

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE GÜRÜLTÜ SEVİYESİNİN ANALİZİ

ERDİ DOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. BEDRİ KEKEZOĞLU**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE GÜRÜLTÜ SEVİYESİNİN ANALİZİ

Erdi DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 15.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent ORAL
Marmara Üniversitesi

Günümüzde ağır sanayi fabrikalarından ev içinde kullanılan donanımlara kadar enerji ihtiyacı katlanarak artmaktadır. Artan enerji ihtiyacıyla birlikte elektriksel donanımların kullanımı da artmaktadır.

Enerji iletim ve dağıtımının kalbi olarak niteleyebileceğimiz güç transformatörlerinin de kullanım alanlarında artış görülmektedir. Sayıları giderek artan güç transformatörlerinde meydana gelen gürültüler insanlar tarafından daha fazla duyulabilir hale gelmiştir.

Güç transformatörlerinin meydana getirdiği gürültülerin giderek rahatsız edici bir hal alacağı düşünülerek bu gürültüye sebebiyet veren parametrelerin incelenmesi hususunda bir çalışma gerçekleştirmekten mutluluk duyduğumu ifade etmek isterim.

Tez çalışmamda teknik bilgi ve araştırma yöntemleri hususlarında destek veren ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU başta olmak üzere yüksek lisans eğitimim süresince değerli bilgi ve görüşleriyle vizyonumu geliştiren bütün hocalarıma; Türkiye’de yapılmış gürültü ölçümlerinin temini hususunda yardımlarını esirgemeyen Türkiye Elektrik İletim A.Ş ailesine, çalışmalarımda manevi destekleriyle hep yanımda olan annem, babam ve eşim Aybüke Betül’e teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2016

Erdi DOĞAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Tezin Özgün Değeri	7
BÖLÜM 2	
TRANSFORMATÖRLER	8
2.1 Transformatörlerin Genel Tanımı	8
2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması	9
2.2.1 Kullanım Amacına Göre	9
2.2.2 Nüve Tipine Göre	10
2.2.3 Faz Sayısına Göre	11
2.2.4 Soğutma Şekline Göre	11
2.3 Yağlı Tip Transformatörlerin Yapısı ve Özellikleri;	12
2.3.1 Sargılar	14
2.3.2 Nüve	14
2.3.3 Kazan(Ana Tank)	15
2.3.4 Yağ Genleşme Deposu(Yağ Rezerve Tankı)	16
2.3.5 Yağ Seviye Göstergeleri	16
2.3.6 Teneffüs Tertibatı.....	18

2.3.7	Emniyet Borusu	18
2.3.8	Bucholz Rölesi	19
2.3.9	Yağ ve Sargı Isı Göstergeleri.....	20
2.3.10	Gaz Tazyik Rölesi	21
2.3.11	Gaz Kontrol Göstergesi.....	21
2.3.12	Buşingler	22
2.3.13	Fanlar	23
2.4	Kuru Tip Transformatörler	24
BÖLÜM 3		
TRANSFORMATÖRLERDE GÜRÜLTÜ SEBEPLERİ		25
3.1	Çekirdek Gürültüsü.....	26
3.1.1	Transformatör Titreşimleri	27
3.1.2	Nüve İmal Metotları	29
3.1.3	Bazı Silisli Sac Tiplerinin Karşılaştırılması.....	30
3.1.4	Örtüşme Uzunluğu, Örtüşme Kayma Uzunluğu ve Basamak Sayılarının Gürültü Seviyesine Etkisi	31
3.1.5	Sıkma Basınçları, Silisli Sac Kalınlıkları ve Kritik İndüksiyonun Transformatör Gürültüleri Üzerindeki Etkileri.....	41
3.1.6	Çekirdeğin Nüvesinde Bulunan Basamaklardaki Plaka Sayısının(İstifleme Yüksekliği veya Laminasyon Sayısı) Gürültü Üzerindeki Etkileri	43
3.1.7	Uygulanan İndüksiyon Değeri, Hava Boşluk Uzunluğu ve Basamak Bindirme Metotlarının Daha Önce Açıklanan Parametreler İle Birlikte Gürültü Üzerindeki Etkileri	45
3.1.8	Mıknatıssal Büzülme ve Manyetik Kuvvetlerin Çekirdek Mimarileri Üzerindeki Etkileri	49
3.2	Yük Gürültüleri	68
3.3	Fan Gürültüleri	94
3.4	Transformatör Gürültü Sebeplerinin Karşılaştırılması	99
BÖLÜM 4		
TRANSFORMATÖR GÜRÜLTÜ TESTLERİ		104
4.1	Ölçüm ve Tahmin Metotlarının Açıklanması ve Karşılaştırılması.....	104
4.1.1	Ses Basınç Metodu	106
4.1.2	Ses Yoğunluk Metodu.....	109
4.1.3	Ses Yoğunluk ve Ses Basınç Tekniklerinin Karşılaştırılması	120
4.2	TEİAŞ'a Ait Transformatörlerde Gürültü Testleri.....	139
4.2.1	250 MVA Ototransformatör	139
4.2.2	125 MVA Ototransformatör	145
4.2.3	50/62,5 MVA Güç Transformatörü	150
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		153

SİMGE LİSTESİ

A	Test Odasının Ses Emme Alanının Oranı
A/m	Amper/metre
A_{wn}	A-ağırlıklı Ölçek Katsayısı
a	Örtüşme Uzunluğu
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
B_c	Kritik İndüksiyon
B_{sat}	Doyma İndüksiyonu
B_8	H, 800 A/m'de Meydana Gelen İndüksiyon
C	Sönümlleme Matrisi
c	Ses Hızı
dB	Desibel
dB(A)	A-ağırlıklı Desibel
dS_c	Tüm Çekirdek Yüzey Alanları
E	Elastisite Modülü
f	Frekans
F_m	Kuvvet Yoğunluğu
f_c	Çakışma Frekansı
g	Boşluk Uzunluğu
H	Manyetik Alan Kuvvet Vektörü
h	Transformatör Yüksekliği
Hz	Hertz
$I(t)$	Geçici Yük Akımı
J	Akım Yoğunluk Vektörü
K	Sertlik Matrisi
k	Laminasyon Sayısı
kg	Kilogram
kV	Kilovolt
L_{bgA}	Ortalama Arka Plan Gürültüsü
L_{IA}	A-ağırlıklı Ortalama Ses Yoğunluk Seviyesi
log	Logaritma
L_{pAO}	Düzeltilmemiş Ortalama Ses Güç Seviyesi
l_m	Belirlenmiş Ölçüm Çevresinin Uzunluğu
L_{pA}	Düzeltilmiş Ses Basınç Seviyesi
L_{WA}	Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi
m	Metre
mm	Milimetre

MPa	Mega Pascal
MVA	Mega Volt Amper
N	Basamak Sayısı
n	Gürültü
p	Odadaki Tüm Noktalardaki Ses Basıncı
PSV _s	Titreşimlerin Birincil Kaynakları
r	Yayılma Ortamının Yoğunluğu
R _n	Dinamik Yanıt Faktörü
S	Ölçüm Yüzeyinin Alanı
s	Örtüşme Kayma Uzunluğu
S _r	Transformatör Nominal Gücü
S _v	Metrekare Olarak Test Odası Yüzeyinin Toplam Alanı
T	Tesla
U	Gerilim
w	Açısal Frekans
α	Ortalama Akustik Emme Katsayısı
φ	Faz Açısı
δ_n (nm)	Yer değiştirme

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
AG	Alçak Gerilim
BEM	Sınır Elemanlar Metodu (Boundary Elements Method)
CGO	Geleneksel Silisli Sac
ÇBB	Çok Basamaklı Bindirme (Multi-Step-Lap)
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Elements Method)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
HGO	Yüksek Geçirgenliğe Sahip Tanecik Yönlendirmeli Silisli Sac
HVDC	Yüksek Gerilim Doğru Akım Enerji İletim Sistemleri
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International Organization for Standardization)
MDOF	Çoklu Serbestlik Derecesi
MS	Mıknatıssal Büzülme
NEMA	Ulusal Elektrik Üreticileri Derneği (National Electrical Manufacturers Association)
ONAF	Doğal Yağ Zorlamalı Hava (Oil Normal Air Forced)
ONAN	Doğal Yağ Doğal Hava (Oil Natural Air Natural)
ODAF	Yönlendirilmiş Yağ Zorlamalı Hava (Oil Directed Air Forced)
ODWF	Yönlendirilmiş Yağ Zorlamalı Su (Oil Directed Water Forced)
OFAF	Zorlamalı Yağ Zorlamalı Hava (Oil Forced Air Forced)
OFWF	Zorlamalı Yağ Zorlamalı Su (Oil Forced Water Forced)
ÖN	Ölçüm Noktası
RSST	Dönel Tek Levha Test Cihazı
Std.	Standart
TBB	Tek Basamaklı Bindirme (Single-Step-Lap)
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Transformatör Çekirdek ve Sargıları[20]	8
Şekil 2.2 Çekirdek Tip Nüve[21]	10
Şekil 2.3 Mantel Tip Nüve[21]	10
Şekil 2.4 Dağıtılmış Tip Nüve[21]	10
Şekil 2.5 Su ile Soğutmalı Transformatör[21]	11
Şekil 2.6 Güç Transformatörü[23]	12
Şekil 2.7 Güç Transformatörünün Yapısı[25,32]	13
Şekil 2.8 Bulchoz Rölesi[25]	14
Şekil 2.9 Sargılar ve Bobinler [25,23]	14
Şekil 2.10 Transformatör Nüvesi [23]	15
Şekil 2.11 Transformatör Kazanı[27]	15
Şekil 2.12 Transformatör Yağ Genleşme Deposu[23]	16
Şekil 2.13 Gözle İzleme Tipi Yağ Seviyesi Göstergesi [26]	17
Şekil 2.14 Şamandıralı Tip Yağ Seviye Göstergesi[26]	17
Şekil 2.15 Teneffüs Tertibatı[26]	18
Şekil 2.16 Transformatör Emniyet Borusu[26]	19
Şekil 2.17 Bucholz Rölesi[26]	19
Şekil 2.18 Isı Göstergesi[26]	21
Şekil 2.19 Buşingler ve Ark Boynuzları[25]	23
Şekil 2.20 Kuru Tip Trafo Yapısı[29]	24
Şekil 3.1 A-)Transformatör Çekirdeğindeki Deformasyondan Öncesi B-) Sonrası [1] ...	27
Şekil 3.2 Demir Üzerindeki Manyetik İndüksiyon ile Mıknatıssal Büzülme Arasındaki İlişki [1]	28
Şekil 3.3 A-) Uç Uca Bindirme B-) Tek Basamaklı Bindirme C-) Çok Basamaklı Bindirme[32]	29
Şekil 3.4 1-Tek Basamaklı Bindirme (A)Her Tabakada 2 Adet Basamak, Her Basamakta 2 Adet Plaka 2-Çok Basamaklı Bindirme (A)Her Tabakada 5 Adet Basamak, Her Basamakta 2 Adet Plaka (B)Her Tabakada 5 Adet Basamak, Her Basamakta 1 Adet Plaka [32]	29
Şekil 3.5 A) Tek Basamaklı Bindirme, B) Her Basamakta İki Plakası Olan Tek Basamaklı Bindirmenin Yandan Görünüşü, C) Çok Basamaklı Bindirme, D) Her Basamakta İki Plakası Olan Çok Basamaklı Bindirmenin Yandan Görünüşü [2]	30

Şekil 3.6 A) Tek Basamaklı Bindirme B) Çok Basamaklı Bindirme(g: Boşluk Uzunluğu)[7]	30
Şekil 3.7 Tek Faz Çekirdek Modellerinin Boyutları ve Mimarisi[4].	31
Şekil 3.8 Örtüşme Uzunluğu(a)[4]	32
Şekil 3.9 Örtüşme Uzunluğunun Farklı İndüksiyon Seviyeleri Altında Gürültü Seviyesi Üzerindeki Etkisi[4]	32
Şekil 3.10 Çekirdek Penceresinin 30 cm Üzerine Sabitlenmiş Mikrofonla Birlikte Doğrusallaştırılmış Örtüşüm Modeli[5]	33
Şekil 3.11 Örtüşüm Alanının Detayları[5]	33
Şekil 3.12 İki Farklı Örtüşüm Uzunluğuna Uygulanan İndüksiyonlar ile Gürültü Seviyesindeki Değişim[5]	34
Şekil 3.13 N ve s Parametrelerinin Değişimiyle Kayıplar, PL , Uyarım VL ve Gürültü (n)[5]	35
Şekil 3.14 Çekirdek İmal Ortamı[14].	36
Şekil 3.15 Çekirdek Etrafındaki Mikrofon Pozisyonları[14]	36
Şekil 3.16 Gürültü Spektrumu(7 Basamak, 2mm Örtüşüm Uzunluğu)[14]	39
Şekil 3.17 1.7 T İndüksiyon Altında Farklı Basamak Sayılarında ve Farklı Örtüşme Uzunluklarında Meydana Gelen Ortalama Gürültü Seviyesi[14]	39
Şekil 3.18 Beş Basamaklı Çekirdekte Farklı İndüksiyon Değerlerinde Örtüşme Uzunluğunun Gürültü Üzerindeki Etkisi[14]	39
Şekil 3.19 0.23 mm Kalınlıktaki Materyal için B8 Değeri ile Mıknatıssal Büzölme İvme Seviyesi Arasındaki İlişki[6]	41
Şekil 3.20 0.23 mm Kalınlıktaki Yeni RGH ve RGH Levhaları Kullanılarak Oluşturulmuş Model Transformatör Çekirdeğinin Gürültü Seviyeleri[6]	42
Şekil 3.21 Basamak Bindirmeli Çekirdeğin Gürültü Seviyesi Üzerinde Sıkma Basıncının Etkisi[6]	43
Şekil 3.22 Çekirdek Etrafındaki Mikrofon Pozisyonları[12]	43
Şekil 3.23 27MOH Materyali Kullanılan Çekirdekte Basamaktaki Levhaların Etkisi[12]	45
Şekil 3.24 27MOH ve 27M3 Materyallerinin Karşılaştırılması[12]	45
Şekil 3.25 Titreşim ve Kayıp Analizleri için Kurulan Deney Ortamı[7]	46
Şekil 3.26 İyi Sıkıştırılmış ÇBB Çekirdeğin Köşe Bölgelerinin Yüzey Titreşimleri (Çekirdek Tipi A; N:2, K:110, B:1.6T). (A) Yer Değiştirmeler, Dn (B) Hızlar, vn , A[7]	46
Şekil 3.27 İki Farklı Laminasyon Sayısı K için(110 ve 160) Ortalama Hava Boşluğu g:1 mm Olan Çekirdeğin vx , A, vy , A, vz , A Yüzey Titreşimleri (Çekirdek Tipi A; N:2, B:1.6 T)[7]	47
Şekil 3.28 İki Farklı Laminasyon Sayısı K için(110 ve 160) Farklı N Basamak Sayılarında Meydana Gelen Yüzey Titreşimleri vx , A, vy , A, vz , A ve Ortalama Hız vA (Çekirdek Tipi A) (A) g:0 (B) g:1 [7]	48
Şekil 3.29 Farklı İndüksiyonlarda(B), Farklı Hava Boşluk Uzunluklarında(g), Farklı Laminasyon Sayılarında(k) ve Farklı Basamak Sayılarında(N) A Tipi Çekirdeğin nA Gürültü Ölçüm Grafikleri [7]	49
Şekil 3.30 Gürültü Emisyonu için Basit Model(PSVs, Titreşimlerin Birincil Kaynakları, DSc Tüm Çekirdek Yüzey Alanları, vn Yüzey Alanlarındaki Titreşim, P Odadaki Tüm Noktalardaki Ses Basıncı) [7]	50

Şekil 3.31 Yüksek Tanecik Yönlendirmeli Silisli Saclarda Oluşan Mıknatıssal Büzülmeler(MB) A)Radyal Yöndeki Mıknatıslanma İçin B İndüksiyonunun Fonksiyonu Olarak MB B)Normal x,y,z-Düzlemlerinin Rastgele Seçilmiş Yönlerinde MB[7]	51
Şekil 3.32 Araştırılan Çekirdek Modeli ve Ölçüm Noktaları[8]	52
Şekil 3.33 Levhanın Üst Bölgesindeki Akı Dağılımı[8].....	53
Şekil 3.34 Yığılma Faktörü ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki[8]	54
Şekil 3.35 Tek Basamaklı ve Çok Basamaklı Bindirme için Yapılmış Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması (A) Paralel Yönde, (B) Enine Yönde, (C) Tabaka Yüzeyine Dik Yönde[8].....	55
Şekil 3.36 B:1.6 T için Temel ve Harmonik Bileşen Spektrumları (A) 11. Ölçüm Noktası, (B) 20. Ölçüm Noktası[8].....	55
Şekil 3.37 11 Alana Bölünmüş Model Çekirdek ve İlgili Ölçümler Olan B-Desenleri[13]	56
Şekil 3.38 Üç Farklı $Br. d.$ İçin ε' 'na Bağlı Fonksiyon Olan r Faktörü[13].....	58
Şekil 3.39 Model Çekirdek Boyutları ve C-Tipi Kelepçelerin Kenetleme Pozisyonları[9]	59
Şekil 3.40 Model Çekirdeğin Bacağını Sıkıştırmak için Tesis Edilmiş Mekanizmanın Şematik Gösterimi[9].....	60
Şekil 3.41 Yankısız Odaya Kurulan Çekirdek ve Mikrofonlar[9]	60
Şekil 3.42 Basma Gerilimi ile Tepeden Tepeye ve Sıfırdan Tepeye Mıknatıssal Büzülmeler Arasındaki İlişki A) 1.3 T İndüksiyonda HGO Materyali. B) 1.3 T İndüksiyonda CGO Materyali. C) 1.7 T İndüksiyonda HGO Materyali. D) 1.7 T İndüksiyonda CGO Materyali[9].....	61
Şekil 3.43 Çekirdeğin Bacaklarına Uygulanan Basma Gerilimi ile Gürültünün Harmonik Bileşenleri Arasındaki İlişki, A) 1.3T B) 1.7T [9]	62
Şekil 3.44 Model Çekirdek Bacağındaki Basma Gerilimi ile Farklı İndüksiyonlarda Meydana Gelen Gürültü Arasındaki İlişki[9]	63
Şekil 3.45 Sıkma Yükünün Etkisi[12].....	63
Şekil 3.46 1.3 T ve 1.7 T'de Basma Gerilimleri ile Mıknatıssal Büzülmenin Harmonik Bileşenleri [9]	64
Şekil 3.47 Basma Gerilimi ile Mıknatıssal Büzülmenin Harmonik Bileşenleri Arasındaki İlişki A) 1.3T B) 1.7T [9].	65
Şekil 3.48 Basma Gerilimi Sebebiyle Deforme Olan Bacağın Görünümü[9].....	67
Şekil 3.49 Model Çekirdeğin Uygulanan Basma Gerilimiyle Meydana Gelen Gürültü Seviyeleri(Deformasyondan Önce ve Sonra)[9]	67
Şekil 3.50 Lineer Bir Yükün Akım Gerilim Karakteristiği[33]	68
Şekil 3.51 Non-Lineer Yükün Akım Gerilim Karakteristiği ve Dalga Şekilleri[33]	69
Şekil 3.52 Lineer ve Non-Lineer Yüklerin Akım ve Gerilim Karakteristikleri ile Dalga Şekilleri[33]	69
Şekil 3.53 A) Yüksek Gerilim Bobini B) Basitleştirilmiş YG Bobini C) 22 İletken Kombinasyonundan 2 İletken Modeli[16]	70
Şekil 3.54 Sonlu Eleman Analizi İçin İletkenlerin Homojenize Edilmesi[17]	70
Şekil 3.55 Sargıların Eksenel Uzunluğunda Bakır, Çubuk ve Kağıdın Dağılımı[17]	71
Şekil 3.56 Transformatörün Bir Fazının Çeyrek Modeli[16].....	72
Şekil 3.57 Sargılar Arasındaki Radyal Uzaklık Çubukları[16]	72
Şekil 3.58 Silindirik Sargıların Radyal Yerdeğiştirmesi A) Simülasyon B) Ölçüm [16].....	73

Şekil 3.59 Transformatörün Üst Tarafındaki Ses Yoğunluk Seviyesi(Sol Taraf: Ölçüm Sonuçları, Sağ Taraf: Simülasyon Sonuçları)[16]	74
Şekil 3.60 Dinamik Lorentz Kuvvetlerine Göre Alçak Gerilim Sargı Mimarisindeki Simetrik Olmayan Yer Değiştirme[17]	74
Şekil 3.61 Okuma Noktası Pozisyonunda Alçak Gerilim Sargılarının Zamana Göre Asimetrik Yer Değiştirmesi[17]	75
Şekil 3.62 Eş Merkezli Sargılar Üzerindeki Manyetik Kuvvetler[15].....	76
Şekil 3.63 Eşitlikte Verilen Sabit ve İkinci Bileşenin Ürettiği Kuvvet Bileşenleri[15]	77
Şekil 3.64 Toplam ve Fark Frekanslarında Üretilen Kuvvet Bileşenleri[15].....	78
Şekil 3.65 Baskın Yük Gürültü Bileşenlerinin Ürettikleri Gürültü Seviyeleri A) Tüm Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Dikkate Alınması Durumundaki Yük Gürültü Bileşenleri B) Temel Yük Akım Bileşeni /1 İçeren Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Dikkate Alınması Durumundaki Yük Gürültü Bileşenleri C) Her İki Metot İçin Meydana Gelen Yük Gürültü Spektrumlarının Karşılaştırılması[15]	80
Şekil 3.66 İki Kaynak ve İki Kütleli MDOF Sistemi[34]	81
Şekil 3.67 İki Kaynak, İki Kütleli ve Sönümlleme Kontrollü MDOF Sistemi[34]	81
Şekil 3.68 Tipik Yağlı Transformatör Sargılarının Net Normal Yüzey Yer Değiştirme Genliğinin Frekans Cevap Karakteristikleri(Tüm Harmonik Yük Kuvvet Bileşenleri İlk Doğal Frekansın Üzerindeki Frekans Aralığında Sönümlleme Kontrolü Altındadır.)[15]	83
Şekil 3.69 Sönümlleme Oranı ζ_n 'nin Zamana Göre Sönümllemeye Etkisi[35].....	83
Şekil 3.70 Yük Akım Harmonikleri Tarafından Üretilen Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Oluşturduğu Kuvvet Titreşimlerinde AG Sargılarda Meydana Gelen Yer Değiştirmeler(Sonuçlar 3D-FEM Analizi İle Elde Edilmiştir.)[15]	84
Şekil 3.71 150 MVA Yağlı Transformatörün Ortalama Ses Yayılma Etkisi[15]	86
Şekil 3.72 35 MVA Düşürücü Transformatörde THD ile Gürültü Arasındaki İlişki [15] ...	89
Şekil 3.73 Yük Harmoniklerinin Yük Gürültü Spekturumuna Etkisi A) Farklı Harmonik Bozulma Seviyeleri İçin Gerilim Spektrumları B) Ortalama Thd'de A-Ağırlıklı ve A-Ağırlıksız Yük Gürültü Spektrumu [15].....	90
Şekil 3.74 Olağandışı Yüksek Harmonik Bozulma Bulunan Bir Bilgisayar Merkezindeki Dağıtım Transformatöründeki Yük Gürültü Spektrumu. A) Yük Akım Bileşenlerinin Genliği B) Yük Akım Dalga Şekli C) Temel Bileşene Göre Harmonik Bileşenlerin Faz İlişkileri D) Transformatörün Yük Gürültü Bileşenleri[15]	91
Şekil 3.75 Yük Akım Bileşenlerinin Faz İlişkilerindeki Değişiklikler A) Yük Gürültü Bileşenlerinde Meydana Gelen Maksimum Değişiklik B) Toplam Yük Gürültü Seviyesindeki Maksimum Değişiklik[15]	92
Şekil 3.76 HVDC Transformatörün Ürettiği Yük Gürültü Bileşenleri A) Yük Akım Bileşenlerinin Genlikleri B) Yük Akım Dalga Şekli C) Hesaplanmış Yük Gürültü Spektrumu(Siyah Çubuklar) İle Ölçülmüş Toplam Gürültü Spektrumunun Karşılaştırılması[15]	93
Şekil 3.77 300 MVA Güç Transformatörünün Yük Gürültü Artışında Yük Akım Harmonik Bileşenlerinin Dağılımı A) Tek Harmonikler B) Çift Harmonikler[15]	94
Şekil 3.78 ONAN Soğutma Tekniği[36]	95
Şekil 3.79 ONAF Soğutma Tekniği[36]	96

Şekil 3.80 OFAF Soğutma Tekniği[36].....	96
Şekil 3.81 Güç Transformatöründe Bulunan Soğutma Fanları[37]	97
Şekil 3.82 Radyatörlerin Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü[37]	97
Şekil 3.83 Düşük Çekirdek Gürültülü Modern Bir Transformatörün Yüklenme Durumuna Göre Meydana Gelen Ses Seviyeleri[18]	98
Şekil 3.84 Düşük Çekirdek Gürültülü Modern Bir Transformatörün Yüklenme Durumuna Göre Meydana Gelen Toplam Ve Yüksüz Durum Ses Seviyeleri[18].....	99
Şekil 3.85 Yüklü ve Yüksüz Durumların Frekans Spektrumu A) Lineer dB Ölçeği B) dBA Ölçeği[18]	100
Şekil 3.86 Farklı Seviyelerde Yüklenen 80 MVA Transformatörün Yüksüz ve Toplam Gürültü Seviyeleri [18].....	103
Şekil 4.1 Ses Basınç Ölçüm Cihazı[40]	104
Şekil 4.2 Ses Yoğunluk Ölçüm Probu[40]	109
Şekil 4.3 Çalışılan Transformatör A-) Kazan B-) Kapaklar [10]	111
Şekil 4.4 Transformatör Kazanının ve Toprakta Yansıyan Görüntüsünün Diyagramı[10].....	112
Şekil 4.5 Doğrudan ve Tipik Kırınım Dalga Yayılm Yollarının Geometrisi[10]	113
Şekil 4.6 Ölçülmüş Titreşim Hız Seviyesi(Db), 1×10^{-9} Referans Değer Olan v_0 İle Kazan Duvarının Tamamının Üzerindeki Ortalama İle, $L_v = 10 \log_{10}(v^2/v_0^2)$ [10].....	115
Şekil 4.7 Transformatörün Tank Duvarının Bir Bölümünde 100 Hz Frekansta İvme Ölçerden Alınmış Transfer Fonksiyonu A) Genlik B) Faz C) Genliğin Standart Sapması[10].....	116
Şekil 4.8 Transformatörün Tank Duvarının Bir Bölümünde 200 Hz Frekansta İvme Ölçerden Alınmış Transfer Fonksiyonu A) Genlik B) Faz C) Genliğin Standart Sapması[10].....	117
Şekil 4.9 Transformatörden 5 ve 10 m Uzaklıktaki Düzlemler Üzerinde 100 Hz'teki Tahmin Edilmiş Ses Yoğunluk Konturları(Referans Değer 1×10^{-12}) A) 5m B) 10m[10].....	119
Şekil 4.10 Transformatörden 10 m Uzaklıktaki Düzlem Üzerindeki Ölçülmüş(*) ve Tahmin Edilmiş(O) Ortalama Ses Basınç Seviyeleri[10].....	119
Şekil 4.11 Hesaplama Şemasının Görünümü[11].....	120
Şekil 4.12 Yağlı Güç Transformatörünün Bir Bobini için Aksisimetrik Manyetomekanik Sonlu Eleman Modeli [11].....	121
Şekil 4.13 Yağlı Transformatörün 3 Boyutlu Akustik Mekanik Sonlu Eleman Modeli[11]	123
Şekil 4.14 Transformatör Kazanının Üç Boyutlu(3D) Sınır Eleman Modeli [11]	123
Şekil 4.15 Transformatör Kazanı ve Yüksek Gerilim Laboratuvarının Üç Boyutlu(3D) Akustik Mekanik Sonlu Eleman Modeli[11]	124
Şekil 4.16 Serbest Alan Yayılmı: Sınır Eleman Metoduyla Analiz Edilmiş Transformatör Ses Basınç Seviyeleri[11].....	126
Şekil 4.17 Gürültü Ölçümleri Yapılan Güç Transformatörü[41]	128
Şekil 4.18 İndirici Merkez Ölçüm Pozisyonları[41]	128
Şekil 4.19 1/3 m Konturda Ölçülmüş 16 MVA Transformatörün Frekans Spektrumu[41]	129

Şekil 4.20 16 MVA Transformatörün Çevresindeki Farklı Konturlarda Ölçülmüş 100 Hz Frekans Bileşenindeki Gürültü Seviyeleri[41]	130
Şekil 4.21 Test Edilen Transformatörlerden Birinin Fotoğrafı[41]	131
Şekil 4.22 250 MVA Transformatörlerden Yayılan Ölçülmüş Gürültünün Frekans Spektrumu[41]	132
Şekil 4.23 250 MVA Transformatörleri Etrafında Yapılan Ses Basınç Ve Ses Yoğunluk Gürültü Ölçümleri Arasındaki Fark[41]	133
Şekil 4.24 Düşük Çevresel Gürültü Ortamındaki 250 MVA Transformatörün Çevresindeki Gürültünün 125 Hz Bileşeni[41]	134
Şekil 4.25 Düşük Çevresel Gürültü Ortamındaki 250 MVA Transformatörün Farklı Uzaklıklarda Ölçülmüş 125 Hz Gürültü Bileşeni[41]	135
Şekil 4.26 50 MVA Transformatörün Yük Gürültülerinin Ölçülmüş Frekans Spektrumu[18]	137
Şekil 4.27 250 MVA Ototransformatör ve Test Ortamı [42]	139
Şekil 4.28 125 MVA Ototransformatör ve Ölçüm Ortamı[43]	146
Şekil 4.29 50/62,5 MVA Güç Transformatörü[44]	150

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Gürültü Seviyelerinin Sınıflandırılması [30]	25
Çizelge 3.2 Gürültü Seviyesindeki Değişimin Toplum Tarafından Algılanması [30]	26
Çizelge 3.3 Çekirdek Üzerinden Ölçülmüş Gürültü Değerleri[14]	37
Çizelge 3.4 Geleneksel Tane Konumlu Materyal(27M3) ile Yüksek Geçirgenlikli Materyalde(27MOH) Meydana Gelen Gürültü Seviyelerinin Karşılaştırılması[14].....	40
Çizelge 3.5 Transformatör Sac Levhaların Özellikleri ve Ticari Kodları[6]	41
Çizelge 3.6 Levha Sayısının Etkisi[12].....	44
Çizelge 3.7 Ölçüm Yapılan Çekirdeklerin Özellikleri[7]	45
Çizelge 3.8 Çekirdek A ve Çekirdek B Boyutları [8].....	53
Çizelge 3.9 Çekirdeğin Bölünmüş Alanlarındaki Mıknatıssal Büzülme[13]	57
Çizelge 3.10 Basma Gerilimi Altında Mıknatıssal Büzülme ve Gürültünün Harmonik Bileşenlerinin Artış Eğimi(dB/MPa) [9]	66
Çizelge 3.11 Simülasyon ve Ölçümün Rezonant Modu[16]	73
Çizelge 3.12 Yük Harmonikleri Tarafından Üretilen Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Frekansları[15]	79
Çizelge 3.13 Yük Harmoniklerinin Ürettiği Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Genlikleri[15]	79
Çizelge 3.14 Yük Harmoniklerinden Kaynaklanan Manyetik Kuvvet Bileşenlerinin Faz Açısı[15].....	80
Çizelge 3.15 Şebeke Harmonikleri Sebebiyle Yükselen Yük Gürültüleri[15]	90
Çizelge 3.16 Manyetik Kuvvet Genliği, Yayılma Etkisi ve Baskın Yük Gürültü Harmoniklerinin Ses Güç Seviyesi[15]	92
Çizelge 3.17 Avrupa’da Üretilmiş Transformatörlerin Gürültü Seviyeleri[18].....	101
Çizelge 3.18 Kuzey Amerika’da Üretilmiş Transformatörlerin Gürültü Seviyeleri[18].....	101
Çizelge 4.1 Ortalama Akustik Emme Katsayısının Yaklaşık Değerleri [39]	107
Çizelge 4.2 Transformatör Kazan Duvarının Cepheden Yüzeyine 5 m ve 10 m Uzaklıkta ve Paralel Olan Sanal Düzlemler(2,8x2,8 m2) İle 15x15 Pozisyonlarında Ölçülmüş ve Tahmin Edilmiş Ortalama Ses Yoğunluk Seviyelerinin Karşılaştırılması[10].....	118
Çizelge 4.3 Transformatör Kazan Duvarının Cepheden Yüzeyine 5 m ve 10 m Uzaklıkta ve Paralel Olan Sanal Düzlemler(2,8x2,8 m2) ile 15x15 Pozisyonlarında Ölçülmüş ve Tahmin Edilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyelerinin Karşılaştırılması[10].....	118

Çizelge 4.4	Yağ Tankı Bulunmayan Transformatörün Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları[11].....	124
Çizelge 4.5	Yağ Tanklı Transformatörün Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları[11].....	125
Çizelge 4.6	Kapalı Odadaki Ses Güç Seviyelerinin Ölçümü ve Simülasyonu[11]	125
Çizelge 4.7	Ses Güç Seviyelerinin Ölçülmüş ve Simüle Edilmiş Serbest Alan Yayılımları[11]	126
Çizelge 4.8	16 MVA Transformatörün 3 Karakteristik Frekansında Ölçülmüş Gürültü Seviyeleri [41]	136
Çizelge 4.9	Üç Farklı Konturda İki Adet 250 MVA Transformatörde Ölçülmüş Toplam Güç Seviyeleri(dB(A))[41]	136
Çizelge 4.10	Kademe Pozisyonlarının Etkisi[11]	136
Çizelge 4.11	Sargı Destekleri Sertliğinin Etkisi[11]	137
Çizelge 4.12	Güç Transformatörlerinin Ölçülmüş Yük Gürültüleri[18].....	138
Çizelge 4.13	Transformatörün Bulunduğu Ortamın Gürültü Basıncı Seviyesi[42]	140
Çizelge 4.14	250 MVA Ototransformatörde Ölçülmüş Gürültü Basıncı Seviyesi [42] ..	140
Çizelge 4.15	250 MVA Ototransformatörde Ölçülen Boşta Akım Harmonikleri [42]...	144
Çizelge 4.16	250 MVA Ototransformatörde Test Geriliminin %110 U_n Olması Durumunda Meydana Gelen Gürültü Seviyeleri[42]	144
Çizelge 4.17	Transformatörün Bulunduğu Ortamın Gürültü Basıncı Seviyesi[43]	146
Çizelge 4.18	ONAN Soğutmada 0.3 m Mesafeden Alınan Gürültü Seviyeleri[43]	146
Çizelge 4.19	ONAF Soğutmada 2 m Mesafeden Alınan Gürültü Seviyeleri[43]	148
Çizelge 4.20	0.3 m Uzaklıkta Alınan Gürültü Seviyeleri[44]	150
Çizelge 4.21	2 m Uzaklıkta Alınan Gürültü Seviyeleri[44].....	152

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE GÜRÜLTÜ SEVİYESİNİN ANALİZİ

Erdi DOĞAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU

Güç transformatörleri, enerji sistemlerinde istenilen gerilim seviyesinin elde edilmesi işlevini yerine getirerek optimum güç transferine olanak sağlarlar. Bu açıdan enerji sistemlerinin vazgeçilmezi durumunda olan transformatörlerin kullanım oranı giderek artmaktadır.

Transformatörler doğası gereği belirli faktörlere bağlı olarak gürültü oluşturabilmektedir. Bu durum özellikle kentsel alanlarda insan sağlığını etkileyecek boyutlara ulaşmaktadır. Bu nedenle transformatörlerdeki gürültü sebeplerinin araştırılması ve önleyici faaliyetlerin ortaya konulması bir sorumluluk halini almıştır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada güç transformatörlerinde gürültüye yol açan etkenler detayları ile açıklanmıştır. Gürültü seviyeleri ile ilgili standartlar ortaya konulmuş ve transformatörlerde gerçekleştirilen gürültü testleri standartlar ışığında irdelenmiştir. Ayrıca 3 farklı güç transformatörüne ait gürültü ölçümleri sunulmuş ve yorumlanmıştır. Tez çalışması sonucunda konu ile ilgili çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güç transformatörleri, gürültü, gürültü testleri, gürültü standartları

ANALYSIS OF THE NOISE LEVEL IN THE POWER TRANSFORMERS

Erdi DOĞAN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Bedri KEKEZOĞLU

Power transformers enable optimum power transfer by making intended voltage level obtained in energy systems. In this respect, transformers' usage rate which is irreplaceable for energy systems is gradually increasing.

Transformers intrinsically can make noise depending upon some factors. This case affects human health especially in urban areas. For this reason, it has become a responsibility to search noise reasons and take preventive activities.

In this study, noise factors in power transformers are explained in details. Noise level standards are determined and noise tests on transformers are scrutinized in consideration of the standards. Besides, noise measurements of three different power transformers are presented and construed. As a result of the thesis study, solution offers about the topic are presented.

Keywords: Power transformers, noise, noise tests, noise standards

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Güç sistemlerindeki kullanımlarının artışı sebebiyle transformatörlerin gürültü düzeyleri önemli araştırma konuları arasında kendine yer edinmiştir. Literatürde güç transformatörlerinde meydana gelen gürültü kaynakları "Çekirdek Gürültüsü", "Yük Gürültüsü" ve "Fan ve Pompa Gürültüsü" olmak üzere 3 farklı ana başlık altında incelenmektedir.

Çekirdek gürültüsünün sebebi güç transformatör çekirdeği üzerindeki titreşim, manyetik kuvvetler ve çekirdek için kullanılan silisli sacın mıknatıssal büzülmesidir. Mıknatıssal büzülme nüveyi oluşturan silisli sac boyutlarının mıknatıslanma ile az da olsa değişmesidir. Boyutlarda meydana gelen bu değişim ile titreşimin etkisiyle gürültü seviyesi artış göstermektedir.

Genel itibariyle "Yük Gürültüleri", yük akımları tarafından üretilen elektromanyetik kuvvetlerin transformatör sargıları ile manyetik ekran üzerinde sızıntı akıları oluşturmaları sebebiyle meydana gelen titreşimlerden dolayı oluşmaktadırlar.

Özellikle elektronik cihazlardaki gelişmeler ve kullanım alanlarının yaygınlaşması neticesinde güç şebekesindeki harmoniklerde yükselmeler meydana gelmiştir ve bu yükseliş dalga formlarını bozmuştur. Benzer şekilde değişken hız sürücüler, 6 darbeli köprü doğrultucu vb. güç elektroniği ekipmanlarının kullanılması da harmonik etkinliğinde önemli artışlar meydana getirmiştir. Son dönemde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması sebebiyle de transformatörlerdeki harmoniklerinde artışlar meydana gelmiştir. Bahsedilen harmonik bozulmalar güç frekansından daha yüksek frekanslarda meydana gelirler ve bu frekanslar transformatör sargılarında

titreşimler meydana getirirler. Harmonikli yükler güç transformatörlerinde gürültü meydana getirmesinin yanında farklı birçok probleme de yol açmaktadır.

Güç transformatörleri çekirdek, sargılar ve diğer metalik yapılar sebebiyle ısınmaktadırlar. Açığa çıkan bu ısının fanlar marifetiyle soğutulması gerekmektedir. Soğutma amaçlı kullanılan bu fanlardan çıkan sesler de transformatörlerde gürültü meydana getiren bir diğer etken olarak ifade edilmektedirler.

1.1 Literatür Özeti

Güç transformatörlerinde gürültü ile ilgili literatürde yapılmış başlıca bilimsel çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

2004'te Garcia, Burgos ve Alonso [1], güç sistemlerinin en kritik bileşeni olan güç transformatörlerinde meydana gelen sargı titreşimlerini incelemişlerdir. Sargılarda meydana gelen deformasyonları kazan titreşim izleme metoduyla tespit etmişlerdir. Testler, yüksüz test transformatöründe yapılmıştır. Transformatör kazanı üzerine, çekirdeğe ve sargılara sensörler yerleştirilerek farklı harmonik bileşenlerin titreşime etkisi incelenmiştir. Ayrıca test transformatörü üzerinde meydana gelen deformasyonlar da gözlemlenmiştir.

Phophongviwat[2], Cardiff Üniversitesinde Ağustos 2013'te yaptığı doktora tezinde transformatör çekirdeğinde meydana gelen titreşim ve gürültüler üzerinde mıknatıssal büzülme ve manyetik kuvvetlerin etkilerini araştırmış ve transformatör çekirdek titreşimi ve gürültüsü arasındaki ilişkiyi çalışmak amacıyla uygun parametreleri belirlemeyi amaçlamıştır. Ayrıca transformatör çekirdek mimarisinin gürültü ve titreşime etkisini araştırmak amacıyla deneysel ölçümlerde bulunmuştur.

Valkoviç[3], 1994'te yapmış olduğu çalışmada nüvede kullanılan silisli sacların transformatörde meydana gelen akustik gürültü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ticari kodu ZDKH, MOH ve M4 olan materyaller kullanılarak çok basamaklı bindirme ve tek basamaklı bindirme metotlarıyla paketlenen çekirdeklere farklı seviyelerde uygulanan manyetik akı ile meydana gelen gürültü seviyelerini karşılaştırarak üstün olan materyali belirlemeyi amaçlamıştır.

Valkovič[4], 1996'da kuru tip transformatör modeli kullanarak çekirdek üzerinde meydana gelen gürültü seviyesini araştırmıştır. Uyguladığı deneylerde farklı örtüşüm uzunluklarının titreşim ve gürültü üzerindeki etkilerini gözlemleyerek hangi durumun daha avantajlı olduğunu tespit etmeyi amaçlamıştır.

Ilo vd.[5], 1996'da yapmış oldukları çalışmada geometrik parametrelerin transformatör çekirdek modellerinin manyetik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Örtüşüm uzunluğunu, kayma uzunluğunu ve basamak sayısını değiştirerek farklı manyetik akı değerleri uygulanmış olup çekirdekte meydana gelen gürültü değişimleri incelenmiştir.

Ishida, Okabe ve Sato[6], 1998 yılında farklı özelliklerdeki materyallerin çok basamaklı bindirme ve tek basamaklı bindirme metotlarıyla paketlenmesi sonucu imal edilmiş üç fazlı transformatörün üzerinde, kullanılan materyallerin ve uygulanan sıkma basınçlarının etkilerini araştırmışlardır. İncelemeler neticesinde çok basamaklı bindirme metodunun ve ince materyalin daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sıkma basıncının 0 ile optimum değeri arasındaki artışların gürültü seviyesini azalttığı da gözlemlenmiştir.

2000 yılında Weiser ve Pfützner[7] mıknatıssal büzülme ve manyetik kuvvetler ile transformatör çekirdeğinde meydana gelen akustik gürültünün ilişkisini incelemişlerdir. Deneysel olarak tek basamaklı bindirme(TBB) ile çok basamaklı bindirme(ÇBB) metotları karşılaştırılmıştır. Kayıpları azaltabilmek amacıyla indüksiyon B'nin üretiminin kritik indüksiyon B_c 'nin altında olması gerektiği belirtilmektedir. TBB metodunda kritik indüksiyon B_c 'nin üstünde kalırken ÇBB tekniğinde B_c 'nin altında veya yakınında seyretmektedir. Bu durumda ÇBB tekniği ile imal edilmiş çekirdeklerde meydana gelen titreşimin ve gürültü seviyesinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Deneysel incelemelerin haricinde meydana gelecek ses gücü matematiksel eşitlikler halinde okuyucuya sunulmuştur. Ayrıca istifleme yüksekliği(laminasyon sayısı), hava boşluğu, örtüşme uzunluğu ve basamak sayısının gürültü üzerindeki etkileri de araştırmaya konu olmuştur.

1996 yılında Weiser vd.[8] farklı tip tek faz çekirdek modelleri üzerinde meydana gelen gürültü seviyelerini araştırmışlardır. Çekirdeklerin birinde basamak sayısının gürültü ile

ilişkisi, diğesinde ise istifleme yüksekliğinin gürültüye etkisi araştırılmıştır. Çekirdekte meydana gelen yer değıştirmeleri tespit etmek amacıyla 27 farklı noktada ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde aynı zamanda ÇBB ve TBB teknikleri de karşılaştırılmıştır. Çekirdek üzerinde x yönündeki(boyunduruk eksen) ve y yönündeki(bacak eksen) yer değıştirmelerin mıknatıssal büzölme kaynaklı olduğı ifade edilerek, z yönündeki yer değıştirmelerin sebeplerinden birinin de kullanılan paketleme tekniğı olduğı ifade edilmektedir. Z yönündeki yer değıştirmenin genliğinde azalma meydana geldiğinde harmoniklerin oldukça düştüğü ve dolayısıyla gürültü seviyesinin azaldığı ifade edilerek hangi tekniğın daha avantajlı olduğı araştırılmıştır.

