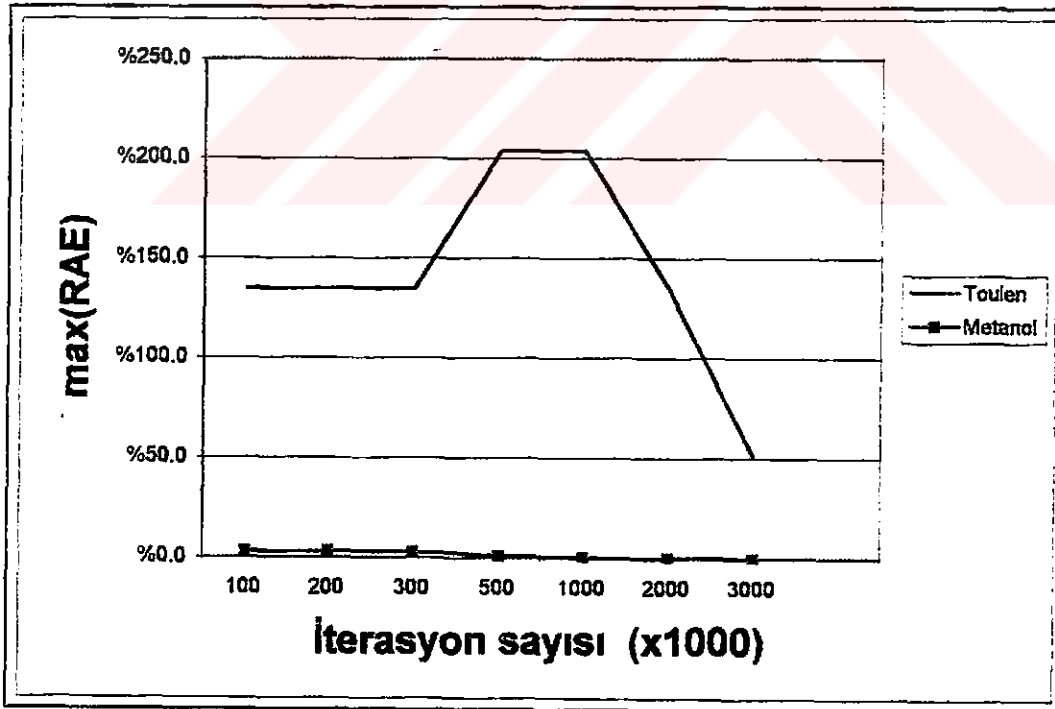
İterasyon	Gerçek (ppm)		ANN Tahmini (ppm)		E(RAE)		max(RAE)	
	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol	Toluen	Metanol
x103	500	500	392	486	%21.6	%2.8	%22.5	%2.9
	1000	500	1056	499	%5.6	%0.2	%7.2	%0.2
	3000	500	2443	512	%18.6	%2.4	%18.9	%2.4
	500	1000	1095	998	%119.1	%0.2	%119.5	%0.2
100	1000	1000	1124	999	%12.4	%0.1	%12.4	%0.1
	3000	1000	1165	1000	%61.2	%0.0	%61.2	%0.0
	500	3000	1174	3000	%134.8	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1173	3000	%17.3	%0.0	%17.3	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%50.2	%0.6	%134.8	%2.9
	500	500	244	484	%51.3	%3.2	%52.0	%3.2
	1000	500	855	497	%14.5	%0.5	%15.5	%0.6
	3000	500	2422	510	%19.3	%2.0	%19.6	%2.0
	500	1000	493	986	%2.4	%1.4	%6.0	%1.4
200	1000	1000	733	993	%26.7	%0.7	%27.2	%0.7
	3000	1000	1216	1001	%59.5	%0.1	%59.8	%0.1
	500	3000	1174	3000	%134.8	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%43.0	%0.9	%134.8	%3.2
	500	500	168	486	%66.5	%2.8	%67.0	%2.9
	1000	500	721	497	%27.9	%0.6	%28.9	%0.6
	3000	500	2358	507	%21.4	%1.5	%21.8	%1.5
	500	1000	430	991	%14.0	%0.9	%22.7	%1.0
300	1000	1000	1025	1000	%2.5	%0.0	%4.8	%0.0
	3000	1000	2773	1012	%7.6	%1.2	%8.8	%1.2
	500	3000	1174	3000	%134.8	%0.0	%134.8	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1173	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%39.2	%0.8	%134.8	%2.9
	500	500	479	496	%4.3	%0.7	%5.7	%0.7
	1000	500	1645	501	%64.5	%0.3	%67.2	%0.3
	3000	500	3885	506	%29.5	%1.1	%31.2	%1.2
	500	1000	462	996	%7.7	%0.4	%17.3	%0.4
500	1000	1000	1128	1000	%12.8	%0.0	%15.4	%0.0
	3000	1000	3080	1005	%2.7	%0.5	%4.0	%0.5
	500	3000	1519	3000	%203.9	%0.0	%203.9	%0.0
	1000	3000	1519	3000	%51.9	%0.0	%51.9	%0.0
	3000	3000	1519	3000	%49.4	%0.0	%49.4	%0.0
	Toplam ortalama				%47.4	%0.3	%203.9	%1.2
	500	500	449	499	%10.1	%0.2	%11.4	%0.2
	1000	500	1520	500	%52.0	%0.1	%54.4	%0.1
	3000	500	3534	502	%17.8	%0.3	%19.3	%0.3
	500	1000	483	1000	%5.6	%0.0	%14.2	%0.0
1000	1000	1000	1234	1000	%23.4	%0.0	%26.3	%0.0
	3000	1000	3451	1000	%15.0	%0.0	%16.5	%0.0
	500	3000	1519	3000	%203.8	%0.0	%203.8	%0.0
	1000	3000	1519	3000	%51.9	%0.0	%51.9	%0.0
	3000	3000	1519	3000	%49.4	%0.0	%49.4	%0.0
	Toplam ortalama				%47.7	%0.1	%203.8	%0.3

	500	500	288	500	%42.5	%0.1	%43.4	%0.1
	1000	500	1074	500	%7.4	%0.0	%9.2	%0.0
	3000	500	2755	500	%8.2	%0.1	%8.5	%0.1
	500	1000	274	1000	%45.3	%0.0	%52.6	%0.0
2000	1000	1000	822	1000	%17.8	%0.0	%19.3	%0.0
	3000	1000	2819	1000	%6.0	%0.0	%7.4	%0.0
	500	3000	1174	3000	%134.7	%0.0	%134.7	%0.0
	1000	3000	1174	3000	%17.4	%0.0	%17.4	%0.0
	3000	3000	1174	3000	%60.9	%0.0	%60.9	%0.0
	Toplam ortalama				%37.8	%0.0	%134.7	%0.1
	500	500	291	500	%41.7	%0.0	%42.6	%0.0
	1000	500	1084	500	%8.4	%0.0	%10.1	%0.0
	3000	500	2760	500	%8.0	%0.0	%8.3	%0.0
	500	1000	455	1000	%9.0	%0.0	%17.8	%0.0
3000	1000	1000	1017	1000	%1.7	%0.0	%3.8	%0.0
	3000	1000	2847	1000	%5.1	%0.0	%6.3	%0.0
	500	3000	330	3000	%34.1	%0.0	%36.7	%0.0
	1000	3000	988	3000	%1.2	%0.0	%3.0	%0.0
	3000	3000	2511	3000	%28.8	%0.0	%51.3	%0.0
	Toplam ortalama				%15.3	%0.0	%51.3	%0.0