Mizokami ve Kurosaki[9], 2015'te yapmış oldukları çalışmada güç transformatörlerinin çekirdeğı üzerindeki basma geriliminin gürültü ile ilişkisini incelemiştir. Ölçümler IEC standartlarına göre dizayn edilmiş yankı yapmayan odaya kurulan 8 adet mikrofon ve çekirdek tertibatıyla yapılmıştır. Ses seviye metrenin AC çıkışında, ses basınç dalga formunun harmonik analizi için FFT analizör kullanılmıştır. Mikrofonlardan alınan ölçümler, bilgisayara aktararak ortalaması alınıp kaydedilmiştir. Ölçüm prosedüründe ilk olarak, arka plan gürültüsü ölçülmüştür ve sonra çekirdek mıknatıssızlaştırılmıştır. Daha sonra 50 Hz'te 1.3T, 1.5T ve 1.7T akı yoğunluğunda gürültü ölçümü yapılmıştır. Sonra gürültü ölçümleri basma geriliminin bir sonraki değesinde yapılarak basma geriliminin gürültü üzerindeki etkileri görülmüştür.

Ming vd.[10], 1998 yılında yapmış oldukları çalışmada güç transformatörlerinin gürültü yayılımları ile ilgili teorik ve deneysel olarak incelemeler yapmışlardır. NEMA pozisyonlarına göre tank duvar yüzeyinden 0.3 m uzaklıktan ses yoğunlukları ölçülmüştür. Ölçümler 50 mm aralıklı mikrofonla birlikte B&K2681 ses yoğunluk probu kullanılarak uygulanmıştır. Ses yoğunluk ve ses basınç verileri B&K2144 çift kanal gerçek zamanlı frekans analizörü kullanılarak kaydedilmiştir. Ölçümlerde hangi frekans bileşenlerinde daha fazla ses yoğunluğu olduğundan ve gürültü yayılımının hangi yöntemler marifetiyle tahmin edilebileceğinden bahsedilmektedir.

Rausch vd. [11] 2001 yılında güç transformatörlerinin yük kontrollü gürültüsünü sınırlı ve sonlu elemanlar metotlarıyla araştırmış ve tahmin etmişlerdir. Deneysel ve teorik olarak yürüttükleri çalışmalarında sargı ve kazan yüzeyindeki titreşimleri sonlu

elemanlar metoduyla(FEM) ve akustik serbest alan yayılımını sınırlı elemanlar metoduyla(BEM) hesaplamışlardır. Daha sonra bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarıyla ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak tahmin yöntemlerinin doğruluğunu araştırmışlardır. Ayrıca gürültü yayılımı üzerinde kademe değiştiricinin ve sargı destekleri sertliğinin etkilerini incelemişlerdir.

Snell[12], 2008 yılında deneysel yöntemler ile transformatör çekirdeğinde meydana gelen gürültüyü incelemiştir. IEC 60651 gürültü standardına uygun olarak yapılan ölçümlerde CR:831A gürültü metre kullanmıştır. Deneyleri 500 kVA'lık transformatöre uygun bir sistem kurularak gerçekleştirmiştir. Kullanılan izolasyon maddelerinin, uygulanan sıkma basınçlarının ve nüvede kullanılan materyallerin transformatörde meydana gelen gürültü üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Krell vd.[13], 2000 yılında transformatör çekirdeklerinde meydana gelen gürültü ile çok yönlü mıknatıssal büzülme arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Deneyde, 1x1 m boyutunda, tanecikleri yönlendirilmiş silisli sacdan(M5-30) imal edilen materyal kullanılarak oluşturulmuş 56 adet laminasyonlu nüveye sahip, boyundurukları ve bacalarının genişliği 900 mm olan model çekirdek kullanılmıştır. Çekirdek üzerine yerleştirilen sensörler üzerinden algılanan veriler dönel tek levha test cihazı(RSST) marifetiyle kabaca simüle edilerek çekirdek üzerinde meydana gelen mıknatıssal büzülmeler tahmin edilmiştir.

Snell[14], 2008 yılında yapmış olduğu çalışmada tanecik yönlendirmeli silisli saclar ile oluşturulmuş basamak bindirmeli çekirdeklerin gürültü üretimlerini incelemiştir. Model çekirdek üzerinde farklı basamak sayıları(3,5 ve 7), farklı basamak örtüşmeleri(2,4 ve 6 mm) ve farklı özelliklere sahip silisli saclar kullanılarak ilgili parametrelerin gürültü üzerine etkisi araştırılmıştır. Ölçümler çekirdekten 300mm uzağa konuşlandırılmış mikrofonlar ile Cirrus CR:831A ses seviye ölçer marifetiyle yapılmıştır.

Ertl ve Voss[15], 2014 yılında yük harmoniklerinin transformatör üzerinde meydana gelen gürültü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada harmoniklerin etkisi teorik yaklaşımlar ile sonlu eleman metodu ile oluşturulan simülasyon yaklaşımları aracılığıyla incelenmiştir. Ayrıca üç adet gerçek zamanlı sistem üzerindeki problemlerin ölçümü ve analizi yapılarak teorik ve simülasyon yaklaşımları doğrulanmıştır.

Peter vd.[16], 2008 yılında güç transformatörlerinde meydana gelen gürültü sebeplerini incelemek amacıyla üç boyutlu sonlu eleman metodunu(3D-FEM) kullanan bilgisayar tabanlı programlar marifetiyle simülasyonlar yapmışlardır. Yaptıkları simülasyonların doğruluğunu tespit etmek amacıyla da ölçümler yaparak karşılaştırma yapmışlardır.

Ertl ve Probst[17], 2006 yılında yağlı tip üç fazlı güç transformatörünün yük gürültü üretimini üç boyutlu nümerik analiz metodunu kullanarak araştırmışlardır. Transformatörlerin titreşimli sargı mimarilerine uygun olarak tasarlanan simülasyon metoduyla cihazların mekanik davranışları çalışılmıştır. Birleşik 3D-FEM kullanılarak manyeto mekanik sonlu eleman hesaplamaları ile manyetik ve mekanik sistemlerin aynı anda çözümü hedeflenmiştir.

Girgis, Bernesjö ve Anger[18], yapmış oldukları çalışmada yük gürültülerinin karakteristiklerini, yük gürültülerinin toplam gürültü üzerindeki etkilerini, yük gürültülerini etkileyen parametreleri ve gürültüyü azaltabilecek yöntemleri araştırmışlardır. Çalışmada teorik yaklaşımlar ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve doğrulanması yöntemi de kullanılmıştır. Ses gücü seviyesini dB(A) cinsinden ifade edebilen Replinger eşitliği ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırılarak sunulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Artan enerji ihtiyacı güç transformatörlerinin şebeke üzerinde daha fazla yer bulmasına sebep olmaktadır. Farklı faktörlerin etkisi ile transformatörler üzerinde zaman içerisinde gürültü problemleri meydana gelebilmektedir. Özellikle kentsel bölgelerde söz konusu problemler insan sağlığını etkileyecek mertebelere yükselebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, güç transformatörleri üzerinde oluşan gürültü sebeplerinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla transformatörler üzerinde gürültü oluşturan etkenler açıklanmıştır. Ayrıca transformatörlerde meydana gelen gürültü seviyesi ölçümleri ve limitleri standartlar dahilinde açıklanmıştır.

Yapılan tezin ana amacı transformatör gürültülerine yönelik önlemlerin ortaya konulmasıdır. Tez kapsamında bu amaç doğrultusunda gerçek transformatör gürültü ölçümleri incelenmiş olup, sonuçlar ışığında çözüm önerileri sunulmuştur.

1.3 Tezin Özgün Değeri

Bu alışma kapsamında g transformatörlerine ait gürültünün nedenleri irdelenmiştir. Ayrıca 3 farklı g transformatörü üzerinde gerçekleştirilen gürültü ölçümleri sunulmuş ve sonuçlar dahilinde transformatörlerde gürültü ölçümlerine ilişkin çözüm nerileri getirilmiştir. Böylece özellikle kentsel bölgelerde bu problemin azaltılması ve insan sağlığının korunması hedeflenmiştir.

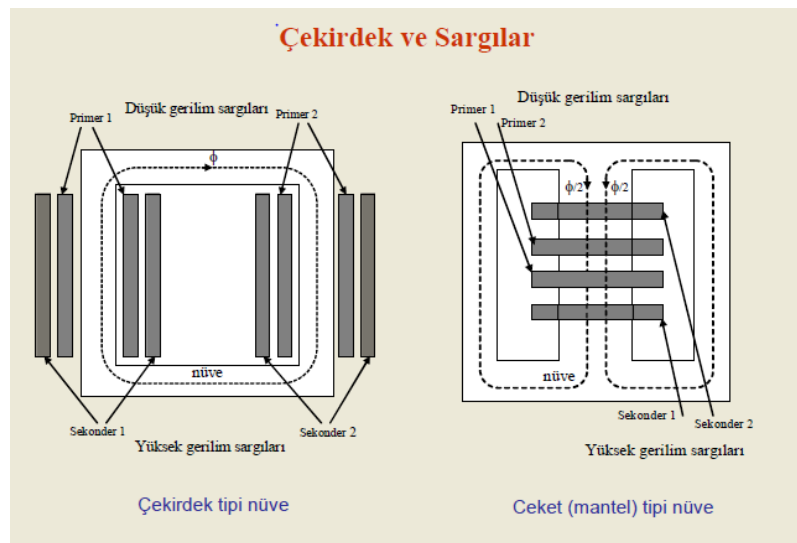


TRANSFORMATÖRLER

2.1 Transformatörlerin Genel Tanımı

Transformatörler sabit frekans ve güçte, elektromanyetik endüksiyon yolu ile gerilim veya akım değerlerini değiştirebilen hareketsiz elektrik makineleridir. Transformatörler hareketli parçaları olmaması sebebiyle en verimli(%99-%99.5) elektrik makineleridir.[19]

Transformatörler kayıpları azaltmak amacıyla ince ve silisli saclardan oluşturulmuş ortak bir ferromanyetik nüve üzerine sarılan sargılardan meydana gelmektedir. Güç kaynaklarının bağlandığı sargıya primer sargı, yüklerin bağlandığı sargıya ise sekonder sargı denir. [20]



Şekil 2.1 Transformatör çekirdek ve sargıları[20]

2.2 Transformatörlerin Sınıflandırılması

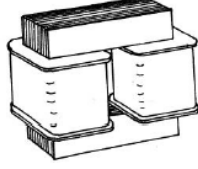
2.2.1 Kullanım Amacına Göre

Transformatörler çeşitli alanlarda farklı amaçlara hizmet etmek düşüncesiyle kullanılmaktadırlar. Kullanım amaçlarına göre transformatörler aşağıda belirtilmiştir;

- **İletim ve Dağıtım Transformatörleri;** Büyük güçlü transformatörlerdir. Enerjinin uzak noktalara iletilmesi ve dağıtılması amacıyla gerilimi yüksek mertebelere taşımak veya düşük mertebeleri indirmek amaçlarıyla kullanılmaktadırlar.
- **Ototransformatörler;** Ayarlı gerilim sağlamak amacıyla kullanılan transformatörlerdir. Genellikle düşük güçlü uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Ancak günümüzde 380 kV şebekelerin 154 kV'a indirilmesi amacıyla büyük güçlü ototransformatörler kullanılmaktadır.
- **İzolasyon Transformatörleri;** İzolasyon transformatörlerinde primer ile sekonder gerilimleri aynıdır. Bu tip trafolarla primer ve sekonder sargıları birbirinden izole edilmiş olup kullanım amacı şebekede meydana gelen her türlü paraziti önlemek ve kısa devre gibi arızalarda kullanıcının zarar görmemesini temin etmektir. İzolasyon transformatörlerinin sekonderinde oluşacak kısa devre veya aşırı akım anlarında çıkış geriliminde düşüş meydana gelerek koruma sağlanmaktadır.
- **Ölçü Transformatörleri;** Yüksek gerilim ve akımların izlenebilmesi, koruma elemanları ile sağlanması gereken muhaberelemlerin temin edilmesi amacıyla ölçü transformatörleri kullanılmaktadır.
- **Güç Kaynağı Transformatörleri;** Birçok farklı uygulaması olan bu tip transformatörler elektronik devrelerde kullanılmaktadır[20].
- **Ses Frekansı Transformatörleri;** Ses frekansı yükseltici devresi giriş veya çıkışında veya yükselticiler arasında empedans eşlemesi sağlamak amacıyla kullanılan transformatörlerdir[20].

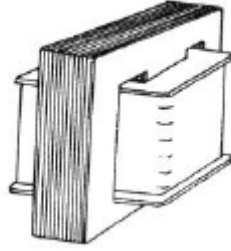
2.2.2 Nüve Tipine Göre

Nüve, çekirdek tip, mantel tip ve dağıtılmış tip olmak üzere üç çeşittir. Çekirdek tipi nüveler büyük güçlerde ve yüksek gerilimlerde kullanılmaktadır. Çünkü bu tip nüvelerde yalıtımı tesis etmek için gereken alan büyüktür.



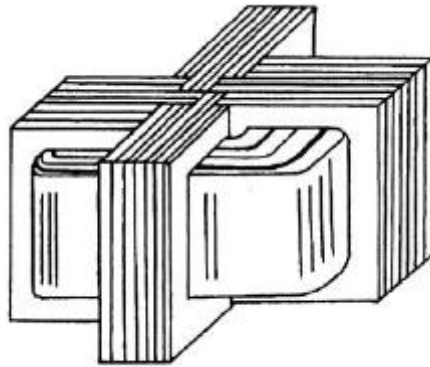
Şekil 2.2 Çekirdek tip nüve[21]

Mantel tip nüvelerde çekirdek tipi nüvelere göre daha az demir kayıpları meydana gelmektedir. Ancak bu tip nüveler alçak gerilimli ve düşük güçlü sistemlerde kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Mantel tip nüve[21]

Dağıtılmış tip nüvelerin iç gerilim düşümleri çok düşüktür ve çok küçük güçlü özel tip transformatörlerde kullanılmaktadır.[21]



Şekil 2.4 Dağıtılmış tip nüve[21]

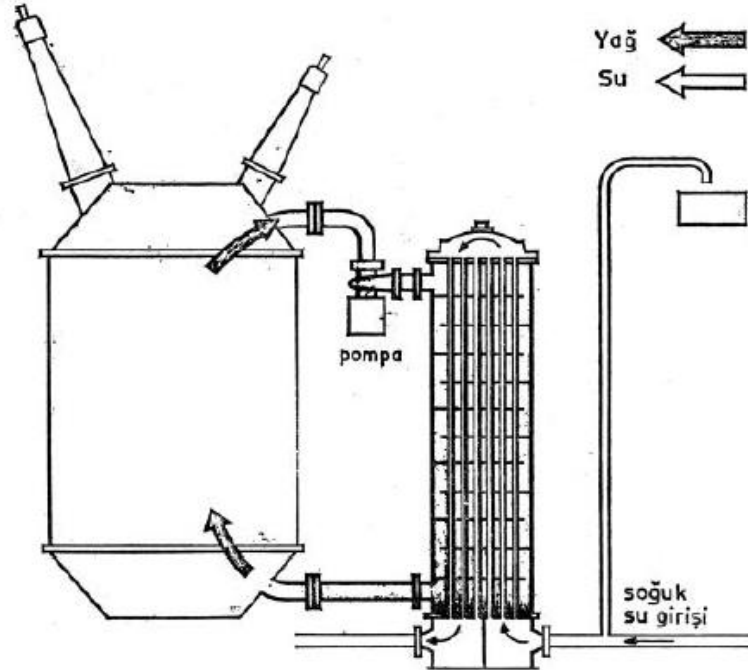
2.2.3 Faz Sayısına Göre

Faz sayısına göre düşünüldüğünde transformatörler tek, üç veya çok fazlı olmak üzere üç çeşittir.

2.2.4 Soğutma Şekline Göre

Transformatörlerde yağ, hava ve su olmak üzere üç farklı soğutma şekli uygulanmaktadır.

- **Hava ile Soğutma;** Bu tip soğutma sistemi genellikle kuru tip transformatörlerde kullanılmaktadır. Kuru tip transformatörlerde nüve ile sargılar doğrudan hava ile temas halindedir. Bu sebeple doğal hava sirkülasyonu ile soğutma sağlanabilmektedir.
- **Yağ ile Soğutma;** Yağlı tip transformatörlerde kullanılmaktadır. Transformatör kazanının içerisinde bulunan yağ hem izolasyon sağlamak amacıyla hem de soğutma sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.
- **Su ile Soğutma;** Yağlı tip transformatörlerde yağın soğutulması amacıyla su ile soğutma sistemi kullanılabilmektedir.



Şekil 2.5 Su ile soğutmalı transformatör[21]

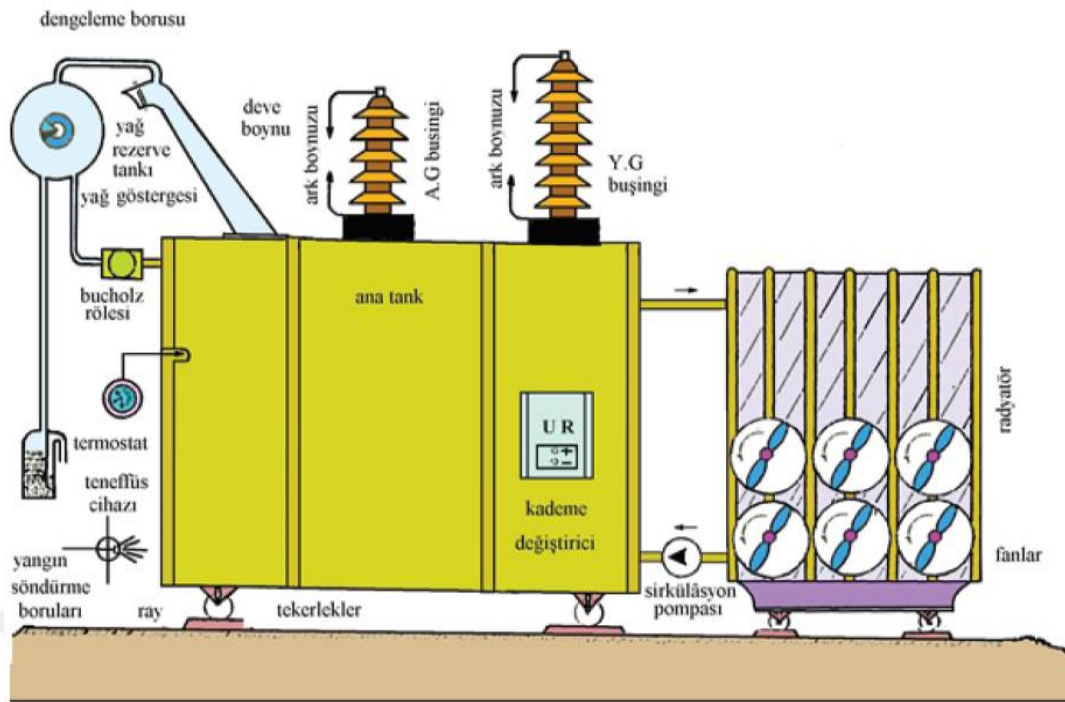
2.3 Yağlı Tip Transformatörlerin Yapısı ve Özellikleri;

Yağlı tip güç transformatöründe genel itibariyle Şekil 2.7’de belirtildiği gibi Transformatör Kazanı(Ana Tank), soğutma işlemine yardımcı olan Dalga Duvar, soğutma ve izolasyon amacıyla kullanılan yağın genişmesi durumunda ihtiyaç olacak alanı karşılamak üzere tasarlanmış olan Yağ Genleşme Deposu(Yağ Rezerve Tankı), Yağ Seviye Göstergeleri, A.G. ve Y.G. Bobinleri, Nüve, Nüve Sıkıştırma Klempleri, gerilim değerinin değiştirilebildiği Kademe Değiştiricisi, Tenefüs Tertibatı, Emniyet Borusu (Genleşme Borusu), Yağ ve Sargı Isı Göstergeleri, Gaz Tazyik Rölesi, Gaz Kontrol Göstergesi, transformatör bağlantılarının yapıldığı A.G. ve Y.G. Buşingleri, Radyatörler, Fanlar, Devir Daim Pompaları, Yangın Söndürme Tertibatı, Ark Boynuzları ve Tekerlekler bulunmaktadır.

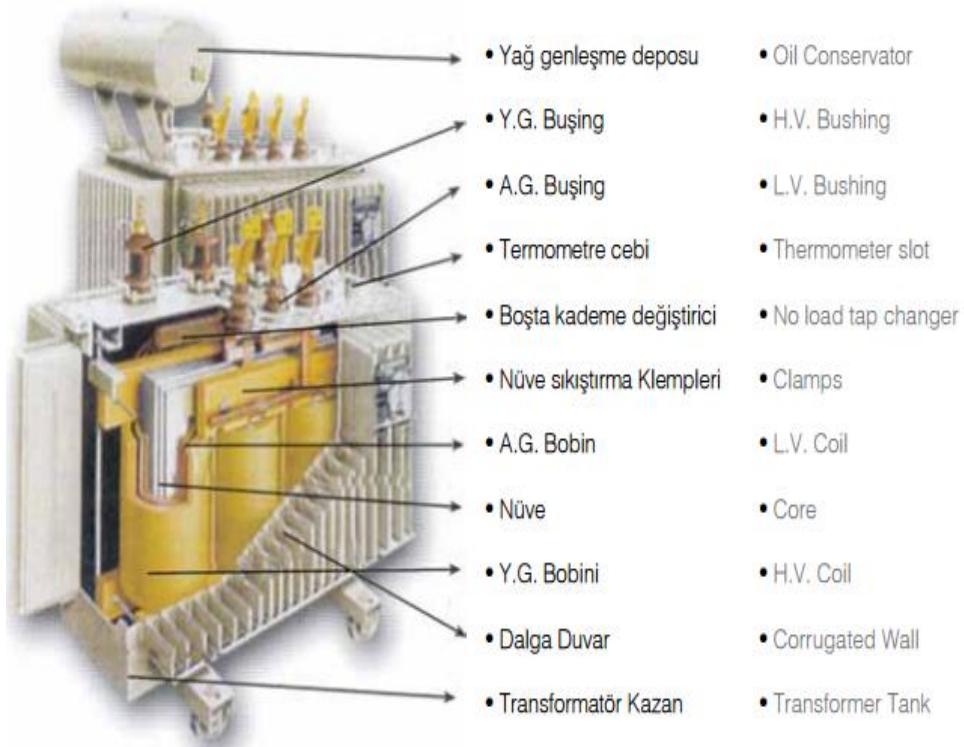
Ek olarak yağ seviyesi ve gaz basıncını ölçerek olası arıza durumlarında tespit ettiği hata sinyali ile trafonun enerjisini kesecek sinyali gönderebilen Şekil 2.8’deki bulchoz rölesi koruma elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.[22]



Şekil 2.6 Güç transformatörü[23]



a) Yandan görünüm [24]



b)İçeriden görünüm[25]

Şekil 2.7 Güç transformatörünün yapısı[24,25]



Şekil 2.8 Bulchoz rölesi[25]

2.3.1 Sargılar

Transformatör sargıları elektrolitik bakır veya alüminyumdan yapılmaktadır. Bu iletkenler yuvarlak veya lama şeklinde olabilmektedir. Sargılar yapılan tasarıma göre silindirik veya dilimli sargı olarak imal edilebilmektedir. İzolasyon kolaylığı sağlamak, trafo yüksekliğini düşürmek ve dağılma reaktansını azaltmak için çift silindirik sargı kullanılmaktadır. Sargılar arası yalıtımı tesis etmek amacıyla yalıtım kağıtları ve yağ kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 Sargılar ve bobinler [23,25]

2.3.2 Nüve

Transformatörün nüvesi soğuk haddelenmiş, kristalleri yönlendirilmiş silisli sacların farklı metotlar (çok basamaklı bindirme metodu, tek basamaklı bindirme metodu vb.) ile paketlenmesi ile oluşturulmaktadır. İlgili levhalar paketlenirken bir veya iki yüzleri yalıtılarak fuko kayıplarının azaltılması hedeflenir. Ayrıca levhaların gürültüye sebebiyet vermemesi amacıyla özel sistemler kullanılarak sıkıştırılır. Manyetik nüvenin bacak

kısımları sargıların sarıldığı bölgedir. Nüvede bacakları üstten ve alttan birleştirilen bölümlere ise boyunduruk denilmektedir.



Şekil 2.10 Transformatör nüvesi [23]

2.3.3 Kazan(Ana Tank)

Sargılar ve nüve, yalıtımı korumak ve soğutma işlemini sağlamak amacıyla kazan içerisine yerleştirilir. Kazanın soğutma yüzeyleri dalga duvarlardan meydana gelmektedir. Ancak çok büyük güçlerde dalga duvarlar yerine radyatör kullanımı tercih edilmektedir. Kazanın üst kapağı sargı ve nüvenin çıkarılabilmesi için cıvatalı tercih edilebilir ancak kaynak yolu ile de birleştirilme işlemi yapılabilir. Kapak üzerinde transformatörün taşınabilmesi amacıyla kaldırma halkaları bulunmaktadır. Ana tankta radyatörleri, buşingleri ve yağ rezerve tankını bağlamak için flanş ve vanalar bulunmaktadır. Ayrıca yağ testi yapabilmek için muhtelif noktalardan yağ alma vanaları kullanılmaktadır.[26]



Şekil 2.11 Transformatör kazanı[27]

2.3.4 Yağ Genleşme Deposu(Yağ Rezerve Tankı)

Transformatörün yüklenmesine, gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkına ve mevsimlerdeki sıcaklık farkına göre transformatörün içerisindeki yağ ısınır veya soğur. Buna binaen transformatörün en soğuk halindeki yağ hacmi ile fazla ısınma durumundaki yağ hacminden daha büyük bir yağ genleşme deposu transformatörün üzerine kurulur. Yapı itibariyle silindirik olan bu depo ile transformatör arasında bir irtibat borusu kullanılır. Aynı zamanda deponun üzerinde teneffüs tertibatı ile irtibatı sağlayan bir boru kullanılır. Bu sayede ana tank ve yağ genleşme deposunda basınç yükselmesi ve azalmasının mahsurları önlenmiş olur. Yağ genleşme deposunun bir veya iki tarafında yağın seviyesini gösterir cam tüplü veya şamandıralı manyetik tipli yağ seviye göstergeleri bulunur.[26]

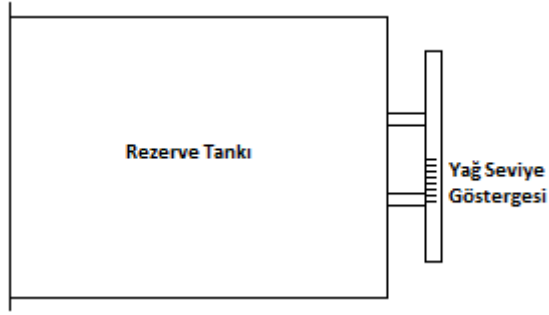


Şekil 2.12 Transformatör yağ genleşme deposu[23]

2.3.5 Yağ Seviye Göstergeleri

Transformatör içerisindeki yağın seviyesi önemli parametrelerdendir. Yağsız kalan bir transformatör büyük arızalara sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple yağ seviyesinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Yağ seviyesi genellikle gözle izleme tip ve şamandıralı tip olmak üzere iki şekilde takip edilmektedir.

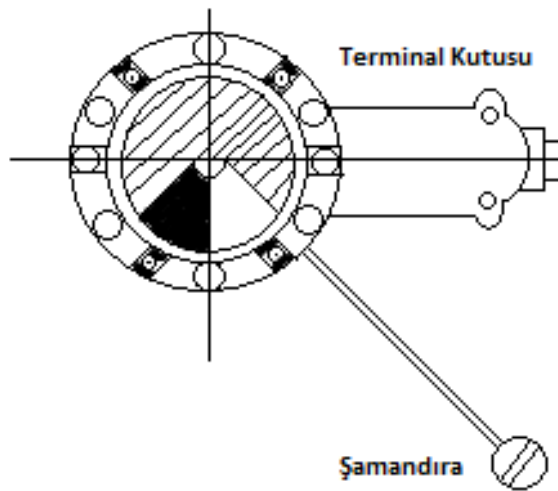
Gözle izleme tipi, birleşik kaplar prensibine göre çalışan ve yağ genleşme deposunun yan tarafına monte edilen mika veya cam tüplü sistemdir[28]. Bu sistemde normal yağ seviyesi tüp üzerinde işaretlenmiştir[26]. Bu izleme tipinde yağ seviyesinde meydana gelen değişimlere binaen herhangi bir sinyal olarak uzaktan takip mümkün değildir. Dolayısıyla yağ seviyesinin izlenmesinde sadece trafo üzerinden gözle izlemeye imkan vermesi sebebiyle güvenilir bir metot değildir.



Şekil 2.13 Göze izleme tipi yağ seviyesi göstergesi [26]

Şamandıralı tip yağ seviye göstergelerinin ana parçaları kadrans kasası içerisinde bir disk gösterge ve bu göstergeye manyetik kuvvet hatları ile bağlı bir şamandıradan ibarettir. Gösterge diskinin yarısı parlak beyaz ve diğer yarısı ise kırmızı renktedir. Şamandıra seviye değişimlerini takip ederek daimi mıknatısın yer değişimine dolayısıyla gösterge diskine bağlı mıknatısın daha ileri hareketine sebebiyet vermektedir. Bu iki renkli disk yağ içerisinde olmayıp yağa karşı muhafazalı bir bölüm ile ayrılmıştır. Yağ seviyesinin minimum olduğu durumda kadrana yalnız gösterge diskinin üzerindeki kırmızı kısım gözükür. Yağ seviyesi arttıkça gösterge diskinin beyaz kısmı gözükmeye başlanmaktadır[26].

Şamandıralı tip yağ seviyesi göstergelerinde gözle kontrol edebilmenin yanında bir ihbar devresi de çalıştırılarak seviye hakkında sinyal alınabilmektedir[28]. Dolayısıyla bu sistem daha güvenilir bir sistem olarak kullanılabilmektedir.

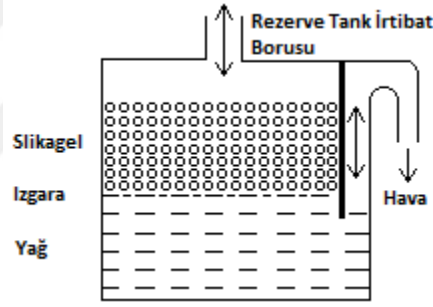


Şekil 2.14 Şamandıralı tip yağ seviye göstergesi[26]

2.3.6 Teneffüs Tertibatı

Transformatör yağında ısınma ve soğumaya bağlı olarak meydana gelen hacim değişikliklerinde oluşan havanın dışarı atılması, vakumun oluşması durumunda da dışarıdan hava alınması gerekmektedir. Hasıl olan bu ihtiyacı karşılayan sistem teneffüs tertibatıdır. Bu tertibatta nem emme özellikleri bulunması sebebiyle hava giriş çıkışında transformatör yağının nem alması önlenmektedir. Teneffüs tertibatında havanın rutubetini almak amacıyla silikagel, toz ve pislikleri tutması için de yağ kullanılmaktadır.

Silisit asit hidratin kobalt nitratla emprenye edilmesinden üretilen silikagel, ağırlığının %40'ı oranında nem alma özelliğine sahiptir. Kuru iken yani rutubet alabilecek durumda iken mavi renkte olan silikagel rutubete doymuş vaziyette iken pembe renk alır. Silikagel miktarının 4/5'i pembeleştiği zaman aktivitesini kaybeder. Ancak 100-150°C de kurutularak tekrar kullanılabilir. Kurutma işlemi birkaç defa uygulanabilir.[26]

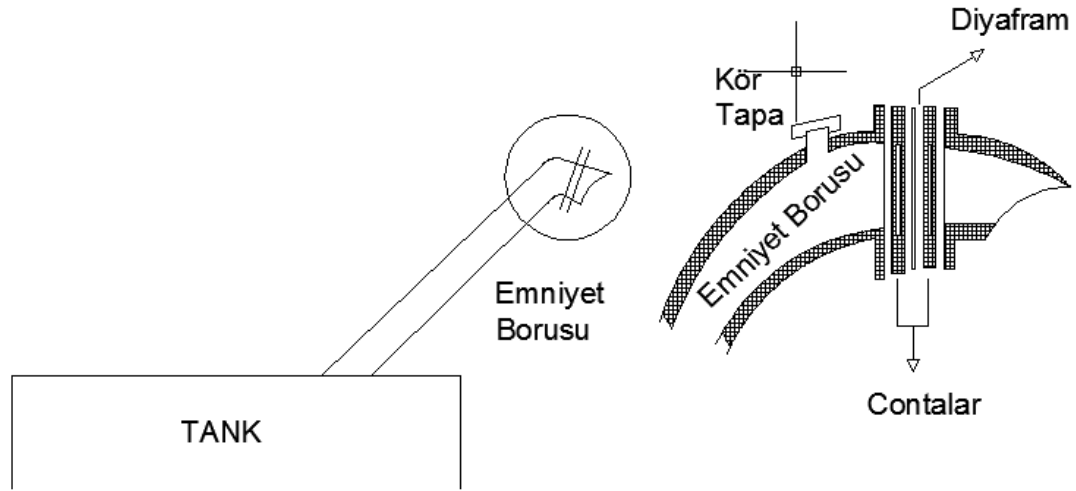


Şekil 2.15 Teneffüs tertibatı[26]

2.3.7 Emniyet Borusu

Emniyet borusu sıcaklık değişimlerine veya arızalara bağlı olarak meydana gelen yüksek basıncın transformatörü patlatmasını önlemek amacıyla tasarlanmıştır. Yüksek basınç oluşması durumunda emniyet borusunun ucundaki ince zar veya cam patlayarak içerdeki basınç ve yağın transformatör dışına aktarılmasını sağlamaktadır. Transformatör üzerine monte edilmiş ve yağ genleşme deposuyla irtibatı sağlanmış bu borunun uç kısmı kıvrıktır. Transformatör içerisinde bulunan yağın havayla temas etmesinin önüne geçilmesi amacıyla emniyet borusunun uç kısmı ince bakır, pirinç, alüminyum veya 2-3 mm kalınlığında camdan imal edilmiş bir diyafram ile kapatılmaktadır. Emniyet borusunun üst kısmında bir adet kör tapa bulunmaktadır. Yağ ikmali yapılırken kör tapa çıkartılarak sıkışan hava tahliye edilir ve işlem

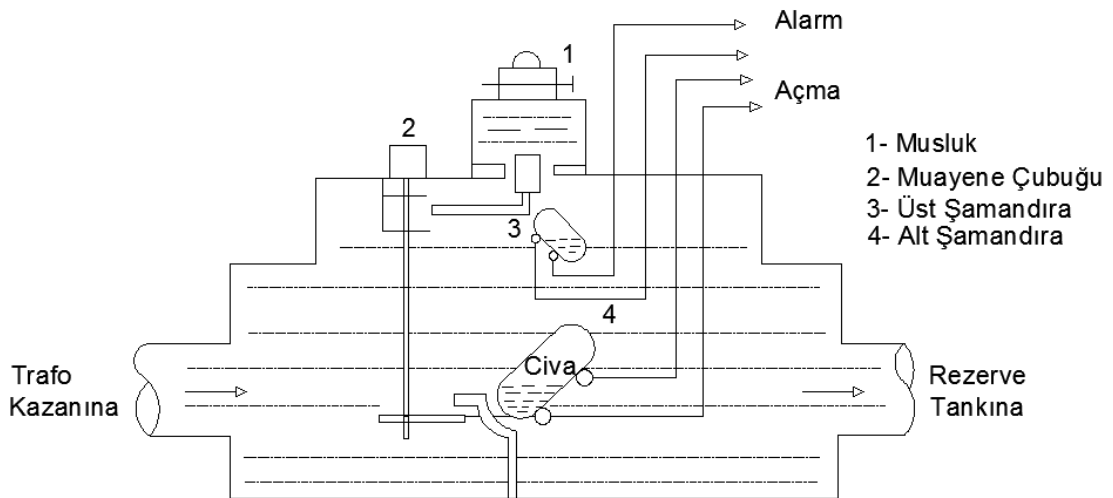
tamamlandıktan sonra tapa tekrar yerine sıkıştırılır. Kör tapa yerine silikagel kabı da kullanılabilir[26].



Şekil 2.16 Transformör emniyet borusu[26]

2.3.8 Bucholz Rölesi

Trafonun zati korumaları arasında bulunan bucholz rölesi en önemli koruma ve sinyal tertibatlarındandır. Transformör kazanı ile yağ genleşme deposu arasında irtibatlandırılan bucholz rölesi bir sargıdaki spir kısa devresi, sargılar arası kısa devre, sargı ile kazan arasındaki kısa devre veya manyetik devreden kaynaklı arızaların meydana gelmesi durumunda hem bilgi sinyali hem de trafo kesicilerine açma bilgisi gönderebilmektedir.

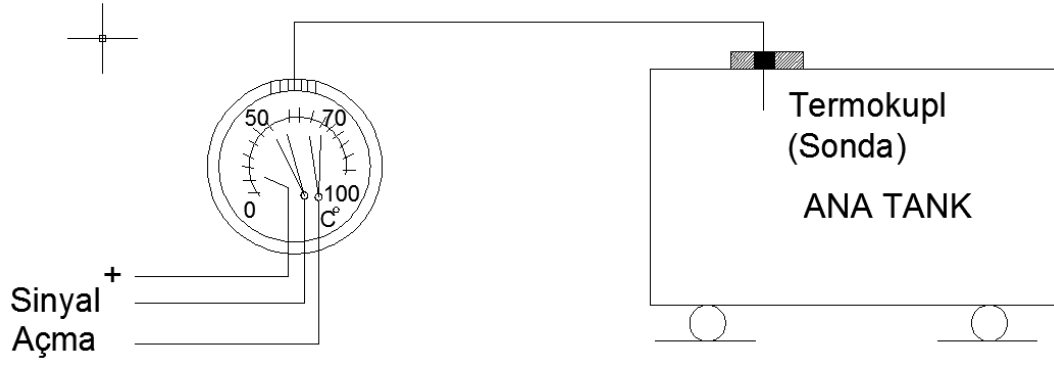


Şekil 2.17 Bucholz rölesi[26]

Bucholz rölesinin içerisinde Şekil 2.17’de görüldüğü gibi civa kontaklı iki adet şamandıra bulunmaktadır. Üst şamandıranın kontak uçları sinyal devresine, alt şamandıranın kontak uçları ise açma devresine bağlanmaktadır. Transformatör içerisinde meydana gelen arıza küçük boyutta gerçekleşmişse hafif gaz oluşumu meydana gelir ve bu gaz baloncukları yağ genleşme tankına doğru ilerleme eğilimi gösterir. Yavaş olan bu gaz akışı alttaki şamandıranın paletini hareket ettiremez ve rölenin üst tarafında birikmeye başlayarak üst şamandıra paletini hareket ettirir. Dolayısıyla Bucholz rölesinden arıza sinyali gelmektedir. Bu durumda transformatör servis dışı yapılarak meydana çıkan gazın analizi yapılır. Gaz analizi yapılırken gazın rengine ve yanıcı olup olmadığına bakılmaktadır. Gaz renginin beyaz olması durumunda kâğıt izolasyonunda bir bozulmayı, siyah ve gri olması durumunda ise yağ bozulmasını ifade etmektedir. Rölenin üst musluğundan alınan gazın yanıcı olmaması durumunda röleyi yağ içerisindeki havanın çalıştırdığı anlaşılır ve hava alınarak transformatör servise sunulur. Büyük arızalarda meydana gelen gaz miktarının çok fazla olması sebebiyle transformatör kazanında yağ genleşme deposuna kuvvetli bir yağ ve gaz akışı gerçekleşir. Bu nedenle hem üst hem de alt şamandıra çalışarak kontaklarını kapatırlar. Alt şamandıranın çalışması ile transformatöre ait giriş ve çıkış kesicileri açarak transformatörü servis dışı yapmaktadır. Bu aşamadan sonra transformatör ilgili testler yapılmadan önce tekrar servise alınmamaktadır.

2.3.9 Yağ ve Sargı Isı Göstergeleri

Isı göstergeleri transformatör içerisinde bulunan sargılarda ve yağda meydana gelen sıcaklık değerlerini ölçebilen ve belirlenen değerlere göre alarm ve kumanda sinyali gönderebilen tertibatlardır. Ayrıca transformatörlerin aşırı yüklenmesi durumunda fanları çalıştırabilme özelliğine sahiptirler. Çeşitli ısı göstergeleri bulunmaktadır. Transformatörlerin sargıları üzerine konmuş akım trafolarından kumanda alan yazıcı termometreler az da olsa kullanılmaktadır. Kurulan sistemlerde en çok kullanılan göstergeli tiplerdir ve bu tiplere sondalı termostatlar veya termometreler denir.



Şekil 2.18 Isı göstergesi[26]

Şekil 2.3.9.1 de görüldüğü üzere transformatörün üst kapağındaki cebe yerleştirilen termokupl eleman ve bu elemanı termostata bağlayan iletken den meydana gelmiştir. Termostatin kadranı üzerinde gösterge ibresi ve iki adet ayarlanabilir elektrikli kontak ibresi bulunmaktadır. İki adet elektrikli kontak ibresi ayarlanan sınırlar dahilinde alarm, açma veya fan devresine sinyal gönderebilme özelliğine sahiptirler.

2.3.10 Gaz Tazyik Rölesi

Bazı güç transformatörlerinde sargılar ve nüve, yağ içerisinde kalacak seviyede yağ ile dolu olup yağın üst yüzeyi ile tank kapağı arasında kalan boşluk azot gazı ile doldurulmuştur. Transformatör üzerine yerleştirilmiş olan basınç rölesi ile transformatör içerisinde meydana gelecek arızalardan korunmuş olunur. Gaz tazyik rölesi sıcaklık değişimlerinden oluşan küçük basınç değişimlerinden etkilenmeyecek şekilde tasarlanarak sadece yüksek basınç değişimlerinde koruma işlemini gerçekleştirir[26].

2.3.11 Gaz Kontrol Göstergesi

Gazlı transformatörlerde gazın mevcut olup olmadığını göstermek amacıyla kullanılmaktadır. Gösterge üzerinde (+), (-) ve (0) bölümleri bulunmaktadır. Gösterge ibresi (+) gösteriyor ise transformatör içerisindeki gaz basıncı atmosfer basıncından yüksek demektir ve bu durum trafo hararetinin yüksek olduğunu göstermektedir. İbre (0) gösteriyor ise iç basınç atmosfer basıncına eşit demektir ve bu durumun sürekli olması oldukça sakıncalıdır. Çünkü trafo basıncının sürekli olarak atmosfer basıncına eşit olması, transformatörde kaçak olduğu ve azot gazının kaçarak trafonun nem almış

olduğunu göstermektedir. İbrenin (-) göstermesi durumunda ise iç basıncın atmosfer basıncından düşük olduğu anlaşılmaktadır ve bu durum transformatör ısısının düşük olduğunu göstermektedir[26].

2.3.12 Buşingler

Transformatör sargı uçlarının baralara bağlanabilmesi amacıyla transformatör kazanından dışarıya çıkarılması gerekir. Kazanın topraklı olması sebebiyle sargı uçlarının kazan ile temas etmemesi gerekir. Transformatör kazanı içerisinde bulunan sargı uçlarının dışarıya çıkartılmasında gerekli olan bu teçhizata buşing denir. Bu tertibatlar porselenden imal edilmiş olup ebatları transformatörün akım ve gerilimi ile orantılı olarak değişmektedir[28]. Buşingler izolasyon kısmı ile içerisindeki iletken arasında bulunan boşluğun doldurulduğu maddelerin cinsine göre sınıflandırılmaktadır[26].

- **Kuru Tip Buşingler;** Buşingin iç yüzeyi ile iletken arasındaki boşluk herhangi bir maddeyle doldurulmamıştır. Bu tip buşingler küçük gerilimlerde kullanılmaktadır[26].
- **Kompound Maddesi veya Pyranol Sıvısı İle Doldurulmuş Tip;** Bu tip buşinglerde aradaki boşluk plastik izolasyon komponenti ile veya pyranol sıvısı ile doldurularak contalarla sızdırmazlık temin edilmiştir[26].
- **Yağ Doldurulmuş Tip;** Buşingin iç yüzeyi ile iletken arasındaki boşluk izolasyon yağı ile doldurulmuştur. Belli güce kadar olan trafolarda transformatör kazanı içerisindeki yağ buşinglerinde içini kaplar. Ancak büyük güçlü transformatörlerde buşinglerin içine konan yağ ince borular aracılığıyla yağ genleşme deposuna bağlanmıştır. Yağ genleşme deposunun bir kısmı bölünerek sadece buşinglere ayrılmıştır[26].
- **Preslenmiş Sentetik Reçineli Kağıt;** Gerilim büyüdükçe izolasyon maddesi olarak preslenmiş sentetik reçineli kağıt kullanılmaktadır. Ancak yüksek gerilimlerde meydana gelen alan düzensizlikleri ile buşinglerin farklı noktaları farklı gerilimler ile zorlanmaktadır. Bunun önüne geçebilmek amacıyla izolasyon maddesi içerisine silindirik ince metal levhalar yerleştirilmektedir. Böylece izolasyon tabakası etkili bir tarzda aynı eksenli silindirik kapasitelere

bölünmüş olur. Bu tür buşinglerde gerek radyal ve gerekse aksiyal yönde alan oldukça düzenlidir[28].

Buşinglerin üzerinde buşingleri aşırı gerilim yükselmelerine karşı korumak amacıyla ark boynuzları kullanılmaktadır. Buşingin üstünde ve altında olmak üzere 2 adet eğik galvanizli demir bulunmaktadır. Altta bulunan ark boynuzu ayarlanabilir özellikte olmaktadır[26].



Şekil 2.19 Buşingler ve ark boynuzları[25]

2.3.13 Fanlar

Fanlar, radyatörler üzeri dolaşım yapan yağın hava ile soğutulması amacıyla radyatörlerin alt veya yan taraflarına monte edilen aksesuarlardır[28]. Fanlar hep beraber olduğu gibi gruplar halinde veya tek tek servise sokulabilmektedirler.

Devir Daim Pompaları; Radyatörler, transformatör kazanına üstten ve alttan bağlanacak şekilde ince sacdan dilimli olarak imal edilmiştirler. Radyatörlerin dilimlerine az miktarda yağ girişi olmasına rağmen hava ile temas yüzeyi oldukça fazladır. Transformatör kazanının içerisindeki ısınan yağ kazanın üst tarafında toplanır ve radyatörlerin üst bağlantısından girerek soğumaya başlar. Soğuyan yağ aşağıya doğru iner ve radyatörlerin alt bağlantısında transformatör kazanına geçer. Bu şekilde meydana gelen soğutma işlemine tabii soğutma denmektedir. Ancak doğal sirkülasyondan daha hızlı bir soğutma temin edilmek istendiği taktirde devir daim pompalarının kullanılması gerekmektedir[26]. Devir daim pompaları, transformatör içerisindeki yağın cebri olarak soğutulması amacıyla radyatörler üzerinden yağın dolaşımını sağlarlar[28].

Yangın Söndürme Tertibatı; Yüksek gerilim tesislerinde kullanılan büyük güçlü transformatörlerde meydana gelebilecek yangınlara karşı hızlı müdahale edecek şekilde imal edilmiş olan yangın söndürme tertibatı kullanılmaktadır.

2.4 Kuru Tip Transformatörler

Yağlı transformatörlerin dışında kuru tip güç transformatörleri de kullanılmaktadırlar. Kuru tip transformatörlerin yağlı transformatörlere göre çeşitli avantajları bulunmaktadır;

- Kuru tip transformatörlerde vakum altında döküm yapılmış epoksi reçine, nemin girmesini engeller ve koruma sağlamış olur. Bu yüzden de nemli ve kirli alanlarda kolaylıkla çalışabilmektedir.
- Sargılara kaplanan dökme epoksi reçinenin yanmaz ve kendiliğinden sönebilme özelliğinden dolayı yangın tehlikesi ve kirliliğe sebep olabilecek sızıntı riski yoktur. Bu nedenle daha emniyetli ve daha çevre dostudur.
- Kuru tip transformatörlerinin boyutlarının yağlı tip transformatörlere göre daha küçük olması da önemli bir avantajdır[25].

Yukarıda açıklandığı gibi kuru tip transformatörlerin avantajları bulunmaktadır. Ancak izolasyon problemleri sebebiyle yüksek güçlü sistemlerde yağlı tip transformatörlerin kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 2.20’de kuru tip güç transformatörünün yapısı basitçe gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Kuru tip trafo yapısı[29]

TRANSFORMATÖRLERDE GÜRÜLTÜ SEBEPLERİ

Transformatörlerde meydana gelen gürültülerin insan sağlığını ve cihaz güvenilirliğini etkilememesi açısından sebeplerinin doğru tespit edilmesi ve buna bağlı çözümlerin üretilmesi gerekmektedir. Temel olarak transformatörlerde meydana gelen/gelebilecek gürültü ile ilgili IEC 60076-10 ve IEEE Std. C57.12.90 standartları kullanılmaktadır. Ülkemizde ise konu ile ilgili TS EN 60076-10 standardı geçerli durumdadır. Transformatörlerde meydana gelen gürültülerin sınırlandırılması için üst limit getiren herhangi bir standart bulunmamaktadır. Ancak insanların rahatsız olduğu gürültü seviyeleri hakkında TS 9315 ISO 1996-1/T1, TS ISO 1996-2/T1 ve ISO 1996-1:2003 standartları ile gürültünün insan sağlığına etkileri tanımlanmaktadır. Çizelge 3.1’de gürültü seviyelerinin sınıflandırılması verilmiştir. Çizelge 3.2’de ise gürültü seviyesinde meydana gelen artışların toplum tarafından algılanma seviyeleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Gürültü seviyelerinin sınıflandırılması [30]

1. Derecedeki gürültüler (30-65 dB(A))	Konforsuzluk, Rahatsızlık, Sıkılma Duygusu, Kızgınlık, Konsantrasyon, Uyku Bozukluğu
2. Derecedeki Gürültüler (65-90 dB(A))	Fizyolojik Gürültü, Kalp Atışının Değişimi, Solunumun Hızlanması, Beyindeki Basıncın Azalması
3. Derecedeki Gürültüler (90-120 dB(A))	Fizyolojik Gürültü, Baş Ağrısı
4. Derecedeki Gürültüler (120-140 dB(A))	İç Kulakta Bozukluk
5. Derecedeki Gürültüler (> 140 dB(A))	Kulak Zarının Patlaması

Çizelge 3.2 Gürültü seviyesindeki değişimin toplum tarafından algılanması [30]

Seviyedeki Artış (dB)	Değişimin Toplum Tarafından Algılanması	Gürültünün Etkisi
0	Fark edilmez	Yok
3	Değişim Ancak Fark Edilebilir	Çok az
3-5	Değişim Kolayca Fark edilebilir	Az
5-7	Aralıklı Şikâyetler Görülebilir	Orta Seviyede
7	Rahatsız Olunur	Orta Seviyede
7-10	Aralıklı Şikayetler	Yüksek
10-15	Geniş çaplı Şikayetler	Çok Yüksek
15-20	Grup Reaksiyonları Görülebilir	Çok Yüksek

İnsan algısı gürültü konusunda oransaldan çok logaritmiktir. Ses yoğunluğunda meydana gelen 10 katlık bir artış insanlar tarafından 2 kat artış olarak algılanabilmektedir. Algılanan gürültü seviyesi frekansa da bağlı olarak değişmektedir[31]. İnsan kulağı 20 Hz ile 20.000 Hz arasındaki sesleri duyabilmektedir[30]. 1000 Hz frekansta algılanan gürültü seviyesi en yüksek seviyedir. En çok kullanılan ağırlıklandırma ise dB(A) olarak ifade edilmektedir[31]. dB(A) ağırlığı insan kulağının en duyarlı olduğu orta ve yüksek frekansların özellikle vurgulandığı bir ses değerlendirme birimidir. İnsanların duyma eşiği 0 dB(A), ağrı eşiği ise 120-130 dB(A) olarak ifade edilmektedir[30].

Transformatörlerde meydana gelen gürültünün sebepleri “çekirdek gürültüsü”, “yük gürültüsü” ve “fan gürültüsü” olmak üzere 3 başlık altında incelenmektedir.

3.1 Çekirdek Gürültüsü

Transformatörde meydana gelen titreşimler sargılar ve çekirdekte meydana gelen farklı kuvvetler tarafından üretilmektedir. Transformatör çekirdek gürültülerinin kaynağı mıknatıssal büzülmeler ve manyetik indüksiyonlar iken sargı gürültülerinin kaynağı yüklenme ile meydana gelen sızıntı akılarıdır.

Weiser ve Pfützner[7] transformatör çekirdeğinde meydana gelen akustik gürültü ile mıknatıssal büzülme ve manyetik kuvvetlerin ilişkisini araştırmışlardır. Çok basamaklı bindirme ve tek basamaklı bindirme mimarilerinin etkilerine çalışmışlardır.

Çalışmaya göre transformatör gürültülerinin oluşmasında iki ana etken söz konusudur,

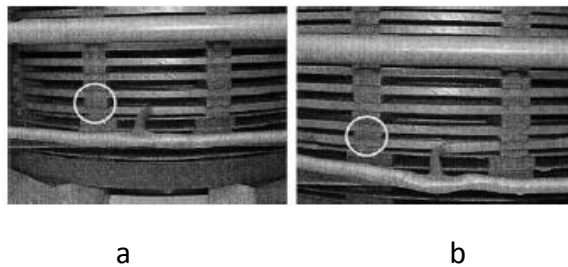
1-) Weiser'e göre en önemli gürültü sebebi mıknatıslanmadır. Bu durum yüksüz haldeki gürültü veya gerilim kaynaklı gürültü olarak düşünülmektedir. Çünkü bu gürültüler çekirdekteki mıknatıslanmaya bağlıdır ve sargılar üzerinden geçen akım ile ilişkisi yoktur[7].

2-) Transformatör sargılarındaki ikinci gürültü kaynağı sargılardır. Bu gürültü çeşidi sargı gürültüsü, yük altındaki gürültü veya akım gürültüsü olarak tanımlanır. Çünkü bu gürültüye sargılardaki yük akımlarının oluşturduğu manyetik alan tarafından meydana getirilen elektromanyetik kuvvetler sebep olur[7].

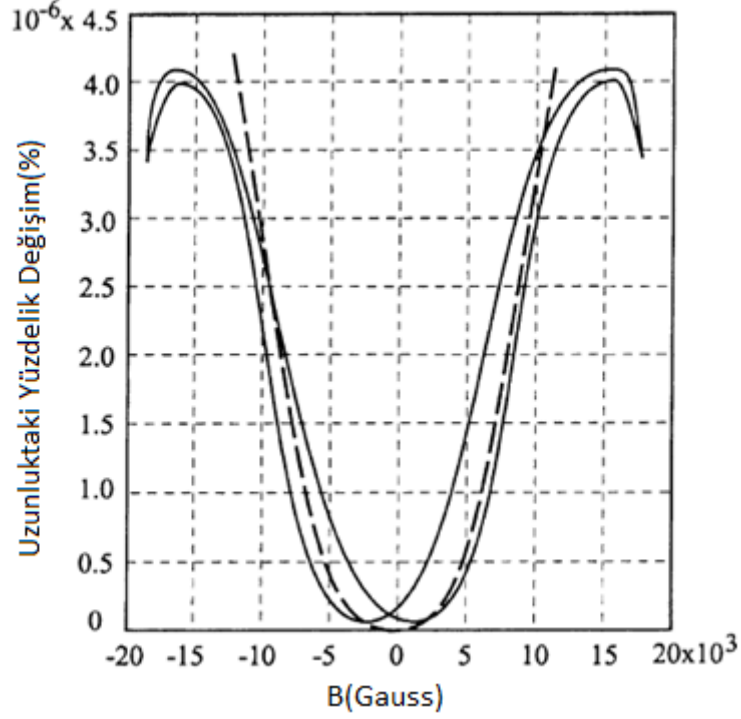
3.1.1 Transformatör Titreşimleri

Sargı Titreşimleri: Sargı titreşimine, sargılardaki sızıntı akısı tarafından oluşturulan akımların etkileşimiyle meydana gelen elektrodinamik kuvvetler sebep olurlar. Bu kuvvetler akımın karesi ile orantılı olup eksenel ve dairesel yönlerde bileşenlere sahiptirler. Eksenel kuvvetler sargıları dik kesme eğilimindedir. [1].

Çekirdek Titreşimleri: Çekirdek titreşimi, mıknatıssal büzülme ve manyetik kuvvetler tarafından meydana getirilir. Manyetik materyaller manyetik alana maruz kaldıklarında her milyonda birkaç parça boyutsal değişimlere maruz kalırlar. Silisli saclarda meydana gelen mıknatıssal büzülmenin mekanik etkisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 a-)Transformatör çekirdeğindeki deformasyondan öncesi b-) Sonrası [1]
Şekil 3.2'de demir üzerindeki manyetik indüksiyon ve yüzde cinsinden uzunluk değişimleri arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Demir Üzerindeki Manyetik İndüksiyon ile Mıknatıssal Büzülme Arasındaki İlişki [1]

Gerilim ile manyetik indüksiyon arasındaki ilişki Eşitlik-3.1’de verilmiştir. Mıknatıssal büzülme kuvvetleri gerilimin karesiyle oransaldır [1].

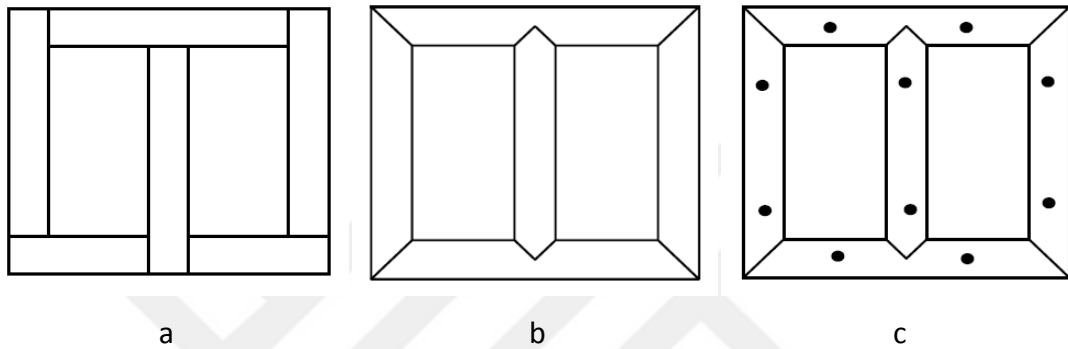
$$U = 4.44fNBs \quad (3.1)$$

U transformatörün giriş gerilimini, f işletme frekansını ve B manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Mıknatıssal büzülmenin ana harmonikleri 50 Hz’in katlarıdır. Yüksek frekansta meydana gelen harmonikler mıknatıssal büzülmenin lineer olmayan karakteristiği gibidir. Eğer çekirdek homojen demir kütlesi olur ise mıknatıssal büzülme sadece çekirdek düzleminde titreşime sebep olacaktır. Çekirdek manyetik sac lar ile tertip edilmiş bacak ve boyundurukların eklemlerinin örtüşmesiyle oluşturulmaktadır. Bu durumda düzensiz akı yoğunluğu dağılımı nedeniyle bacak ve boyunduruklar arasındaki eklemlerde bulunan küçük boşluklarda tabaka içi akı oluşmaktadır. Oluşan bu sebeple mıknatıssal büzülme kuvvetleri çekirdek düzlemine dikey olarak etki etmektedir[1].

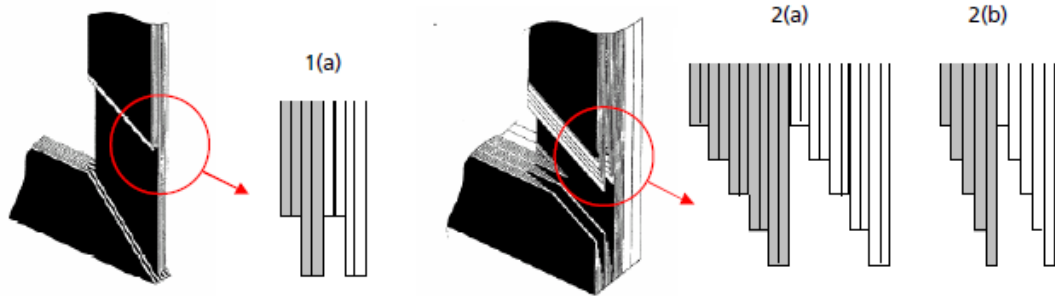
3.1.2 Nüve İmal Metotları

Güç transformatör çekirdeklerinde kullanılan çelik sac türleri ve çeşitli imal metotlarıyla meydana gelen gürültü arasındaki ilişkinin incelenmesi ile oluşan gürültünün azaltılması hususunda önlem alınabilmesi amaçlanmıştır.

Transformatör çekirdekleri oluşturulurken çekirdeğin nüvesi olarak isimlendirilen silisli sacların farklı metotlar marifetiyle birleştirildiği bilinmektedir. Bunlardan bazıları uç uca bindirme, tek basamaklı bindirme ve çok basamaklı bindirme metotlarıdır.

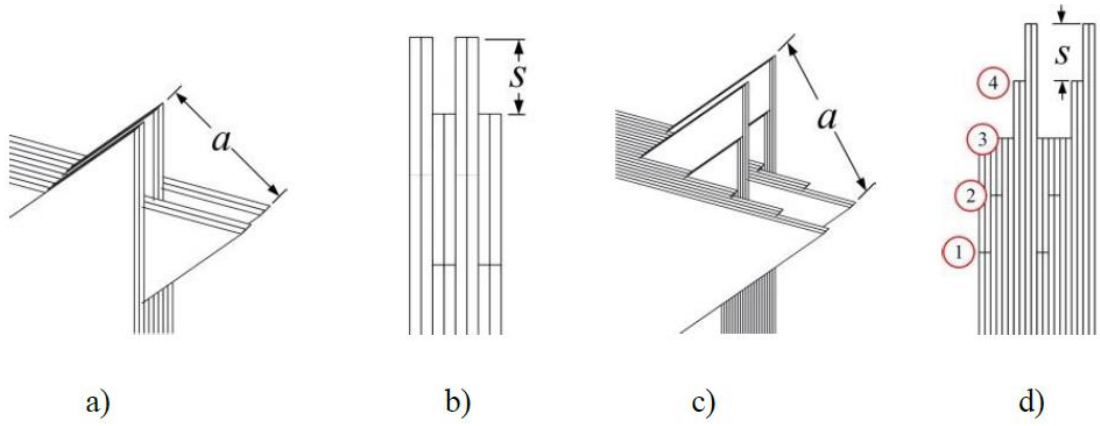


Şekil 3.3 a-) Uç uca bindirme b-) Tek basamaklı bindirme c-) Çok basamaklı bindirme[32]

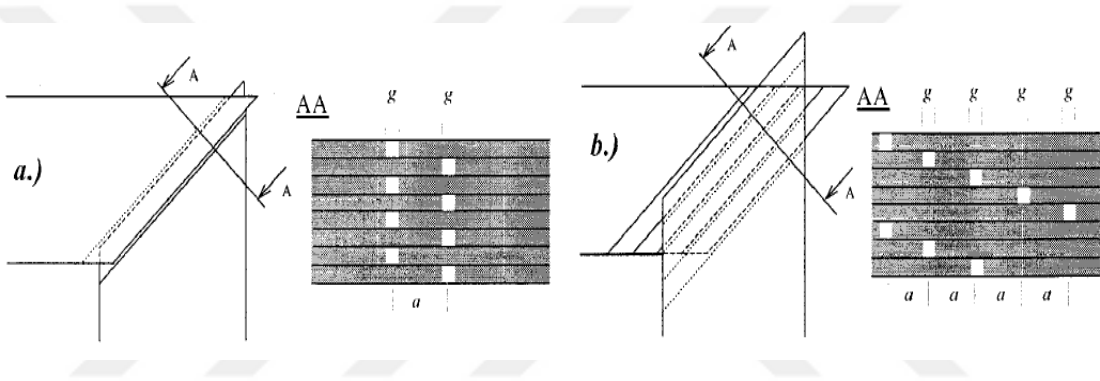


Şekil 3.4 1-Tek basamaklı bindirme (a) Her tabakada 2 adet basamak, her basamakta 2 adet plaka 2-Çok basamaklı bindirme (a) Her tabakada 5 adet basamak, her basamakta 2 adet plaka (b) Her tabakada 5 adet basamak, her basamakta 1 adet plaka [32]

Şekil 3.5'te Tek Basamaklı Bindirme ve Çok Basamaklı Bindirme teknikleriyle oluşturulan çekirdeklerde örtüşme uzunluğu a , örtüşme kayma uzunluğu s ve basamak sayısı N gösterilmektedir[2].



Şekil 3.5 a) Tek basamaklı bindirme, b) Her basamakta iki plakası olan tek basamaklı bindirmenin yandan görünüşü, c) Çok basamaklı bindirme, d) Her basamakta iki plakası olan çok basamaklı bindirmenin yandan görünüşü [2].

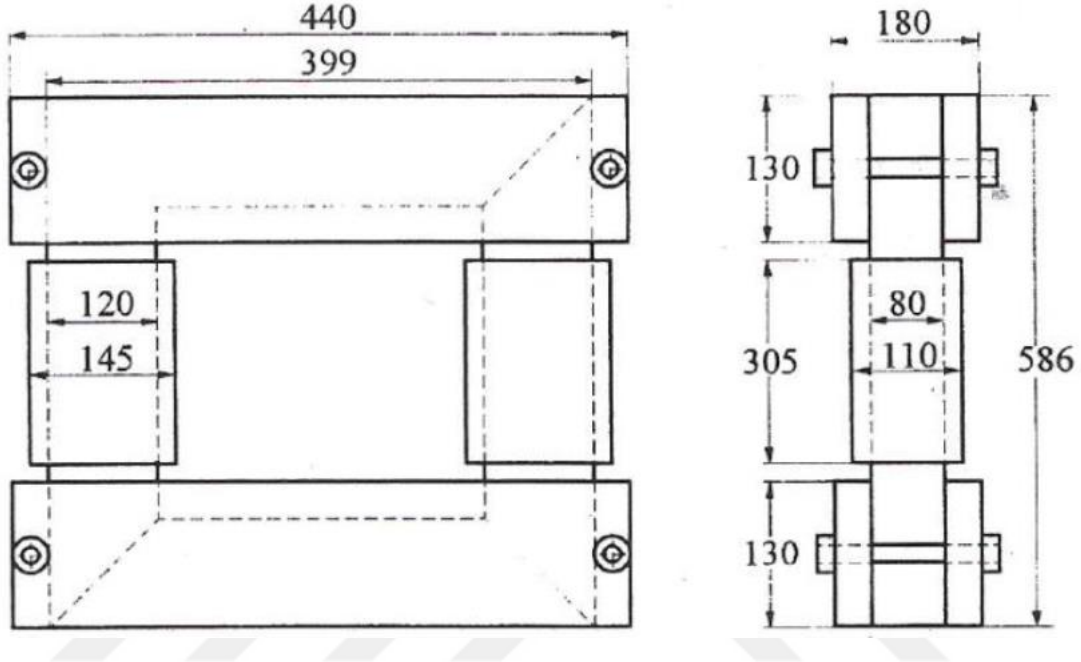


Şekil 3.6 a) Tek basamaklı bindirme b) Çok basamaklı bindirme(g: boşluk uzunluğu)[7]

3.1.3 Bazı Silisli Sac Tiplerinin Karşılaştırılması

Çekirdek mimarisinde kullanılan silisli sac özelliklerinin çekirdekte meydana gelen gürültü üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda modellenmiş ve boyutları Şekil 3.7’de gösterilen bir güç transformatörü çekirdeğinin ağırlığı 105 kg’dır. Çekirdek 3 adet 0.27 mm kalınlığındaki levha türlerinden inşa edilmiştir. Bu levha türleri, geleneksel tane yönlendirmeli (ticari kodu M4), yüksek geçirgenlikli tane yönlendirmeli (ticari kodu MOH) ve etki alanı artırılmış (ticari kodu ZDKH) olarak tanımlanmaktadır. Örtüşüm kayma uzunluğu 10mm olan ve her basamağında 2 levha bulunan tek basamaklı bindirme tekniğiyle yapılmış çekirdek ile 5 basamağı bulunan, örtüşme kayma uzunluğu 2 mm olan ve her basamağında tek levha bulunan çok basamaklı bindirme tekniğiyle yapılmış çekirdek karşılaştırılmıştır. [2].

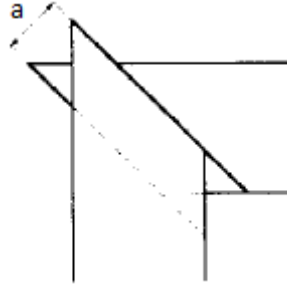
Manyetik akı yoğunluğunun (B) 1.4T, 1.6T ve 1.8T olduğu durumlar için yapılan ölçümler neticesinde TBB ve ÇBB konfigürasyonlarının her ikisinde de MOH ve ZDKH çelik sac türleriyle oluşturulmuş çekirdek tiplerinde meydana gelen gürültü yaklaşık olarak aynı seviyededir. M4 türü ile yapılmış çekirdekte ise ilgili manyetik akı yoğunluklarında en yüksek gürültü seviyeleri ölçülmüştür[2].



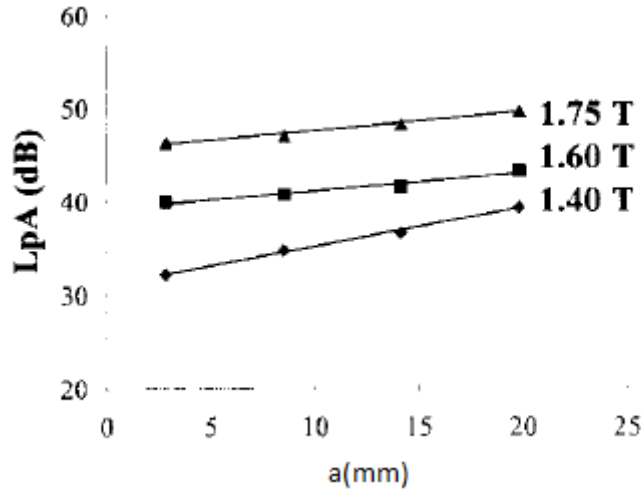
Şekil 3.7 Tek faz çekirdek modellerinin boyutları ve mimarisi[4].

3.1.4 Örtüşme Uzunluğu, Örtüşme Kayma Uzunluğu ve Basamak Sayılarının Gürültü Seviyesine Etkisi

Valkovic[4], örtüşme uzunluğunun transformatör çekirdeği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu araştırmada 0.27 mm kalınlığında M4 tip çelik kullanılan kuru tip transformatör kullanmıştır. Örtüşme uzunluğu 2 ile 14 mm arasında değiştirilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun 1.4, 1.6 ve 1.75 T olduğu durumlar için örtüşme uzunluğunun 2.8 mm olması durumu en düşük gürültüyü, 19.8 mm olması durumu da en yüksek gürültüyü ifade etmektedir. 1.4T indüksiyon altında 2.8 mm ile 19.8 mm örtüşme uzunluğu uygulanması durumunda 7 dB, 1.6 ve 1.75T indüksiyonda ise 3-3.5 dB gürültü artışı meydana gelmektedir. Sonuçlara göre örtüşme uzunluğunun fazla olması plakanın titreşimine sebep olmaktadır ve dolayısıyla gürültü meydana gelmektedir.

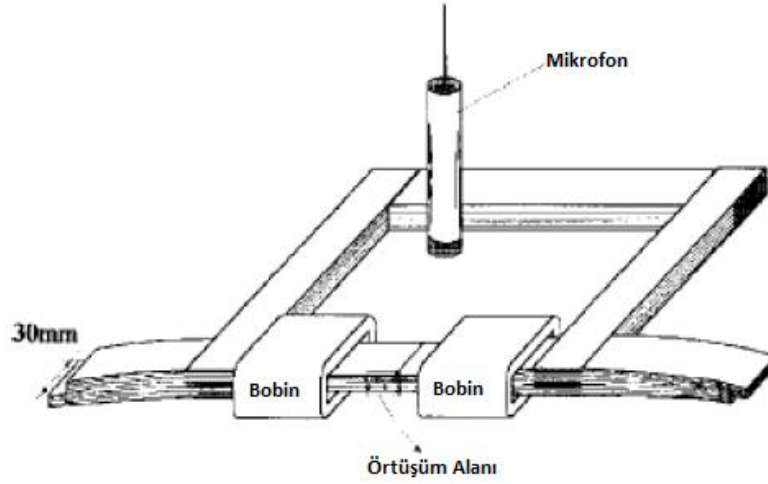


Şekil 3.8 Örtüşme uzunluğu(a)[4]

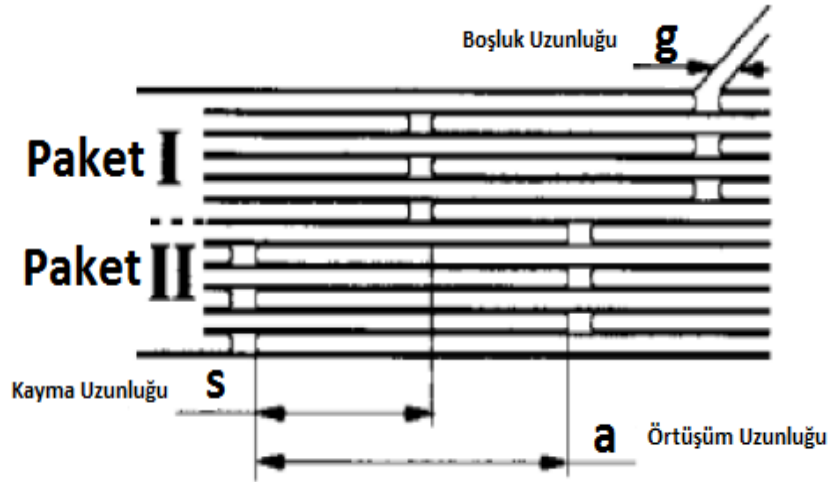


Şekil 3.9 Örtüşme uzunluğunun farklı indüksiyon seviyeleri altında gürültü seviyesi üzerindeki etkisi[4]

İlo ve diğerleri örtüşme kayma uzunluğu ve basamak sayısının ilişkisini araştırmıştır. Buna göre döner manyetizasyon etkisine engel olmak amacıyla Şekil 3.10'da gösterilen doğrusallaştırılmış çekirdek modeli kullanılmıştır. Çekirdeğin inşasında yüksek geçirgenlikli tane konumlu meteryal kullanılmıştır (ZDKH) ve istifleme yüksekliği 20 levha olarak alınmıştır. Kurulumda çekirdek 2 pakete bölünmüştür. Örtüşüm bölgesindeki bacakta 0.23 mm kalınlığında levha kullanılırken diğer bacaklarda 0.27 mm kalınlığında levha kullanılmıştır. İlk olarak örtüşme uzunluğunun 10 mm ve boşluk uzunluğunun 1 mm olduğu durum için basamak sayısının gürültü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Basamak sayısının 2 olması durumunda gürültü seviyesinde azalma meydana geldiği görülmüştür [5].



Şekil 3.10 Çekirdek penceresinin 30 cm üzerine sabitlenmiş mikrofona birlikte doğrusalştırılmış örtüşüm modeli[5]



Şekil 3.11 Örtüşüm alanının detayları[5]

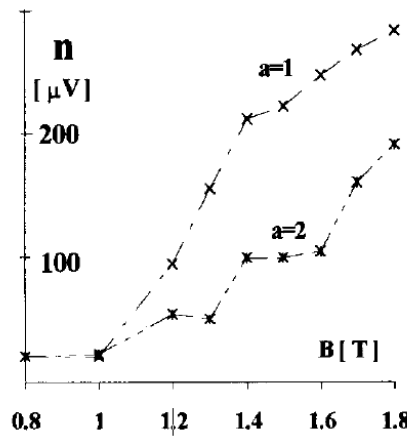
Levhaların üzerindeki ve altındaki boşluklarda doyuma ulaşan bir manyetik akı yoğunluğu üretmek, kritik indüksiyon olarak adlandırılan B_c 'ye tekabül etmektedir. Kritik indüksiyon B_c aşağıda verilen denklemden yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [5].

$$B_c \approx \frac{N}{N+1} \times B_{sat} \quad (3.2)$$

Burada, B_{sat} meteryalin doygunluk indüksiyonudur.

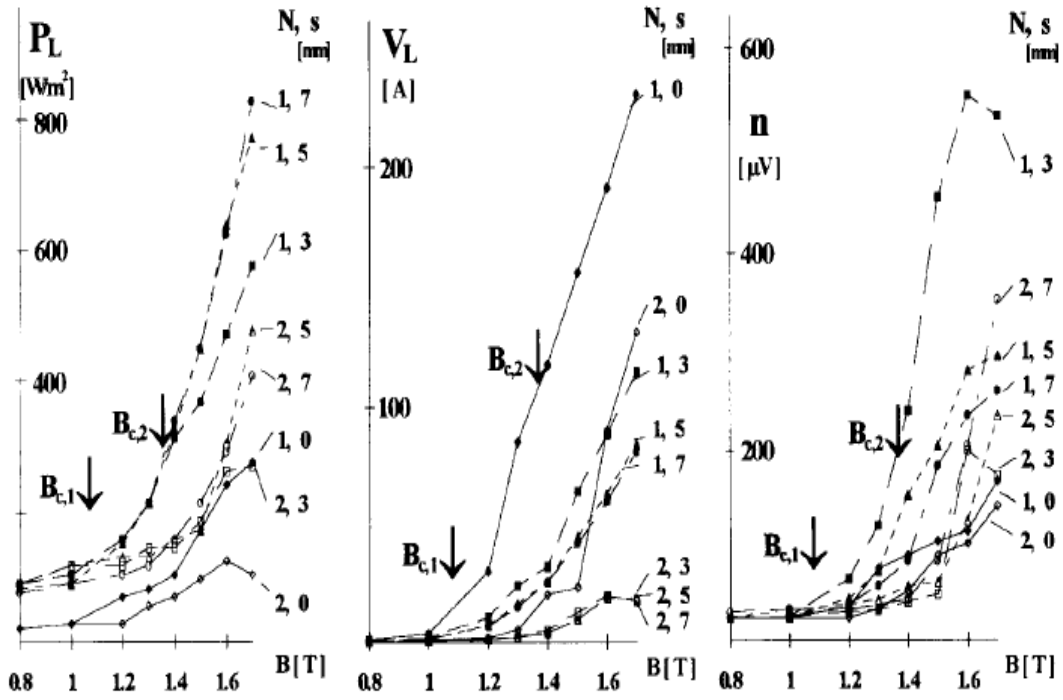
B' 'nin B_c den küçük olduğu durum için TBB çekirdeğinde örtüşme kayma uzunluğundaki değişikliklerde önemli bir fark görülmemiştir. Ancak B' 'nin B_c den büyük olduğu durumlarda gürültü seviyesi hızla artmaktadır. Herhangi bir B için ÇBB çekirdeğinde üretilen gürültü TBB çekirdeğinde üretilenden daha düşüktür [2].

Kritik indüksiyon B_c 'nin N:1 için 1T, N:2 için 1.3T olduğu ve $s>0$ ile $B>B_c$ olması durumunda tabaka içi mekanik kuvvetler ile birlikte düzlemsel eddy akım kayıplarının artış göstermesi sebebiyle gürültü seviyesinde artış meydana gelmektedir. Dolayısıyla kritik indüksiyon çekirdek parametresi olarak kabul edilebilmektedir. Diğer bir parametre olan örtüşme uzunluğunun gürültü seviyesi üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasında ise TBB konfigürasyonu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hava boşluk uzunluğu 1mm olarak sabitlenmiş ve iki örtüşme uzunluğu arasındaki gürültü sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.12'de görüldüğü üzere örtüşme uzunluklarının birincisi ikincisinin yarı uzunluğunda olacak şekilde tasarlanmıştır. B' 'nin $B_c \approx 1T$ den küçük olduğu durum için iki örtüşme uzunluğu arasında önemli bir fark görülmemiştir. $B > B_c$ için gürültüde meydana gelen artış, tabaka içi akı yoğunluğu B_z 'nin karesi ile orantılı olan tabaka içi kuvvetlere atfedilebilmektedir. Bu duruma binaen örtüşme uzunluğundaki artışla tabaka içi akı yoğunluğunun açıkça düştüğü ve gürültünün azaldığı görülmektedir. Bu sonuç Valkovic [4]'te bulduğu sonuçlarla uyuşmamaktadır. Bu durumun sebebi deneylerin yapıldığı çekirdek mimarisinin doğrusallaştırılmış olmasıdır. Çünkü doğrusallaştırılmış çekirdekte, tabakadaki çıkıntıların titreşimleri ihmal edilmiş olmaktadır.



Şekil 3.12 İki farklı örtüşüm uzunluğuna uygulanan indüksiyonlar ile gürültü seviyesindeki değişim[5]

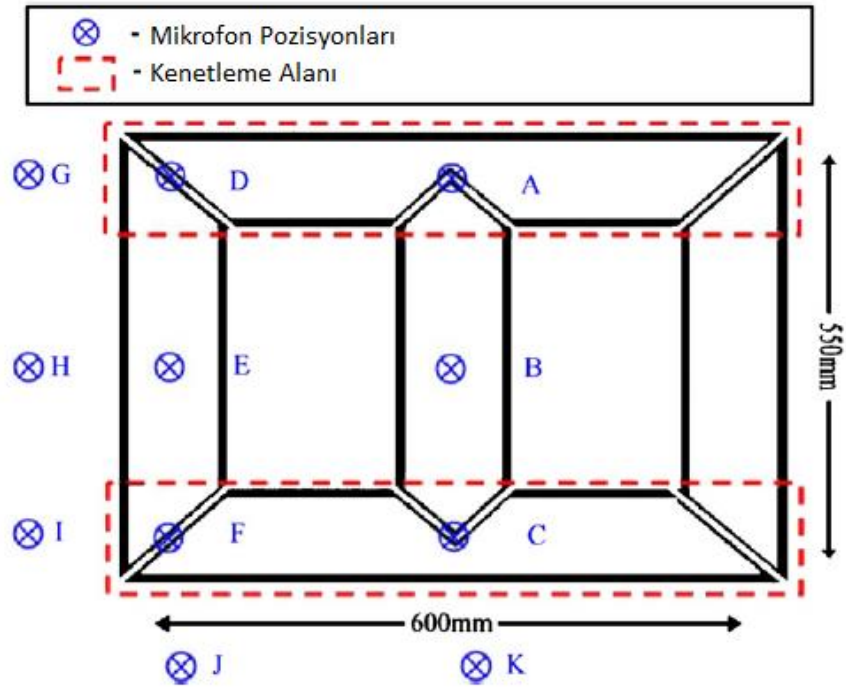
Çekirdek parametrelerini etkileyen sebepler çeşitlilik göstermektedir. Örtüşme uzunluğu a 'nın 10 mm ve boşluk uzunluğu g 'nin 1 mm olarak sabitlendiği durum için örtüşme kayma uzunluğu s ve basamak sayısı N 'in değişimiyle çekirdek parametreler P_L , V_L ve n 'in değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi basamak sayısının artışı çekirdek parametrelerinin tümünde azalma meydana getirmiştir. Basamak sayısının artışıyla kritik indüksiyonun artması gürültüde meydana gelen azalmaya sebep olmaktadır. Örtüşme kayma uzunluğunun artması halinde ise $B > B_c$ olan durumlarda tüm çekirdek parametrelerinin artışına sebebiyet vermiştir. Gürültüde meydana gelen değişiklikler incelendiği zaman aslında tek bir parametrenin çok etkin olmadığı, ancak ilgili parametrelerin kombinasyonuna bağlı olarak gürültünün değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.13 N ve S parametrelerinin değişimiyle kayıplar, P_L , uyarım V_L ve gürültü (n) [5] Snell [14], farklı basamak sayıları (3,5 ve 7), farklı basamak örtüşme uzunlukları (2,4 ve 6 mm) ve farklı özelliklere sahip silisli saclar kullanarak ilgili parametrelerin gürültü üzerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği ve mikrofön pozisyonları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 3.14 Çekirdek imal ortamı[14]



Şekil 3.15 Çekirdek etrafındaki mikrofon pozisyonları[14]

Nüvesi 27MOH materyali ile imal edilen çekirdek üzerinde yapılan ölçümler neticesinde Çizelge 3.3’de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 3.3 Çekirdek üzerinden ölçülmüş gürültü değerleri[14]

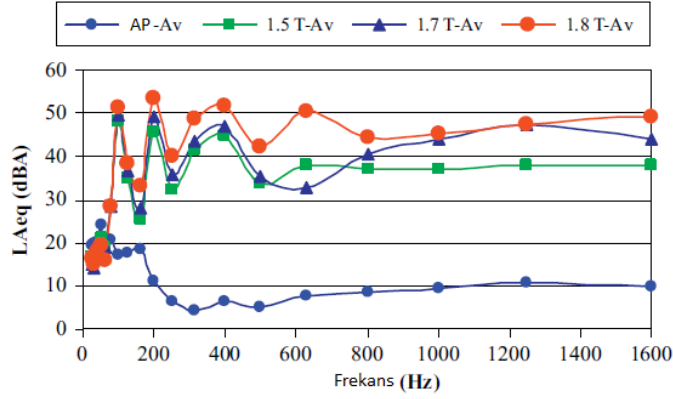
Basamak Sayısı	Örtüşme Uzunluğu	LAeq(dBA)			
		ArkaPlan	1,5 T	1,7 T	1,8 T
Yığın(B,E)					
3	2	34,1	50,7	56,5	61,2
	4	34,4	51,4	61,3	66,6
	6	33,5	51,1	61,9	66,3
5	2	37,2	52,6	56,9	63,6
	4	35,2	45,9	54,0	60,6
	6	34,0	44,7	52,3	59,1
7	2	34,6	52,8	57,1	61,0
	4	35,5	46,7	53,1	60,8
T-Noktası(A,C)					
3	2	37,4	49,4	55,0	60,0
	4	35,2	51,4	62,4	67,5
	6	34,0	50,1	59,7	64,3
5	2	36,4	52,8	57,4	63,5
	4	35,6	45,5	53,2	59,8
	6	31,4	46,0	52,9	60,4

Çizelge 3.3 Çekirdek üzerinden ölçülmüş gürültü değerleri(devamı)[14]

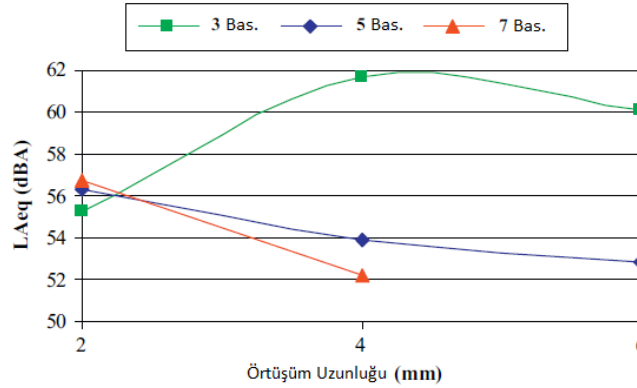
Basamak Sayısı	Örtüşme Uzunluğu	LAeq(dBA)			
		ArkaPlan	1,5 T	1,7 T	1,8 T
T-Noktası(A,C)					
7	2	34,6	51,3	56,7	60,5
	4	37,0	48,1	51,7	59,1
Köşe(D,F)					
3	2	34,5	49,7	54,5	57,1
	4	35,3	53,2	61,4	65,8
	6	36,6	50,0	58,5	62,4
5	2	37,1	50,4	54,6	59,0
	4	35,7	48,4	54,6	58,7
	6	34,9	45,8	53,3	58,6
7	2	35,8	51,8	56,3	59,6
	4	35,4	46,1	51,7	57,9

Çizelgeden de görüldüğü üzere 3 basamaklı çekirdekte 4mm ve 6mm örtüşme uzunluğunda gürültü seviyesi 5 ve 7 basamaklı çekirdeklere göre daha yüksektir. 4mm örtüşme uzunluğunda 7 basamaklı çekirdek modeli 5 basamaklı çekirdekle hemen hemen aynı gürültü seviyesi meydana getirmektedir. Örtüşme uzunluğunun 2mm olması durumunda ise 3 basamaklı çekirdek modeli diğerlerine göre daha az bir gürültü meydana getirmektedir. Sonuçlara göre indüksiyon seviyesinin yükseltilmesi gürültüyü artırmaktadır. 5 ve 7 basamaklı sabit indüksiyon altındaki çekirdeklere örtüşme uzunluğunun artması ile gürültü seviyesi azalmakta olup 3 basamaklı çekirdekte ise bu

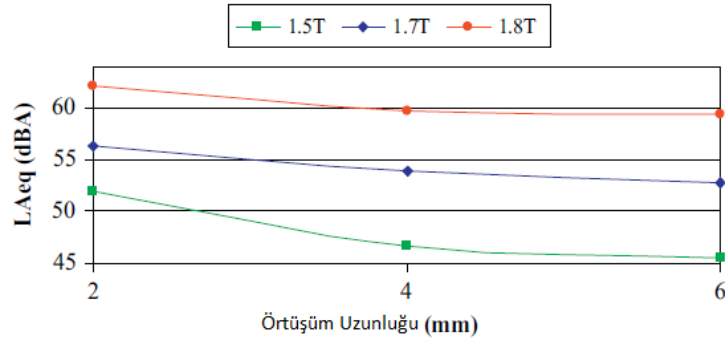
durum genellikle gürültü artışına sebep olmaktadır. Bu sonuç ile Ilo vd.[5] teki tespitleri örtüşmekte olup basamak sayısının değişmesine binaen farklılıklar gözlemlenmektedir. Anlatılan ilgili etkilerin grafiksel gösterimleri sırası ile Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.16 Gürültü spektrumu(7 basamak, 2mm örtüşüm uzunluğu)[14]



Şekil 3.17 1.7 T indüksiyon altında farklı basamak sayılarında ve farklı örtüşme uzunluklarında meydana gelen ortalama gürültü seviyesi[14]



Şekil 3.18 beş basamaklı çekirdekte farklı indüksiyon değerlerinde örtüşme uzunluğunun gürültü üzerindeki etkisi[14]

Snell[14], ayrıca geleneksel tane konumlu materyal olan 27M3 ile meydana getirilmiş farklı basamak ve farklı örtüşme uzunluklarındaki çekirdeklere farklı seviyelerde indüksiyon uygulayarak meydana gelen gürültüleri ölçmüştür. Ölçümler neticesinde yüksek geçirgenlikli 27MOH materyali ile geleneksel 27M3 materyalini karşılaştırmaya imkan sağlamıştır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Geleneksel tane konumlu materyal(27m3) ile yüksek geçirgenlikli materyalde(27moh) meydana gelen gürültü seviyelerinin karşılaştırılması[14]

Basamak Örtüşme Kayma Uzunluğu(mm)	1,5T		1,7T		1,8T		Basamak Sayısı
	27M3	27MOH	27M3	27MOH	27M3	27MOH	
2	54,9	49,9	61,2	55,3	63,7	59,4	3
4	50,3	52,0	56,5	61,7	59	66,6	
6		50,4		60,1		64,3	
2	51,6	51,9	57,2	56,3	59,8	62	5
4	48,4	46,6	55,1	53,9	58,8	59,7	
6	48,3	45,5	56,6	52,8	59,9	59,3	
2	52,5	51,9	57,1	56,7	59,1	60,4	7
4	49,5	47,0	56,5	52,2	59,9	59,3	

Edinilen verilere göre genel olarak yüksek geçirgenlikli materyalde meydana gelen gürültü seviyesi geleneksel materyale göre daha düşüktür. Ancak 1.8T indüksiyon altındaki çekirdekte genellikle yüksek geçirgenlikli materyalin gürültü seviyesi diğerine göre biraz daha yüksek çıkmıştır.