Tablo 6.12.1 de verilen değerlerden sistemin genel performansını gösteren ortalama değerlere ait hata değerleri, daha kolay anlaşılma amacı ile şekil 6.12.1 ve şekil 6.12.2 'de görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Tablo ve bu şekillerden de görülebileceği gibi iterasyon sayısı (öğrenme işleminin tekrar sayısı) arttıkça hata genel olarak azalmaktadır. Şekillerden de görüleceği gibi beş yüzbin - bir milyon iterasyon civarında bir yükselme görülmesine rağmen öğrenmeye devam edince hata tekrar düşmüştür. Şekillerden görüldüğü gibi Metanol gazı için elde edilen sonuçlar oldukça güzel ve Toluen gazı için elde edilen sonuçlara göre daha iyi çıkmıştır. Bu durumun sebebi Metanol gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisinin , Toluen gazının konsantrasyon değişiminin QCM sensörlerin frekans değişimi üzerindeki etkisine göre daha fazla olmasıdır (Bkz. bölüm 5.1.7).



Şekil 6.12.1. Toluen ve Metanol gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları ortalama hata değerleri (E(RAE))



Şekil 6.11.2. Metanol ve Toluen gaz karışımları için Paralel YSA algoritması ve bulanık mantık kullanılarak elde edilen miktarsal sınıflandırma sonuçları maksimum hata değerleri (max(RAE))

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada temel olarak yapay zekanın iki güçlü aracı (tool) olan YSA ve Bulanık Mantık algoritmaları kullanarak değişik sensör sinyali dataları ile gaz konsantrasyonlarının saptanması, sensör dizileri ile yapılan ölçümlerle gazların miktarsal sınıflandırılması ve gaz sensörleriyle ilgili problemlere çözümler getirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç ile örnek olarak seçilen gazlar ve gaz karışımları için konsantrasyon saptama ve miktarsal sınıflandırma üzerinde çalışılmıştır

Bu tez çalışmasının ilk aşaması olarak ilk kez YSA metodunu ek bir sistem kullanmadan tek başına gaz sensörü cevap zamanını iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla gaz analizinde diğer bir alan olan gaz konsantrasyonlarını saptamada kullanılmak üzere bölüm 5.3.1’ de izah edildiği gibi, sensörlerin sadece kararlı hal cevapları değil aynı zamanda geçiş bölgesi cevapları da kullanılmıştır. Bununla sensörler cevap sürelerini tamamlamadan önce konsantrasyon saptama yoluna gidilmiş ve böylece girişte izah edilen sensörlerle ilgili problemlerden “yavaş cevap zamanı” problemine alternatif bir çözüm getirilmeye çalışılmıştır. Denise M. Wilson ve arkadaşları[34] gazların ayırımında kullanılmak üzere gaz sensörü cevap zamanını iyileştirmek amacıyla, sensör datalarının geçiş bölgesi cevaplarını analiz etmek için analog sinyal işleme ve tekniklerini kullanmışlardır. Bu amaç ile 8 sensörden oluşan bir sensör dizisi ve VLSI tabanlı bir analiz sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistemi kullanarak çeşitli gazların sabit gaz konsantrasyonları için sensör cevap süreleri tamamlamadan önce ayırt edilebilmeye imkan sağlayan ve YSA gibi sinyal işleme metodlarının kullanabileceği desenleri elde etmişlerdir. Bu metod Dijital sinyal işleme sistemlerine bir alternatif değil yardımcı bir ön işlem metodudur.

G.Huyberegts ve arkadaşları [21] karbon monoksit ve metan gazlarının gerçek zamanlı konsantrasyon tahmini için ileri beslemeli geri yayılım YSA yapısını kullanmışlar ve % 5 gibi oldukça iyi miktarsal sonuçlar elde ettiklerini bildirmişlerdir. Çalışmada ölçümler ani değişken olmayan bir ortamda yapıldığı için okunan değerler sensörlerin geçiş bölgesi sinyal dataları değil kararlı hal sinyal datalarıdır.

Konsantrasyon saptama amacı ile örnek olarak seçilen CCl_4 , CHCl_3 , Metanol ve Toluen gazlarının 500 ppm'den 10000 ppm' e değişen bir aralıktaki konsantrasyonları için ölçülen sensör sinyal dataları kullanılmıştır.

Tablo 7.1 'de CCl_4 , CHCl_3 , Metanol ve Toluen gazları için kullanılan sensör tipi ve YSA giriş sinir sayılarına bağlı olarak sensör cevap süreleri, konsantrasyon tahmin süreleri ve ortalama ve maksimum hata değerleri görülmektedir.

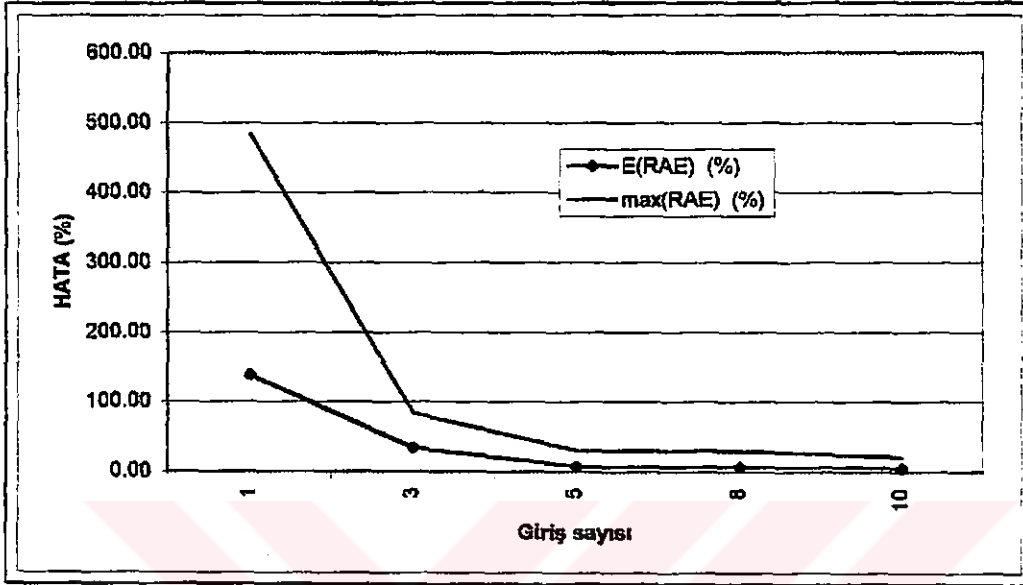
Tablo 7.1. CCl_4 , CHCl_3 , Metanol ve Toluen gazları için sensör cevap süreleri ve YSA tahmin sonuçları

Gaz	Sensör	YSA giriş sayısı	Sensör cevap süresi (sn)	YSA tahmin süresi (sn)	E(RAE) (%)	Max(REA) (%)
CCl_4	12	10	250-300	20	40.78	100.17
	24	10	250-300	20	4.18	24.16
	36	1	250-300	2	138.5	483.4
		3	250-300	6	34.6	83.6
		5	250-300	10	7.36	30.6
		8	250-300	16	6.59	29.6
		10	250-300	20	5.52	21.42
	46	10	250-300	20	8.90	35.65
	Idt	10	150-200	20	15.38	54.31
CHCl_3	36	10	250-300	20	2.52	14.35
Metanol	24	10	150-200	20	12.54	51.75
Toluen	24	10	150-200	20	17.38	90.41

Tablo 7.1' den de görüldüğü gibi genel olarak kullanılan sensörlerin cevap süreleri dakikalar mertebesinde iken YSA tahmin süreleri saniyeler mertebesine düşmüştür.