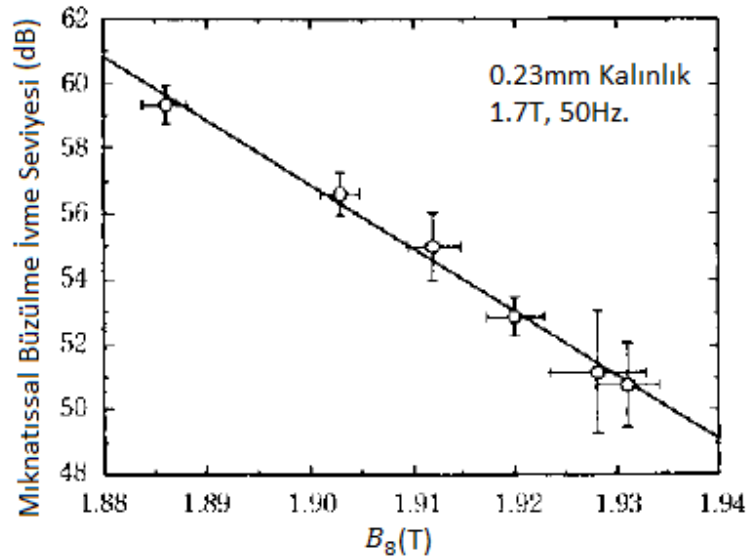
3.1.5 Sıkma Basınçları, Silisli Sac Kalınlıkları ve Kritik İndüksiyonun Transformatör Gürültüleri Üzerindeki Etkileri

Işida[6], üç fazlı transformatör çekirdeği üzerindeki sıkma basınçları ve levha materyallerinin etkilerini araştırmıştır. Transformatör çekirdeği dört farklı sac çelik kullanılarak inşa edilmiştir. Deney sonuçlarına göre basamaklı bindirme metotları karşılaştırıldığında ÇBB tekniğiyle oluşturulmuş çekirdekte 0.3 mm ve 0.23 mm kalınlıklarındaki materyallerin her ikisinde de daha düşük gürültü seviyesi görülmüştür.

Çizelge 3.5 Transformatör sac levhaların özellikleri ve ticari kodları[6]

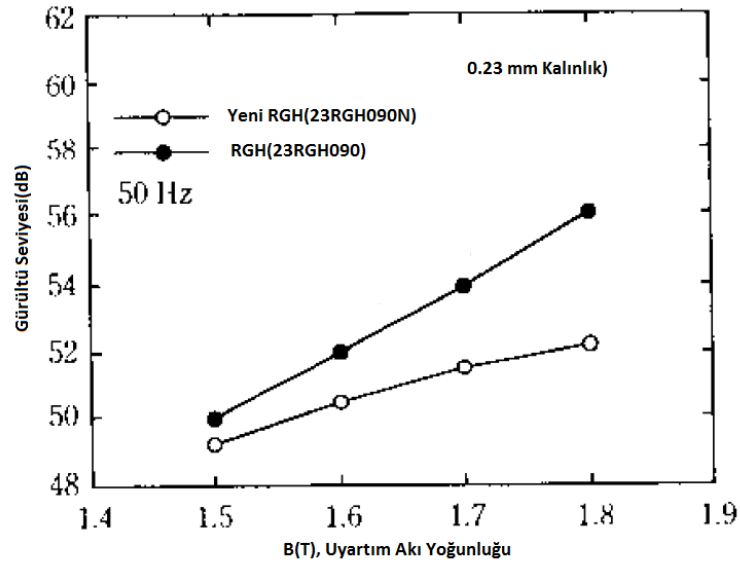
No	Malzeme İsmi	Kalınlık(mm)	$B_8[T]$	$W_{17,50}$
1	23RGH090N	0.23	1.931	0.85
2	23RGH090		1.898	0.89
3	30GRH105N	0.30	1.930	1.02
4	30GRH105		1.896	1.06

$B_8[T]$, H:800 A/m, 50Hz'deki akı yoğunluğu, $W_{17,50}$, B:1.7T, 50Hz'deki Demir Kaybı.



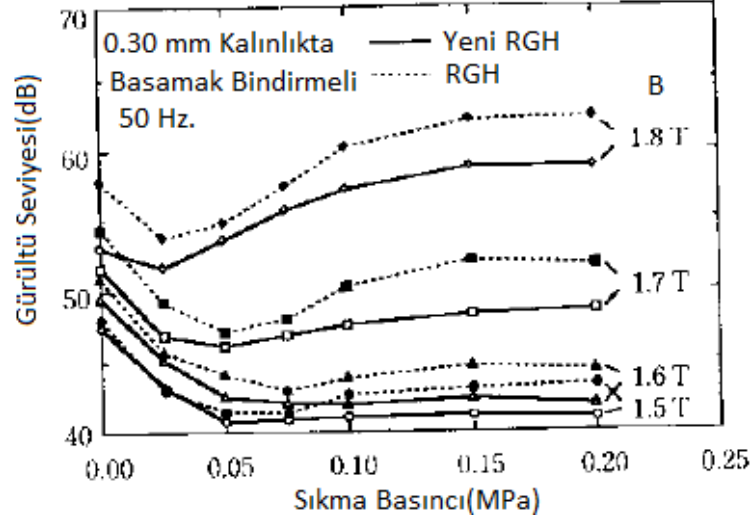
Şekil 3.19 0.23 mm kalınlıktaki materyal için B_8 değeri ile mıknatıssal büzülme ivme seviyesi arasındaki ilişki[6]

Materyallerin 0.23 mm kalınlığında 0.30 mm kalınlığına göre daha düşük gürültü seviyesi oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca Yeni RGH materyalinin de RGH materyaline göre daha düşük gürültü meydana getirdiği de tespit edilmiştir. Bu durumların sebebi materyalin sahip olduğu B_8 değerinin(kritik indüksiyon, diğer bir ifadeyle B_c) daha yüksek olmasıdır. 1.7T indüksiyon altındaki gürültü seviyesinde, materyalin B_8 değerinin her bir 0.01T artması durumunda 2dB civarında azalma meydana gelmektedir.



Şekil 3.20 0.23 mm kalınlıktaki yeni rgh ve rgh levhaları kullanılarak oluşturulmuş model transformatör çekirdeğinin gürültü seviyeleri[6]

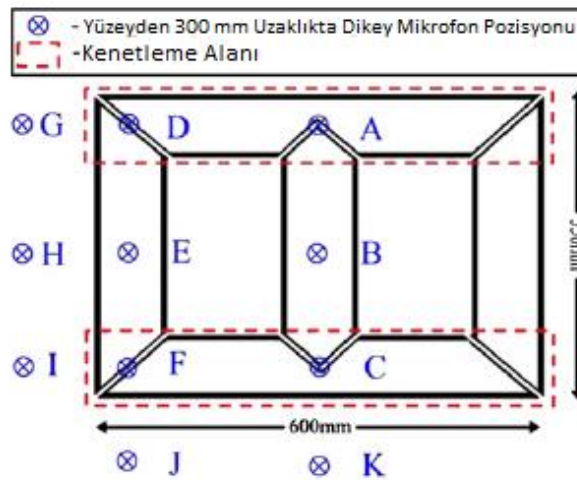
Sıkma basınçlarının etkisi 0.30 mm kalınlığındaki materyalle inşa edilmiş TBB ve ÇBB tasarımları arasında karşılaştırılmıştır. 1.5 T ile 1.8 T'ye kadar pik manyetik akı yoğunluğunda 0.25 MPa ya kadar basınç uygulanmıştır. ÇBB çekirdeğinde gürültü seviyesi B:1.5 T'de 0.075 MPa ile 0.1 MPa arasında en azdır. 1.8 T de daha düşük gürültü seviyesi için sıkma basıncı 0.025 MPa'ya düşürülmüştür. TBB çekirdeği olması durumunda ise en düşük gürültü seviyesi 0.05 MPa'da meydana gelir. Çok Basamaklı Bindirme ve Tek Basamaklı Bindirme çekirdeklerinde sonuçlara göre benzer eğimler bulunmuştur. Sıkma basıncı 0 ile optimum değer arasında artış gösterdiği zaman gürültü seviyesi azalmaktadır[6].



Şekil 3.21 Basamak bindirmeli çekirdeğin gürültü seviyesi üzerinde sıkma basıncının etkisi[6]

3.1.6 Çekirdeğin Nüvesinde Bulunan Basamaklardaki Plaka Sayısının (İstifleleme Yüksekliği veya Laminasyon Sayısı) Gürültü Üzerindeki Etkileri

Normal şartlar altında transformatör üreticileri basamaklara 1 yerine 2 veya 3 levha yerleştirmektedirler. Bu durum çekirdeğin manyetik etkisini azaltmasına rağmen daha hızlı çekirdek üretimi sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Snell[12] yapmış olduğu çalışmada 27MOH ve 27M3 materyallerini kullanarak basamaklarda bulunan levha sayılarıyla meydana gelen gürültü arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Ölçümler 4mm örtüşme uzunluğu olan 5 basamaklı çekirdek üzerinde gerçekleştirilmiştir.



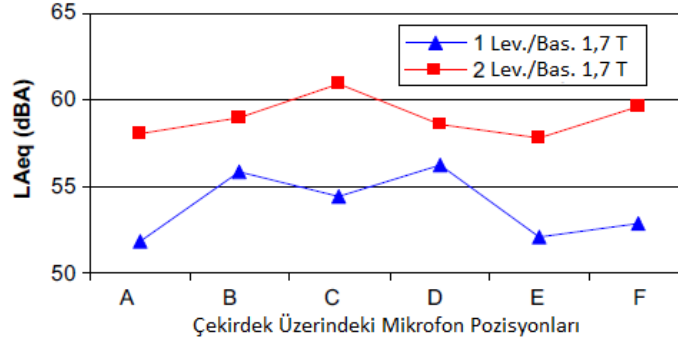
Şekil 3.22 Çekirdek etrafındaki mikrofon pozisyonları[12]

Çizelge 3.6 Levha sayısının etkisi[12]

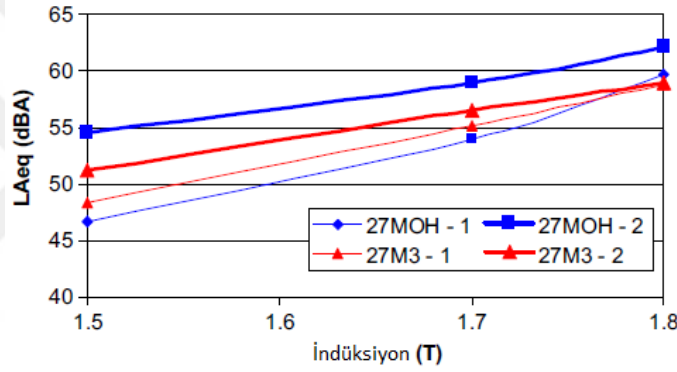
Çekirdekteki Mikrofon Pozisyonu	Her Basamakta 1 Levha			Her Basamakta 2 Levha			Materyal Tipi
	(T) İndüksiyonundaki LAeq Değeri						
	1,5	1,7	1,8	1,5	1,7	1,8	
A	42,0	49,4	56,8	50,1	54,3	56,0	27MOH
B	51,9	59,3	62,9	51,6	56,7	59,0	
C	49,7	55,7	59,9	52,4	58,3	60,8	
D	49,8	52,4	54,7	53,7	57,8	60,2	
E	44,4	54,8	58,9	50,0	57,3	59,4	
F	42,0	50,6	55,2	53,0	58,7	60,2	
Ortalama	46,6	53,9	59,7	54,6	59,0	62,1	
A	48,1	57,0	59,2	51,6	55,7	59,4	27M3
B	53,0	60,4	61,6	49,8	55,9	59,6	
C	49,5	56,9	61,6	51,9	58,3	60,4	
D	49,7	53,0	57,3	52,1	56,3	56,9	
E	47,8	54,8	58,4	50,3	55,3	58,5	
F	53,1	57,0	59,5	48,1	53,7	57,0	
Ortalama	48,4	55,1	58,8	51,2	56,5	59,0	

Yukarıdaki çizelge ve şekilden görüldüğü üzere her basamakta 1 levha bulunması 2 levha bulunmasından daha iyi sonuçlar vermiştir. 27MOH materyalinde 1,5T indüksiyon altında 2 levha bulunan durumdaki gürültü seviyesi %27 daha büyüktür.

1,8T indüksiyon altında 2 levha bulunan durumda ise %4 daha yüksek gürültü görülmektedir. 27M3 materyalinde ise 2 levha bulunan durumdaki gürültü seviyesi 1,5T indüksiyon altında %5,8 ve 1,7T indüksiyon altında %2,5 daha büyüktür.



Şekil 3.23 27MOH materyali kullanılan çekirdeklerde basamaktaki levhaların etkisi[12]



Şekil 3.24 27MOH ve 27M3 materyallerinin karşılaştırılması[12]

3.1.7 Uygulanan İndüksiyon Değeri, Hava Boşluk Uzunluğu ve Basamak Bindirme Metotlarının Daha Önce Açıklanan Parametreler İle Birlikte Gürültü Üzerindeki Etkileri

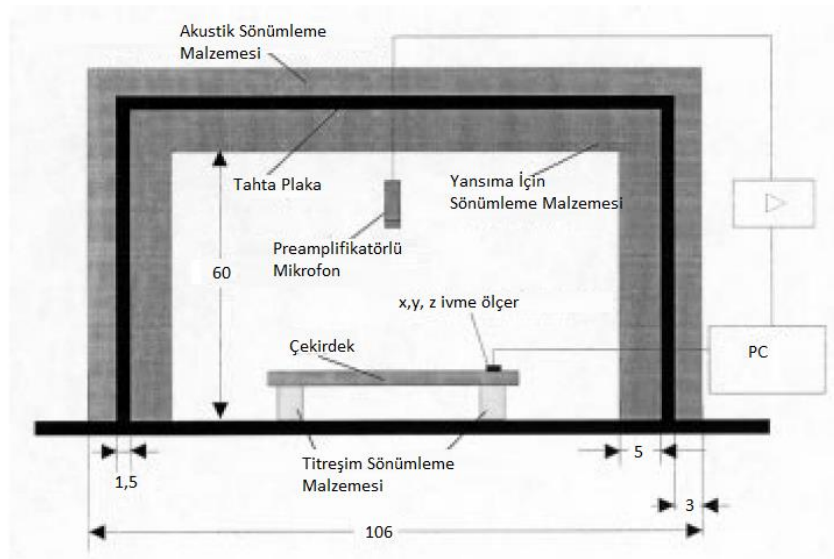
Weiser ve Pfützner [7]'de yapmış oldukları çalışmada Çizelge 3.7'de belirtilen 3 farklı çekirdek tipinin gürültü seviyelerine etkileri araştırılmıştır.

Çizelge 3.7 Ölçüm yapılan çekirdeklerin özellikleri[7]

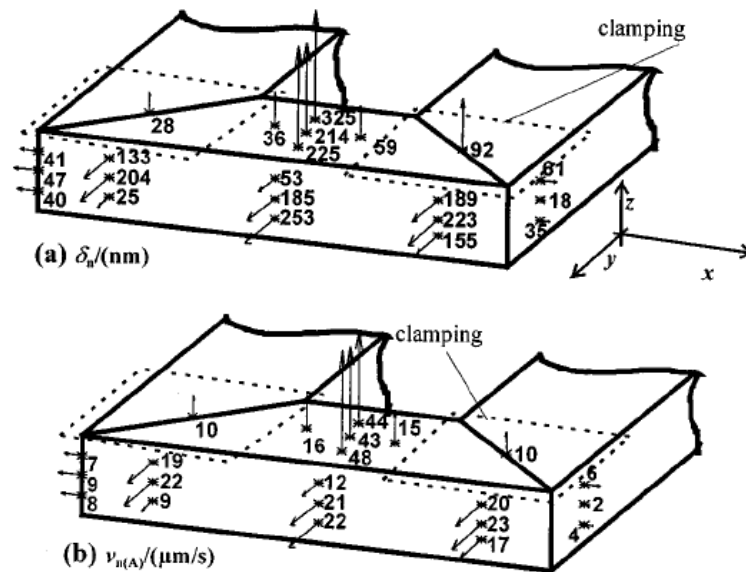
Çekirdek	Ölçüler	Tabaka Genişliği	Katmanların Sayısı	Materyal Sınıfı ve Kalınlığı	Ölçümler	Parametreler
A	400x210	50	110,160,180	ZDKH, 0.27	Gürültü, Titreşim	N,g,a,k

Çizelge 3.7 Ölçüm yapılan çekirdeklerin özellikleri(devamı)[7]

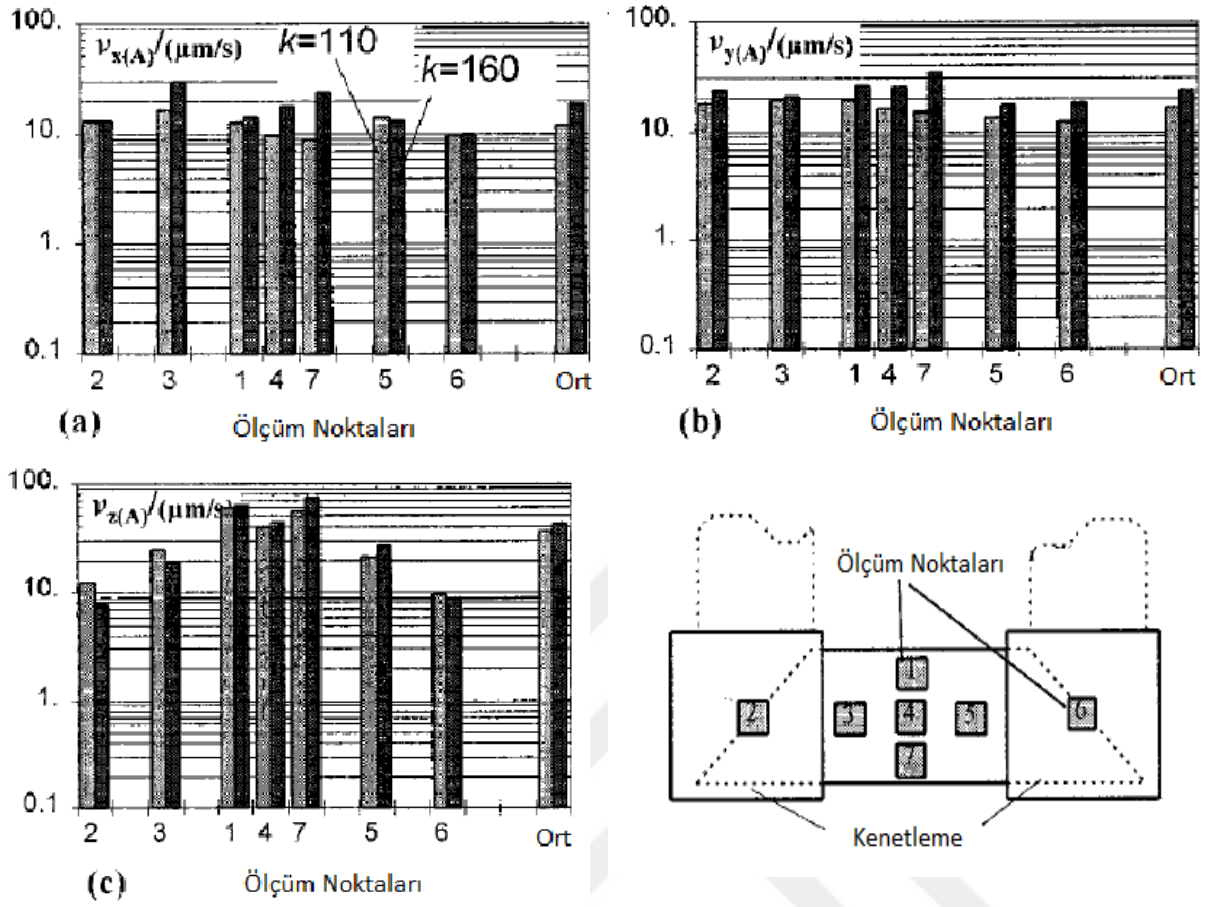
Çekirdek	Ölçüler	Tabaka Genişliği	Katmanların Sayısı	Materyal Sınıfı ve Kalınlığı	Ölçümler	Parametreler
B	740x770	170	20 veya 40	M-OH, 0.27	Titreşim	N
C	460x270	80	180	ZDKH, 0.27	Gürültü	N,a,g



Şekil 3.25 Titreşim ve kayıp analizleri için kurulan deney ortamı[7]

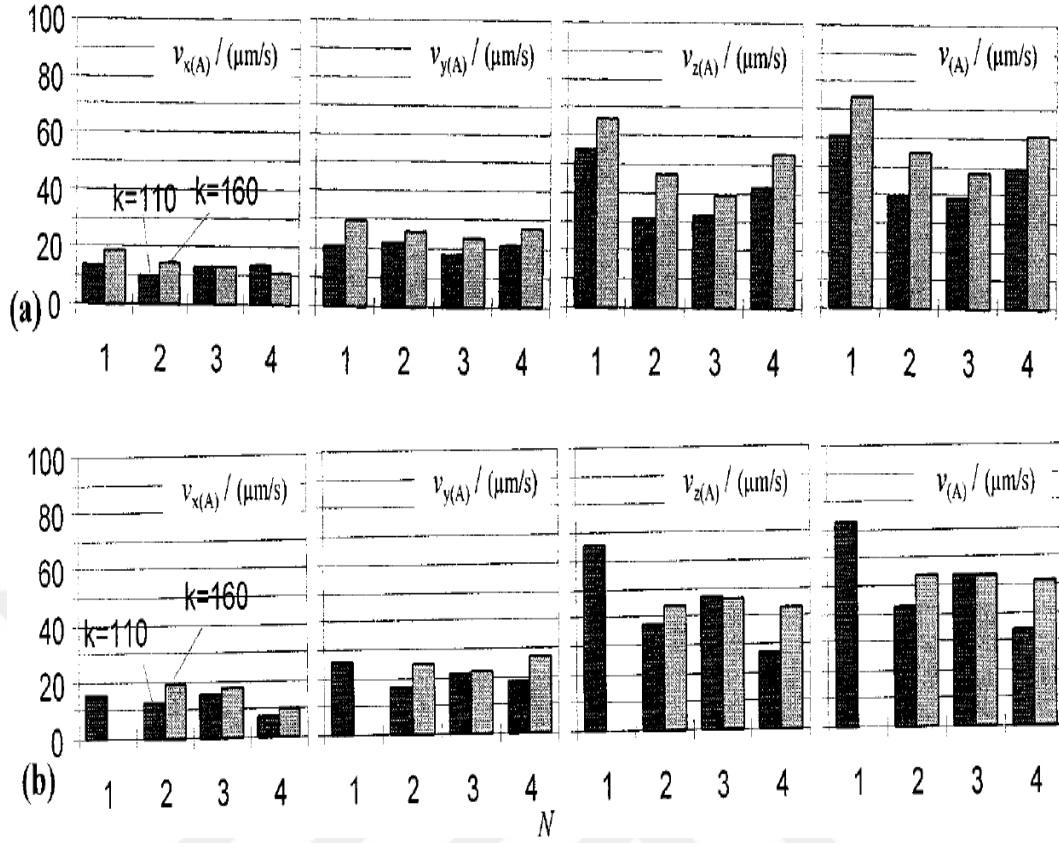


Şekil 3.26 İyi sıkıştırılmış ÇBB çekirdeğin köşe bölgelerinin yüzey titreşimleri (çekirdek tipi A; N:2, k:110, B:1.6T). (a) Yer değiştirmeler, dn (b) Hızlar, $v_{n,A}$ [7]



Şekil 3.27 İki farklı laminasyon sayısı k için (110 ve 160) ortalama hava boşluğu $g:1$ mm olan çekirdeğin $v_{x,A}$, $v_{y,A}$, $v_{z,A}$ yüzey titreşimleri (çekirdek tipi A; N:2, B:1.6 T)[7]

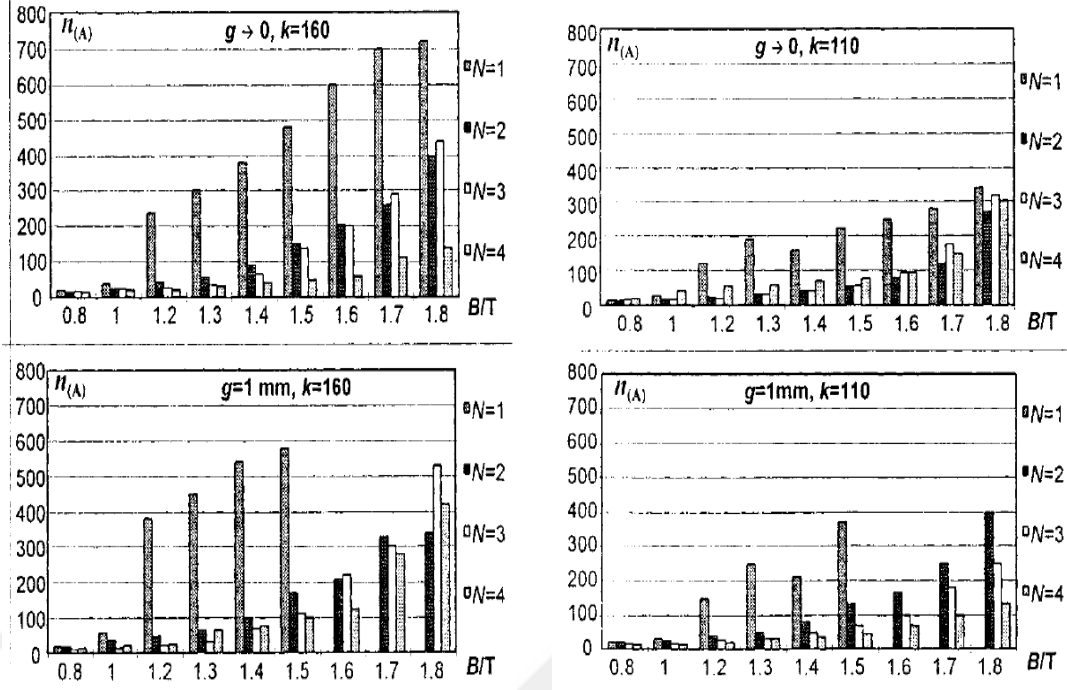
Şekil 3.27’de hava boşluğu ve laminasyon sayısının etkileri gösterilmiştir. Hava boşluğu g ’nin 0 yerine 1 olması durumunda z yönündeki hızlar v_z ’nin az miktarda arttığı görülmektedir (Ölçüm noktası 1 de $g:0$ iken $44 \mu\text{m/s}$ olan hız, $g:1$ iken $60 \mu\text{m/s}$ olmuştur). Üst çekirdek yüzeyinde x ve y yönündeki hızlar v_x ve v_y etkili bir şekilde artış göstermiştir. Dolayısıyla hava boşluğu g ’nin artması durumunun dezavantaj olduğu tespit edilmiştir. Laminasyon sayısı k ’nın 110 iken 160 yapılması durumunda her üç yöndeki hızlarda da az miktarda artış meydana gelmiştir. Böylelikle laminasyon sayısının artmasıyla meydana gelen gürültü artışı Snell[12]’in tespit etmiş olduğu sonuçlarla uyumaktadır.



Şekil 3.28 İki farklı laminasyon sayısı k için (110 ve 160) farklı N basamak sayılarında meydana gelen yüzey titreşimleri $v_{x,A}$, $v_{y,A}$, $v_{z,A}$ ve ortalama hız v_A (Çekirdek Tipi A) (a) $g:0$ (b) $g:1$ [7]

Şekil 3.28’de Tek Basamaklı Bindirme($N:1$) ve Çok Basamaklı Bindirme($N:2,...,4$) metotlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Z yönündeki hızlar v_z ÇBB’de belirgin bir azalış göstermektedir. Ortalama hızlarda da yine ÇBB’nin avantajlı olduğu görülmektedir. Bulunan ilgili sonuçlar Ilo[5] ve Işıda[6]’ın tespitleriyle paraleldir.

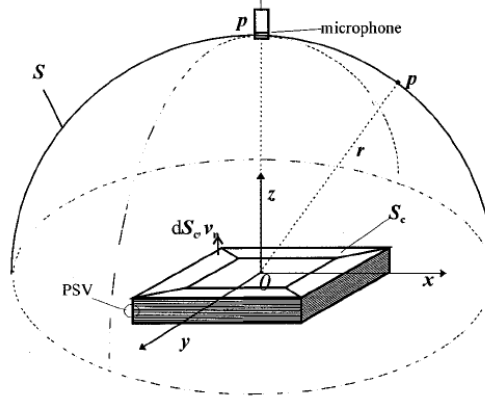
Şekil 3.29’da farklı parametrelerdeki A tipi çekirdek modelinin gürültü analizleri grafik halinde gösterilmiştir. N basamak sayısının artışı gürültü üzerinde ılımlı etki göstermektedir. Bu durumda Ilo ve diğerleri[5] tarafından doğrulanmıştır. Laminasyon sayısı k ’nın artması durumunda ise genel olarak gürültü seviyesi artış göstermiştir. Basamak sayısı N ’nin 1 olduğu durum için hava boşluğu g ’nin artması, gürültü seviyesinde artış meydana getirmiştir.



Şekil 3.29 Farklı indüksiyonlarda(B), farklı hava boşluk uzunluklarında(g), farklı laminasyon sayılarında(k) ve farklı basamak sayılarında(N) A tipi çekirdeğin n_A gürültü ölçüm grafikleri [7]

3.1.8 Mıknatıssal Büzülme ve Manyetik Kuvvetlerin Çekirdek Mimarileri Üzerindeki Etkileri

Son yıllarda transformatör çekirdeklerinin global tasarımları değiştirilmemiştir. Bilindiği üzere TBB tekniği veya ÇBB tekniği kullanılmaktadır. Ancak endüstriyel tecrübeler ve yapılmış olan deneysel çalışmalarda ÇBB tekniğinin çok daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Kayıpları azaltmak için ilk olarak indüksiyon B'nin üretimi kritik değer olan B_c 'nin altında olmalı ve basamak sayısı N artırılmalıdır. ÇBB tekniğiyle tasarlanmış çekirdekte 1.6 T indüksiyon uygulanması halinde A-ağırlıklı gürültü seviyesindeki azalma 20 dB, 1.5 T için 7.5 dB ve 1.7 T için önemli bir düşüş görülmemektedir. Güç transformatörlerindeki endüstriyel tecrübeler en düşük ortalama gürültü seviyesi azalışının 1.5 T indüksiyonda 6 dB olduğunu, 1.8 T indüksiyonda ise 0 olduğunu göstermektedir. En çok kullanılan basamak sayısı N:6 için kritik indüksiyon değerinin 1.7 T olduğu görülmektedir. TBB tekniğiyle oluşturulmuş çekirdeklerdeki indüksiyon genellikle kritik indüksiyonun üzerinde olup ÇBB tekniğinde ise B_c 'nin altında veya yakınında olmaktadır.[7]



Şekil 3.30 Gürültü emisyonu için basit model(PSVs, titreşimlerin birincil kaynakları, dSc tüm çekirdek yüzey alanları, v_n yüzey alanlarındaki titreşim, p odadaki tüm noktalardaki ses basıncı) [7]

$$P = F_i r c \oint_S v_n^2 dS_c \quad (3.3)$$

F_i , uzunluk, genişlik ve yükseklik gibi global geometrik parametrelerin dikkate alındığı ışınlama faktörüdür. F_i , N gibi ortak parametrelerin değişimi için sabit olabilir ve akı dağılımlarını etkilerken çekirdeğin global geometrisini etkilemeyecektir. r , yayılma ortamının yoğunluğudur(hava veya yağ). c , ses hızına karşılık gelmektedir. v_n , yüzey hızının ortalama kareköküdür. $v_{n,A}$ ise A-ağırlıklı sinyali belirtmektedir. v_n 'in düşük frekans bileşenleri insan kulağının fizyolojik karakteristikleri dikkate alınarak zayıflatılmıştır. A-ağırlıklı ölçüm nüve yüzeyinde meydana gelen titreşim ve gürültünün karşılaştırılmasında faydalıdır. v_n 'in ölçümü tekil yüzey noktalarda kısıtlıdır. Ses gücünün kabaca tahmini Eşitlik 3.4'te verilmiştir[7].

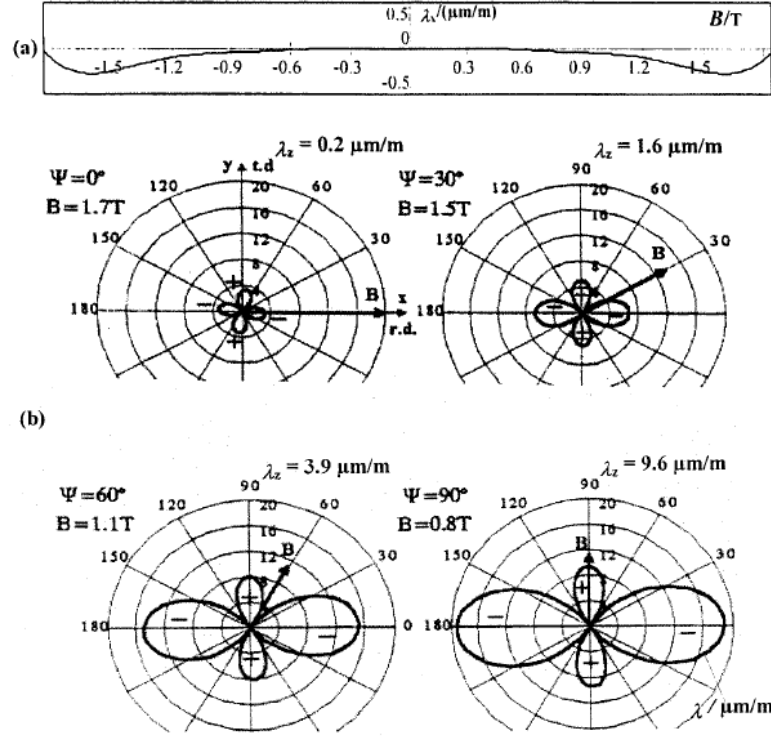
$$P = F_i r \left(\frac{c}{4}\right) \sum_i v_{n,k}^2 S_{c,k} \quad (3.4)$$

İkinci bir özellik olarak gürültünün tespiti için mikrofon kullanılmaktadır. Ses yoğunluk vektörünün ortalaması aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir[7].

$$I = 1/T \int_T p(t) \cdot v(t) dt \quad (3.5)$$

Çevreleyen odanın S yüzeylerinin j noktalarında(Genellikle J=6) T periyot uzunluğundaki güç, aşağıda verilmiş olan denklemdeki gibi ifade edilebilir[7].

$$P = \oint_S I \cdot dS = \sum_j I_j \Delta S_c \quad (3.6)$$



Şekil 3.31 Yüksek tanecik yönlendirmeli silisli saclarda oluşan mıknatıssal büzülmeler(MB) a)Radyal yöndeki mıknatıssalanma için B indüksiyonunun fonksiyonu olarak MB b)Normal x,y,z-düzlemlerinin rastgele seçilmiş yönlerinde MB[7]

İdeal akı dağılımları olması durumunda(yüksek homojenlik, düşük bozulmalar vb.) çekirdek boyunca mıknatıssal büzülme(MB) oldukça küçük olur. Ancak akı dağılımlarının ideal olmaması sebebiyle MB gürültü problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yukarıdaki şekilde bulunan eğriler MB'ye karşılık gelmekte olup basitçe "kelebek" eğrisi olarak tanımlanabilir. Tepeden tepeye I_x değeri en iyi materyal için telaffuz edilebilecek $0,3\mu\text{m}/\text{m}$ kadar küçüktür(Şekil-(a)). Çekirdek yüzey elemanlarının tabaka içi yer değiştirmeleri büyük çekirdekler için $1\mu\text{m}$ kadardır. Dönel yön(r.d) ile indüksiyon B arasındaki açı arttıkça görüldüğü üzere MS'nin üç bileşeni(normal yön(n.d), enine yön(t.d), dönel yön(r.d) de artış göstermektedir. Dönel yön için $20\mu\text{m}/\text{m}$ 'ye kadar olan en fazla değer $0,8\text{T}$ indüksiyonda tespit edilmiştir[7].

Bunun dışında literatürde yapılan çalışmalar neticesinde gürültü ve mıknatıssal büzülme titreşim karakteristikleri ile harmonik bileşenler arasındaki ilişki matematiksel denklemler ile verilmiştir. Manyetostriktif titreşim ivmesi eşitlik 3.7'de gösterilmiştir[6].

$$p_n: (2\pi f_n)^2 \lambda_n A_{wn} \quad (3.7)$$

f_n , n inci harmonikteki frekans, λ_n , mıknatıssalbüzölme harmonik bileşeni, A_{wn} , A-ağırlıklı ölçek katsayısıdır. A-ağırlıklı manyetostriktif titreşim ivmesi seviyesi P, harmonik bileşenlerden Eşitlik 3.8'deki gibi hesaplanabilir[6].

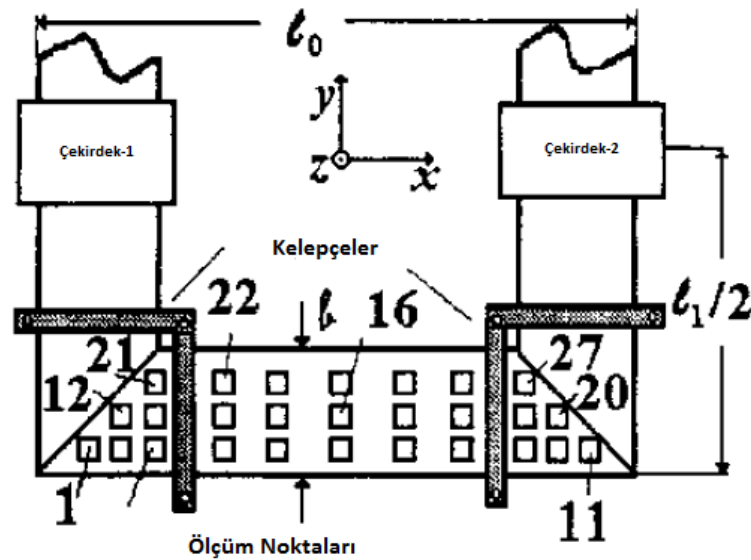
$$P: 20 \log\left(\frac{\sqrt{\sum_n p_n^2}}{p_0}\right) \text{ dB} \quad (3.8)$$

$p_0: (2\pi)^2 \times 10^{-5}$ mıknatıssalbüzölme titreşim ivmesi referans değeridir.

Şekil 28'de belirtilen ölçümlere göre x yönündeki (boyunduruk eksen) yer değiştirme d_x 50 nm seviyesindedir. Yarım boyunduruk uzunluğu 0.1 m olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla bulunan zorlanma değeri $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ mıknatıssal büzölme açısından normal değerindedir. Y yönündeki (bacak eksen) yer değiştirme d_y 3 noktada yükselmektedir. Sonuçlar mıknatıssal büzölme beklentilerini karşılamaktadır[7].

Z yönündeki yer değiştirme d_z kelepçeler üzerinde 100nm'nin altındadır. Ancak kelepçeler arasında oldukça yüksek çıkmıştır[7].

B. Weiser , A. Hasenzagl, T. Booth ve H. Pfützner[8] iki farklı çekirdek modeli üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Ölçümler Şekil 3.32'de gösterilen iki farklı tipte tek faz çekirdek modelleri üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.32 Araştırılan çekirdek modeli ve ölçüm noktaları[8]

İki farklı çekirdeğin bobinler arası uzaklığı ℓ_0 , bobin yüksekliği $\ell_1/2$, nüve yüksekliği b Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çekirdek A'da N adet basamak sayısının ilişkisi araştırılmış ve Çekirdek B'de de istifleme yüksekliğinin etkisi çalışılmıştır. Her iki çekirdek de kenetlemelidir. Yüzeyde oluşacak yer değiştirmelerin ölçülebilmesi amacıyla 27 noktada ölçüm yapılmıştır.

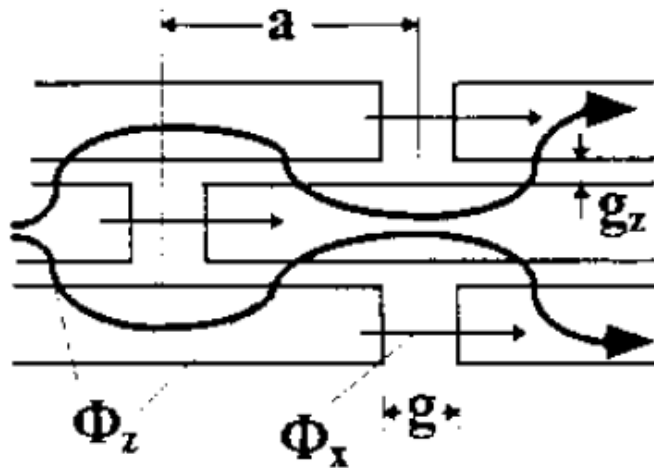
Çizelge 3.8 Çekirdek A ve çekirdek B boyutları [8]

Çekirdek	ℓ_0	$\ell_1/2$	B
A	740 mm	370 mm	170 mm
B	400 mm	105 mm	50 mm

Ölçüm Analizleri: Çekirdek A için yer değiştirme sonuçları Şekil 3.33'de gösterilmektedir. δ_x , δ_y ve δ_z , sac uçlarındaki aşırı düzensizliklerle birlikte köşelerde yüksek genlik gösterirken merkez bölgelerde düşük genlik göstermektedir. Düşük istifleme yüksekliği dikkate alınırca Maxwell stress vektörüne göre istiflenen katmanlar arasındaki mekanik kuvvetler δ_z nin oldukça yüksek olmasına sebep olabilir[8].

$$P: (B_a n H_a) - \frac{1}{2}(B_a H_a)n \quad (3.9)$$

P, normal vektör n tarafından karakterize edilen çevreleyen havadaki levhanın yüzey elemanını ifade eder. Alan vektörü H_a ve indüksiyon vektörü $B_a = \mu_0 * H_a$ dır. Akı dağılımı kabaca dışa doğru olmaktadır[8].

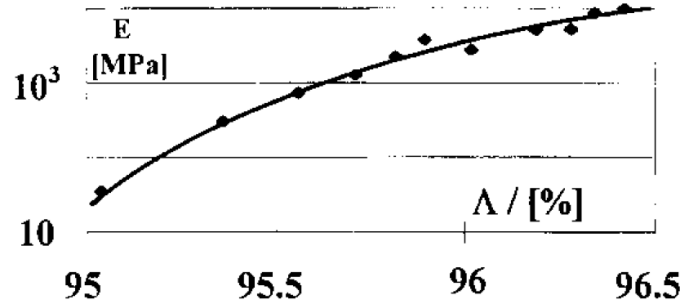


Şekil 3.33 Levhanın üst bölgesindeki akı dağılımı[8]

i) Bacaklar ve boyundurukların homojen bölümleri $0.5\mu_0 H_2$ katmanlararası itici gerilim gösterir. Bu itici gerilim 1.7 T için 10 mPa derecesindedir ve bu nedenle ihmal edilebilir.

ii) Örtüşme bölgelerinde, boşluk üzerindeki çekici gerilim $\rho_g: 0.5B_g^2 / \mu_0$ dır. Tek basamaklı bindirme için maksimum boşluk indüksiyonunu $B_g: 0.7$ T olarak farzederek, 200 kPa derecesini buluruz. Bu gerilimde mıknatıssal büzülme gibi boşluk uzunluğu g 'nin 100 Hz'te hafif salınımına ve katmanlararası sürtünme dolayısıyla titreşim ve gürültü oluşumuna sebep olabilir.

iii) Örtüşme bölgelerinde normal indüksiyon bileşeni B_z ye göre katmanlararası çekici kuvvet $P_z: 0.5B_z^2 / \mu_0$ dır. Z akısı $B_z: 0.05$ T farzedilirse gerilim 1kPa olur. Gerilim ρ_z katmanlararası boşluk g_z nin 100 Hz'te salınımına ve dolayısıyla yerel yığılma faktörü Λ nın periyodik artışına sebep olur[8].

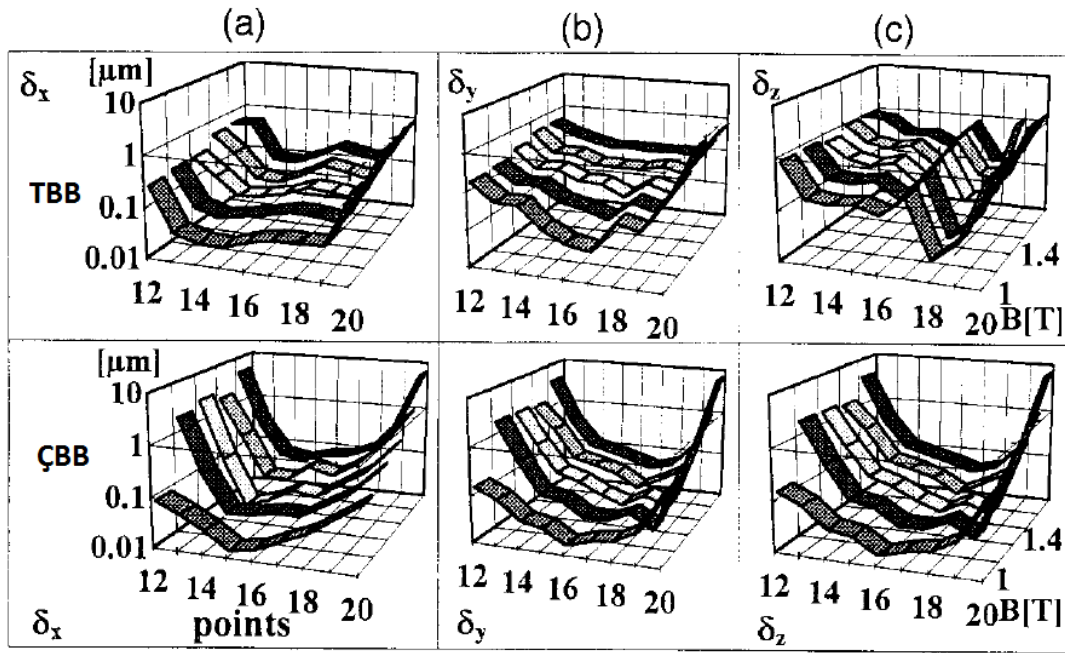


Şekil 3.34 Yığılma faktörü ile elastisite modülü arasındaki ilişki[8]

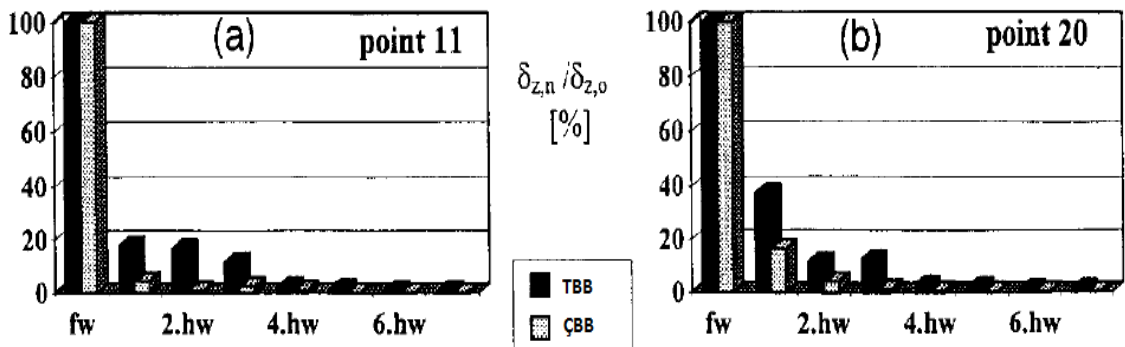
Normal yöndeki yerdeğiştirme δ_z 'yi tahmin etmek için yerel yığılma faktörü Λ nın artışıyla yüksek oranda artan elastisite modülü E_z dikkate alınır. Mıknatıslanma olmayan durum için $\Lambda: 0.95$ varsayarsak diferansiyel E değeri 30 mPa ya yakındır. $\delta_z = k\Delta g_z$ formülüne göre istifleme yüksekliği k arttıkça normal yöndeki yerdeğiştirme δ_z artacaktır. Ancak B çekirdeğinde yapılan ölçümlere göre k 'nın 45, 90 ve 180 olduğu değerlerde δ_z yerdeğiştirmesi değişmemiştir. Bu durum B.Weiser ve H.Pfützner[7]'in yapmış oldukları çalışma sonuçlarıyla uyuşmamaktadır. Ancak istifleme yüksekliğinin artmasına rağmen normal yöndeki yer değıştirmenin artmaması, artan yığılma faktörünün altpaketleri kısıtlaması olarak açıklanabilir. Bu durumda çeliğin yüksek elastisite modülü δ_z nin toplamını kısıtlamaktadır[8].

Şekil 3.35-c'de Çok Basamaklı Bindirmede(ÇBB, N:4) B_z 'nin yüksek değerleriyle ilişkili olarak δ_z 'nin değeri artış göstermiştir. Bu görünüm A-ağırlıklı gürültü azalışı ile çelişki

göstermektedir. Ancak verilen spektrumda δ_z genliğinin artması durumunda harmonik sabit n'in yüksek oranda düştüğü görülmektedir. Harmonik sabit n'in ortalamasının ÇBB için 27 ölçüm noktasında düşük değerde olduğu görülmektedir. Sırasıyla nTBB;nÇBB 1 T için %24:%10 ve 1.8 T için %33:%25 tir. Yükselen değerler sırasıyla Nokta 11 %26:%5 ve nokta 20 %38:%17 yüksek Bz ye göre köşe alanlardaki sonuçtur(her ikisi de 1.6 T için). ÇBB harmoniklerin yüksek oranda düşmesine ve dolayısıyla A-ağırlıklı gürültü seviyesinin düşmesine sebep olur[8].



Şekil 3.35 Tek basamaklı ve çok basamaklı bindirme için yapılmış ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması (a) Paralel yönde, (b) Enine yönde, (c) Tabaka yüzeyine dik yönde[8]



Şekil 3.36 B:1.6 T için temel ve harmonik bileşen spektrumları (a) 11. ölçüm noktası, (b) 20. ölçüm noktası[8]

Çizelge 3.9 Çekirdeğin bölünmüş alanlarındaki mıknatıssal büzülme[13]

Alan	ε	$\lambda_{r.d.,pp}(\frac{\mu m}{m})$	$r_{r.d.}$	$r_{t.d.}$
0	0 ^b	0,75	1	
1	0,04	0,95	1,27	
2	0,05	0,96	1,29	
3	0,03	0,89	1,20	
4	0,06	1,02	1,37	0,69
5	0,07	1,09	1,47	0,74
6	0,09	1,18	1,58	
7	0,12	1,34	1,80	0,90
8	0,06	1,05	1,41	
9	0,05	1,01	1,35	0,68
10	0,03	0,89	1,20	0,60
11	0,08	1,11	1,49	0,75

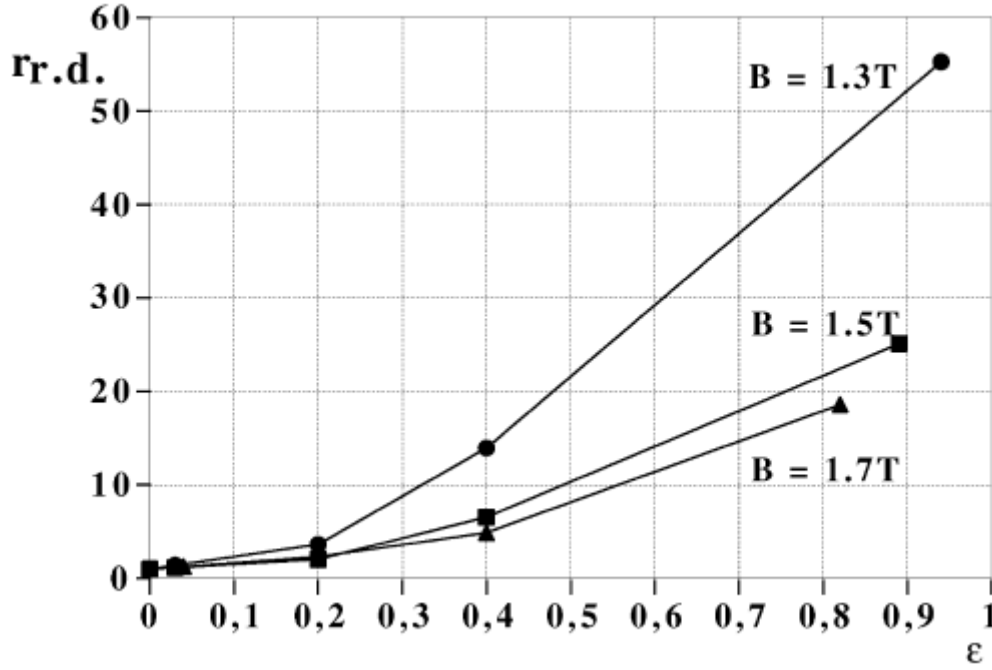
ε , 116 noktada ölçülmüş B desenlerinden elde edilmiş olan ortalama genlik oranı, $\lambda_{r.d.,pp}$, RSS simülasyonundan elde edilmiş olan ortalama tepeden tepeye mıknatıssal büzülme değeri, $r_{r.d.}$ ve $r_{t.d.}$ mıknatıssal büzülme ile ilişkili olan mıknatıssal büzülme değerleridir[13].

Çizelgeden görüldüğü üzere bölgesel genlik oranı 0,03 ile 0,12 arasında değişmiştir. Alan 7’de mıknatıssal büzülme en yüksek değerini görmüş ve $r_{r.d.}$ 1,8 değerine gelmiştir. Bunun anlamı mıknatıssal büzülme optimum koşullara göre %80 artış göstermiştir. Anlaşıldığı gibi ε , $\lambda_{r.d.,pp}$ ve r değerleri arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Bu ilişki denklem 3.10 ile ifade edilmektedir.

$$r_{r.d.}(\varepsilon) = \lambda_{r.d.,pp}(\varepsilon)/\lambda_{r.d.,pp}(\varepsilon:0) \quad (3.10)$$

Tepeden tepeye mıknatıssal büzülmeyi ifade eden $\lambda_{r.d.,pp}$ ise denklem 3.11 ile ifade edilmektedir.

$$\lambda_{r.d.,pp} = |\lambda_{r.d.,B \text{ in } td(\text{enine yönde})} - \lambda_{r.d.,B \text{ in } rd(\text{dönel yönde})}| \quad (3.11)$$



Şekil 3.38 Üç farklı $B_{r.d.}$ için ε 'na bağlı fonksiyon olan r faktörü[13]

Bölgesel genlik oranı arttıkça mıknatıssal büzülme ile ilişkili olan r faktörünün artış gösterdiği şekilden görülmektedir. Herhangi bir eksenindeki ortalama r faktörünü tahmin edebilmek amacıyla aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$r_{ortalama} = \frac{\sum_i l_i x r_{r.d.,i} + \sum_j l_j x r_{r.d.,j}}{\sum_i l_i + \sum_j l_j} \quad (3.12)$$

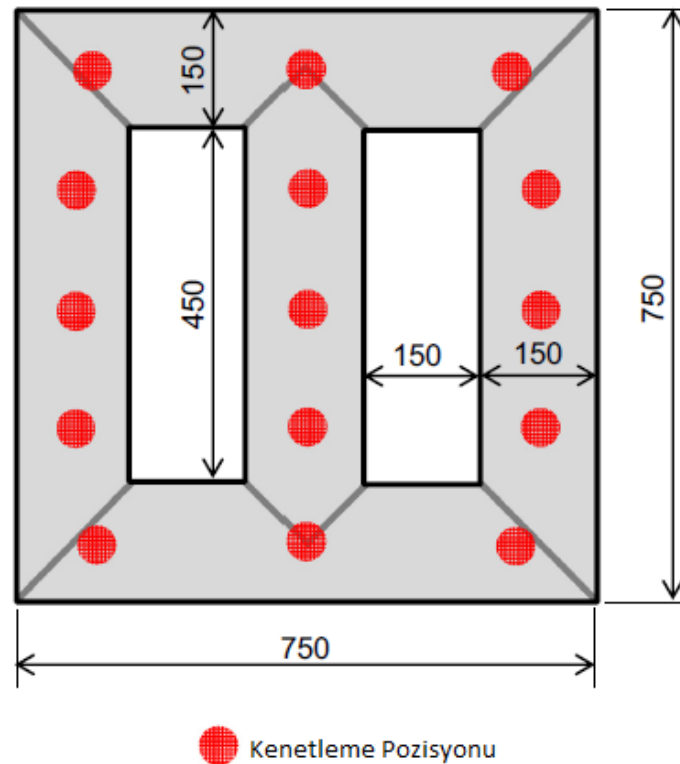
Yapılmış ölçümler sonucunda elde edilen veriler ile Y eksenindeki ortalama r faktörünün hesaplaması aşağıda verilmiştir.

$$r_y = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)(r_{t.d.,4} + r_{r.d.,5} + r_{r.d.,9} + r_{t.d.,10}) + D(r_{r.d.,6} + r_{r.d.,7} + r_{r.d.,8})}{5D} = 1,37$$

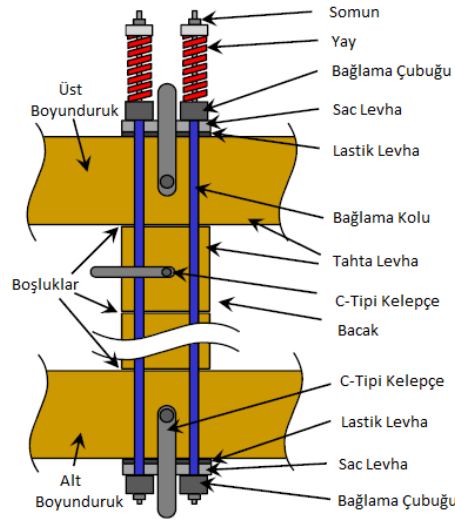
Bulunan sonuç ile Y ekseninde meydana gelen mıknatıssal büzülme optimum koşullara göre %37 daha fazla olmuştur. Deneyde kullanılan çekirdek için aynı hesaplama

metodu kullanılarak L1,L2 ve L3 bacaklarının r faktörü sırasıyla %13, %19 ve %6 çıkmıştır. Bu sonuca göre de Y(boyunduruk) ekseninde gerçekleşen mıknatıssal büzülme miktarı bacaklara göre çok daha fazla çıkmıştır.

Mizokami ve Kurosaki[9] basma gerilimi ile gürültü arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Araştırmalarında basma gerilimi değişimiyle mıknatıssal büzülme varyasyonları ölçülmüş ve modellenen çekirdekte meydana gelen gürültü seviyeleri gözlenmiştir. Ölçümler Şekil 3.39’da boyutları ve kenetleme pozisyonları verilen 3 faz, 3 bacaklı ve 6 basamak bindirmeli çekirdek üzerinde yapılmıştır. Çekirdek materyalinde iki farklı 0.30 mm kalınlığında ve istifleme yüksekliği 41 mm olan tanecik yönlendirmeli silisli sac kullanılmıştır. Çekirdeği sıkıştırmak amacıyla Şekil 3.40’da verildiği gibi çekirdeğin her iki tarafına tahta tabakalar yerleştirilmiş ve c tipi kelepçeler kullanılmıştır. Çekirdek üzerinde meydana gelen mıknatıssal büzülmeler lazer titreşim metre marifetiyle ölçülmüştür. 50 Hz. de 1.3 ve 1.7 T indüksiyon uygulanmış olup basma gerilimi 0 ile 3 MPa arasında 0.5 MPa aralıklar ile değiştirilerek meydana gelen değişiklikler ölçülmüştür[9].

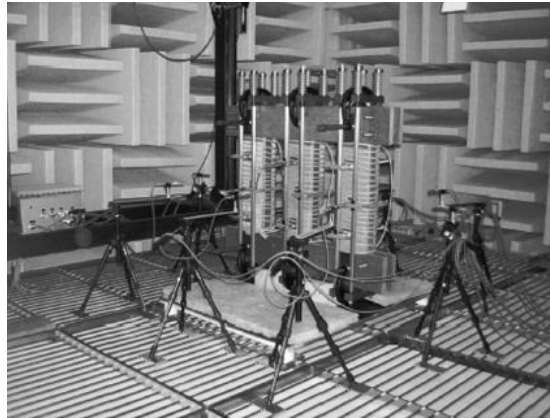


Şekil 3.39 Model çekirdek boyutları ve c-tipi kelepçelerin kenetleme pozisyonları[9]



Şekil 3.40 Model çekirdeğin bacağına sıkıştırmak için tesis edilmiş mekanizmanın şematik gösterimi[9]

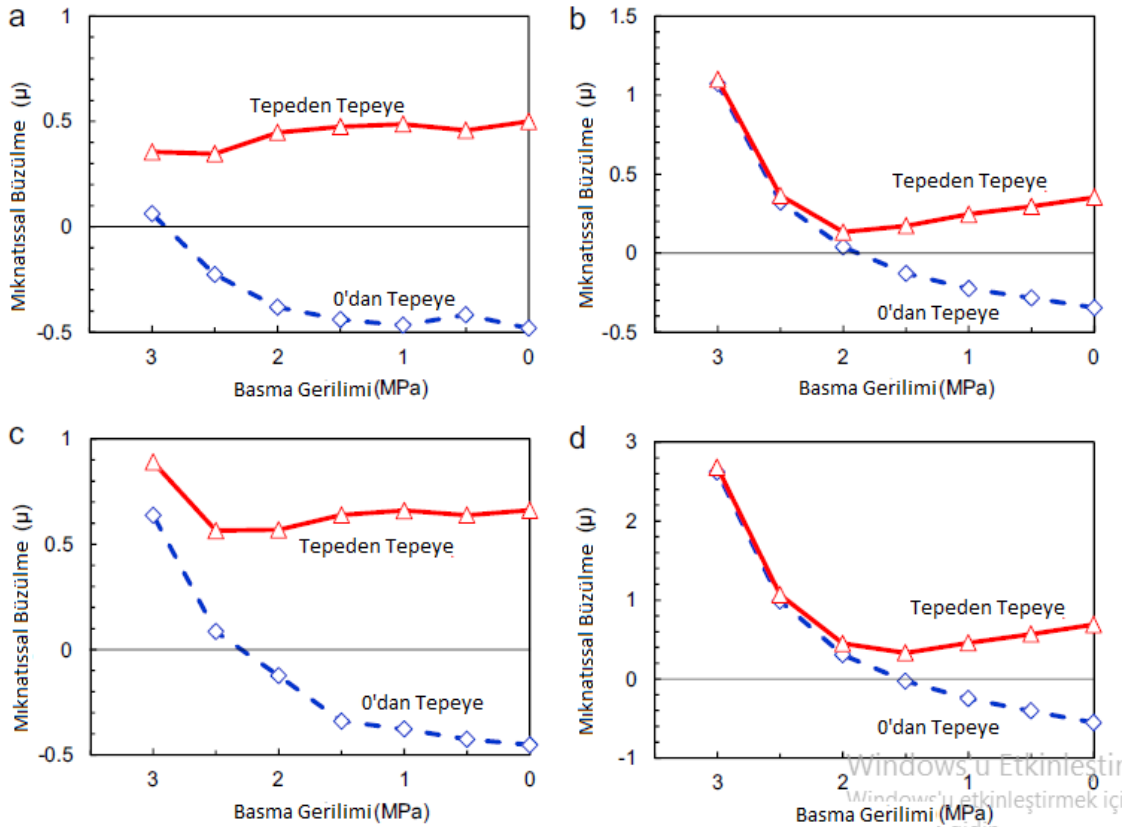
Modellenmiş çekirdekte meydana gelen gürültü ölçümleri IEC standartları gereğince çekirdek yüksekliğinin yarısı kadar yükseklikte ve çekirdek yüzeyinden 30 cm uzaklıkta yerleştirilmiş mikrofona aracılığıyla yapılmıştır. Mikrofondan gelen bilgiler otomatik olarak bilgisayara transfer edilmektedir. Bilgisayar gelen verilerin ortalamasını alarak kaydetmektedir. Ölçüm prosedürüne göre ilk olarak Şekil 3.41’de verilen arka plan gürültüsü ölçülmüş ve çekirdek mıknatıssızlaştırılmıştır. Sonra 50 Hz frekansta 1.3, 1.5 ve 1.7 T akı yoğunluklarında gürültü seviyesi ölçülmüştür. Daha sonra da basma gerilimi değiştirilerek gerekli ölçümler tekrar yapılmış ve neticede basma geriliminin gürültü üzerindeki etkisi tespit edilmiştir[9].



Şekil 3.41 Yankısız odaya kurulan çekirdek ve mikrofona[9]

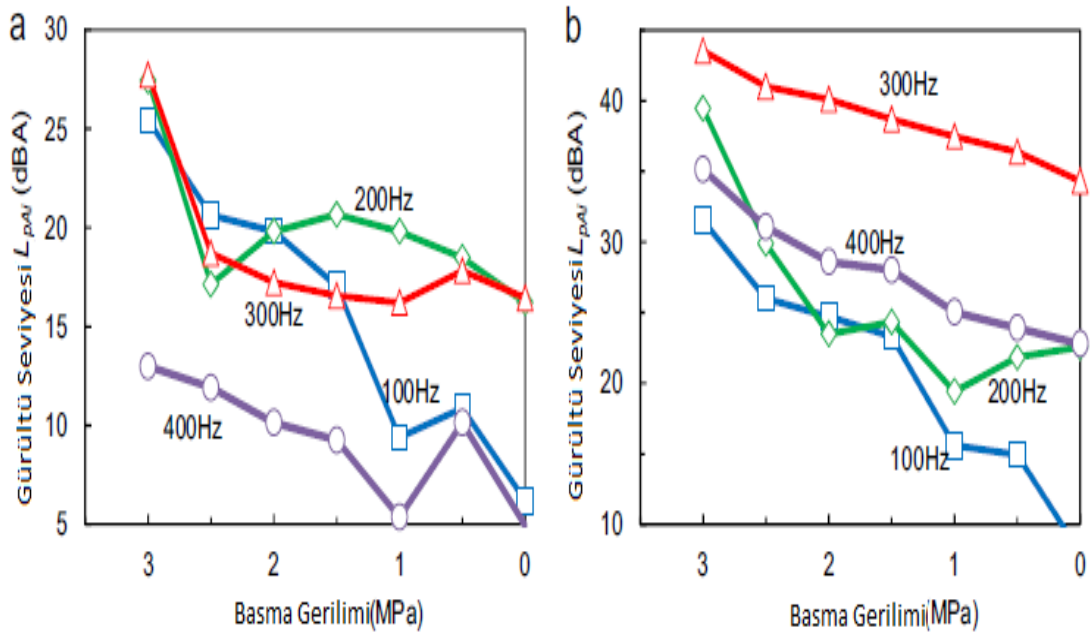
Çekirdekte kullanılan saclardan biri yüksek geçirgenliğe sahip tanecik yönlendirmeli silisli sac HGO’dur. Diğer ise gürültü seviyesi HGO’ya göre fazla çıktığı bilinen

geleneksel silisli sac CGO'dur. Miknatıssal büzölme değerleri sıfırdan tepeye ve tepeden tepeye değerler ile hesaplanmıştır. Sıfırdan tepeye miknatıssal büzölme, 0 indüksiyondan maksimum indüksiyona kadar olan yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Tepeden tepeye miknatıssal büzölme ise miknatıssal büzölme dalga formunun maksimum büyüklüğü ifade etmektedir. Ölçüm sonuçları grafiksel olarak Şekil 3.42'de gösterilmektedir. Sıfırdan tepeye miknatıssal büzölme her iki materyalde de düşük basma gerilimi olması durumunda negatif değerlerdedir. Basma geriliminin artış göstermesi ile sıfırdan tepeye miknatıssal büzölme pozitif değerlere çıkmaktadır. Tepeden tepeye miknatıssal büzölme HGO materyalinde 2.5 MPa'ya kadar pek değişmemiştir. Sadece 1.7 T indüksiyonda 3MPa basma geriliminde yükselme göstermiştir. CGO değerleri ise 2 veya 1.5 MPa'ya kadar azalmış ve daha sonrasında artış göstermiştir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere CGO materyalinin basma gerilimi hassasiyeti HGO materyaline göre daha yüksek çıkmıştır[9].

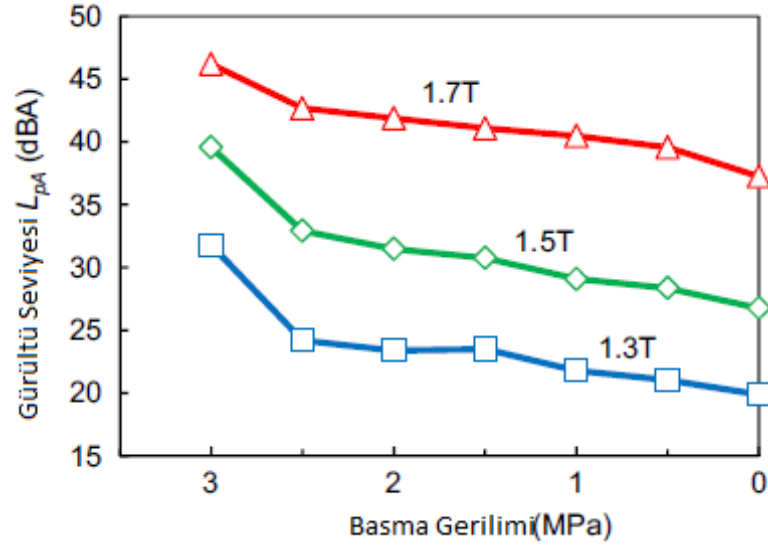


Şekil 3.42 Basma gerilimi ile tepeden tepeye ve sıfırdan tepeye miknatıssal büzölmeler arasındaki ilişki a) 1.3 T indüksiyonda HGO materyali. b) 1.3 T indüksiyonda CGO materyali. c) 1.7 T indüksiyonda HGO materyali. d) 1.7 T indüksiyonda CGO materyali[9].

HGO materyali ile tesis edilmiş çekirdeğin uygulanan indüksiyon seviyelerinde basma gerilimi değişimi ile gürültü arasındaki ilişki Şekil 3.44'te gösterilmektedir. 2.5 MPa basma gerilimine kadar yaklaşık olarak lineer artış gösteren ses seviyesi 2.5 MPa'dan sonra daha fazla yükselmektedir. Şekil 3.43'de uygulanan 1.3 ve 1.7 T indüksiyonda basma gerilimi ile harmonik bileşenlerde meydana gelen gürültü seviyeleri gösterilmektedir. 1.3 T indüksiyon uygulandığı durumda genel olarak basma gerilimi yükseldikçe harmonik bileşenlerin gürültü seviyeleri de artış göstermiştir. 100 Hz bileşeni 0 MPa'da ihmal edilebilecek kadar düşük seviyede iken 2 MPa'nın üzerinde önemli değerlere ulaşmaktadır. Şekil 3.44'te görüldüğü gibi genel gürültü seviyesi 2.5-3 MPa arasında hızla yükselmektedir. Bu yükselişin sebebi 100, 200 ve 300 Hz harmonik bileşenlerdeki artıştır. 1.7T indüksiyon uygulandığı durumda 300 Hz bileşeni en yüksek seviyededir. 200 Hz bileşeni ise 2 MPa basma geriliminin üzerinde önemli mertebelere ulaşmaktadır[9].

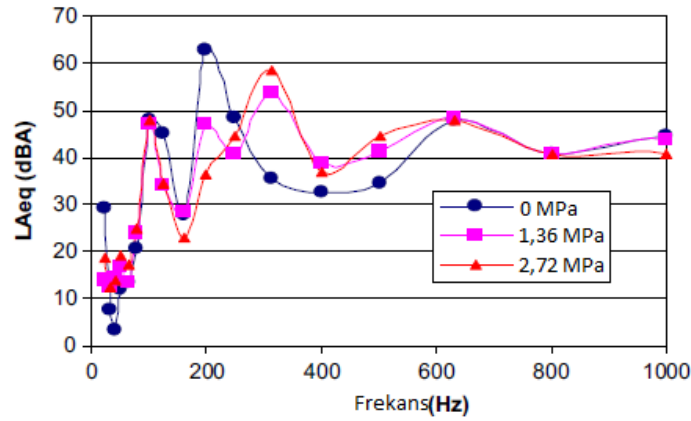


Şekil 3.43 Çekirdeğin bacaklarına uygulanan basma gerilimi ile gürültünün harmonik bileşenleri arasındaki ilişki, a) 1.3T b) 1.7T [9]



Şekil 3.44 Model çekirdek bacağındaki basma gerilimi ile farklı indüksiyonlarda meydana gelen gürültü arasındaki ilişki[9]

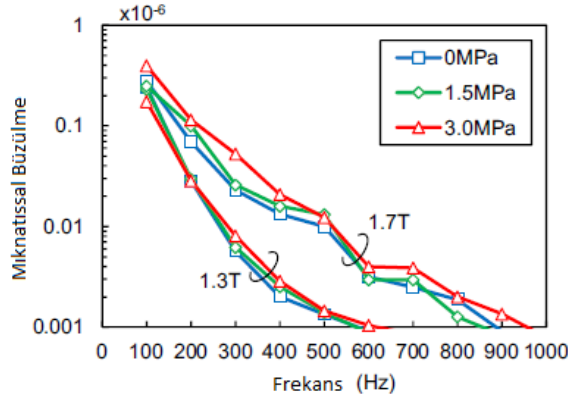
Snell[12] basma geriliminin gürültü seviyesine etkisi hususunda deneysel gözlemler yaparak Mizokami'nin sonuçlarını doğrular nitelikte sonuçlara ulaşmıştır. Ölçümler 27M3 sınıfı CGO materyalinden imal edilmiş olan beş basamak bindirmeli çekirdek üzerinde yapılmıştır. 1,7 T indüksiyon altında 0, 1,36 ve 2,72MPa basma gerilimi uygulanmış olup ses basınç seviyesi sırasıyla 56, 56,2 ve 59 dBA çıkmıştır.



Şekil 3.45 Sıkma yükünün etkisi[12]

HGO materyalinin mıknatıssal büzülmesi ile ilgili olan Şekil 3.42 a'da 1.3 T indüksiyonda basma geriliminin artış göstermesi durumunda mıknatıssal büzülmenin yavaşça azaldığı görülmektedir. Aynı şeklin c şikkında ise 1.7 T indüksiyon 2.5-3 MPa basma gerilimi uygulanması durumunda mıknatıssal büzülme artış göstermektedir. Bu davranışın

aksine Şekil 3.44'te görüldüğü üzere 1.3 T ve 1.7 T'nin her ikisinde de basma gerilimi artışıyla gürültü seviyesi artış göstermektedir. Bu durumun anlamı gürültü seviyesinin davranışı ile mıknatıssal büzülme arasında net bir ilişki olmadığıdır[9].



Şekil 3.46 1.3T ve 1.7 T'de basma gerilimleri ile mıknatıssal büzülmenin harmonik bileşenleri [9]

Şekil 3.46'da birkaç basma geriliminde mıknatıssal büzülme spektrumları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere 100 Hz bileşeni tüm durumlar için en yüksek değerdedir ve bu durum tepeden tepeye mıknatıssal büzülmede 100 Hz bileşeninin baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 3.43'de verilen spekturumlara göre 100 Hz bileşeni gürültü seviyesi üzerinde baskın bileşen değildir. Yapılan tespite binaen gürültü ile tepeden tepeye mıknatıssal büzülme arasındaki tutarsızlığın sebebi gürültü ile mıknatıssal büzülme üzerinde baskın olan bileşenlerin farklılık göstermesidir. Mıknatıssal büzülmeyi gürültü cinsinden ifade etmek amacıyla yapılan araştırmalar neticesinde aşağıdaki eşitlik çıkartılmıştır[9].

$$L_{VA} = 20 \log_{10} \left\{ pc \sqrt{\sum_i \left(\frac{2\pi f_i \lambda_i}{\sqrt{2} a_i} \right)^2} / P_{e0} \right\} \quad (3.13)$$

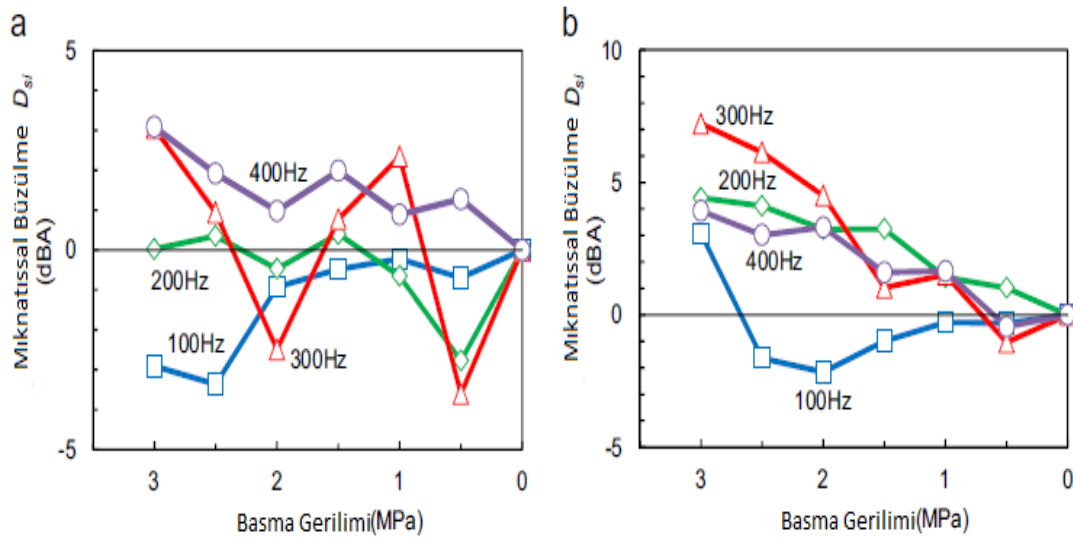
L_{VA} A ağırlıklı mıknatıssal büzülme hızı seviyesini(dBA), pc özel akustik direncini(N s/m³), f_i mıknatıssal büzülmenin i inci harmonikteki frekansını(Hz), λ_i mıknatıssal büzülmenin i inci harmonikteki genliğini, a_i f_i frekansında A ağırlıklı katsayısı ve P_{e0} minimum akustik ses basıncını ifade etmektedir[9].

Akustik teoride ses basıncı, hava moleküllerinin titreşim hızıyla orantılıdır. Mıknatıssal büzülmenin titreşiminin kayıpsız havada üretildiğini farz edersek, mıknatıssal büzülme genliği ses basıncına çevrilebilir ve bunu açıklayan metot Eşitlik 3.13'de verilmiştir. İlgili

eşitlikte belirli gerilim ve gerilimsiz(referans) durumlar arasındaki mıknatıssal büzülme farkı hesaplanmıştır. Her bir harmoniğin gürültüye etkisi Şekil 3.43’de görüldüğü üzere birbirine benzemez. Bu nedenle mıknatıssal büzülme ve gürültü arasındaki ilişki harmonik bileşenler üzerinden araştırılabilir. Bu düşünceye binaen aşağıdaki denklem verilmiştir[9].

$$D_{si} = 20 \log_{10} \lambda_{si} - 20 \log_{10} \lambda_{0i} \quad (3.14)$$

D_{si} i’inci harmonik (dBA) için 0 dan S MPa ya kadar basma gerilimi değişimiyle meydana gelen mıknatıssal büzülme hızı seviyesinin artışıdır. λ_{si} i’inci harmonik(dBA) için S MPa’da mıknatıssal büzülme genliğidir ve λ_{0i} i’inci harmonik için 0 MPa’da mıknatıssal büzülme genliğidir. Eşitlik 3.14’deki diferansiyel ve logaritmik hesaplamalar eşitlik 3.13’deki ortak değişkenler ve sabitler elimine edilerek elde edilir. Çekirdekdeki havadan meydana gelen ses yayılım faktörü ve ses difüzyonu dikkate alınmalıdır. Ancak aynı zamanda bunlar da Eşitlik 3.14’de elimine edilmiştir[9].



Şekil 3.47 Basma gerilimi ile mıknatıssal büzülmenin harmonik bileşenleri arasındaki ilişki a) 1.3T b) 1.7T [9].

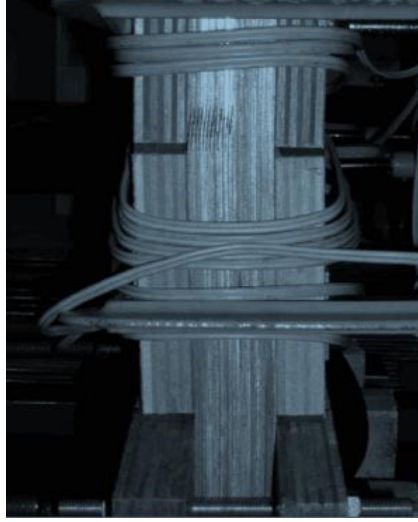
Ölçülmüş mıknatıssal büzülme değerleri eşitlik 3.14’de yerine koyulursa Şekil 3.47’deki grafikler çıkartılabilmektedir. Araştırmalar 400 Hz’e kadar olan harmonik bileşenler üzerinde yapılmıştır. Çünkü gürültüye etki eden asıl harmoniklerin bunlar olduğu ifade edilmektedir. Şekil 3.47 ile Şekil 3.43 karşılaştırılarak mıknatıssal büzülme ile gürültü arasındaki ilişki incelenmektedir. Yapılan incelemede ilk olarak 100 Hz bileşeni

tartışılmıştır. 2 veya 2.5 MPa'ya kadar artış gösteren basma gerilimine karşılık mıknatıssal büzülme azalmış olup 2.5 MPa'dan sonra artış göstermiştir. Bu eğilim Şekil 3.42 a ve c'de grafiği verilen HGO materyalinin tepeden tepeye mıknatıssal büzülme trendiyle oldukça yakındır. Aynı karşılaştırma gürültü karakteristiği için uygulandığında gürültünün 100 Hz bileşeninde 1.3 ve 1.7 T indüksiyonlarının her ikisinde de 0 MPa'da temel olarak yüksektir. Bu sonuca göre 100 Hz bileşeninde gürültü ile mıknatıssal büzülme arasında ilişki yoktur. Aynı karşılaştırmalar diğer harmonik bileşenler için de yapılırsa, gürültü mıknatıssal büzülmeyle 1.3 ve 1.7 T indüksiyonda 400 Hz bileşende ve 1.7 T indüksiyonda 300 Hz bileşende ilişkili görülmektedir. İlgili ilişkiler dB/MPa cinsinden Çizelge 3.10'da verilmiştir[9].

Çizelge 3.10 Basma gerilimi altında mıknatıssal büzülme ve gürültünün harmonik bileşenlerinin artış eğimi(dB/MPa) [9]

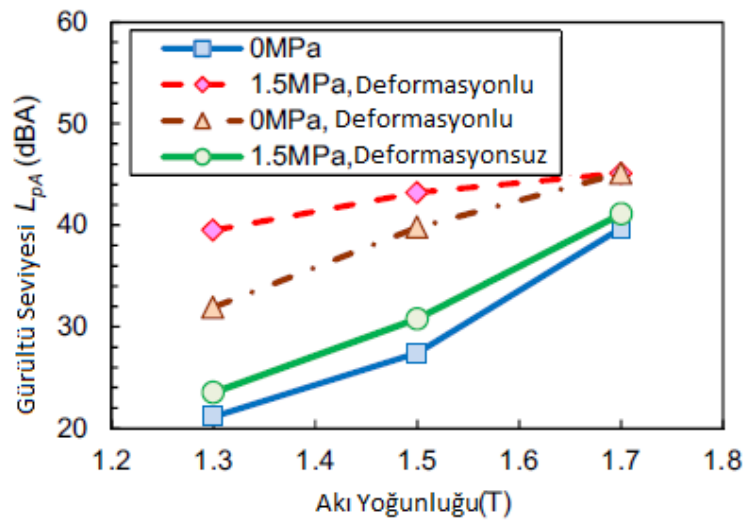
Akı Yoğunluğu	1.3 T	1.7 T	
Harmonik Bileşen Frekansı	400 Hz.	300 Hz.	400 Hz.
Gürültü Artışının Eğimi	2,32	2,82	3,92
Mıknatıssal Büzülme Artışının Eğimi	0,76	2,78	1,45
Fark	1,56	0,04	2,47

Basma gerilimi sebebiyle çekirdekte meydana gelen deformasyonun gürültü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla deney düzeneği kurulmuş ve 1.5 MPa'ya kadar basma gerilimi uygulanmıştır. Şekil 3.48'de görüldüğü üzere uygulanan gerilim neticesinde bacakta deformasyon meydana gelmiştir. Bilindiği üzere çekirdekte meydana gelen deformasyonlar sebebiyle boşluklar oluşmaktadır. Bu boşluklar tabaka içerisinde manyetik akı oluşumuna ve dolayısıyla titreşime sebebiyet vermektedir. Meydana gelen titreşim de gürültü seviyesinin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.48 Basma gerilimi sebebiyle deforme olan bacağın görünümü[9]

Şekil 3.48’de oluşan deformasyonun bahsettiğimiz gürültü seviyesine nasıl bir etki yaptığını öğrenebilmek amacıyla gürültü ölçümleri yapılmıştır. İlk olarak basma gerilimi uygulanmamış çekirdekteki farklı akı yoğunluklarının meydana gelen gürültü seviyeleri ölçülmüş olup sonra basma gerilimi uygulanmış çekirdekteki farklı akı yoğunluklarının meydana getirdiği gürültü seviyeleri ölçülmüştür. Şekil 3.49’da verilen ölçüm sonuçlarına göre deformasyon, gürültü seviyesinde 10 dBA ve üzeri artışa sebep olmuştur ve bu durum deformasyonsuz 1.5 MPa gerilim sebebiyle meydana gelen artışa göre oldukça yüksektir. Deformasyonlu çekirdekte 0 MPa basma geriliminde dahi gürültü seviyesinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

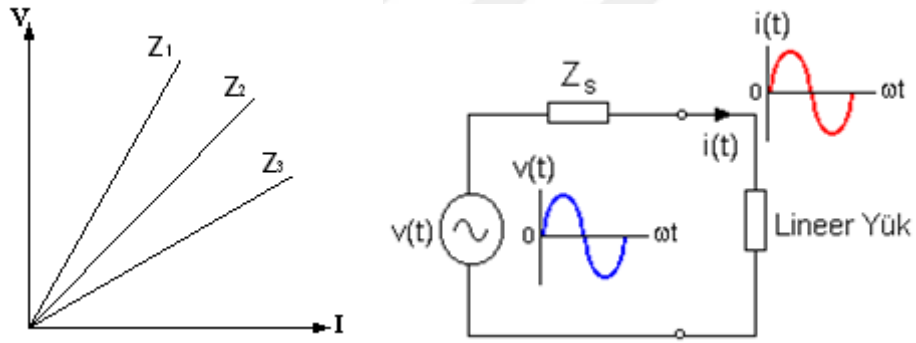


Şekil 3.49 Model çekirdeğin uygulanan basma gerilimiyle meydana gelen gürültü seviyeleri(deformasyondan önce ve sonra)[9]

3.2 Yük Gürültüleri

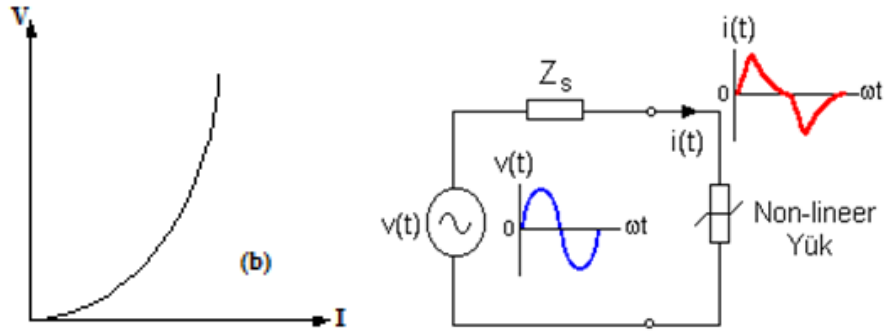
Transformatörlerde meydana gelen gürültülerin ana sebebi çekirdek gürültüleri olarak görülmesine karşın, son zamanlarda yapılan araştırmalar ve yatırımlar ile çekirdek gürültülerinde azalmalar meydana getirilmiştir. Önceleri etkisi çekirdek gürültüsüne göre daha az olan yk gürültüleri ise son zamanlarda teknolojik gelişmeler neticesinde baskın gürültü kaynağı olmaya başlamıştır. Rüzgar türbinleri ve güneş enerji santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının artış göstermesi, güç elektroniği teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanması yk gürültüleri üzerinde artışa sebebiyet vermiştir.