Tabloya ve şekil 7.1' e bakıldığı zaman CCl_4 gazı ve 36 no'lu sensör için YSA giriş sayısı azaltıldığında tahmin süresinin azaldığı fakat hatanın arttığı görülmektedir.

Uygulama alanına bağı olarak kabul edilebilir hata derecesine göre YSA giriş sayısı ayarlanabilir.



Şekil 7.1. CCl_4 gazı ve 36 nolu sensör için YSA giriş sayısına göre hata grafiği

Ayrıca tablo 7.1. 'de görüldüğü gibi 10 girişli YSA kullanılarak elde edilen sonuçlar sensörden sensöre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak oldukça iyidir. 12 no'lu QCM sensör sinyali dotaları kullanılarak YSA ile elde edilen sonuçlarda görülen hata miktarının fazlalığı bölüm 6.1' de de izah edildiği gibi sensörün CCl_4 gazının küçük konsantrasyonlarında gösterdiği belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. QCM sensörleri kullanılarak elde edilen YSA sonuçları farklı gazlar için farklı öğrenme sonuçları alındığı görülmektedir. Genel ağ performansını gösteren ortalama hata CHCl_3 için düşük bir oran olan %2.52 iken, Toluene gazı için yüksek sayılabilecek %17.38 civarındadır. Bütün bunlar sensör tepkilerinin YSA performansı üzerinde direkt etkili olduğunu göstermektedir. Yani bir gaz için ne kadar uyumlu bir sensör kullanılırsa YSA ile yapılan konsantrasyon tahmininde o derece iyi sonuçlar elde edilecektir.

Yaşlanma etkisini görmek için 36 no'lu QCM sensör ile değişik periyotlarda ölçümler yapılmış ve bu ölçümler sonucu elde edilen dotalar, 36 no'lu QCM

sensörünün ilk ölçüm dataları kullanılarak eğitilen YSA ile değerlendirilmiş ve tablo 7.2 'de de görüldüğü gibi aylarca sonra bile oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Bu sonuçlar, A.Hierlemann ve arkadaşlarının [20] çalışmalarında bildirdikleri YSA 'nın aylarca sonra bile iyi sonuçlar verdiği görüşleri ile uyum göstermektedir. Tablo 7.2'ye bakıldığında zamanla 36 nolu sensörün konsantrasyonlarında saptanan sapmanın YSA 'nın performansını olumsuz olarak etkilediği görülmektedir.

Tablo 7.2. İlk ölçümden 15 gün , 1 ay, 6 ay ve 8 ay sonra yapılan ölçümler kullanılarak elde edilen YSA sonuçları ve frekans sapmaları

Ölçüm Zamanı	E(RAE) (%)	Max(RAE) (%)	E(RAE)-sapma (%)	max(RAE)-sapma (%)	Δf (36 nolu QCM sensör) ortalama değişim. (%)
İlk Ölçüm	5.52	21.42	0.00	0.00	0.00
15 gün sonra	6.82	35.30	1.31	13.88	2.24
1 ay sonra	14.34	49.80	8.83	28.38	21.00
6 ay sonra	13.95	51.78	8.43	30.36	58.00
8 ay sonra	9.02	36.10	3.51	14.68	44.00

Bu çalışmada ayrıca CCl_4 ve $CHCl_3$ gazlarının konsantrasyon tahmini için bulanık mantık kullanılmıştır. Bu amaçla 12 ve 24 no'lu QCM sensörlerinin kararlı hal cevapları kullanılmıştır.

Bu konu ile ilgili olarak, B.Yea ve arkadaşları [22] yarı iletken sensörlerle, metan, hidrojen ve bütan gazları için DC gerilim değişimi ölçerek elde ettikleri sinyal datalarını bulanık mantık ile işleyerek konsantrasyon tahmini çalışması yapmışlardır. Bu amaç ile düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç üyelik fonksiyonu kullanmışlar ve üyelik fonksiyonu sayısını artırmakla sonuçların iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Tablo 7.3' den de görüldüğü gibi beş üyelik fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlar üç üyelik fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlardan daha iyidir ve tatmin edicidir. Bu sonuçlar, B. Yea ve arkadaşlarının[22] üyelik fonksiyonu sayısını artırmakla sonuçların iyileştirilebileceği şeklindeki görüşleriyle uyum göstermektedir.

Tablo 7.3. CCl₃ ve CHCl₃ gazları için sensör cevap süreleri ve Bulanık Mantık tahmin sonuçları

Gaz	Sensör	Bulanık Küme sayısı	Sensör cevap süresi (sn)	Bulanık Mantık tahmin süresi (sn)	E(RAE) (%)	Max(REA) (%)
CCl ₄	12	3	250-300	250-300	18.97	60
		5	250-300	250-300	7.59	31.43
	24	3	250-300	250-300	23.27	54.17
		5	250-300	250-300	5.64	14.98
	36	3	250-300	250-300	19.04	57.5
		5	250-300	250-300	5.13	15
CHCl ₃	36	3	250-300	250-300	19.64	41
		5	250-300	250-300	7.4	15.62

Bu çalışmada ikinci aşamada gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırması üzerinde çalışılmıştır. Bu amaç ile CCl₄ – Metanol, CCl₄ – Toluen ve Metanol – Toluen gaz karışımları kullanılmıştır.

İkinci aşamada gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırılması için ilk olarak iki katmanlı ileri beslemeli YSA yapısı kullanılmıştır. Bu yapı ile kabul edilebilir düzeyde bir hata ile tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir. Bu aşamada ikinci olarak Bulanık Mantık karar algoritmalı paralel YSA yapısı oluşturulmuş ve gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırılmasına çalışılmıştır.

Tablo 7.4’ de CCl₄ – Metanol, CCl₄ – Toluen ve Metanol – Toluen gaz karışımları için YSA ve Paralel YSA yapıları kullanılarak elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.4. CCl₄ – Metanol, CCl₄ – Toluen ve Metanol – Toluen gaz karışımları için YSA ve Paralel YSA yapıları kullanılarak elde edilen en iyi miktarsal sınıflandırma sonuçları

Karışım	Gaz	YSA		Paralel	YSA
		E(RAE) (%)	max(RAE) (%)		
CCl ₄ – Metanol	CCl ₄	22.4	62.4	0.03	0.1
	Metanol	89.8	349.5	6.4	74.2
CCl ₄ – Toluen	CCl ₄	11.8	29.1	0.0	0.0
	Toluen	73.5	259.5	14.9	51.3
Toluen- Metanol	Toluen	11.8	29.1	0.0	0.0
	Metanol	72.1	251.5	15.3	42.6

İkili karışımların miktarsal sınıflandırması konusunda, A.Hierlemann ve arkadaşları [20] altı adet akustik dalga sensörü sinyal dataları kullanarak eğittikleri ileri beslemeli YSA yapısı ile , Toluen - n-Octane gaz karışımı için %4.2 (Toluen) ve % 5 (n-Octane) ortalama hata ile öğrenme yapmışlardır.

Aynı konuda, T. Eklöv ve I. Lundström [23] beş adet Pd MOSFET sensör kullanarak eğittikleri ileri beslemeli YSA ağ yapısı ile Hidrojen – Etanol ve A. Szczurek ve arkadaşları [24] dört adet ticari yarı iletken gaz sensörü kullanarak eğittikleri ileri beslemeli YSA ile Butanol – Xylen gaz karışımlarının miktarsal sınıflandırma benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

B.Yang ve arkadaşları [19] üç sensör kullanarak yaptıkları çalışmada H₂S ve NO₂ gaz karışımı miktarsal sınıflandırmak için kullandıkları ileri beslemeli YSA 'nın performansını , YSA girişlerinde sensör sinyal datalarını ön işleme tabi tutarak artırmaya çalışmışlardır.

Litaratürde bahsedilen aynı YSA yapısı ile 2 sensör sinyal datası kullanarak elde edilen sonuçlarda yukarda bahsedildiği ve tablo 7.4' de de görüldüğü gibi CCl₄ - Metanol gaz karışımı için % 22.4 (CCl₄) ve %89.8 (Metanol) ortalama hata ve CCl₄ – Metanol ve Metanol - Toluen gaz karışımları için benzer tatmin edici olmaktan uzak olan sonuçlar elde edilmiştir.

Sensör sayısının yetersiz olmasından kaynaklanan bu olumsuz sonuç, Bulanık mantık karar mekanizmalı Paralel YSA yapısı kullanılarak giderilmeye çalışılmış ve tablo 7.4' de de görüldüğü gibi Paralel YSA yapısı kullanılarak , YSA yapısının performansının oldukça arttığı ve tatmin edici bir düzeye eriştiği görülmektedir.

J.A.Benediktsson ve arkadaşları[110] çok kaynaklı uzaktan algılama ve Coğrafik dataların sınıflandırılmasında ortak karar veren ve her bir YSA' nın probleme bir bütün olarak baktığı bir paralel YSA yapısını kullanmışlar ve tek bir YSA 'dan daha iyi bir sonuç elde ettiklerini raporlamışlardır.

Bu çalışmada paralel YSA yapısı farklı bir şekilde kullanılmış ve paralel YSA yapısı ile problem daha küçük alt parçalarına bölünerek her bir YSA'nın problemin bir parçasına çözüm oluşturmasına ve böylece problemin daha kolay çözülmesine çalışılmıştır.

Aynı zamanda burada, paralel YSA yapısı grup kararının tek bir YSA kararından daha doğru olmasının avantajı kullanılmıştır. [107,110]

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz;

- YSA ve Bulanık Mantık gaz konsantrasyonu tahmininde başarılı bir şekilde kullanılmıştır.
- Kolay uygulanabilir olan bulanık mantık yapısı ile konsantrasyon tahmininde oldukça iyi sonuçlar alınmıştır.
- YSA ile giriş sayısı uygun bir şekilde ayarlandığı zaman sensör cevap süresi tamamlanmadan konsantrasyon tahmini başarılı bir şekilde yapılabilir.
- İyi bir eğitime yapılan YSA aylarca sonra yapılan ölçümlerde bile iyi bir performansla kullanılabilir.
- YSA ve bulanık mantığın performansında sensörlerin cevap kabiliyeti etkin bir rol oynamaktadır.
- Gaz karışımlarının YSA yardımı ile miktarsal sınıflandırması konusunda sensör sayısı önemlidir. Sensör sayısı artırılarak YSA performansı artırılabilir.

- Bulanık mantık karar algoritması kullanılan paralel YSA yapısı ile ileri beslemeli YSA yapısının performansı artırılmıştır.

Gaz algılama konusunda yapılabilecek ileriki çalışmalar için yapılabilecek öneriler şu şekilde sıralanabilir;

- Ani konsantrasyon değişimleri gösterebilen ortamlarda YSA ve bulanık mantığın konsantrasyon tahmini ve sınıflandırma amacıyla yapılan gerçek zaman uygulamalarında daha etkin olarak kullanılabilmesi için cevap zamanı kısa olan sensörler imal edilmelidir.
- Bulanık mantık algoritmaları uygulama kolaylığı bakımından mobil el detektör sistemlerinde kolaylıkla uygulanabilir.
- YSA ve Bulanık mantık algoritmalarından daha etkin sonuçlar alabilmek için gazlara karşı duyarlılığı yüksek sensörler imal edilmelidir.
- Yaşlanma testlerinden oldukça iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen gözlenen sapmalar gösteriyor ki ; eğitilmiş YSA algoritmalarının uzun yıllar etkin bir biçimde kullanılabilmesi için sensörlerin yaşlanma etkilerine karşı uzun süre kararlılıklarını koruyabilmeleri , tekrar kullanılabilir ve tekrar üretilebilir omaları gerekmektedir.