Yük gürültüleri transformatörün yüklü olması durumunda meydana gelen gürültü çeşididir. Yük gürültüleri transformatör tank duvarları üzerine çarpan sızıntı akıları sebebiyle oluşan manyetik çekme kuvvetlerinin yanı sıra sargı akımları sebebiyle sargılarda meydana gelen sızıntı akıları etkileşimiyle üretilmektedir[18].

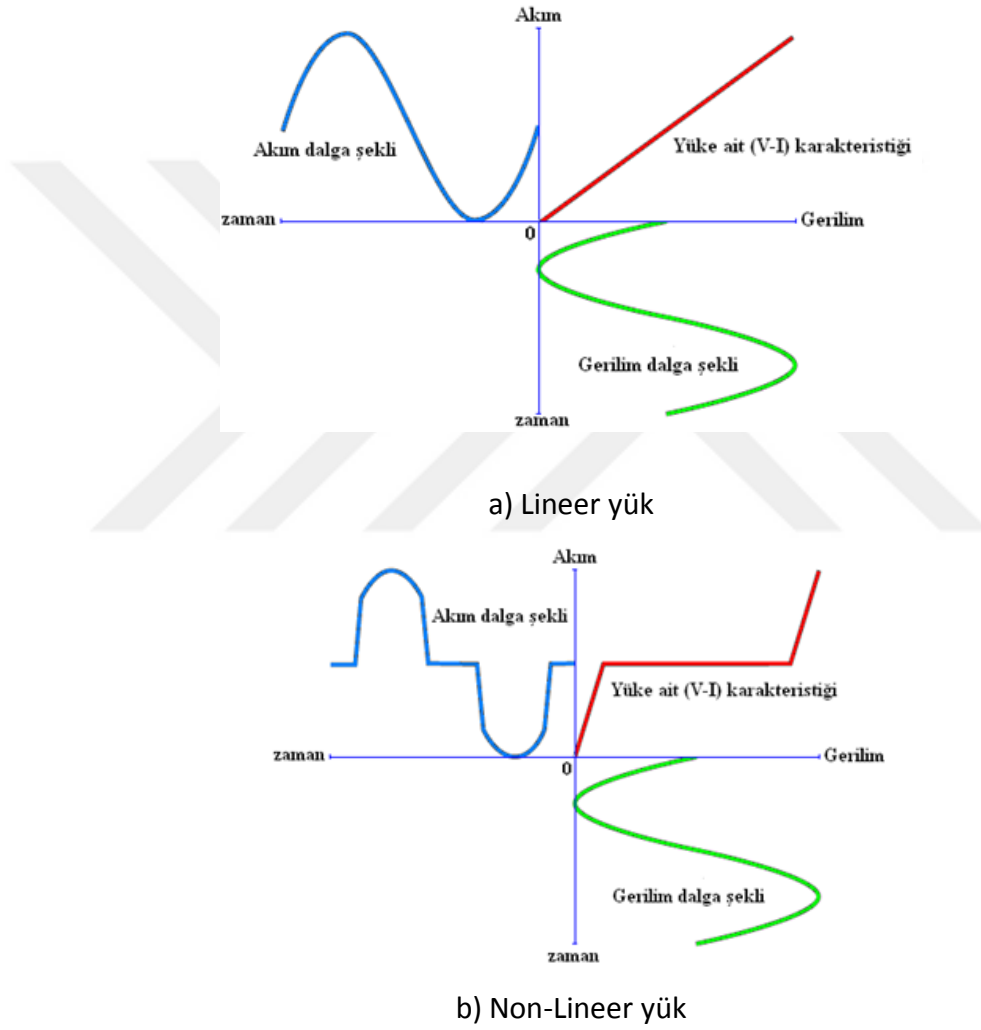


şekil 3.50 Lineer bir yükün akım gerilim karakteriştiği[33]

Harmonik bulunmayan bir yükte sinüzoidal dalgada bozulmalar meydana gelmediği için yukarıdaki şekilden görüldüğü üzere akım gerilim karakteriştiği düzgündür. Ancak bahsedilen teknolojik gelişmeler neticesinde yükün non-lineer özellik göstermeye başlaması ile sinüzoidal dalga şekilleri üzerinde harmonik kaynaklı bozulmalar meydana gelmiştir.



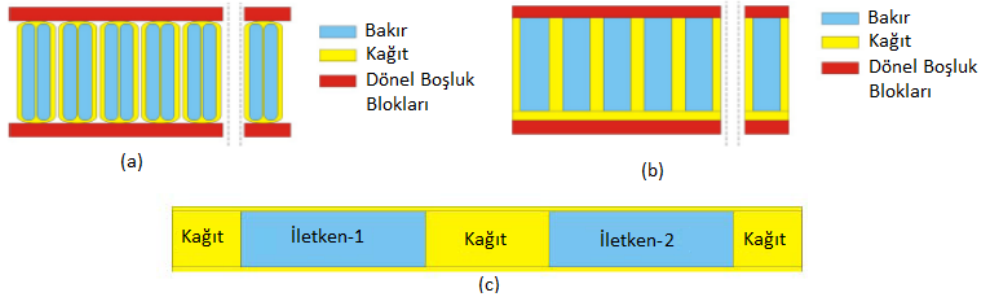
Şekil 3.51 Non-Lineer yükün akım gerilim karakteristiği ve dalga şekilleri[33]



Şekil 3.52 Lineer ve non-lineer yüklerin akım ve gerilim karakteristikleri ile dalga şekilleri[33]

Peter vd. [16]'da yapmış oldukları çalışmada güç transformatörlerinde meydana gelen yük gürültülerini üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanarak oluşturdukları simülasyonlar ile araştırmışlardır. İncelemeye konu olan güç transformatörü benzer sargı düzenine sahip olan tipik 3 fazlı transformatördür. Her fazda, yüksek gerilim(YG)

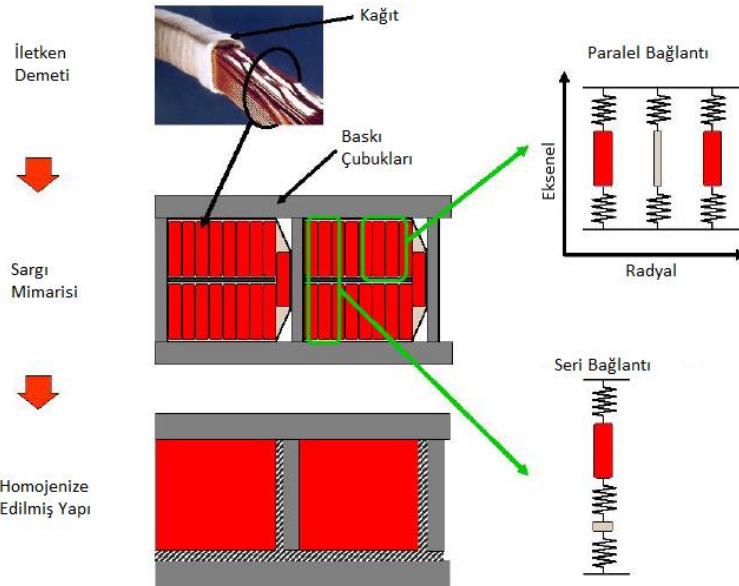
ve alçak gerilim(AG) olmak üzere en az iki adet sargı bulunmaktadır. AG sargıları dilimli tip sargı ve YG sargıları silindirik tip sargı metotları kullanılarak sarılmıştır.



Şekil 3.53 a) Yüksek gerilim bobini b) Basitleştirilmiş YG bobini c) 22 iletken kombinasyonundan 2 iletken modeli[16]

Yukarıdaki şekilde 22 iletkenlerden meydana gelen gerçek YG sargıları görülmektedir(a). İki demetten oluşan her iletken FEM simülasyonunda bir bakır demet olarak kombine edilmiştir(b). 22 iletkenli modelin boyutunu azaltmak amacıyla bir, iki veya üç iletkene birleştirilmiştir(c).

Ertl ve Probst [17]'de yapmış oldukları çalışmada güç transformatöründe bulunan sargıların düzenine ait bilgiler paylaşmışlardır.



Şekil 3.54 Sonlu eleman analizi için iletkenlerin homojenize edilmesi[17]

Manyeto mekanik problemin çözülebilmesi amacıyla sistemin boyutunun indirgenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla sargıların yapısı, benzer boyut ve

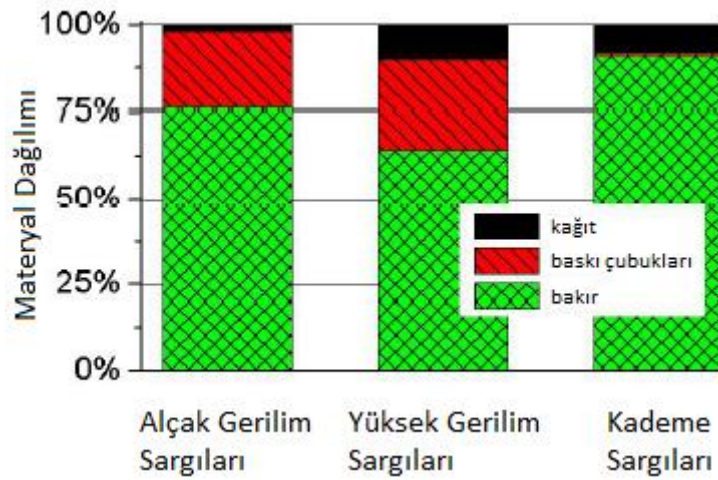
şekildeki homojenize edilmiş üç boyutlu modele indirgenmiştir. Homojenize etme işlemi baskı çubukları, yalıtım kağıdı ve çekirdek bakırı hacimleri üzerine uygulanmıştır. Birleştirilmiş bu materyallerin mekanik davranışı gerçeğe uygun olmalıdır. Yukarıdaki şekilde görülen kaynağın paralel bağlantısında toplam sertlik üzerinde en sert kaynak baskındır. Dolayısıyla baskı çubukları ve yalıtım kağıdından daha sert olan bakırın sertliği paralel bağlantıdaki sertlik kaynağı üzerinde daha baskındır. İlgili sertlik aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir[17].

$$k_{paralel} = \sum_i k_i \approx k_{cu} \quad (3.15)$$

Eksenel yöndeki toplam sertlik ise Şekil 56'da seri bağlantı şeklinde gösterilmektedir. Seri bağlantıda titreşim sisteminin tüm sertliği üzerinde en önemli düşürücü kaynak baskındır. İlgili ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\frac{1}{k_{seri}} = \sum_i \frac{1}{k_i} \quad (3.16)$$

Aşağıdaki şekilden de görüldüğü üzere güç transformatörünün sargı mimarisinde en esnek materyal yalıtım kağıdıdır. Sargı mimarisinde yalıtım kağıdının oranı oldukça düşük olmasına rağmen eksenel sertlik üzerinde en baskın materyaldir.

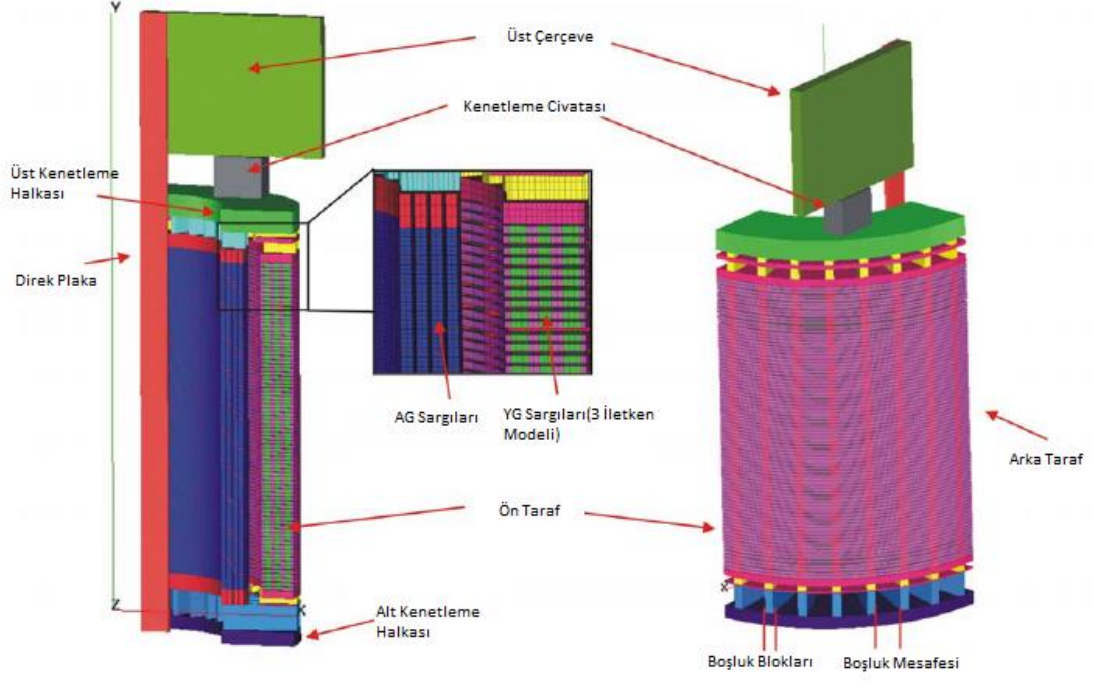


Şekil 3.55 Sargıların eksenel uzunluğunda bakır, çubuk ve kağıdın dağılımı[17]

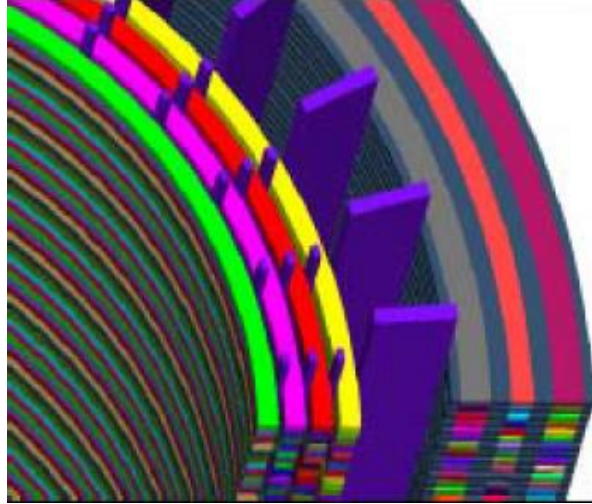
Homojenize edilmiş materyalin etkin sertliğini elde etmek için sargı mimarisinin eksenel, radyal ve teğetsel yöndeki titreşim davranışı sertlik kaynağıyla birlikte lineer elastik kaynaklar tarafından modellenenilmektedir. Yukarıda bahsedilen bu kaynak sertliği aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir.

$$k_i = \frac{E_i A_i}{h_i} \quad (3.17)$$

E_i , eş yönlü esneklik modülü, A_i , tüm eksenel boşlukların alanı ve h_i , sırasıyla bakır, çubuk veya yalıtım kağıdının yüksekliğidir.



Şekil 3.56 Transformatörün bir fazının çeyrek modeli[16]



Şekil 3.57 Sargılar arasındaki radyal uzaklık çubukları[16]

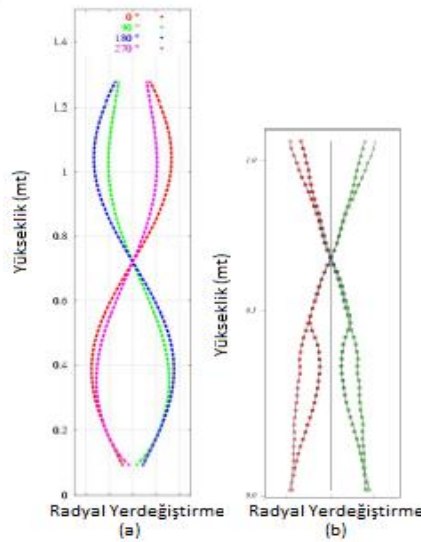
Peter vd. [16] tarafından incelenen transformatörün simülasyon modeli Şekil 3.56'da gösterilmiştir. Şekil 3.57'de ise sargılar arasındaki radyal mesafe çubukları gösterilmektedir. Çubuklar AG ve YG sargıları arasına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bu

ubukların simülasyon sonuçlarına etkisini incelemek amacıyla ubuklu ve çubuksuz modeller için yapılan ölçümün ve simülasyonun rezonant modu izelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Simülasyon ve ölçümün rezonant modu[16]

	Birinci Mod(Hz)	İkinci Mod(Hz)
lm	82	142
Radyal Mesafe ubuklarının Olmadığı Durum	82	133
Radyal Mesafe ubuklarının Olduğu Durum	87	--

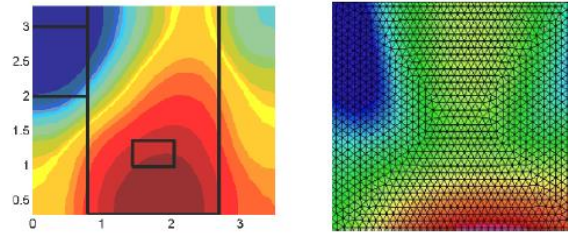
Grldğu üzere simülasyon üzerinde radyal mesafe çubuklarının kullanılması durumunda rezonant mod önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda çekirdekte bulunan bu çubuklar ihmal edilmiştir.



şekil 3.58 Silindirik sargıların radyal yerdeğiştirmesi a) Simülasyon b) lm [16]

İletkenlerdeki manyetik akı ve akımdan sargılar zerindeki Lorentz kuvvetleri hesaplanmıştır. şekil 3.58’de model transformatörün bir fazındaki dikey hattın radyal yer değiştirmesi verilmiştir. Bir metre üzerindeki yükseklikte kenetleme plakasındaki montaj aparatları sebebiyle ölçüm mümkün olmamıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları

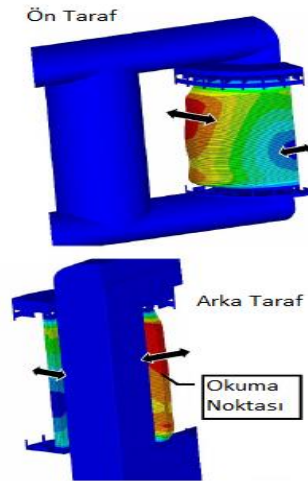
incelendiğinde benzer dikey pozisyonlarda benzer genlikler görülmektedir ve dolayısıyla simülasyon sonuçları güvenilir çıkmıştır.



Şekil 3.59 Transformatörün üst tarafındaki ses yoğunluk seviyesi(Sol Taraf: Ölçüm sonuçları, Sağ Taraf: Simülasyon sonuçları)[16]

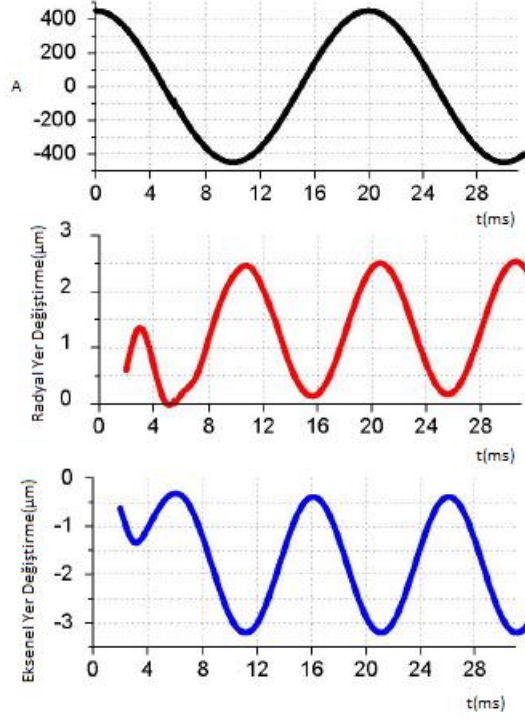
Yukarıdaki şekilde transformatörün üst tarafında meydana gelen ses seviyesinin simülasyon ve ölçüm sonuçları görülmektedir. Simülasyon sonuçları ölçüm sonuçlarına yakın değerlerde çıkmıştır. İki metot arasında yalnızca 3 dB farklılık bulunmaktadır[16].

Güç transformatöründe geçici olarak meydana gelen yüklenmelerin çekirdek üzerinde meydana getirdiği yer değiştirmeler de titreşime ve dolayısıyla gürültüye sebebiyet verebilmektedir. Yapılan simülasyonda ani akım, kısa devre ve yıldırım darbesi gibi transienler sonucunda bir fazda meydana gelen yer değiştirmeler aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.60 Dinamik lorentz kuvvetlerine göre alçak gerilim sargı mimarisindeki simetrik olmayan yer değiştirme[17]

Yukarıdaki şekilde okuma noktası olarak işaretlenen bölümden alınan radyal ve eksenel zamana bağlı yer değiştirme verileri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.61 Okuma noktası pozisyonunda alçak gerilim sargılarının zamana göre asimetric yer değiştirmesi[17]

Ertl ve Voss[15] yapmış oldukları çalışma ile yk akımlarının gürültü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bilindiği üzere transformatördeki yk gürültüleri sargılar üzerindeki elektromanyetik kuvvetler tarafından üretilmektedir. Bu kuvvetler yük akımının karesi ile oransaldır. Bu durum g frekansından daha yüksek frekanslarda sargı titreşimleri üretmektedir. Yük akımında bulunan harmonikler sebebiyle manyetik kuvvet ve gürültü bileşenlerinde oldukça kompleks frekans spektrumuna sahip harmonikler bulunmaktadır. Yük akımında meydana gelen harmonikler aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir[15].

$$I(t) = \sum_{i=1}^N \hat{I}_i \sin(w_i t + \varphi_i) \quad (3.18)$$

Sistem frekansı f_1 'de yk akım genliği $\hat{I}_1$ ve faz açısı φ_1 'dir. Harmonik olması durumunda geçici yük akımı $I(t)$ 'nin genel formu Eşitlik 3.18'de verilmiştir. N, toplam harmonik sayısı olarak ifade edilmektedir. Dolayısıyla ifadedeki hamonik bileşen i , açısal frekans $w_i = 2\pi f_i$, genlik $\hat{I}_i$ ve faz açısı φ_i 'dir.

Transformatörün yüklenme durumunda eş merkezli sargılar arasında manyetik sızıntı akısı artış göstermektedir. Amper yasasına göre transformatör sargılarında yüklenen

akım yük akımı yoğunluğuyla oransal olan manyetik alan üretir. H , manyetik alan kuvvet vektörü ve J akım yoğunluk vektörü olarak tanımlanmaktadır.

$$\nabla \times H = J \quad (3.19)$$

Transformatör sargıları yağ dolu veya hava ile temas halinde olan tank içerisinde bulunduğu için manyetik geçirgenlik sabiti $\mu_r \approx 1$ 'dir. Manyetik akı yoğunluk vektörü B , manyetik alan kuvvet vektörü ile aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi oransaldır. ifadedeki $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ manyetik sabit olarak tanımlanmaktadır.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (3.20)$$

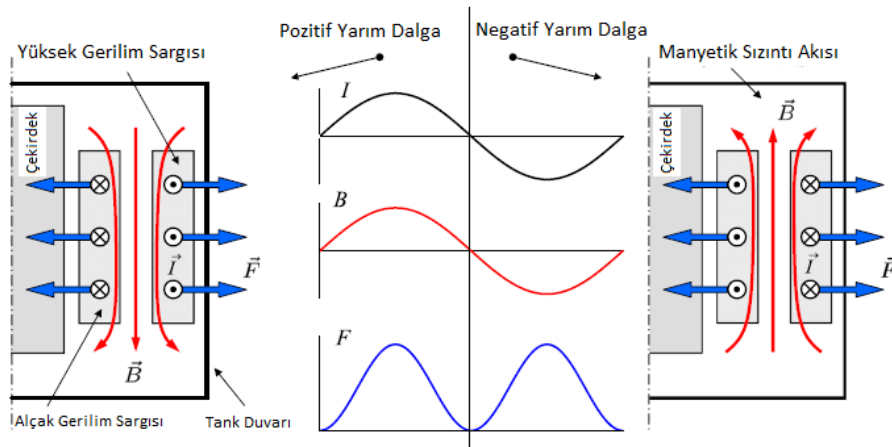
Bir sonraki sargının sızıntı akı genliği B 'yi yaklaşık olarak tahmin edebilmek için ise aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$B \approx \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (3.21)$$

N , sargıda bulunan sarım sayısını, l ise sargı uzunluğunu ifade etmektedir. Kuvvet yoğunluğu, manyetik akı yoğunluğu ve elektriksel akım yoğunluğuyla oransaldır.

$$F_m \approx I(t)^2 \quad (3.22)$$

Transformatörün yüklenmesiyle çekirdek, yüksek gerilim sargısı ve alçak gerilim sargısı üzerinde meydana gelen manyetik akı yoğunluk vektörü ve kuvvet yoğunluğunun pozitif ve negatif yarımlardaki davranışı Şekil 3.62'de görülmektedir.

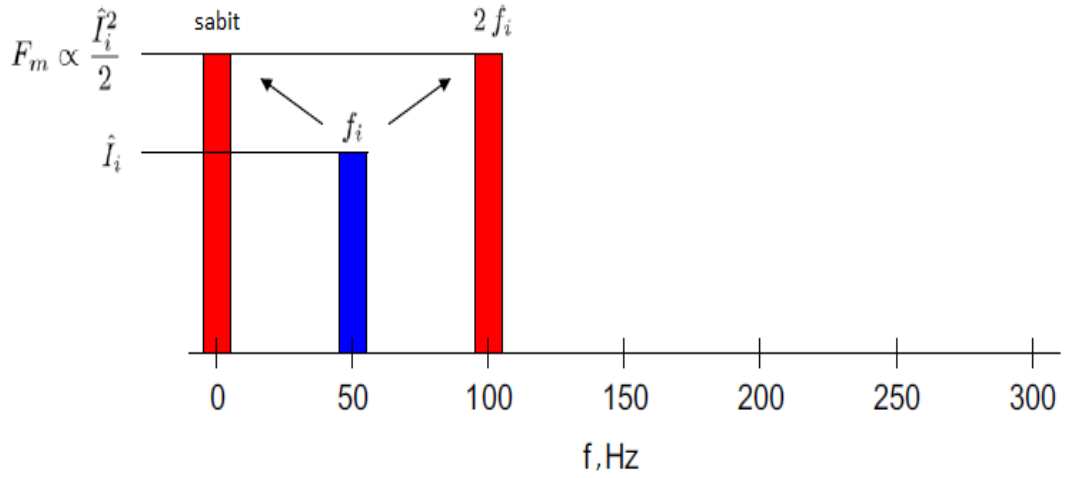


Şekil 3.62 Eş merkezli sargılar üzerindeki manyetik kuvvetler[15]

Eşitlik 3.22’de verilen ifadeye Eşitlik 3.18’in yerleştirilmesi ve trigonometrik işlemlerin yapılması neticesinde aşağıdaki ifade elde edilmiştir.

$$F_m \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \hat{I}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \hat{I}_i^2 \sin \left[2w_i t + 2\varphi_i - \frac{\pi}{2} \right] + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{I}_i \hat{I}_j \sin \left[(w_i - w_j)t + \varphi_i - \varphi_j + \frac{\pi}{2} \right] + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \hat{I}_i \hat{I}_j \sin \left[(w_i + w_j)t + \varphi_i + \varphi_j - \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.23)$$

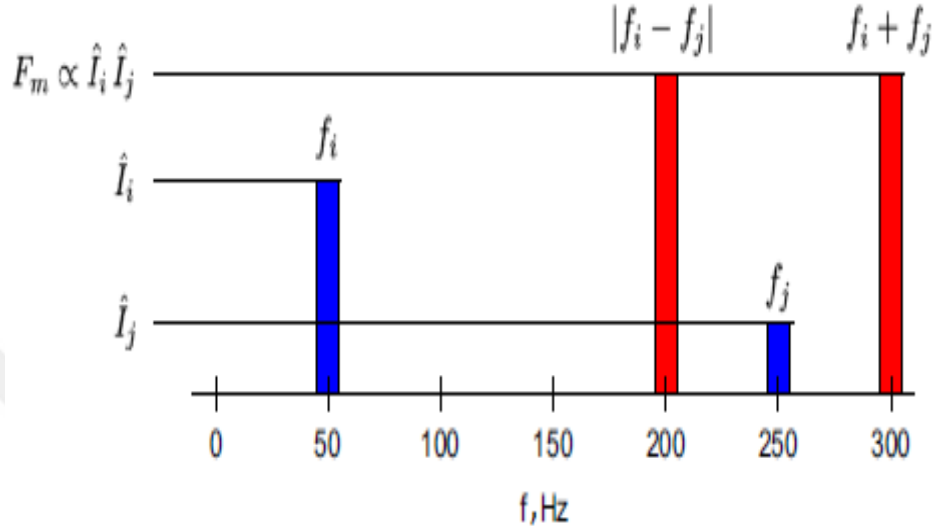
Yukarıdaki eşitlikte görülen dört ayrı denklemin manyetik kuvvet bileşenleri farklılık göstermektedir. Eşitliğin ilk denklemi sabit bileşendir. Bu bileşende, tüm yük akım harmonik bileşenleri yalnızca 0 Hz frekansta kuvvet bileşenine katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla sabit bileşen sargılar üzerinde statik deformasyona sebep olsa dahi çekirdek titreşimlerine etkisi bulunmamaktadır. Bu sebeplerle sabit bileşenin gürültü seviyesi üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. İkinci denklem ikinci harmonikleri ifade etmektedir. Her bir yük akım bileşeni $2f_i$ frekansta kuvvet bileşenine etki etmektedir. Her bir bileşenin genliği $2\varphi_i - \frac{\pi}{2}$ fazındaki yük akım bileşeni I_i ile orantılıdır.



Şekil 3.63 Eşitlikte verilen sabit ve ikinci bileşenin ürettiği kuvvet bileşenleri[15]

Eşitlik 3.23’de verilen denklemdaki üçüncü terim fark frekans bileşenidir. Bu bileşende her bir yük akım bileşen çifti $n_i \neq n_j$ olduğu durumda $\varphi_i - \varphi_j + \frac{\pi}{2}$ fazında ve $|f_i - f_j|$ fark frekansında manyetik kuvvet bileşeninin yükselmesine sebep olmaktadır. Manyetik kuvvet bileşenlerinin genliği yük akım harmonikleri olan $\hat{I}_i$ ve $\hat{I}_j$ ’nin çarpımıyla orantılı olarak değişmektedir. Fark frekansında $N(N - 1)/2$ adet kuvvet bileşeni meydana gelmektedir. İlgili denklemdaki dördüncü terim ise toplam frekans

bileşenidir. Bu bileşende her bir yük akım bileşen çifti $n_i \neq n_j$ olduğu durumda benzer genlikte fakat farklı fazda($\varphi_i + \varphi_j - \frac{\pi}{2}$) fazda $f_i + f_j$ toplam frekansında kuvvet bileşeni üretmektedir. Fark frekans bileşeninde olduğu gibi $N(N - 1)/2$ adet kuvvet bileşeni üretmektedir.



Şekil 3.64 Toplam ve fark frekanslarında üretilen kuvvet bileşenleri[15]

Görüldüğü üzere manyetik kuvvet bileşenleri üzerinde dört farklı denklemin tamamen birbirinden farklı frekansları yoktur. Dolayısıyla toplam manyetik kuvvet harmoniklerinin sayısı maksimum sayı olan N^2 'den çok daha küçüktür ve genel olarak bu sayı $2N$ 'dir. Özdeş frekansları olan kuvvet bileşenlerinde, kuvvet vektörlerinin eklenmesiyle toplam manyetik kuvvet genliği ve faz açısı elde edilir. Meydana gelen çakışmalar münferit kuvvet bileşenleri arasındaki faz ilişkilerine bağlı olarak yapıcı veya yıkıcı etki gösterebilir. Dolayısıyla meydana gelen harmonik kuvvet bileşenlerinden herhangi birinin genliği münferit kuvvet bileşenlerinin genliğinden oldukça farklı olabilir.

Eşitlik 3.23'de belirtilen denklemlere binaen açıklanmış olan kuvvet bileşenleri aşağıda çizelgeler halinde gösterilmiştir. Çizelge 3.12'de alt birinci hücrede(1,1) iki hat frekansındaki temel manyetik kuvvet bileşenini temsil etmektedir. İkinci harmonikleri ifade eden frekanslar ise (2,2) ve (3,3) hücrelerinde verilmiştir. Toplam frekansı çizelgedeki üst üçgen, fark frekansını ise alt üçgen temsil etmektedir.

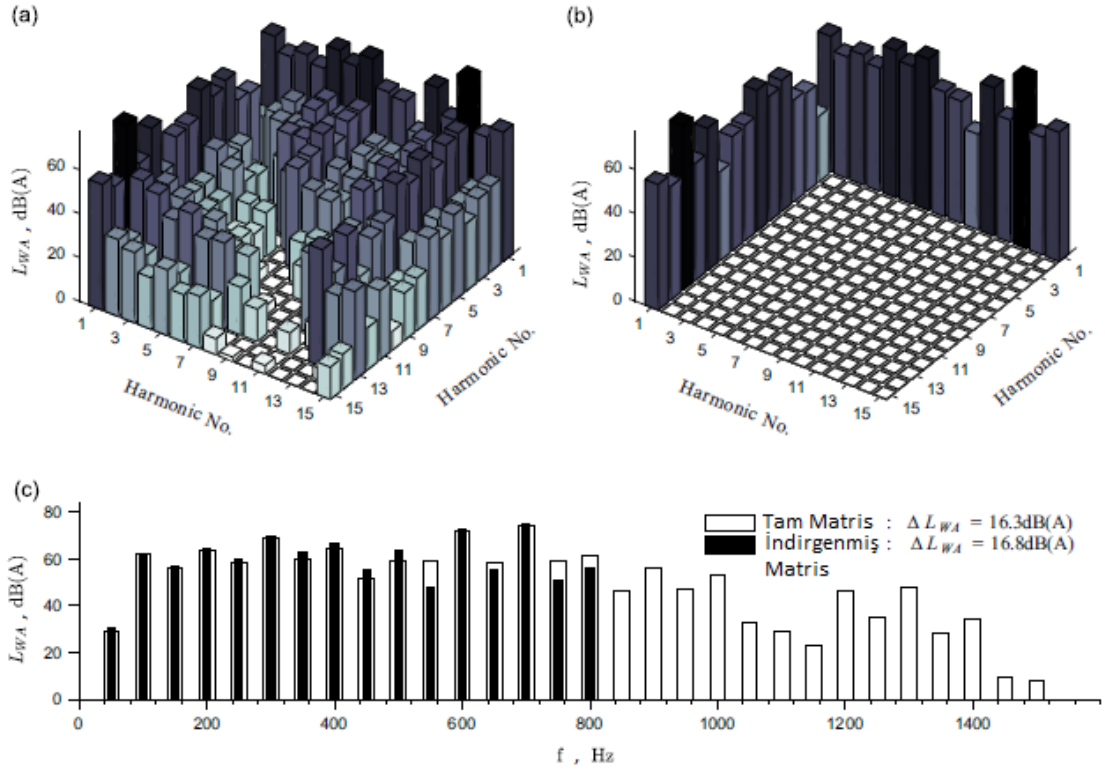
Çizelge 3.12 Yük harmonikleri tarafından üretilen manyetik kuvvet bileşenlerinin frekansları[15]

	n_1	n_2	n_3
n_1	$2f_1$	$f_1 + f_2$	$f_1 + f_3$
n_2	$f_2 - f_1$	$2f_2$	$f_2 + f_3$
n_3	$f_3 - f_1$	$f_3 - f_2$	$2f_3$

Çizelge 3.13 Yük harmoniklerinin ürettiği manyetik kuvvet bileşenlerinin genlikleri[15]

	n_1	n_2	n_3
n_1	$I_1^2/2$	$I_1 I_2$	$I_1 I_3$
n_2	$I_1 I_2$	$I_2^2/2$	$I_2 I_3$
n_3	$I_1 I_3$	$I_2 I_3$	$I_3^2/2$

Manyetik kuvvet bileşenlerinin genlikleri Çizelge 3.13’de verilmiştir. Görüldüğü üzere ilk sütun ve satırın tüm hücrelerinde yük akımı I_1 ’in temel harmonik bileşeni bulunmaktadır. Yük akımının temel harmonik bileşeninin bulunduğu hücreler Şekil 3.65’den de görüldüğü üzere baskın gürültü kaynağı olarak görülmektedir. Bu duruma paralel olarak yük akımının ikinci ve yüksek harmoniklerini içeren terimler, yük akım harmoniklerinin genliğinin temel yük akım bileşeninin genliğinden küçük olması durumunda ihmal edilebilir. Tüm manyetik kuvvet bileşenlerinin dikkate alındığı durumdaki yük gürültüleri ile indirgenmiş matris olan sadece temel yük akım bileşeni I_1 ’i içeren manyetik kuvvet bileşenlerinin dikkate alındığı durum arasındaki yük gürültüleri arasında 0,5 dB kadar bir fark söz konusudur. Pratik yaklaşımda iki metot arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar küçük çıkmaktadır. Dolayısıyla şebeke harmoniklerinden kaynaklanan yük gürültü artışlarının hesaplanmasında indirgenmiş kuvvet bileşenlerinin dikkate alınması yeterlidir. Ayrıca yine şekilden görüldüğü üzere toplam frekans bileşenlerinin yük gürültüsü üzerindeki etkisi fark frekans bileşenlerine göre daha yüksektir.



Şekil 3.65 Baskın yük gürültü bileşenlerinin ürettikleri gürültü seviyeleri a) Tüm manyetik kuvvet bileşenlerinin dikkate alınması durumundaki yük gürültü bileşenleri b) Temel yük akım bileşeni I_1 içeren manyetik kuvvet bileşenlerinin dikkate alınması durumundaki yük gürültü bileşenleri c) Her iki metod için meydana gelen yük gürültü spektrumlarının karşılaştırılması[15]

Çizelge 3.14 Yük Harmoniklerinden kaynaklanan manyetik kuvvet bileşenlerinin faz açısı[15]

	n_1	n_2	n_3
n_1	$2\varphi_1 - \frac{\pi}{2}$	$\varphi_1 + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}$	$\varphi_1 + \varphi_3 - \frac{\pi}{2}$
n_2	$\varphi_2 - \varphi_1 + \frac{\pi}{2}$	$2\varphi_2 - \frac{\pi}{2}$	$\varphi_2 + \varphi_3 - \frac{\pi}{2}$
n_3	$\varphi_3 - \varphi_1 + \frac{\pi}{2}$	$\varphi_3 - \varphi_2 + \frac{\pi}{2}$	$2\varphi_3 - \frac{\pi}{2}$

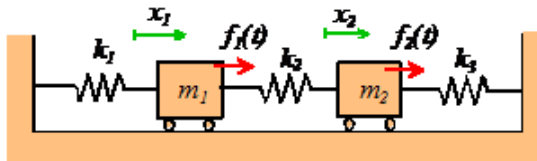
Transformatör sargıları genellikle izole edilmiş iletkenler, boşluklar ve sıkıştırılmış kartonlar içermektedir. Yüklü durumdaki transformatörün sargı yer değiştirmeleri

birkaç milimetreye kadar mikrometre mertebesinde değişmektedir. Sonlu eleman metodu(FEM) uygulanarak, uzaydaki bu sürekli sistemin ayrıklaştırılması çoklu serbestlik derecesini(MDOF) meydana getirmektedir. Sonuç olarak dinamik davranış, hareketin diferansiyel eşitliğiyle Eşitlik 3.24 ile tanımlanmıştır.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + Kd = F_m \quad (3.24)$$

Mekanik sistemde kütle matrisi M, sönümlenme matrisi C ve sertlik matrisi K olarak tanımlanmaktadır. İvme, hız, yer değiştirme ve manyetik kuvvet vektörleri sırasıyla $\ddot{d}$, $\dot{d}$, d ve F_m olarak gösterilmektedir. Yer değiştirmeler sargılar üzerindeki dinamik olmayan hareketlerde dinlenme pozisyonundadır.

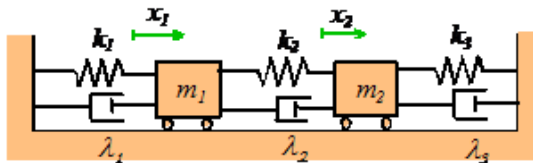
MDOF'un daha anlaşılır olması amacıyla Şekil 3.66 verilmiştir. Burada iki kaynak ve iki kütlesi bulunan sistem dikkate alınmıştır. Kütlelerin her biri bazı frekanslarda titreşime sebep olan harmonik kuvvetlere maruz kalmaktadır. Şekil üzerinde görülen m_1 ve m_2 kütleleri, k_1, k_2 ve k_3 sertlikleri ve $f_1(t)$ ve $f_2(t)$ ise harmonik kuvvetleri ifade etmektedir. Ayrıca x_1 ve x_2 titreşim genliği olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.66 İki kaynak ve iki kütleli MDOF sistemi[34]

Yukarıda verilen şekildeki yapı matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Eşitlik 3.25'de görüldüğü üzere kütle ve sertlik matrislerinin toplamı harmonik kuvvet vektörlerine eşit olarak ifade edilmiştir. Eşitlik 3.24'den farkı ise sönümlenme matrisinin bulunmamasıdır.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$



Şekil 3.67 İki kaynak, iki kütleli ve sönümlenme kontrollü MDOF sistemi[34]

Yukarıda verilmiş olan şekilde diğerinden farklı olarak λ_1, λ_2 ve λ_3 olarak ifade edilmiş sönümlenme faktörü eklenmiştir. Sönümlenmenin de eklenmesiyle Eşitlik 3.24'de verilen denklemde dikkate alınan yaklaşımla benzer bir yaklaşım kurulabilir.