Sonuç olarak , çok kolayca söyleyebiliriz ki , bulanık mantık ve iyi bir öğretim yapıldıktan sonra YSA yapıları gaz sensör sistemlerinde gaz algılama ve sınıflandırmada etkin olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] GÖPEL, W., SCHIERBAUM, K-D., *Sensors A Comprehensive Survey* Ed. Göpel, W., Hesse, J., Zemel, J.N., 2 *Chemical and Biochemical Sensors Part I* Ed. Göpel, W., Jones, T.A., Kleitz, M., Lundström, J., Chap. 1, VCH Weinheim, New York, 1991
- [2] ÖZTÜRK, Z.Z., *Savunma Sanayisindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, Kara Harp Okulu*, 817-824, Ankara, 1997
- [3] GÖPEL, W., *Sensors and Actuators B*, 18-19, 1-21, 1994
- [4] GARDNER, J.W., *Microsensors principles and applications*, chapter 1. John Wiley&Sons, New York 1982
- [5] PENZA, M., ANISIMKIN, V.I., MAXIMOV, S.A., VASANELLI, L., *Sensors and Actuators B*, 42, 103-107, 1997
- [6] DU, J., HARDING, G.L., OGILVY, J.A., DENCHER, P.R., LAKE, M., *Sensors and Actuators A*, 56, 211-219, 1996
- [7] Z.A.SHANA, F.JOSSE, *Anal. Chem.*, 66, 1955-1964, 1994
- [8] WAJID, A., *Sensors and Actuators A*, 63, 41-46, 1997
- [9] THOMPSON, M., ARTHUR, C.L. and DHALIWAL, G.K., *Anal. Chem.*, 58, 1206-1209, 1986
- [10] NIEUWENHUIZEN, M.S., NEDERLOF, A.J., BARENDZ, A.W., *Anal. Chem.*, 60, 230-235, 1988
- [11] BALLANTINE, D.S., ROSE, S.L., GRATE, J.W., WOHLTJEN, H., *Anal. Chem.*, 58, 3058-3066, 1986
- [12] MIERZWINSKI, A., WITKIEWICZ, Z., *TALANTA*, 34,10, 865-871, 1987
- [13] YAMAGUCHI, S., SHIMOMURA, T., TETSUMA, T., OYAMA, N., *Anal. Chem.*, 65, 1925-1927, 1993
- [14] WAJID, A., *Rev.Sci.Instrum.*, 67, 5, 1961-1964, 1995
- [15] RICKERT, J., BRECHT, A., GÖPEL, W., *Anal. Chem.*, 69, 1441-1448, 1997
- [16] FREDRIKSON, C., KIHLMON, S., RODAHL, M., KASEMA, B., *Langmuir*, 14, 248-251, 1998
- [17] TAKEUCHI, M., NAKAZAWA, M., MATSUZAKA, H., MORIIZUMI, T., NIYAMA, O., *Sensors and Actuators A*, 40, 97-101, 1994
- [18] NAKAMOTO, T., OKAZAKI, N., MORNZUMI, T. *Sensors and Actuators B*, 41, 183-188, 1997
- [19] YANG, B., CAROTTA, M.C., FAGLIA, G. FERRONI, GUIDI, V., MARTINELLI, G., SBERVEGLIERI, G., *Sensors & Actuators B*, 235-238, 1997
- [20] HIERLEMANN, A., WEIMAR, U., KRAUS, G., BERBERICH, M.S., GÖPEL, W., *Sensors & Actuators B*, 126-134, 1996

- [21] HUYBERECHTS, G., SZECOWKA, P., ROGGEN, J., LICZNERSKI, B.W., *Sensors & Actuators B*, 123-130, 1997
- [22] YEA, B., OSAKI, T., SUGAHARA, K., KONISHI, R., *Sensors & Actuators B*, 181-188, 1999
- [23] EKLÖV, T., LUNDSTRÖM, I., *Sensors & Actuators B*, 274-282, 1999
- [24] SZCZUREK, A., SZECOWKA, P.M., LICZNERSKI, B.W., *Sensors & Actuators B*, 427-432, 1996
- [25] KING, W.H., *Anal. Chem.* 36, 1735-1740, 1964
- [26] CHUAN, R.L., *J. Aerosol. Sci.*, 1, 111, 1970
- [27] SCHEIDE, E.P., GUILBAULT, G.G., *Anal. Chem.*, 144, No: 11, 1764-1768, 1972
- [28] WEBBER, L.M., GUILBAULT, G.G., *Anal. Chem.*, 48, No: 14, 2244-2247, 1976
- [29] HLAVAY, I., GUILBAULT, G.G., *Anal. Chem.*, 50, No: 7, 965-967, 1978
- [30] HO, M.H., GUILBAULT, G.G., SCHNEIDE, E.P., *Anal. Chem.*, 54, 1998-2002, 1982
- [31] MORISON, R.C., GUILBAULT, G.G., *Anal. Chem.*, 57, 2342-2344, 1985
- [32] FOGLEMAN, F.F., SHUMAN, M.S., *Anal. Lett.*, 9, 751, 1976
- [33] SULEMAN, A.A., *Anal. Lett.*, 17, A19, 2205, 1984
- [34] WILSON, D.M., DEWEERTH, S.P., *Sensors and Actuators B*, 41, 63-70, 1997
- [35] GÖPEL, W., SCHIERBAUM, K-D., *Sensors A Comprehensive Survey* Ed. Göpel, W., Hesse, J., Zemel, J.N., 2 *Chemical and Biochemical Sensors Part I* Ed. Göpel, W., Jones, T.A., Kleitz, M., Lundström, J., Chap. 1, 18-27, VCH Weinheim, New York, 1991
- [36] TAŞALTIN, C., TEMURTAŞ, F., GÜROL, İ., EBEOĞLU, M.A., ÖZTÜRK, Z.Z., AHSEN, V., *Türk Fizik Derneği 18. Fizik Kongresi*, 207-212, Adana, 1999
- [37] RATTON, L., KUNT, T., MCAVOY, T., FUJA, T., CAVICCHI, R., SEMANCIK, S., *Sensors & Actuators B*, 105-120, 1997
- [38] KATSU, T., KUROKO, M., HIROTA, T., FUJITA, Y., *Analytica Chimica Acta*, 193-195, 1989
- [39] ABULAFYA, N., MSc Thesis, University of London, 1995.
- [40] ALEXANDER, I., and Morton, H., *An Introduction to Neural Computing*, London, 1990.
- [41] ARBIB, K. J., and WITTENMARK B., *Brains, Machines and Mathematics*, 2 nd ed. Springer Verlag, 1987.
- [42] BARTO, A. G., SUTTON, R. S., AND ANDERSON C. H., *IEEE Transaction on Systems, and Cybernetics*, 13, 5, 840-846, 1983.
- [43] BARTO, A. G., *Connectionist Learning for Control*, 3 rd printing, MIT press, 1992.
- [44] CHARALAMBOUS. C., *IEE Proceedings-G*, 139, 3, 301-310, 1992.
- [45] CHEN, F.-C., AND KHALIL, H. K., 29 th *IEEE Conference on Decision and Control*, 3, 1707-12, 1990.

- [46] CHEN. S., AND BILLINGS. S.A., *International Journal of Control*, 56, 2, 319-346, 1992.
- [47] FUNAHASHI, K., *Neural Networks*, 2, 183-192, 1989.
- [48] GHANDHI, S.K., *VLSI Fabrication Principles*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1983.
- [49] ZADEH, L.A., *Communication of the ACM*, 37, 3, 77-84, 1994.
- [50] ZADEH, L.A., *Information and Control*, 8, 338-353, 1965.
- [51] BROWN M., AND HARRIS, C., *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Prentice Hall, 1994.
- [52] ZADEH, L.A., *IEEE Transactions on System, man and Cybernetics*, SMC-3, 1, 28-44, 1973.
- [53] ZARADA, J.M., 2. ed., West Publishing Company, St.Paul, 1990.
- [54] HO, M.H., GULLBAULT, G.G., *Anal. Chem*, 52, 1489-1492, 1980
- [55] MC CULLAH, W.S., and PITTS, W., *Buletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133
- [56] HEBB, D. O, *The Organization of Behavior*, Wiley, Newyork, 1949.
- [57] WIDROW, B., AND NGUYEN, D. , *IJCNN-90*, 3, 21-26, IEEE, 1990.
- [58] MINSKY, M.L., and PAPERT, S., "Perceptrons", MIT Press, 1969.
- [59] GROSBERG S., AND CARPENTER, G.A., *IEEE computer*, 80-88, 1988.
- [60] HOPFIELD, J. J.,AND TANK. D.W., 52, 141-152, 1985.
- [61] KOHONEN, T., *Self-Organization and Associative Memory*, 2nd ed., Springer Verlag, 1987.
- [62] RUMELHART, D. C., HINTON, G. E., and WILLIAMS, R.J., *Paralel Distrubuted Processing* , 1, 318-362, MIT press, 1986
- [63] YUMUSAK, N., *Doktora Tezi*, Sakarya Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapzari, 1998
- [64] HSU , Y. Y., AND YANG, C. C., *Applications of Neural Networks*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [65] LIPPMANN, R.P., *IEEE ASSP Magazine*, April, 4-22, 1987.
- [66] MONTAGUE, G. A., WILLIS, M.J., THAM, M.T., MORRIS, A.J., *Second international Conference on Artificial Neural Networks*, 119-23, 1991.
- [67] NARENDRA, K.S., AND MUKHOPADHYAY, S. , *IEEE Transaction on Neural Networks*, 4, 1, 63-72, 1993.
- [68] ZEMENKOVA, M., KANDEL, A., *Information Sciences*, 107-141, 1985
- [69] HUANG, L.J., TOMIZUKA, M., *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20, 5, 1115-1123, 1990
- [70] AKBAY, E., *Doktora Tezi*, Marmara Universitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999
- [71] McCAULEY, J.J., *The C Users Journal*, 47-64, 1995

- [72] TONG, R.M., *Automatica*, 13, 559-569, 1977
- [73] ZADEH A. L., KACPRZYK, J., *Fuzzy Logic For The Management of Uncertainty*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1992
- [74] BRUBAKER, D. I., *EDN Design Feature*, 111-116, 1992
- [75] LIN, C. T., LEE, C. S. G., *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 2, 1, 46 – 55, 1994
- [76] KLIR, G. J., YUAN, B., *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications*, Prentice Hall, New Jersey, 1995
- [77] BABA, A. F., *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995
- [78] ERDAL, H., *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998
- [79] KORKMAZ, K., *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999
- [80] MIZUMOTO, M., *Information Sciences*, 45, 129-151, 1988
- [81] ALTINDAL, A., *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999
- [82] SNOW, A.W., BARGER, W.R., *Phthalocyanine Films in Chemical Sensors*, 5, Ed.C.C. Leznoff and A.B.P. Lever, VCH, New York 1989
- [83] GRATE, J.W., MARTIN, S.J., WHITE, R.M., *Anal. Chem.*, 65, No: 21, 940A-948A, 1993
- [84] YANG, M., THOMPSON, M., *Anal. Chem.*, 65, 1158-1168, 1993
- [85] CUMPSON, P.J., SEAH, M.P., *Meas. Sci. Technol.*, 1, 544-555, 1990
- [86] HILLER, A.C., WARD, M.D., *Anal. Chem.*, 64, 2439-2554, 1992
- [87] TIERSTEN, H., *In linear Piezoelectric Plate Vibrations*, Plenum, New York, Chap. 10, 1969
- [88] TAŞALTIN, C., *Y.Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000
- [89] LORD, R., *Proc.London Math.Soc.* 17, 4-11 1885
- [90] SAUERBREY, G., *Z. Phys.* 155, 206-222, 1959
- [91] BENES, E., *J. Appl. Phys.* 56(3), 608-626, 1984
- [92] SCHOKLEY, W., CURRAN, D.R., KONEVAL, D.J., *J. Acoust. Soc. America.* 41, 981-993, 1966
- [93] BUTTERWORTH, B., *Proc. IRE.* 43, 790, 1955
- [94] VAN-DYKE, K.S., U.S. Patent 257,171, July 4, 1945
- [95] MARTIN, S.J., GRANSTAFF, V.E., FRYE, G.C., *Anal. Chem.* 63, 2272-2281, 1991
- [96] REED, C.E., KANAZAWA, K.K., KAUFMAN, J.H., *J. Appl. Phys.* 68(5), 1993-2001, 1990
- [97] MACEA, V., BUCUR, R.V., *Thin Solid Films* 60, 73-84, 1979
- [98] CADY, W.G., *Piezoelectricity*; Mc Graw-Hill, New York, 1974

- [99] MARTIN, S.J., FRYE, G.C., RICCO, A.J., SENTURIA, S.D., *Anal. Chem.*, 65, 2910-2922, 1993
- [100] OSCIK, J., *Adsorption*, Ed. I.L. Cooper, John Wiley & Sons, New York, 1982
- [101] FIETZEK, C., BODENHÖFER, K., HAI SCH, P., HEES, M., HANACK, P., STEINBRECHER, S., *Sensors & Actuators B*, 1-11, 1999
- [102] EBEOĞLU, M.A., ÖZTÜRK, Z.Z., TAŞALTIN, C., TEMURTAŞ, F., Teknik Rapor, Gaz Sensör Prototipi Geliştirme Projesi, TÜBİTAK MAM, 1999
- [103] TEMURTAŞ, F., EBEOĞLU, M.A., YUMUŞAK, N., TAŞALTIN, C., ÖZTÜRK, Z.Z., ELECO'99 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 219-223, Bursa, 1999
- [104] YUMUŞAK, N., TEMURTAŞ, F., ÖZTÜRK, Z.Z., ELM EKSEM 97, 294-299, Bursa 1997
- [105] YUMUŞAK, N., TEMURTAŞ, F., ÖZTÜRK, Z.Z., TMMOB Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, 47-51, Ankara 1997
- [106] YUMUŞAK, N., TEMURTAŞ, F., ÇEREZCİ, O., ÖZTÜRK, Z.Z., IMS'98 2. International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, 1053-1058, Adapazarı, 1998
- [107] TEMURTAŞ, F., YUMUŞAK, N., ÇEREZCİ, O., ICEM'99 International Conference on Electrical Machines, 552-555, İstanbul, 1998
- [108] YUMUŞAK, N., TEMURTAŞ, F., ÇEREZCİ, O., Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 103-108, Adapazarı, 1998
- [109] YUMUŞAK, N., TEMURTAŞ, F., ÇEREZCİ, O., ELM EKSEM 97, 255-259, Bursa 1997
- [110] BENEDIKTSSON, J.A., SVEINSSON, J.R., ERSOY, O.K., SWAIN, P. H., IEEE Transactions on Neural Networks, 8, 1, 54-64, 1997


```

Uses crt,dos,ieeeapas;
CONST k617 = 0;
VAR
    status,code,sayi,k,sensor,nr, nrf,nrk,nc1,nc2,nc3,nc4 : integer;
    l,h1,m1,s1,hund1 : word;
    x,y,r,r1,r2,r3,r4 : string;
    ya : array[1..20,1..10] of string;
    gs,gg : array[1..20,1..10] of integer;

vt,vout,zam0,zama,zamb,zamd,tax,zaml,zaman,cl,t,c,vc100pf,i,ia,ib,id,vbas,vbit,d
v,i2 : real;
    fz1,fz2,fz3,x1,x2,dataadi,dataadil,df,dx,dy,xx : string;
    aciklama1,aciklama2,aciklama3,zz : string[100];
    zz1,zz2,data,cvsecenek,ivsecenek,gecikme,gec,veri,ftt,fn : integer;
    resist,taramahizi,vgate,zamanson,vft,fevz : real;
    datafile,datafile1 : text;
    h,m,s,hund : word;
    ig,ig2,ic,nc,ng,vr,v,v1,v2,v3,v4,Mode,Flag,secenek,dvx : integer ;
    Key : char ;
    upper,lower : word;

data_frekansmetre,data_Multimetre,data_elektrometre,VSON,volt,lamdasifir,lamdaso
n,lamda,flow : real;
    a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,c10,c11,c12,c13,c14,d,f,e : real;
    fa,fs,OI,MK : integer;

Procedure Elektrometre_sifirla;
Begin
    Send(K617,'C1X',Status);
    Send(K617,'Z1X',Status);
    Send(K617,'N1X',Status);
End;
Procedure Elektrometre_hazirla;
Begin
    Send(K617,'C0X',Status);
    Send(K617,'Z0X',Status);
    Send(K617,'N0X',Status);
End;
Procedure Multimetre_Oku;
Begin
    Send(26,'FOROG1X',Status);
    Delay(200);
    Enter(r,80,1,26,Status);
    val(r,Data_Multimetre,code);
End;
Procedure Elektrometre_Oku;
Begin
    Send(K617,x,Status);
    Delay(200);
    Enter(r,80,1,K617,Status);
    val(r,Data_Elektrometre,code);
End;
Procedure Frekansmetre_Oku;
Begin
    Enter(r,80,1,14,Status);
    Val(r,data_frekansmetre,code);
End;