Akışkanla temas halindeki sargıların yapısal titreşimi mekanik sisteme viskoz sönümlenmenin eklenmesi ile doğrulanır. Transformatör sargılarının homojen bileşimi(iletken çevrimi gibi periyodik olarak tekrarlanan alt bölümler ile birlikte) kaynak boyutuyla ilişkili olan sönümlenme boyutu dağılımını temsil etmektedir. Düzenli viskoz sönümlenme durumunda hareketin normal modları bir diğerini etkilemez ve yanıt denklemleri bağımsız normal modlara ayrılabilir. Buna göre sinüzoidal titreşim kuvvetinde Eşitlik 3.24'ün genel kararlı hal çözümü Eşitlik 3.26 ile ifade edilmektedir.

$$d_k(t) = \sum_{i=1}^N R_n \frac{D_{kn}}{w_n^2} \frac{\hat{F}_{mn}}{m_n} \sin(wt - \theta_n) \quad (3.26)$$

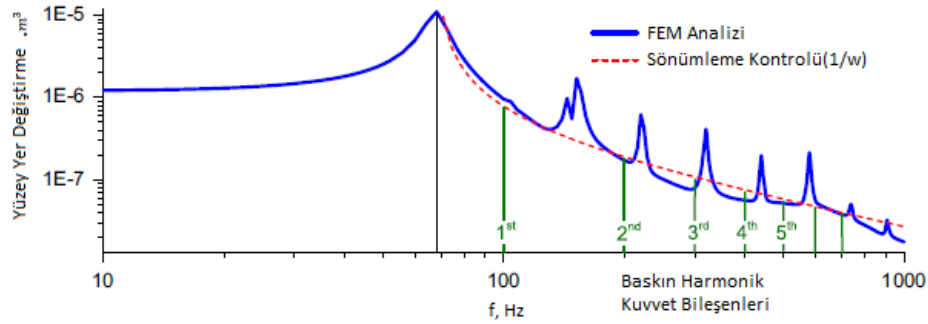
d_k , k'nci serbestlik derecesindeki(DOF) yer değiştirmeyi, R_n , n modundaki dinamik yanıt faktörünü, N, DOF'un toplam sayısını, D_{kn} , n modunda k'nci DOF'un titreşim genliğini, w_n , normal mod n'in doğal frekansını, $\hat{F}_{mn}$, normal mod n'deki manyetik kuvvetin genliğini, m_n , n modundaki kütleyi ve θ_n , mod n'in faz açısını ifade etmektedir. Viskoz sönümlenme durumunda çoklu DOF sisteminin her biri basit bir sönümlenme osilatörü gibi cevap vermektedir. $w_n \approx \sqrt{k/m}$ denkleminde göre meydana gelen radyal ve eksenel yöndeki sargı yer değiştirmesi, etkin sertlik k ve uygulanan manyetik kuvvetin lineer fonksiyonudur. Eşitlik 3.26'daki boyutsuz dinamik cevap faktörü frekans oranı w/w_n 'in fonksiyonudur ve bu oran kuvvet F_m 'in statik olarak uygulanması halinde yer değiştirmeye dinamik yer değiştirmenin genlik oranını ifade etmektedir.

Yük harmonik kuvvetleri tarafından üretilen sargıların titreşim genliklerini belirlemek için ilgili frekans aralığındaki dinamik cevap faktörünün iyi tahmin edilmesi gerekmektedir. Ağır akışkana daldırılmış transformatör sargısının birinci doğal frekansı genel olarak Şekil 3.68'den görüldüğü üzere temel manyetik kuvvet bileşeninin altındadır. Yük akım harmoniklerinden meydana gelen tüm baskın manyetik kuvvet bileşenleri özellikle sargının eigenton(titreşim tonu) aralığı olarak adlandırılan yerde bulunmaktadır. Dolayısıyla bu frekans aralığında MDOF sisteminin kuvvet titreşiminde

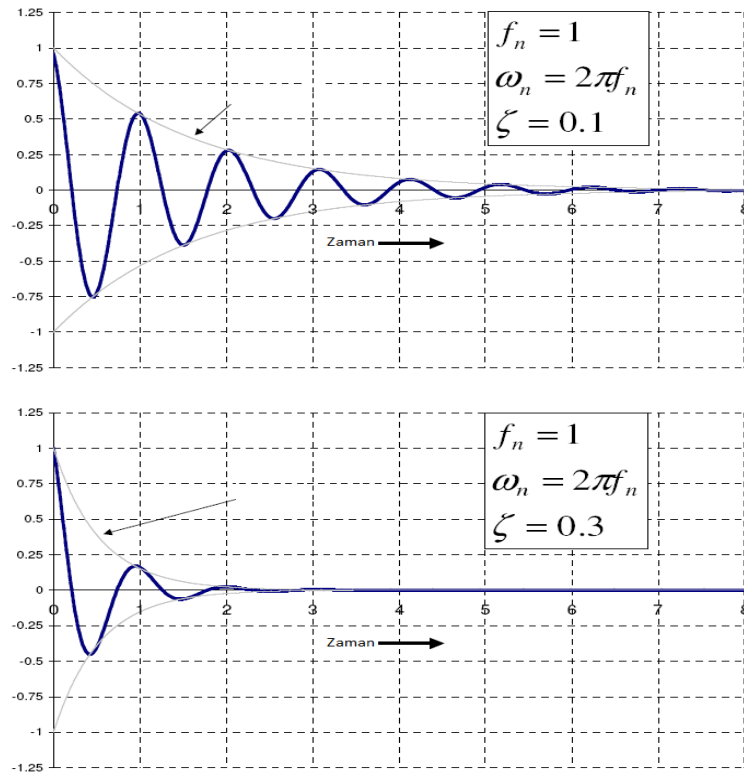
sönümleme kontrolü yapılabilir ve Eşitlik 3.26'daki boyutsuz dinamik cevap faktörü frekansa ters orantılı şekilde düşer.

$$R_n(w) \cong \frac{w_n}{2\zeta_n w}, \quad (w \approx w_n \text{ için}) \quad (3.27)$$

$\zeta_n = c_n/2m_n w_n$, model sönümleme faktörü c_n 'deki kritik sönümleme bölgesini ifade etmektedir.



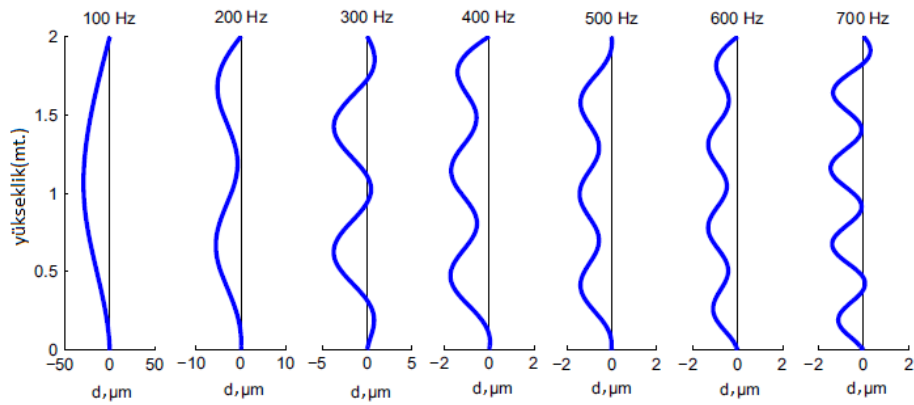
Şekil 3.68 Tipik yağlı transformatör sargılarının net normal yüzey yer değiştirme genliğinin frekans cevap karakteristikleri(tüm harmonik yük kuvvet bileşenleri ilk doğal frekansın üzerindeki frekans aralığında sönümleme kontrolü altındadır.)[15]



Şekil 3.69 Sönümleme oranı ζ_n 'nin zamana göre sönümlemeye etkisi[35]

Şekil 3.69’da sönümlleme kontrol frekans aralığındaki genliğin düşmesi ile meydana gelen sargıların net normal yüzey yer değiştirmeleri görülmektedir. Şekil 3.70’deki örnekte iç kısımda alçak gerilim sargısı, ortada yüksek gerilim sargısı ve dış kısımda kademe sargısı bulunan tipik eş merkezli sargılara sahip çekirdek yapısı bulunmaktadır. Burada alçak gerilim sargıları üzerinde sayısal bir örnek ile varsayımların doğrulanması amaçlanacaktır. AG sargısı 2m yükseklikte, 1.3m çapında ve 100mm radyal kalınlıkta iki sargı katmanından oluşmaktadır. AG sargısının toplam kütlesi 3500 kg olarak ölçülmüştür. Sonlu elemanlar kullanılarak harmonik analiz yapılmış ve NACS yazılımı marifetiyle de akışkan yapı kavraması uygulanmıştır.

Tüm manyetik kuvvet bileşen frekanslarında sargı boyunca oluşan manyetik kuvvet yoğunluğunun yer dağılımı hem yön hem de genlik açısından özdeştir. Şekil 3.70’de görüldüğü üzere manyetik kuvvetler nedeniyle meydana gelen sargı titreşimleri farklı şekillere sahip olmasına rağmen Şekil 3.68’de görüldüğü üzere sönümlleme kontrolü ile $1/w$ oranında sürekli olarak azalmaktadır. Özet olarak 1000 Hz’e kadar olan frekanslardaki akustik transformatör gürültüsünün tamamında sayısal sonuçlarda farz edildiği gibi transformatör sargılarında sönümlleme kontrolü yapılabilmektedir. Transformatör sargı mimarisi lineer mekanik sistem gibi dikkate alındığı için, kuvvet ve yer değiştirme bileşenlerinin lineer çakışmaları yük akım harmoniklerinden kaynaklanan gürültü artışını tahmin edebilmek amacıyla farklı frekanslarda uygulanabilir



Şekil 3.70 Yük akım harmonikleri tarafından üretilen manyetik kuvvet bileşenlerinin oluşturduğu kuvvet titreşimlerinde ag sargılarda meydana gelen yer değiştirmeler(sonuçlar 3D-FEM analizi ile elde edilmiştir.)[15]

Titreşim kaynakları aslen sıkıştırılmaz akışkan tarafından tamamen çevrilmiştir. Akışkan aracılığıyla iletilen ses gücü akışkanın sesi absorbe edememesi sebebiyle korunarak iletilmektedir. Sargı titreşiminin net hacim hızı tank duvar titreşimlerinin net hacim hızına çevrilebilmektedir. Bu akustik kaynaklı titreşimde tank duvarı değişken basınç hareketine maruz kalmaktadır. Bu durumda iletilen ses gücü normal yüzey hızının dağılımına çok duyarsızdır. Transformatörün yüzey titreşimleri nedeniyle serbest alana yayılan ses gücü P vibro-akustik temel eşitlikler kullanılarak tahmin edilebilmektedir.

$$P = \sigma p c S_t \langle \overline{v_t^2} \rangle \quad 3.28$$

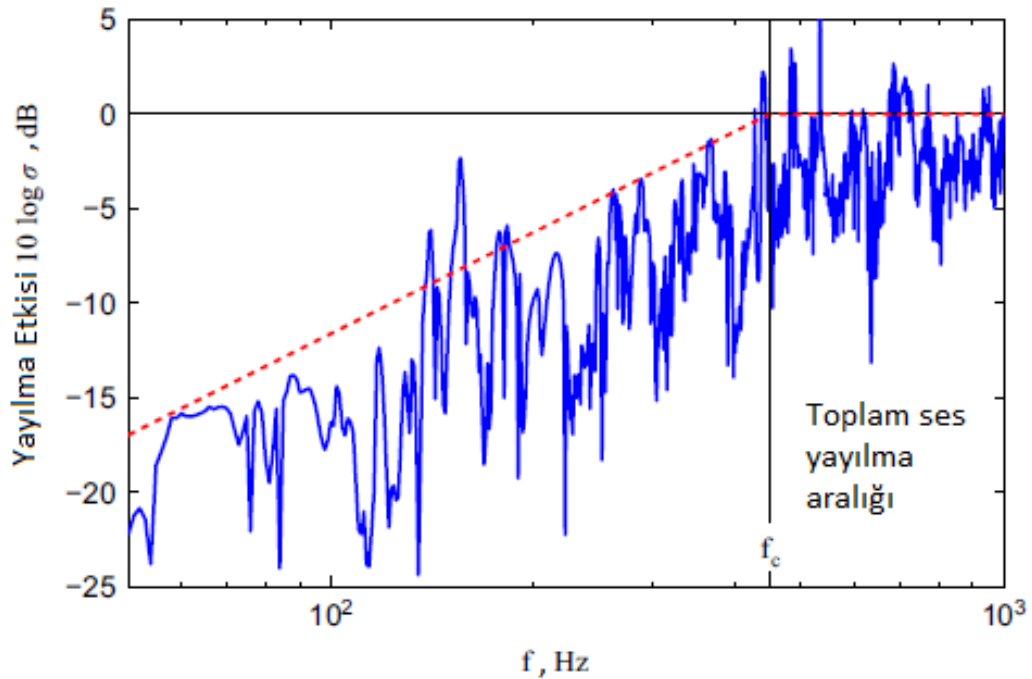
σ , transformatör tankının frekansa bağlı ışınlam etkinliği olarak ifade edilmektedir. p , havanın yoğunluğu, c , sesin havadaki hızı, S_t , transformatör tankının toplam yüzey alanı olarak ifade edilmektedir. Ayrıca $\langle \overline{v_t^2} \rangle$, tankın normal yüzey hızının karesinin zaman ve mesafe ortalaması olarak tanımlanmaktadır. Harmonikli durumlarda, sargı yüzeyi üzerindeki herhangi bir yerde normal yüzey hızı $v_w = w d_w$ 'dir. Bu denklemdeki d_w Eşitlik 3.24'de kullanılmış olan normal sargı yer değiştirmeleridir. Verilen denklemin T periyodu boyunca integrali alınması durumunda normal yüzey titreşim hızı karesinin zaman ortalaması olan $\overline{v_w^2} = w^2 \hat{d}_w^2 / 2$ denklemi elde edilmektedir. Sonuç olarak tank yüzeyinin zaman ve mesafe ortalama net hacim hızı yüzey alanı S_w ile birlikte sargıların net normal yer değiştirmesi d_w kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$S_t \langle \overline{v_t^2} \rangle = S_w \frac{w^2}{2} \langle \hat{d}_w^2 \rangle \quad (3.29)$$

Yük gürültü harmoniklerinden yayılan ses gücünün tahmininde en belirsiz parametre frekans bağımlı ışınlam etkisi σ 'dır. Yayılma etkisi hava boyunca yayılan ses dalgalarının dönüşümü için ölçülmektedir. Böyle plakalı titreşimleri yapıların ışınlam etkisi bükülme dalgasının karakteristiğine göre frekansla birlikte değişkenlik göstermektedir. Ses enerjisinin maksimum dönüşümü f_c çakışma frekansında ve üzerinde meydana gelmektedir. Bu frekansta transformatör tank bölümlerinin eğilme dalga boyları çevreleyen akışkan içindeki ses dalgasının dalga boyuyla özdeştir. Çakışma frekansı altında ses yayılma etkisi frekansın artmasıyla birlikte düşmektedir. Tankın birbirine yakın bölümlerinde pozitif ve negatif yüzey titreşim hızları bir diğerini iptal etme eğilimi

göstermektedir. Sonuç olarak ses enerjisi akustik yakın alanda dolaşır ve transformatör tarafından yayılan ses enerjisinin sadece bir kısmını uzak alana yayar.

Transformatör yük gürültüsünün baskın ses bileşenleri çoğunlukla serviste olan güç transformatörünün çakışma frekansının altındadır. Dolayısıyla yayılma etkisine ait frekans cevap eğrisinin yeteri kadar iyi saptanması toplam yük gürültü seviyesi üzerinde yük harmoniklerinin katkısını tahmin edebilmek açısından önemlidir. Yayılma etkisi titreşim ve ses ölçümlerinin birleştirilmesiyle veya vibro-akustik sayısal analizler ile tanımlanabilir. Birinci durumda, yayılma etkisi, IEC 60076-10 uygun olacak şekilde yayılan ses gücünün ölçümleri ve transformatör tankı yüzeyine yeterli sayıda yerleştirilmiş ivme ölçerler ile de normal yüzey hızı ölçümlerine göre hesaplanmaktadır. İkinci durumda, ses gücü, transformatör tankı etrafını çevreleyen kapalı gövdede gerçekleştirilen ses yoğunluk ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanır. Mesafe-ortalama yüzey hızı, transformatör tankının yüzeyinde sonlu elemanların yer değiştirme serbestlik derecesinin sayısal sonuçlarından hesaplanmaktadır.



Şekil 3.71 150 MVA yağlı transformatörün ortalama ses yayılma etkisi[15]

Yukarıdaki şekilde transformatörün yayılma etkisiyle frekans değişimi arasındaki ilişkiler gösterilmektedir. Görüldüğü üzere çakışma frekansının altındaki frekans seviyelerinde frekans arttıkça yayılma etkisi azalma göstermektedir. Aslında şekilde

görülen frekans yanıt karakteristiği transformatör tank duvarının kalınlığı ve materyal özelliğine, tankın sertlik tasarımına ve transformatör tankının şekil ve boyutuna bağlıdır. Şekli meydana getiren hesaplamalarda boşluk modları veya akışkanların yapısal etkileşimleri dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla ilgili sonuçlar Eşitlik 3.28 kullanılarak bulunmuştur.

Yük gürültü bileşenlerinin tanımlanması amacıyla Eşitlik 3.23’de bulunan manyeto mekanik bağlantı terimi, Eşitlik 3.26’daki hareket eşitliğinin çözümü, Eşitlik 3.28’deki akışkan yapı bağlantı terimi ve Eşitlik 3.29’daki ses enerjisinin iletimi kullanılarak ses gücü üretimi, manyetik kuvvet bileşenine bağlı olarak yazılabilir[15],

$$P = C\sigma\hat{F}_m^2 \quad (3.30)$$

Eklenen C sabiti tüm frekanstan bağımsız parametreler için yazılmıştır. IEC 60076-10’a göre transformatör ses ölçümleri A-ağırlıklı filtre kullanılarak yapılmalıdır. Bu filtre alçak ve yüksek frekanslardaki ses sinyallerini azaltarak insan kulağının düşük hassasiyetine uygun olacak şekle getirmektedir. Dolayısıyla manyetik kuvvet $F_m(f_i)$ tarafından üretilen ilgili A-ağırlıklı ses gücü seviyesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilmektedir[15].

$$L_i = 10 \log(C\hat{F}_{mi}^2) + R_i + A_i \quad (3.31)$$

$R_i = 10 \log \sigma(f_i)$, yayılma etkisinin seviyesi ve $A_i = A(f_i)$, frekansa bağlı A-ağırlıklı filtrenin düzetme terimi olarak tanımlanmaktadır. Yük akımlarında yüksek harmoniklerin olmadığı durumda transformatörün yük gürültüsü sadece temel bileşene bağlıdır[15].

$$L_f = 10 \log(C\hat{F}_{mf}^2) + R_1 + A_1 \quad (3.32)$$

R_1 , yayılma etkisinin seviyesi ve A_1 A-ağırlıklı temel ses bileşenini ifade etmektedir. Her ikisi de iki hat frekansındaki temel manyetik kuvvet bileşeni F_{mf} tarafından üretilmektedir[15].

$$F_{mf}(t) \propto \frac{I_1^2}{2} \cos 2(w_1 t + \varphi_1) \quad (3.33)$$

Harmoniksiz durumda temel ses bileşeni $L_f(f_1)$ ’in ses seviyesi harmoniklerin bulunduğu durumdaki ses seviyesi $L_1(f_1)$ ’den farklı olabilmektedir. Bunun sebebi

Eşitlik 3.23’de verilen üçüncü terimden kaynaklanan fark frekanslarıdır. Harmonikli durumda bu fark frekansları temel kuvvet bileşeni üzerinde çıkışarak manyetik kuvvet bileşeni üzerinde ek bir kaynak meydana getirmektedir.

Sonuç olarak yük akım harmoniklerinin bulunduğu durumda transformatörün toplam A-ağırlıklı yük gürültü ses gücü seviyesi L_{harm} Eşitlik 3.31’de verilen tüm ses seviyesi bileşenlerinin logaritmik eklenmesiyle hesaplanabilmektedir.

$$\Delta L_{harm} = L_{harm} - L_f = 10 \log \left(\frac{\sum_i^N (\hat{f}_{mi}^2 10^{R_i + A_i/10})}{\hat{f}_m^2 10^{R_1 + A_1/10}} \right) dB \quad (3.34)$$

Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü üzere diğer eşitliklerde bulunan frekanstan bağımsız C parametresi çıkartılmıştır.

Harmonik bozulmaların toplamını ifade etmek amacıyla Toplam Harmonik Distorsiyon(THD) terimi kullanılmaktadır. Akım ve Gerilim THD eşitlikleri aşağıda verilmiştir[33].

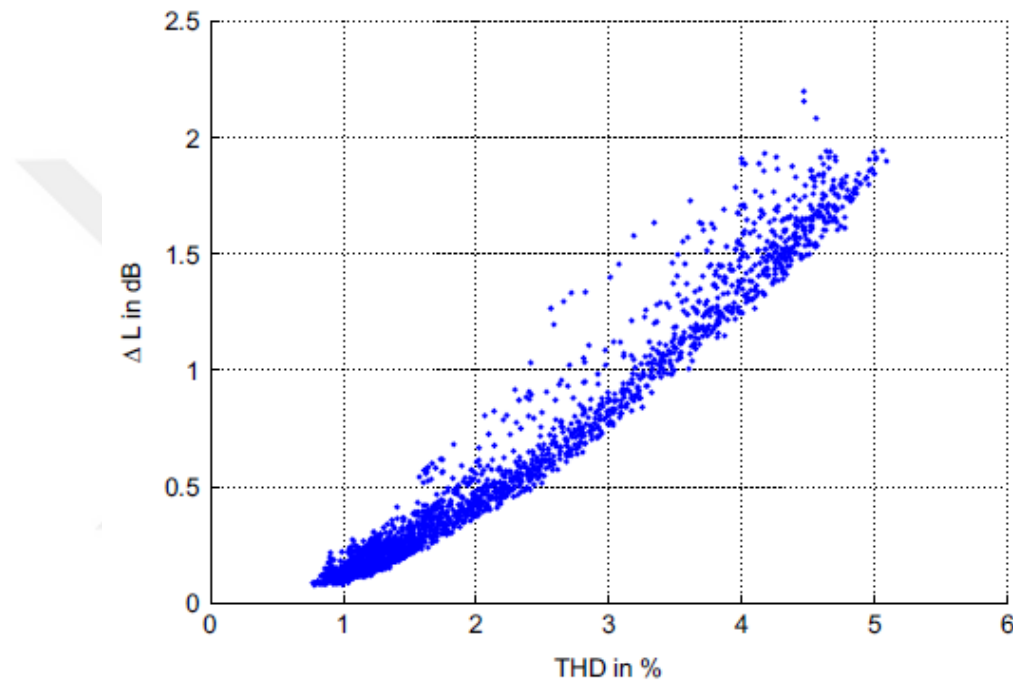
$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_i^\infty V_i^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_i^\infty I_i^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \quad (3.35)$$

Akım ve gerilimin sinüzoidal dalga formları, güç sistemlerindeki sinüzoidal olmayan kaynaklar ile lineer olmayan yükler sebebiyle bozulmaktadır. Bu bozulmayla, enerji sistemindeki kayıpların artması, koruma, kontrol ve ölçme sistemlerindeki hatalı çalışma sayılarının yükselmesi, kompanzasyon tesislerindeki reaktif yüklenmelerin artması ve zayıf akım sistemlerinde meydana gelen parazitlerin artış göstermesi gibi birçok problem oluşmaktadır. Bu itibarla, tüketiciye sağlanan enerjinin kalitesi azalmakta ve arz güvenilirliği düşmektedir. Bahsedilen konulara ek olarak toplam harmonik distorsiyon seviyesindeki artışlar, transformatörlerde meydana gelen gürültü seviyesini artırarak, çevresel gürültü kirliliğini yükseltmektedir.

Harmonikli akım ve gerilimlerin oluşmasının birçok sebebi olabilmektedir. Konverterler, yüksek gerilim doğru akım enerji iletim sistemleri(HVDC), motor sürücü devreleri, ark fırınları, kaynak makinaları, elektrik makinaları(transformatörler, generatörler, motorlar), statik var kompanzatorler, gaz deşarj sistemi ile çalışan aydınlatma

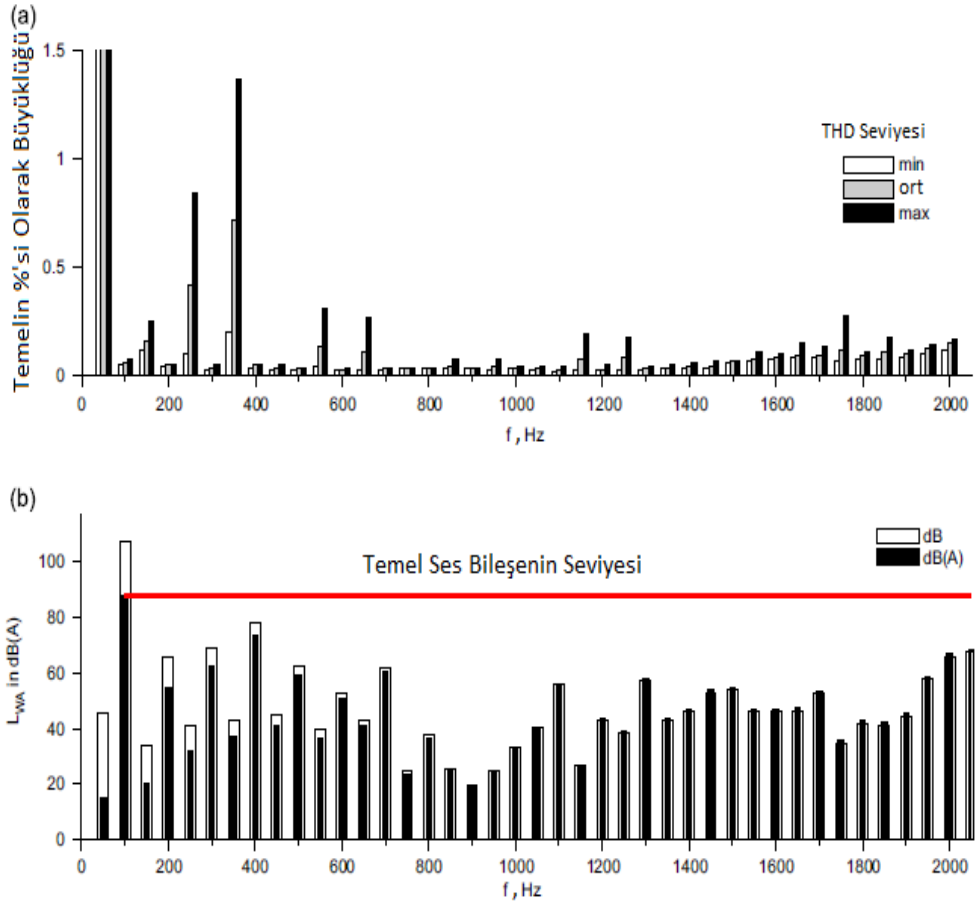
elemanları, fotovoltaik sistemler, bilgisayarlar, kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlamalı güç kaynakları, harmonik kaynağı olarak tespit edilen sistemlerdendir.

THD ile gürültü arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla Ertl ve Voss [15]'te bir yerleşim alanında bulunan 35MVA gücündeki düşürücü transformatör üzerinde ölçümler yapmışlardır. Gerçekleştirilen 2200 periyodik ölçüm neticesinde THD ile gürültü arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Şekil 3.72 incelendiğinde, THD seviyesinde meydana gelen artışın, gürültü artışına sebebiyet verdiği görülmektedir.



Şekil 3.72 35 MVA düşürücü transformatörde THD ile gürültü arasındaki ilişki [15]

Harmonik kaynakların gürültü üzerindeki etkisini daha net görebilmek amacıyla, Ertl ve Voss [15] te üç farklı sistem üzerinde ölçümler yapmışlardır. Yapılan ölçümler ile THD'yi ulusal ve uluslararası standartların üzerine çıkaran güç elektroniği kaynaklarının gürültü üzerinde meydana getirdiği etkileri gözlemlemişlerdir. İlk olarak 380 kV iletim hattında bulunan gerilim harmonikleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Anma yük gürültü seviyesi $L_{WA}=88$ dB(A) olan 300 MVA gücündeki düşürücü yağlı güç transformatörü üzerinde yük harmoniklerinin artışı ile yük gürültüsünde meydana gelen artışlar incelenmiştir. Almanya'da bulunan 50Hz/380kV enerji nakil hattında farklı seviyelerdeki THD oranının gürültü üzerindeki etkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

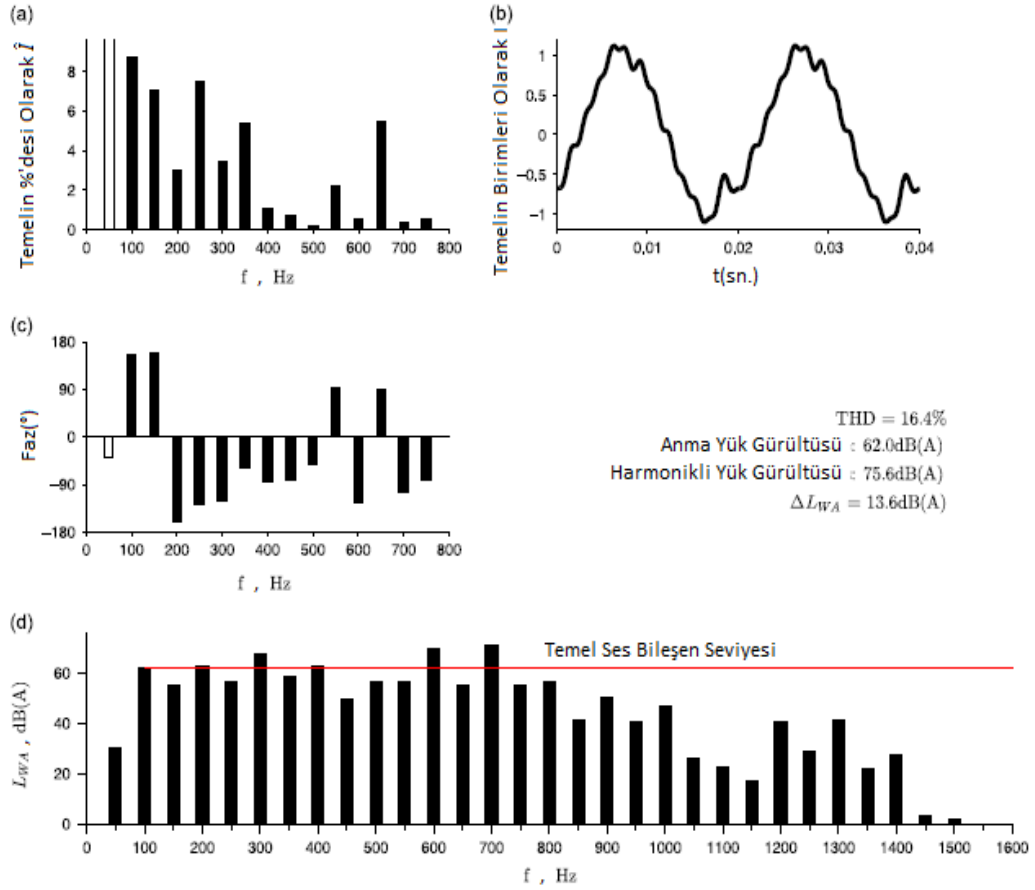


Şekil 3.73 Yük harmoniklerinin yük gürültü spektrumuna etkisi a) Farklı harmonik bozulma seviyeleri için gerilim spektrumları b) Ortalama THD’de A-ağırlıklı ve A-ağırlıksız yük gürültü spektrumu [15]

Çizelge 3.15 Şebeke harmonikleri sebebiyle yükselen yük gürültüleri[15]

Bozulma Seviyesi	THD(%)	ΔL dB	ΔL_A dB
Min.	0,4	0,0	1,6
Ort.	1,0	0,0	2,9
Max.	1,8	0,0	5,8

Yukarıdaki şekil ve çizelgeden de görüldüğü üzere şebekedeki harmoniklerin artışı yük gürültüleri üzerinde artış meydana getirmiştir. Ancak uluslararası standartlar gereğince enerji nakil hattındaki THD’lerin sınırlı tutulması sebebiyle ortalama THD değeri %1 ve insan kulağının algılayabileceği gürültü artış seviyesi ise 2,9 dB’dir.



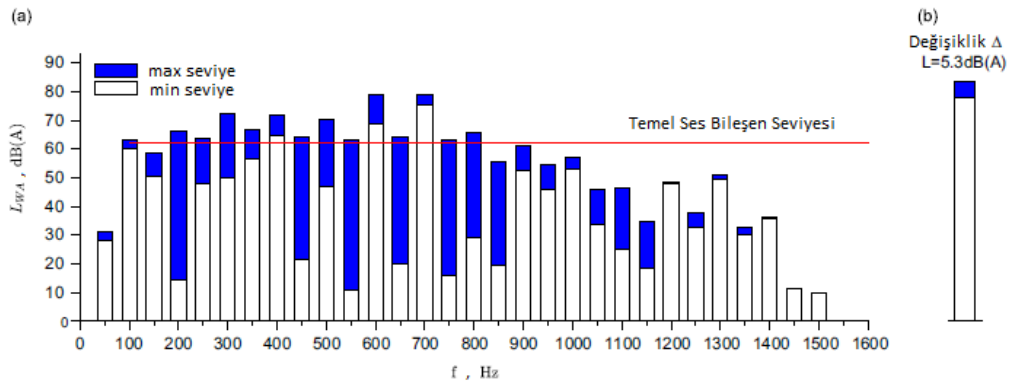
Şekil 3.74 Olağandışı yüksek harmonik bozulma bulunan bir bilgisayar merkezindeki dağıtım transformatöründeki yük gürkütü spektrumu. a) Yık akım bileşenlerinin genliği b) Yık akım dalga şekli c) Temel bileşene göre harmonik bileşenlerin faz ilişkileri d) Transformatörün yük gürkütü bileşenleri[15]

İkinci örnek bilgisayar merkezinde bulunan 150kVA dağıtım transformatörlerindeki olağandışı gürkütü oluşumuyla ilgilidir. İşletmedeki transformatörün yük faktörü yaklaşık olarak 0.7'dir. Bilgisayarlar ve diğör elektronik ekipmanlardaki dönüştürücülerin lineer olmayan güç tüketimi neticesinde meydana gelen akım dalga formunun yüksek distorsiyonu Şekil 3.74'de gösterilmiştir. Ayrıca yük akım bileşenleri de ölçülmüştür. Sistemdeki toplam harmonik bozulma %16,4 olarak ölçülmüştür. Bu THD değeriinde yük gürkütüsünde 13,6dB(A) seviyesinde artış meydana getirmiştir. Çizelge 3.16'dan de görüldüğü üzere temel ses bileşenin oldukça aşan 700Hz'e kadar olan ses harmoniklerinde genellikle yükselen frekans ile ses yayılma etkisi ve A-ağırlıklı gürkütü seviyesi artış göstermektedir. En yüksek gürkütü seviyelerinin 600 ve 700 Hz frekansında görölmesi de Eşitlik 3.23'ün üçüncü ve dördüncü terimleri olan toplam ve fark frekanslarının gürkütü üzerindeki etkisini kanıtlamaktadır.

Çizelge 3.16 Manyetik kuvvet genliği, yayılma etkisi ve baskın yük gürültü harmoniklerinin ses güç seviyesi[15]

f(Hz.)	100	200	300	400	500	600	700
$\hat{F}/\hat{F}_1(\%)$	100,5	26,2	23	8	2,9	10	10,4
R_i dB	-17	-11,9	-8,9	-6,8	-5,2	-3,8	-2,7
L_i dB(A)	62	63,8	69,4	64,6	59,1	72,2	74,5

Harmonik bileşenlerin faz ilişkilerinin gürültü üzerindeki etkisini anlamak amacıyla da ikinci örneğin tüm manyetik kuvvet bileşenlerinin faz ilişkilerindeki toplam değişiklik $\varphi = [0,2\pi]$ aralığında uygulanmıştır. Her bir faz ilişkisi için ses spektrumu ve toplam yük gürültü seviyesi hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekilde yük akım harmoniklerinin faz değişikliklerinden kaynaklanan toplam gürültü seviyesi ve her bir ses bileşeninin maksimum değişikliği verilmiştir. Görüldüğü üzere her bir ses bileşeninde faz farklılıklarından kaynaklanan genlik değişiklikleri meydana gelmiştir. Özellikle 200, 450, 550, 650, 750, 800 ve 850 Hz. bileşenlerinde faz farklılıkları dolayısıyla meydana gelen maksimum ve minimum genlikler arasında önemli farklar bulunmaktadır. İlgili örnek için faz farklılıklarından kaynaklanan maksimum gürültü artışı ise 5,3 dB(A) çıkmıştır. Elde edilen verilere binaen yük gürültü seviyesinin iyi tahmin edilebilmesi için yük akım harmonik bileşenlerinin faz ilişkileri de dikkate alınmalıdır.

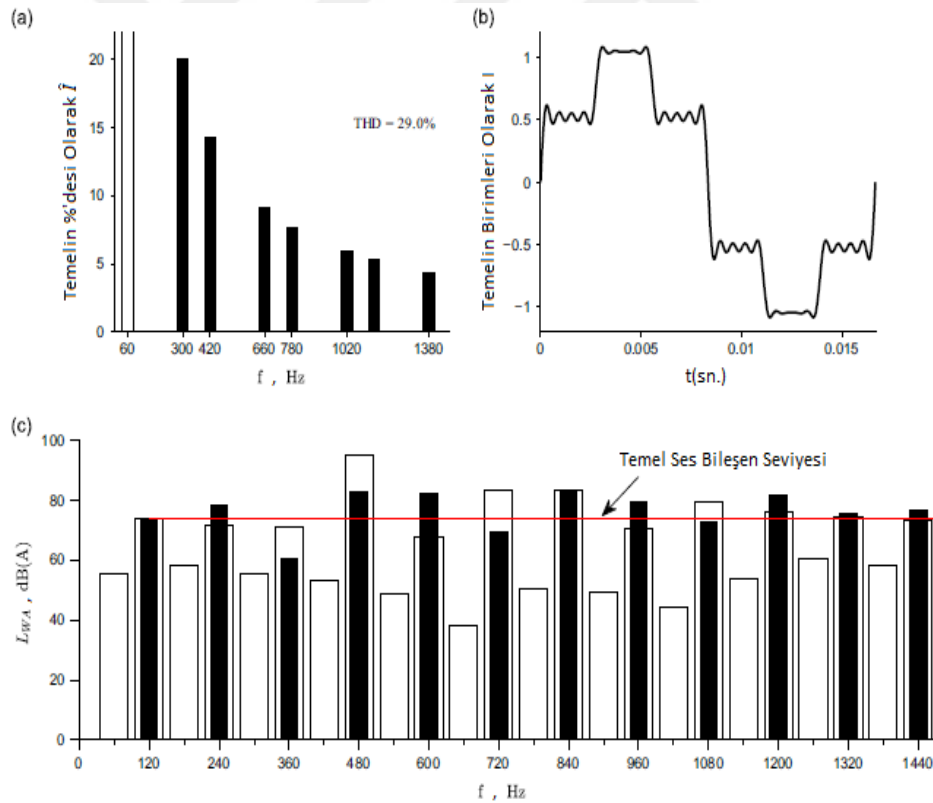


Şekil 3.75 Yük akım bileşenlerinin faz ilişkilerindeki değişiklikler a) yük gürültü bileşenlerinde meydana gelen maksimum değişiklik b) toplam yük gürültü seviyesindeki maksimum değişiklik[15]

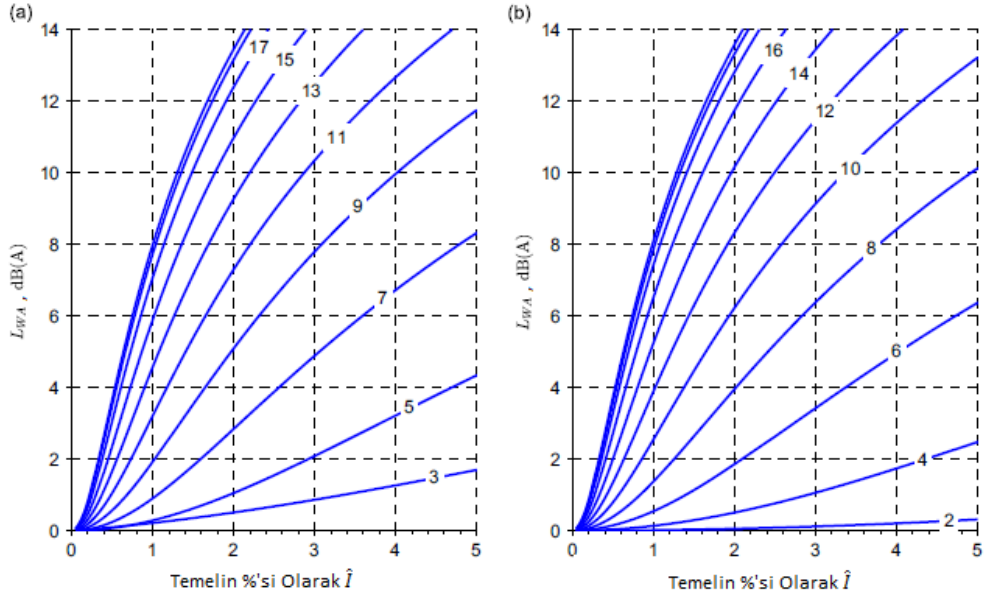
Üçüncü örnekte bir yüksek gerilim enerji nakil hattında(HVDC) uluslararası yakın ölçüm kurallarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen sistemde toplam harmonik

bozulma değeri oldukça yüksek çıkmıştır. THD'si %29 olan sistemde toplam yük gürültü artışı 29,4dB(A) olmuştur. İlgili sistemde yük gürültülerine ek olarak transformatör çekirdeğindeki manyetik kuvvetler ve mıknatıssal büzülme sebebiyle meydana gelen yüksüz gürültü kaynakları da bulunmaktadır. Dolayısıyla sadece yük akım harmoniklerinden kaynaklanan gürültü seviyesi 16,8dB(A) hesaplanmasına rağmen ölçülmüş olan toplam gürültü seviyesi DC mıknatıslanma sebebiyle daha yüksek çıkmıştır. Şekil 3.76-c'de hesaplanmış yük gürültü seviyeleri ile ölçülmüş yük gürültü seviyeleri karşılaştırılarak yüksüz durumdaki gürültü seviyesi gösterilmiştir.

Ayrıca 300 MVA gücündeki bir güç transformatörünün yük gürültü artışına sebebiyet veren yük akım harmonik bileşenlerinin dağılımı Şekil 3.77'de verilmiştir. Gürültü üzerinde daha yüksek mertebede etkisi olan yük akım harmonik bileşenlerinin hem tek harmoniklerde hem de çift harmoniklerde yüksek frekanslardaki bileşenler olduğu görülmektedir.



Şekil 3.76 HVDC transformatörün ürettiği yük gürültü bileşenleri a) yük akım bileşenlerinin genlikleri b) yük akım dalga şekli c) hesaplanmış yük gürültü spektrumu(siyah çubuklar) ile ölçülmüş toplam gürültü spektrumunun karşılaştırılması[15]



Şekil 3.77 300 MVA güç transformatörünün yük gürültü artışında yük akım harmonik bileşenlerinin dağılımı a) Tek harmonikler b) Çift harmonikler[15]

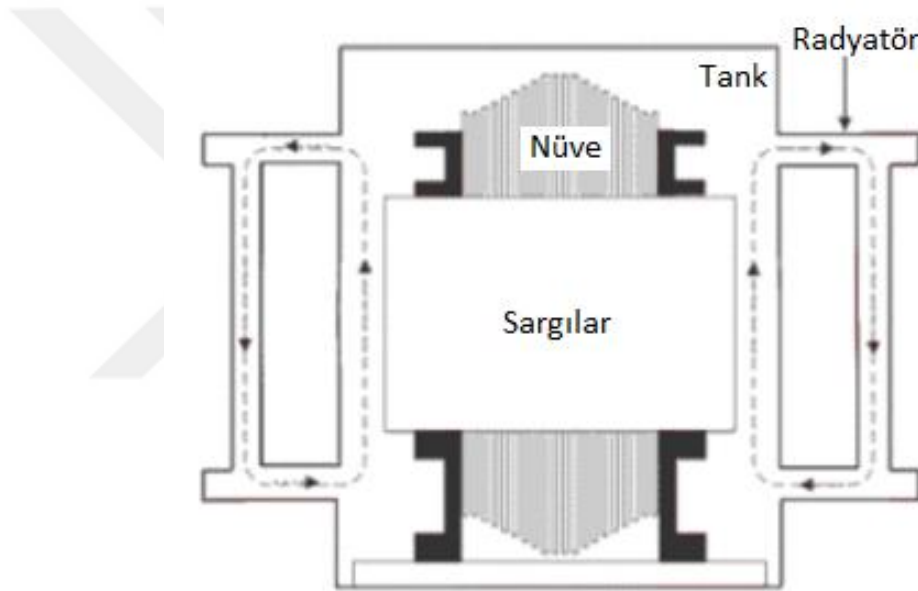
3.3 Fan Gürültüleri

Transformatör gürültüleri üzerinde etkisi olan üçüncü faktör fan ve pompa gürültüleridir. Bilindiği üzere transformatörlerin çekirdeğinde bulunan sargılar ile nüve arasında meydana gelen manyetik indüklenme ısı seviyesinin yükselmesine sebebiyet vermektedir. Meydana gelen ısı seviyesinin çok yüksek değerlere çıkabilmesi nedeniyle soğutma işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu soğutma tertibatını oluşturmak amacıyla farklı soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Bölüm 2.2.4'te açıklanan hava, su ve yağ ile soğutma düzenekleri ilgili ısınmanın önüne geçebilmektedir. Hava, su ve yağ kullanılarak gerçekleştirilen soğutma sistemleri farklı yapılarda kurulabilmektedir. Bu sistemler ONAN(Oil Natural Air Natural), ONAF(Oil Natural Air Forced), OFAF(Oil Forced Air Forced), OFWF(Oil Forced Water Forced), ODAF(Oil Directed Air Forced) ve ODWF(Oil Directed Water Forced) olmak üzere 6 farklı şekilde kurulabilmektedir. Kullanılan bu tekniklerin en yaygın kullanılanları aşağıda açıklanmıştır.