```

```

Procedure GirEkran;
Begin
    Window(1,1,80,25);
    GotoXY(1,1);
    TextColor(Black);
    TextBackground(brown);
    ClrScr;
    Writeln;
    Writeln('                **   SENS - GAZ SENSOR TEST PROGRAMI   **
');
    GotoXY(1,3);
    Write(' DATA FILE ADI : ');
    GotoXY(35,3);
    Write(' PROTOKOL FILE ADI : ');
    Gotoxy(1,4);
    Writeln(' DIKKAT !  E/H Soru Girislerinde E icin 1 , H icin 0
giriniz');
    Gotoxy(1,5);
    Writeln(' DIKKAT !  Max.Top.CCM: 1210 CCM , 2.kanal: 10 CCM, 3.ve
4.kanal: 100 CCM ');
    Writeln(' MKS Gas Controler E/H ? :      Max.Top.CCM :      t-Gaz:
sn t-Yika: sn');
    Writeln;
    Writeln(' Gaz Menu su Adedi:          . Gaz Menu su icin
Olcum E/H ?      1/2 ?');
    Writeln('
:      Sensor:');
    Writeln(' Gaz Kanal Adedi :      1.Kanal :      CCM ');
    Writeln('
:      t :      sn');
    Writeln(' 2.Kanal Set CCM :      2.Kanal :      CCM I-t
olcumu icin ');
    Writeln('
Gerilim :      volt ');
    Writeln(' 3.Kanal Set CCM :      3.Kanal :      CCM
LowPassFil.E/H ? : ');
    Writeln('
Ortalamasi alinacak ');
    Writeln(' 4.Kanal Set CCM :      4.Kanal :      CCM
data sayisi : ');
    Writeln('
E/H ? :      ');
    Writeln(' Network File adi :      Olcum sonuclari ');
    Writeln('
Hz ');
    Writeln(' Ogrenme sonuclari ');
    Writeln('      ppm      ,      ppm      Frekans B :
Hz ');
    Writeln(' ');
    Writeln('      ppm      ,      ppm      I :
A t :      sn');
    Write('
6417780 - 397 / 295 F.T. ');
    Writeln;
    Window(17,3,32,3);
    TextBackground(blue);
    Gotoxy(1,1);
    ClrEol;
    Window(54,3,71,3);
    TextBackground(blue);

```

```
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(27,6,29,6);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(44,6,48,6);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(56,6,59,6);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(71,6,74,6);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;

Window(19,8,23,8);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(26,8,28,8);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(19,10,23,10);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(34,10,40,10);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;

Window(19,12,23,12);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(19,14,23,14);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(19,16,23,16);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(34,12,40,12);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(34,14,40,14);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(34,16,40,16);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(44,10,50,10);
```

```
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(44,12,50,12);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(44,14,50,14);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(44,16,50,16);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(62,9,64,9);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(70,11,74,11);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(62,11,64,11);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Window(73,9,76,9);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(66,13,71,13);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(73,14,76,14);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(70,16,74,16);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(66,17,68,17);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;

window(20,18,35,18);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(52,19,68,19);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(3,21,7,21);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(12,21,17,21);
```

```

TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(21,21,25,21);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(30,21,35,21);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(52,21,68,21);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(3,23,7,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(12,23,17,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(21,23,25,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(30,23,35,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(44,23,60,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
window(67,23,72,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
end;
Procedure Dofile;
Begin
Window(17,3,32,3);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
read(dataadi);
write(dataadi);
assign(datafile,dataadi);
rewrite(datafile);
end;
Procedure Procfile;
Begin
Window(54,3,71,3);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
write('?');
read(dataadi1);
write(dataadi1);
assign(datafile1,dataadi1);

```

```

        rewrite(datafile1);
        {
    end;
Procedure tsn;
Begin
Window(70,11,74,11);
TextBackground(blue);
Gotoxy(1,1);
ClrEol;
Read(zama);
zz1:=Round(zama);
write(zz1);
end;

Procedure FR;
Begin
        i:=0;
        For nr:= 1 to nrf do
                begin
                frekansmetre_Oku;
                i:=i+data_frekansmetre;
                end;
                i:=i/nrf;
        end;

Procedure Fabas;
Begin
Send(14,'AC0',Status);
Delay(200);
{Send(14,'AF1',Status);
Delay(200);
}
Send(14,'R0',Status);
Delay(200);
Send(14,'F0',Status);
Delay(200);
Send(14,'N8',Status);
Delay(200);
Send(14,'X4',Status);;
end;

Procedure Fbbas;
Begin
Send(14,'BC0',Status);
Delay(200);
{Send(14,'BF1',Status);
Delay(200);
}
Send(14,'R0',Status);
Delay(200);
Send(14,'F1',Status);
Delay(200);
Send(14,'N8',Status);
Delay(200);
Send(14,'X4',Status);
end;

Procedure gerlim;
Begin
window(66,13,71,13);
TextBackground(blue);

```

```

    Gotoxy(1,1);
    ClrEol;
    Read(vbas);
    vft:=vbas;
    vr:=round(vbas);
    write(vr);
end;

Procedure IT;
Begin
    i:=0;
    For nr:= 1 to nrf do
        begin
            Elektrometre_Oku;
            i:=i+Data_Elektrometre;
            end;
        i:=i/nrf;
    end;

Procedure Ibas;
Begin
    x1:='D1V';
    x2:='01X';
    Elektrometre_hazirla;
    Delay(200);
    x:='F1R0G1X';
    Str(vft,dx);
    y:=Concat(x1,dx,x2);
    Send(k617,y,Status);
    Delay(200);
end;

Procedure olcum;
Begin
    if fa=1 then
        Begin
            Fabas;
            FR;
            window(52,19,68,19);
            TextBackground(green);
            Gotoxy(17,1);
            ClrEol;
            write(i);
            ia:=i;
        end;
    if fs=2 then
        Begin
            Fbbas;
            FR;
            window(52,21,68,21);
            TextBackground(green);
            Gotoxy(17,1);
            ClrEol;
            write(i);
            ib:=i;
        end;
    end;
    if OI=1 then
        Begin
            Ibas;
            IT;
        end;
end;

```

```

window(44,23,60,23);
TextBackground(green);
Gotoxy(17,1);
ClrEol;
write(i);
id:=i;
end;
if (((fa=1) and (fs=2)) and (OI=1)) then
  Begin
    writeln(datafile,zz1,',',ia,',',ib,',',id);
  end;
if (((fa=1) and (fs=2)) and (OI<>1)) then
  Begin
    writeln(datafile,zz1,',',ia,',',ib);
  end;
if (((fa=1) and (fs<>2)) and (OI=1)) then
  Begin
    writeln(datafile,zz1,',',ia,',',id);
  end;
if (((fa=1) and (fs<>2)) and (OI<>1)) then
  Begin
    writeln(datafile,zz1,',',ia);
  end;
if ((fa<>1) and (OI=1)) then
  Begin
    writeln(datafile,zz1,',',id);
  end;
end;

```

```

Procedure Gir;

```

```

Begin
  Window(27,6,29,6);
  TextBackground(blue);
  Gotoxy(1,1);
  Read(MK);
  write(MK);
  if MK=1 then
    Begin
      Procfile;
      Window(44,6,48,6);
      TextBackground(blue);
      Gotoxy(1,1);
      ClrEol;
      Read(v);
      write(v);
      Window(56,6,59,6);
      TextBackground(blue);
      Gotoxy(1,1);
      ClrEol;
      read(zama);
      zz1:=Round(zama);
      write(zz1);
      Window(71,6,74,6);
      TextBackground(blue);
      Gotoxy(1,1);
      ClrEol;
      read(zamb);
      zz2:=Round(zamb);
      write(zz2);
    end;
end;

```



```

    Window(62,9,64,9);
    TextBackground(blue);
    Gotoxy(1,1);
    ClrEol;
Repeat
  Begin
    Read(fa);
    write(fa);
    end;
  until (fa=1) or (fa=0);
  if fa=1 then
  Begin
    Window(73,9,76,9);
    TextBackground(green);
    Gotoxy(1,1);
    ClrEol;
Repeat
  Begin
    Read(fs);
    write(fs);
    end;
  until (fs=1) or (fs=2);
  end;
  Window(62,11,64,11);
  TextBackground(blue);
  Gotoxy(1,1);
  ClrEol;
Repeat
  Begin
    Read(OI);
    write(OI);
    end;
  until (OI=1) or (OI=0);

if MK=0 then
  Begin
    tsn;
  end;
if OI=1 then
  Begin
    gerlim;
  end;
end;

BEGIN
  initialize (21,0);
  clrscr;
  GirEkran;
  Dafile;
  Gir;
  nrf:=2;
  fn:=1;

  zamd:=zama;
  gettime(h1,m1,s1,hund1);
  zam0:=3600*h1+60*m1+s1+hund1/100;

  Repeat
    Begin
      gettime(h,m,s,hund);
      zam1:=3600*h+60*m+s+hund/100;

```

```
        zaman:=zam1-zam0;
        zz1:=Round(zaman);
        window(67,23,72,23);
        TextBackground(green);
        Gotoxy(1,1);
    ClrEol;
        write(zz1);
        olcum;
    End;
    until (zamd<=zaman) or (KeyPressed);
clrscr;
y:='D1V000X';
Send(k617,y,Status);
Elektrometre_sifirla;
Close(Datafile);
```

END.



Ek B

0.0138	0.0436	0.0838	0.1288	0.1735	0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	1
0.0436	0.0838	0.1288	0.1735	0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	1
0.0838	0.1288	0.1735	0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	1
0.1288	0.1735	0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	1
0.1735	0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	1
0.2175	0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	1
0.2591	0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	1
0.2988	0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	1
0.3361	0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	1
0.371	0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	1
0.4039	0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	1
0.435	0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	1
0.4637	0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	1
0.4913	0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	1
0.5164	0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	1
0.5403	0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	1
0.5628	0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	1
0.5832	0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	1
0.6021	0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	1
0.6197	0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	1
0.636	0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	1
0.6509	0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	1
0.6653	0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	1
0.6783	0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	1
0.6906	0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	1
0.7019	0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	1
0.7123	0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	1
0.7221	0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	1
0.7315	0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	1
0.7398	0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	1
0.748	0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	1
0.7554	0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	1
0.7628	0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	1
0.7697	0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	1
0.776	0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	1
0.7826	0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	1
0.7886	0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	1
0.7943	0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	1
0.7999	0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	1
0.8052	0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	1
0.8105	0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	1
0.8152	0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	1
0.82	0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	1
0.8243	0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	1
0.8288	0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	1
0.8332	0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	1
0.8372	0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	1
0.8407	0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	1
0.8447	0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	1
0.848	0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	0.8716	1
0.8512	0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	0.8716	0.8737	1
0.8543	0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	0.8716	0.8737	0.8755	1
0.8573	0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	0.8716	0.8737	0.8755	0.8775	1
0.8601	0.8623	0.8648	0.8672	0.8695	0.8716	0.8737	0.8755	0.8775	0.8793	1

0.9163	0.9163	0.9165	0.9168	0.917	0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	1
0.9163	0.9165	0.9168	0.917	0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	0.9186	1
0.9165	0.9168	0.917	0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	0.9186	0.9188	1
0.9168	0.917	0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	0.9186	0.9188	0.919	1
0.917	0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	0.9186	0.9188	0.919	0.9194	1
0.9173	0.9175	0.9179	0.918	0.9183	0.9186	0.9188	0.919	0.9194	0.9198	1



ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Yozgat-Akdağmadeni'nde doğdu. Ortaokul ve lise öğrenimini 1986 yılında Mersin Tevfik Sırrı Gür Lisesi'nde tamamladı. 1991 yılında ODTÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. 1995 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektronik Bilim dalında Yüksek Lisansını tamamlayarak 1996 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği ana bilim dalı Elektrik-Elektronik bilim dalında doktora eğitimine başladı. Halen ALSTOM Elektrik Endüstrisi A.Ş. bünyesinde GETİ Dökme Reçineli Trafolar Geliştirme Bölümünde Geliştirme -Hesap Şube Müdürü olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.