ONAN(Oil Natural Air Natural);

Bu yöntem yaygın olarak kullanılan basit bir transformatör soğutma sistemidir. Bu teknikte sıcaklığı artarak yüksek değerlere ulaşan yağın doğal konvansiyonel dolaşımı ile soğutulması sağlanmaktadır. Transformatörün içinde gerçekleşen manyetik

indüklenme neticesinde üretilen ısı ile ısı ve doğal olarak kinetik enerjisi yükselen yağ molekülleri kazan içerisinde yukarı doğru hareket eder. Yukarı doğru yükselen sıcak yağ yukarıda bulunan soğuk yağ molekülleri ile yer değiştirir. Bu sıcak yağ molekülleri dalga duvarlar veya radyatörlerin içerisinde geçerken ısılarını doğal iletim, yayılım ve ışıma ile atmosfere ileterek soğurlar. ONAN soğutma tekniğinde transformatör kazanının içerisindeki yağ devir hareketini yük altında iken sürekli olarak tekrarlar. Bu sistemde yağın soğumasını hızlandırmak amacıyla sıcak yağın hava ile temas yüzeyi artırılmalıdır. Bu nedenle transformatör kazanının yüzeyi artırılmaktadır. Genellikle temas yüzeyini artırma işlemi transformatör kazanına dalga duvarlar veya radyatörlerin eklenmesiyle gerçekleştirilir.



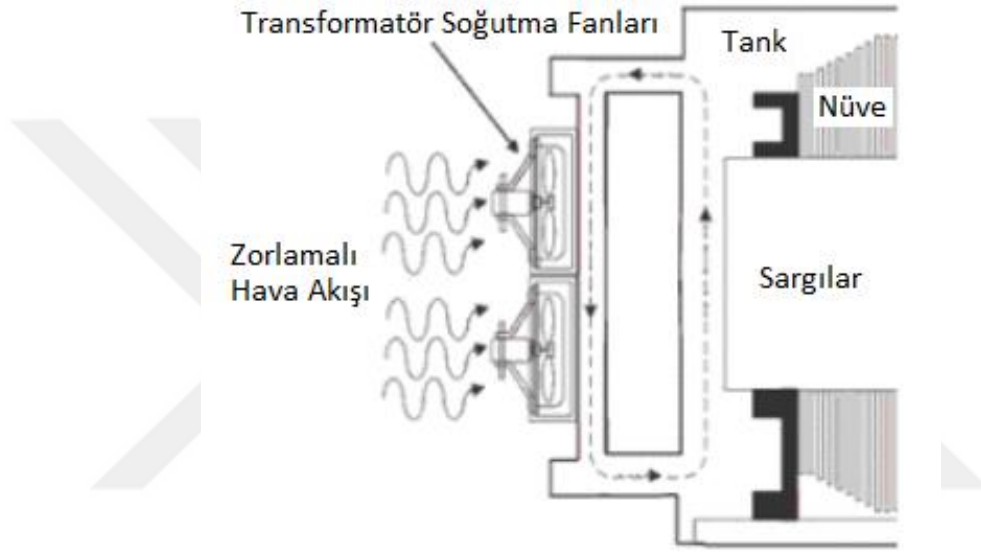
Şekil 3.78 ONAN soğutma tekniği[36]

ONAF(Oil Natural Air Forced);

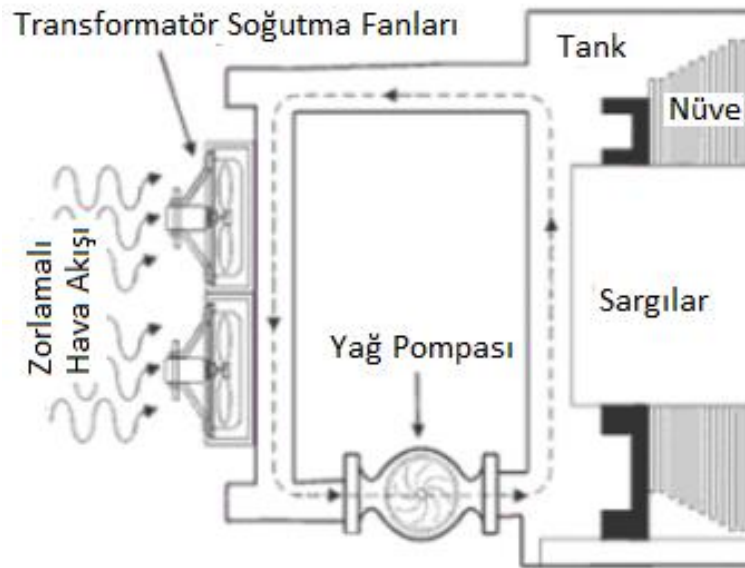
Genellikle güç transformatörlerinde kullanılan bu soğutma sisteminde yağ dolaşımı konvansiyonel olarak, hava teması ise fanlar aracılığı ile sağlanmaktadır. ONAN sisteminde olduğu gibi ısı ve kinetik enerjisi yükselen yağ molekülleri kazan içerisinde yukarı doğru hareket eder ve yukarıda bulunan soğuk yağ molekülleri ile yer değiştirir. Yukarı kısımlara hareket eden bu sıcak yağ molekülleri dalga duvarlar veya radyatörlerin içerisinde geçerken fanlar marifetiyle gönderilen zorlamalı hava akımı ile soğutulurlar. Şekil 3.79’da ONAF sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.

OFAF(Oil Forced Air Forced);

OFAF soğutma sisteminde ısınan yağın daha hızlı soğutulması amaçlanmaktadır. Isınmış yağın sirkülasyonu, yağın doğal yükselişine ek olarak kazan içerisinde yerleştirilmiş yağ pompası marifetiyle daha hızlı sağlanmaktadır. Yağın soğutulması işlemi ise ONAF sisteminde olduğu gibi fanlar aracılığıyla sağlanmaktadır. OFAF transformatör soğutma tekniğine ait çalışma prensibi ise basitçe Şekil 3.80’de gösterilmiştir.



Şekil 3.79 ONAF soğutma tekniği[36]

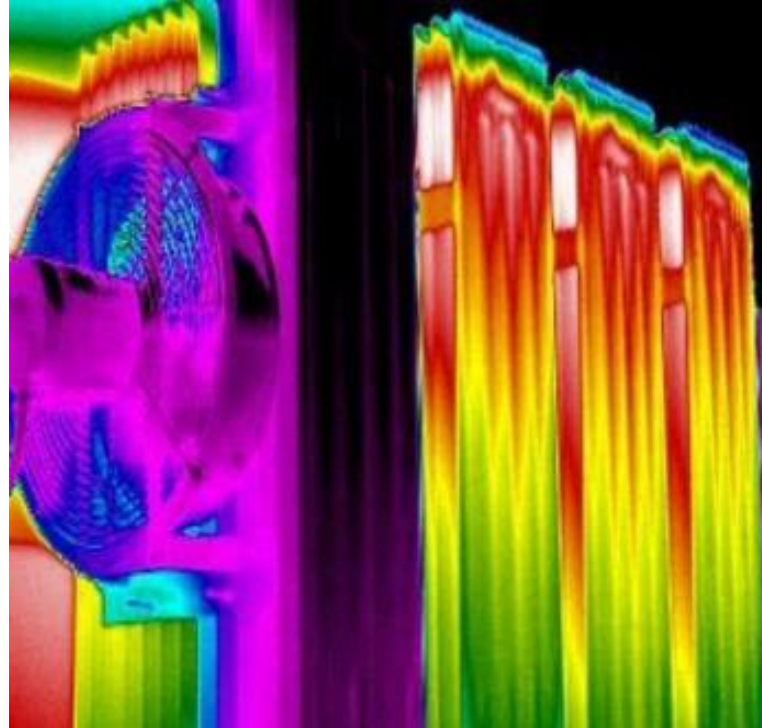


Şekil 3.80 OFAF soğutma tekniği[36]

Şekil 3.81’de gerçek bir güç transformatörünün radyatörlerine yerleştirilmiş soğutma fanları gösterilmektedir. Şekil 3.82’de ise transformatörde bulunan soğutma fanı ile radyatörlerin termal kamera ile alınmış sıcaklık ölçümleri gösterilmektedir.



Şekil 3.81 Güç transformatöründe bulunan soğutma fanları[37]

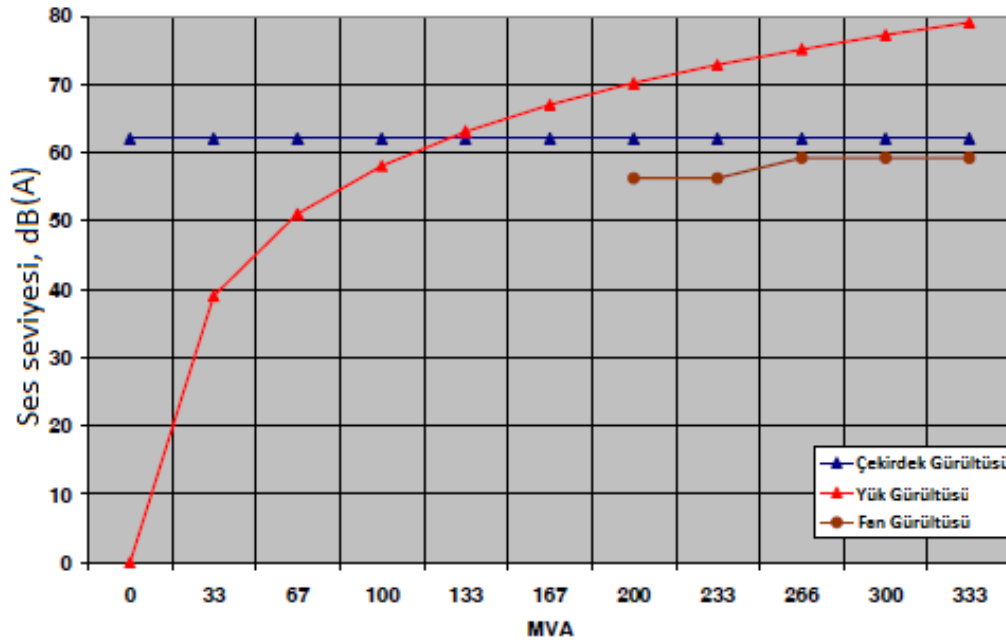


Şekil 3.82 Radyatörlerin termal kamera ile sıcaklık ölçümü[37]

Transformatörü soğutmak amacıyla kullanılan bu pompa ve fanların transformatör gürültüleri üzerinde az da olsa etkisi bulunmaktadır. J.Pan ve diğerlerine göre fan gürültüleri doğal geniş bant karakteristiğine sahiptir. Bu sebeple transformatörlerin çevresindeki gürültü problemlerine etkisi azdır[10].

Kulkarni ve Khaparde [38] de yaptıkları çalışmada fan gürültülerinin fanın bıçak boyutu ve hızına bağlı olarak değişen hava akışının bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Transformatör çekirdeğinin meydana getirdiği gürültülerin 100-600 Hz frekans aralığında gürültü üretirken fanlar ve pompaların ürettiği gürültü bileşenleri bu aralığın altında veya üstünde olduğunu ifade etmişlerdir.

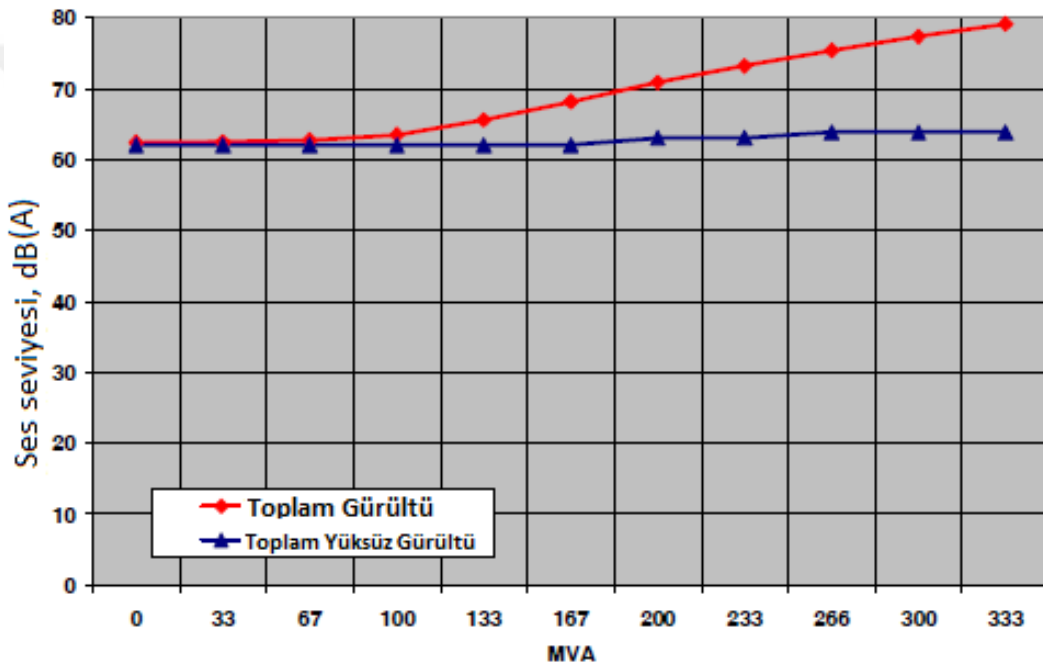
Transformatörden yayılan gürültüye sebep olan sistemlerin meydana getirdiği gürültü seviyeleri incelenirse J.Pan ve diğerlerinin ifade ettiği şekilde fan gürültülerinin çok etkin olmadığı görülmektedir. Şekil 3.83’de çekirdek gürültüsü(yüksüz durumda meydana gelen gürültü), yük altında meydana gelen gürültü ve fanların meydana getirdiği gürültünün 333 MVA’lık bir transformatörün yüklenme durumuna göre meydana getirdiği ses seviyeleri gösterilmektedir.



Şekil 3.83 Düşük çekirdek gürültülü modern bir transformatörün yüklenme durumuna göre meydana gelen ses seviyeleri[18]

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü üzere 100 MVA'nın üzerine çıkana kadar baskın gürültü kaynağı çekirdek gürültüsüdür. Ancak transformatörün yüklenme seviyesi arttıkça yük altında meydana gelen gürültü seviyesi baskın gürültü kaynağı olarak öne çıkmaktadır. 167 MVA'dan sonra sıcaklığı artan yağın soğutulması amacıyla devreye giren fanların gürültüsü ise mevcut çekirdek gürültüsünün biraz altında ve yüklü durum gürültü seviyesinin çok altında kalmış olması sebebiyle baskın gürültü kaynağı olmaktan uzak kalmaktadır.

Meydana gelen toplam gürültünün baskın gürültü kaynağına paralel olarak değiştiği aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

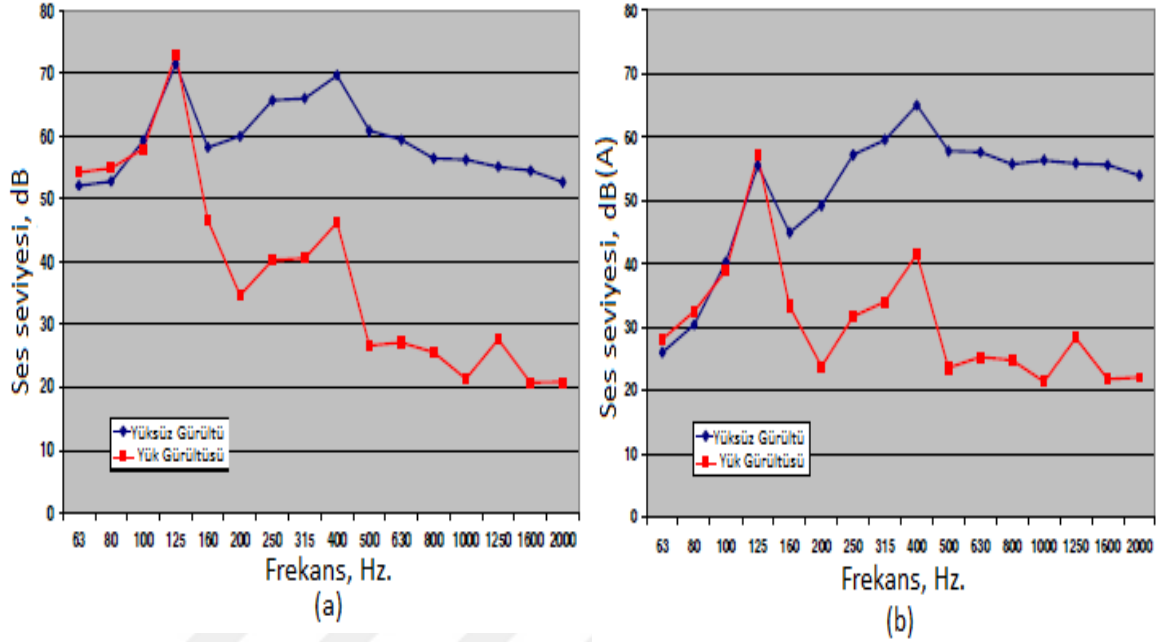


Şekil 3.84 Düşük çekirdek gürültülü modern bir transformatörün yüklenme durumuna göre meydana gelen toplam ve yüksüz durum ses seviyeleri[18]

3.4 Transformatör Gürültü Sebeplerinin Karşılaştırılması

Transformatör gürültüleri yüksüz ve yüklü durum gürültüleri olmak üzere iki ana başlık altında ayrılmaktadır. Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere her iki gürültü çeşidini de etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Transformatörde meydana gelen toplam gürültü seviyesi üzerinde hangisinin ne kadar etkin olduğunu görebilmek amacıyla yapılmış olan ölçümler bu bölümde incelenecektir.

Şekil 3.85'te bir güç transformatörünün yüklü ve yüksüz durumlarında ölçülmüş frekans spektrumu verilmiştir. Şekil 3.85-(a)'da verilen şekilden görüldüğü üzere yüksüz durumdaki gürültü birkaç önemli bileşene sahipken yüklü durumdaki gürültü ağırlıklı olarak 120 Hz frekansında baskındır[18].



Şekil 3.85 Yüklü ve yüksüz durumların frekans spektrumu a) Lineer dB ölçeği b) dBA ölçeği[18]

Şekil 3.85-(b)'de ise A-ağırlıklı ölçek ile alınmış frekans spektrumları bulunmaktadır. A-ağırlıklı ölçekte yüksek frekanslar yerine daha çok alçak frekanslar zayıflatılır. Bu sonuçla yüksüz durum gürültüsünün yüksek frekans bileşenleri transformatörün toplam dB(A) gürültü seviyesini belirler.

Modern transformatörlerde düşük mıknatıssal büzülmeye maruz kalan çekirdek tasarımları ve levhaları, az gürültülü soğutma sistemleri neticesinde yüksüz durum gürültü seviyeleri azalmıştır. Bu gürültü seviyesinin azalmasıyla yüklü durumdaki gürültü seviyeleri toplam gürültü seviyesi üzerinde baskın hale gelmeye başlamıştır. Aşağıdaki çizelgelerde 10 adet Avrupa ve 10 adet Kuzey Amerika olmak üzere alınan toplam 20 transformatör üzerinde yapılmış yüklü ve yüksüz durum gürültü seviye ölçümleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.17 Avrupa’da üretilmiş transformatörlerin gürültü seviyeleri[18]

Transformatör	MVA	Yüksüz Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Yüklü Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Fark
1	20	39.4	42.9	3.5
2	22	49.8	42.3	-7.5
3	25	43.8	49.5	5.7
4	25	45.8	43.2	-2.6
5	31.5	46.2	48.1	1.9
6	40	43.8	53.0	9.2
7	80	63.0	50.0	-13.0
8	200	55.4	65.0	9.6
9	294	53.0	59.0	6.0
10	300	61.0	62.8	1.8

Çizelge 3.18 Kuzey Amerika’da üretilmiş transformatörlerin gürültü seviyeleri[18]

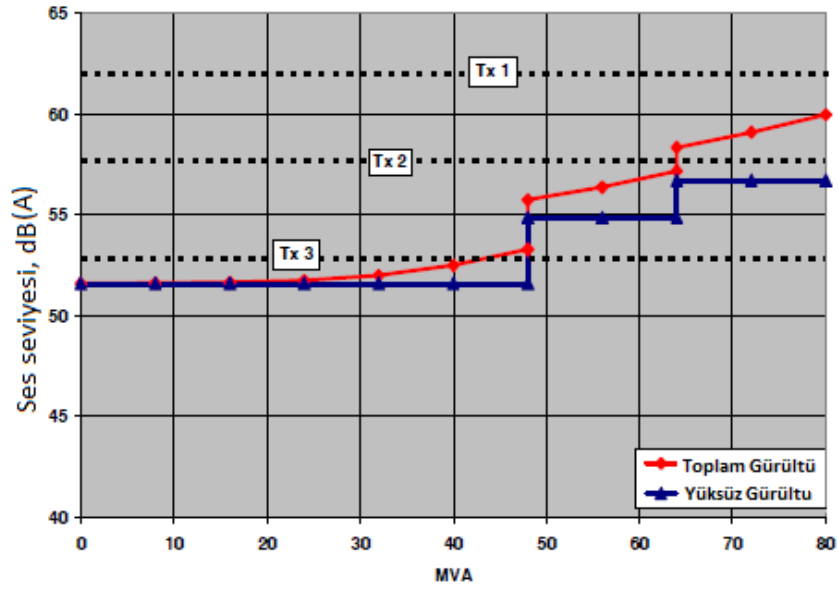
Transformatör	MVA	Yüksüz Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Yüklü Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Fark
1	45	60.7	50.1	-10.6
2	50	63.2	58.0	-5.2
3	65	54.6	52.2	-2.4

Çizelge 3.18 Kuzey Amerika’da üretilmiş transformatörlerin gürültü seviyeleri(devamı)[18]

Transformatör	MVA	Yüksüz Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Yüklü Durum Gürültü Seviyesi, dB(A)	Fark
4	84	55.0	60.8	5.8
5	87	66.0	51.3	-14.7
6	93	56.8	53.8	-3.0
7	202	50.3	56.6	6.3
8	208	74.3	71.0	-3.3
9	333	63.9	79.0	15.1
10	336	75.8	69.9	-5.9

Çizelgelerden görüldüğü üzere Avrupa’da üretilmiş 7 adet transformatörün yüklü durum gürültüleri yüksüz durum gürültülerinden daha yüksektir. Kuzey Amerika’da üretilmiş olan transformatörlerde ise 3 adet transformatörün yüklü durum gürültü seviyesi daha yüksek çıkmıştır.

Bilindiği üzere toplam gürültü seviyesi baskın gürültü kaynağına göre şekillenmektedir. Bu bağlamda düşük çekirdek gürültüsüne sahip modern transformatörlerde meydana gelen gürültü seviyelerindeki baskın karakterin daha iyi anlaşılması amacıyla düşük gürültülü 80 MVA transformatörde ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.86 Farklı seviyelerde yüklenen 80 MVA transformatörün yüksüz ve toplam gürültü seviyeleri [18]

TX1, TX2 ve TX3 olarak isimlendirilen üç farklı ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler farklı zaman veya farklı mahalde gerçekleştirilmiştir. TX1 ölçümünde transformatör tam yükte, TX2 ölçümünde %80 yükte ve TX3 ölçümünde %50 yükte çalıştırılmıştır. Sonuç olarak yüksüz durumda meydana gelen çekirdek gürültüleri ile toplam gürültü arasındaki ilişki Şekil 3.86’da gösterilmiştir.

Modern transformatörlerin tasarımı ve kullanılan materyallerin geliştirilmesi neticesinde yüksüz durum gürültüleri olarak ifade edilen gerilim altındaki çekirdek gürültüleri genellikle baskın gürültü problemi olmaktan çıkmıştır. Pompa ve fan gürültüleri ise yüksüz durum gürültülerinden daha az etki yapması sebebiyle baskın gürültü kaynağı olarak düşünülememektedir. Transformatör gürültülerinin baskın gürültü kaynağı genellikle yük altında meydana gelen manyetik sızıntı akılarıyla oluşan yük gürültüleri olmaktadır.

TRANSFORMATÖR GÜRÜLTÜ TESTLERİ

4.1 Ölçüm ve Tahmin Metotlarının Açıklanması ve Karşılaştırılması

Transformatörlerde meydana gelen gürültülerin ölçülmesi ve tahmin edilmesi hususlarında uluslararası standartların belirlediği yöntemler uygulanmalıdır. Genel olarak gürültü ölçümü için ses basınç ve ses yoğunluk olmak üzere iki ölçüm metodu bulunmaktadır.

Ses basınç ölçümleri IEC 60651 standardına uygun olan tip-1 ses seviye metresi kullanılmalı ve ISO 3746'nın 5.2. maddesine göre kalibre edilmelidir. Ses yoğunluk ölçümlerinde IEC 61043 standardına uygun olan class-1 ses yoğunluk aleti kullanılmalı ve ISO 9614-1'in 6.2. maddesine göre kalibre edilmelidir[39].



Şekil 4.1 Ses basınç ölçüm cihazı[40]

Zorlamalı soğutma sistemlerinin devre dışı olması durumunda transformatör yüzeyinden 0.3 m uzaklıktan ölçüm alınmalıdır. Soğutma gruplarının devrede olması durumunda ise 2 m uzaklıktan ölçülmelidir. Tank yüksekliği <2,5 m ise tank yüksekliğinin yarısından ölçüm alınmalıdır. Tank yüksekliği >2,5 m ise tank yüksekliğinin 1/3'ü ve 2/3'ü yüksekliklerinden ölçüm alınmalıdır[39].

Mikrofonlar belirtilen yükseklik ve mesafelerde konuşlandırılmalıdır. Ancak bir ölçümde en az 6 mikrofon olmalıdır. Mikrofonlar arası yatay mesafe ise 1 m'den daha fazla olmamalıdır[39].

Her iki ölçüm metodunda da aşağıda verilen maddeler uygulanarak ölçüm yapılmasına izin verilmektedir;

- Transformatöre enerji verilir, fanlar ve pompalar servis dışı bırakılır.
- Transformatöre enerji verilir, fanlar ve pompalar servise alınır.
- Transformatöre enerji verilir, fanlar servis dışı bırakılır, pompalar servise alınır.
- Transformatör enerjisi kesilir, fanlar ve pompalar servise alınır.

Transformatörün nominal akım ve geriliminde meydana gelen çekirdek gürültüsü ve yük gürültüsünün toplamı ile A-ağırlıklı ses gücü seviyesi $L_{WA,SN}$ Eşitlik 4.1'de ifade edilmektedir[39].

$$L_{WA,SN} = 10\lg(10^{0,1L_{WA,UN}} + 10^{0,1L_{WA,IN}}) \quad (4.1)$$

$L_{WA,UN}$, sinüzoidal nominal gerilim, nominal frekans ve yüksüz durumdaki A-ağırlıklı ses gücüdür. $L_{WA,IN}$, nominal akımdaki A-ağırlıklı ses gücüdür. Soğutma ekipmanlarının meydana getirdiği sesin de eklenmesi gerekirse $L_{WA,UN}$ veya $L_{WA,IN}$ içerisine eklenebilir. Ölçüm belirsizliklerinden kaynaklanacak olan farklar sebebiyle gerçekte meydana gelen ses gücü seviyesi Eşitlik 4.1'de verilen denklemin kullanılmasıyla elde edilen ses gücü seviyesinden daha düşük olabilmektedir[39].

Test ekipmanlarının standartlara uygun olarak seçilmesi ile ölçüm belirsizliklerinden kaynaklanan fark 1 dB'den daha düşük olabilmektedir. Ancak bazı parametreler ölçüm belirsizliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin, gerilimin 1.6 T indüksiyon altındaki bir transformatörde %1 değişmesi 0.5 dB, frekansın 1 Hz değişmesi 0.4 dB ve tankın alt kısmıyla zeminin arasındaki uzaklığın çok küçük olması 4 dB'nin üzerinde hata

oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca DC mıknatıslanma ile uyartım gerilimindeki harmonikler de gürültü seviyesini etkileyen ölçüm belirsizliklerindendir[31].

Nominal akım, nominal frekans ve empedans gerilimindeki A-ağırlıklı gürültü gücü seviyesi $L_{WA,IN}$ Eşitlik 4.2'den yaklaşık olarak bulunabilmektedir[39].

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \lg \frac{S_r}{S_p} \quad (4.2)$$

S_r , transformatörün nominal gücü(MVA) ve S_p , referans güç(1 MVA) olarak ifade edilmektedir. Ototransformatörler ve üç sargılı transformatörlerde iki sargının nominal gücü olan S_t , nominal güç S_r yerine kullanılabilir. Bulunan gürültü gücü seviyesinin garanti edilen seviyeden 8 dB veya daha düşük olması durumunda yük akım ölçüm sonuçları uygun olmamaktadır[39].

4.1.1 Ses Basınç Metodu

Kapalı ve açık alanda yapılan ses basınç ölçümleri farklı koşullara sahip olunması sebebiyle farklı uygulamalar içermektedir. Kapalı alanda ölçüm yapılması durumunda yansıtma düzlemi odanın zemindir. Akustik emilme katsayısı ilgili frekans aralığında tercihen 0.1'den az olmalıdır. Bu gerekliliğe beton, çelik veya sert karo döşeme üzerinde yapılan kapalı alan ölçümlerinde genellikle uyulmaktadır.

Ses basınç ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken diğer parametre ise çevresel düzeltme faktörünün hesaplanmasıdır. Çevresel düzeltme faktörü, K, oda sınırları ve transformatörün yanındaki cisimlerden istenmeyen ses yansımalarıdır ve Eşitlik 4.3'te ifade edilmektedir[39].

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (4.3)$$

S, ölçüm yüzeyinin alanıdır ve 0.3 m uzaklıktan alınan ölçümler için Eşitlik 4.4'te tanımlanmaktadır[39].

$$S = 1,25 h l_m \quad (4.4)$$

h, transformatör tankının yüksekliği ve l_m belirlenmiş ölçüm çevresinin uzunluğudur. 1.25 kat sayısı ise deneysel gözlemlerle elde edilmiş bir sabittir. 2 m uzaklıktan alınan ölçüm için ise Eşitlik 4.5 kullanılmaktadır[39].

$$S = (h + 2)l_m \quad (4.5)$$

A, test odasının ses emme alanının oranıdır ve metrekare olarak Eşitlik 4.6'da tanımlanmaktadır[39].

$$A = \alpha S_v \quad (4.6)$$

α , ortalama akustik emme katsayısıdır ve aşağıdaki çizelgeye göre belirlenmektedir. S_v , metrekare olarak test odası yüzeyinin toplam alanıdır.

Çizelge 4.1 Ortalama akustik emme katsayısının yaklaşık değerleri [39]

Odanın Özellikleri	Ortalama Akustik Emme Katsayısı α
Beton, tuğla, alçı ve fayans ile yapılmış pürüzsüz sert duvarlara sahip neredeyse boş oda	0,05
Pürüzsüz duvarlara sahip kısmen boş oda	0,1
Mobilyalı oda, dikdörtgen makine odası, dikdörtgen sanayi odası	0,15
Düzensiz şekilli mobilyalı oda, düzensiz şekilli makine veya sanayi odası	0,2
Döşemeli mobilyalı oda, kısmen emici tavan veya duvarlara sahip sanayi veya makine odası	0,25
Emici özellikte tavan ve duvarlara sahip oda	0,35
Yüksek emici özellikte tavan ve duvarlara sahip oda	0,5

Çevresel düzeltme faktörü K, 7 dB'den daha küçük olmalıdır. Tam kapalı olmayan çok büyük oda ve çalışma alanları için K'nın değeri 0 dB'ye yaklaşır[39].

Dış alanda yapılan ölçümlerde arka plan gürültüsü yaklaşık olarak sabit olmalıdır. Bu ölçümlerde yansıtıcı yüzey bozulmamış zemin veya asfalt gibi yapay yüzeydir. Akustik emilme katsayısı ilgili frekans aralığında tercihen 0.1'den az olmalıdır. Bu gerekliliğe beton, asfalt, kum veya taş yüzeyler üzerinde yapılan dış alan ölçümlerinde genellikle uyulmaktadır. Dış alan ölçümlerinde K, yaklaşık olarak sıfırdır. Dış alan ölçümlerinde bozuk meteorolojik koşullarda ölçüm yapılmaması gerekmektedir[39].

Yapılan testin kabul edilebilir olması için belirlenmiş bazı şartların sağlanmış olması gerekmektedir. Test yapılan ortamın arka plan gürültüsü ile transformatör gürültüsü arasında fark ≥ 8 dB ise ölçüm kabul edilir. Arka plan ile transformatör gürültüsü arasındaki fark 8 dB'den küçük iken ölçümden önce ve ölçümden sonraki arka plan gürültü seviyesi arasındaki fark < 3 dB ise ölçüm kabul edilir. İlgili şartlar sağlanmadığı durumda ölçüm tekrar yapılmalıdır[39].

Ortalama arka plan gürültüsü L_{bg} Eşitlik 4.7'de tanımlanmaktadır. M, 1 ve 10 arasında arka plan ölçüm noktalarının sayısıdır. L_{bgi} , i. ölçüm noktasındaki arka plan ses basınç seviyesi ölçümüdür[31].

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgi}} \right) \quad (4.7)$$

Düzeltilmemiş ortalama ses güç seviyesi L_{pAO} ise Eşitlik 4.8'de verilmiştir. N, ölçüm noktalarının sayısı ve L_{pAi} i. ölçüm noktasındaki ses güç seviyesidir[31].

$$\overline{L_{pAO}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right) \quad (4.8)$$

Ölçümden sonra ikinci arka plan ölçümü yapılmalıdır. Düzeltilmiş A-ağırlıklı ses basınç seviyesi $\overline{L_{pA}}$ ise Eşitlik 4.9'da verilmiştir[31].

$$\overline{L_{pA}} = 10 \log_{10} \left(10^{0,1\overline{L_{pAO}}} - 10^{0,1\overline{L_{bgA}}} \right) - K \quad (4.9)$$

Son olarak meydana gelen ses güç seviyesi L_{wA} Eşitlik 4.10'da tanımlanmıştır. S, metrekare olarak ölçüm yüzey alanı ve S_0 referans alandır($1m^2$)[31].

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} \quad (4.10)$$

4.1.2 Ses Yoğunluk Metodu

Yapılan ölçümlerde çevresel faktörlerle sesin yansması nedeniyle hata payları meydana gelmektedir. Bu sebeple ölçüm yapılan transformatörün çevresindeki yansıtıcı etkenlerin mümkün olduğunca uzaklaştırılması gerekmektedir. Ancak ses yoğunluk metodu test edilecek transformatörün belirlenmiş çevresinden en az 1.2 m uzaklıkta kurulan 2 yansıtıcı duvarla daha iyi sonuçlar elde etmeye imkan vermektedir. 3 adet yansıtıcı duvar olması durumunda ise her bir duvarın belirlenmiş çevreden en az 1.8 m uzaklıkta olması gerekmektedir[39]. Ölçümler ses yoğunluk ölçüm problemleriyle gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.2 Ses yoğunluk ölçüm probu[40]

Ölçümlerde arka plan gürültüsü yaklaşık olarak sabit alınmaktadır. A-ağırlıklı ortalama ses yoğunluk seviyesi $\overline{L_{IA}}$ Eşitlik 4.11’de tanımlanmaktadır[39].

$$\overline{L_{IA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sign}(L_{IAi}) 10^{0,1|L_{IAi}|} \right) \quad (4.11)$$

Düzeltilmemiş ortalama A-ağırlıklı ses basınç seviyesi $\overline{L_{pAO}}$ Eşitlik 4.8’de verilmişti. Test çevresi ve arka plan gürültü seviyesinin uygunluğunun kararlaştırılabilmesi amacıyla ΔL ölçütü Eşitlik 4.12’de verilmektedir[39].

$$\Delta L = \overline{L_{pAO}} - \overline{L_{IA}} \quad (4.12)$$

Standart sapmaları 3 dB(A) seviyesinin altında tutabilmek amacıyla maksimum ΔL 8 dB(A) seviyesinden küçük olmalıdır. Ses basınç ölçümünde olduğu gibi ses yoğunluk ölçümlerinde de meydana gelen ses güç seviyesi L_{wA} Eşitlik 4.13’te tanımlanmıştır[39].

$$L_{WA} = \overline{L_{IA}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} \quad (4.13)$$

Soğutma ekipmanları bulunan bir transformatörün sadece soğutma ekipmanlarının ses seviyesi ise Eşitlik 4.14’de verilmiştir[39].

$$L_{WA0} = 10 \lg(10^{0,1L_{WA1}} - 10^{0,1L_{WA2}}) \quad (4.14)$$

L_{WA1} , transformatör ve soğutma ekipmanlarının ses güç seviyesi, L_{WA2} , transformatörün ses güç seviyesidir.

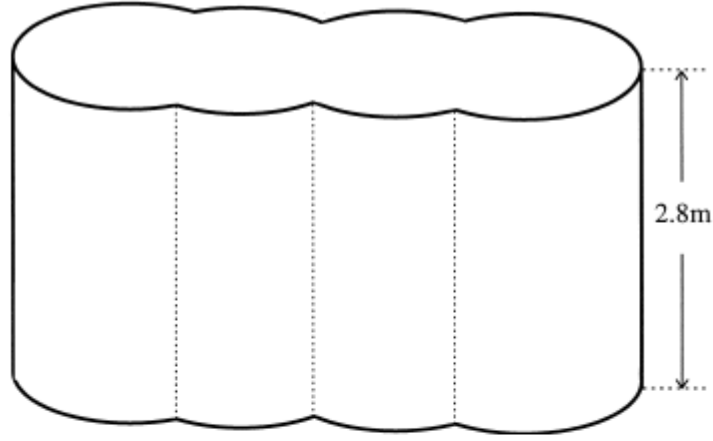
Yansıtıcı düzlem üzerindeki serbest alan koşulları dikkate alınacak olursa ekipmanın geometrik merkezinden R metre uzaklıktaki A-ağırlıklı ses basınç seviyesi L_{pAR} (Uzak alan ses basınç seviyesi) Eşitlik 4.15’te ifade edilmektedir[39].

$$L_{pAR} = L_{WA} - 10 \lg \frac{S_h}{S_0} \quad (4.15)$$

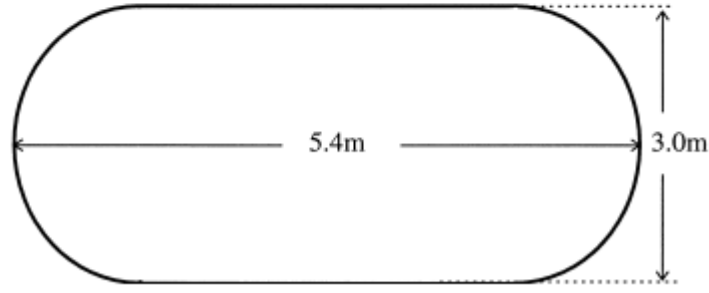
$S_h = 2\pi R^2$, 30 metreden büyük olan R yarıçapındaki yarım kürenin yüzey alanıdır. Daha doğru değerler elde edebilmek için atmosferik emme, yansıma ve perdeleme gibi diğer faktörler de dikkate alınmalıdır[39].

Ming ve diğerleri[10] indirici merkezdeki bir güç transformatöründe ses yoğunluk tekniğini kullanarak ölçümler yapmış ve teorik tahmin eşitlikleriyle buldukları sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada büyük transformatörden yayılan gürültü teorik ve deneysel metotlarla incelenmiştir. NEMA pozisyonlarına uygun olarak yerleştirilmiş olan ivmeölçerler ile transformatörden yayılan gürültü seviyesi ölçülmüş (NEMA'ya göre ivmeölçerler transformatör kazanından 0.3 m uzağa konularak ölçüm yapılmalıdır) ve gürültü yayılımı tahmin edilmiştir. Ses yoğunluk tekniğinde yerinde ölçüm sonuçları kullanılmıştır. Bu yöntemle transformatör kazanında meydana gelen titreşim ile harmonik bileşenlerin oluşturduğu gürültü yayılımı görülebilmektedir[10].

Çalışılan güç transformatörü evlerin ve araçların yoğun olarak bulunduğu bir indirici merkezde bulunmaktadır. Transformatör kazanı Şekil 4.3’te görüldüğü üzere 1.5 m çapında 4 adet kısmi silindirik kabuktan meydana gelmektedir. Kazan duvarının yüksekliği ve kalınlığı sırasıyla 19 mm ve 2.8 m’dir. Üst ve alt kapaklar benzer boyutlardadır[10].



(a) Transformatör Kazanı



(b) Üst ve Alt Kapaklar

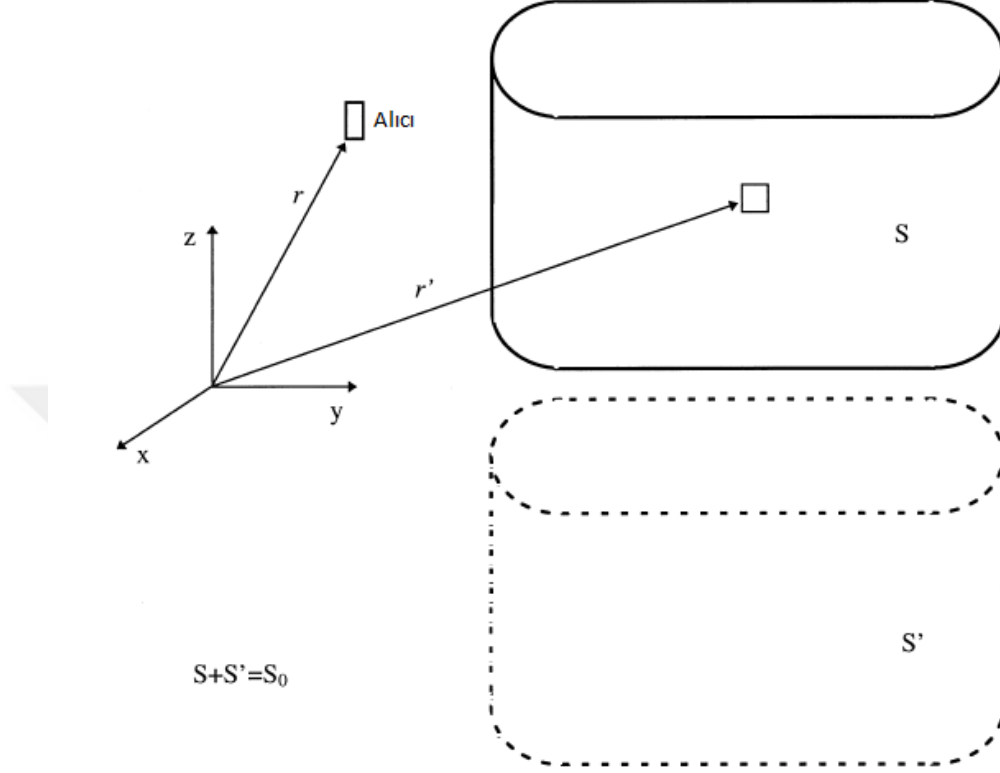
Şekil 4.3 Çalışılan transformatör a-) Kazan b-) Kapaklar [10]

Ming ve arkadaşlarına göre transformatör gürültüsün en önemli bileşeni manyetik devredeki levhaların mıknatıssal büzülmesinden kaynaklanan vızıltı şeklindeki gürültüdür. Manyetostriktif kuvvet yağ ve yalıtım materyalleri yolu ile veya destek noktalarına direk iletim ile manyetik devreden transformatör kazan duvarına taşınır. Bu uyartım transformatörün titreşimine ve gürültü yayılımına sebep olmaktadır[10].

Ölçümler transformatörün üst kapağında yüksek gerilimden dolayı, alt kapağında ise toprağa yakın olması dolayısıyla yapılamamıştır. Ancak zaten Ming ve diğerlerine göre kapaklardan yayılan gürültü ihmal edilebilecek kadar küçüktür[10].

Transformatör kazanının Şekil 4.4’de görüldüğü gibi 2 yarı silindirik kabuk ve 2 düz panelden oluştuğu düşünülebilir. Kazan duvarındaki titreşim takip eden araştırmalar boyunca periyodik ve zamana bağlı $us(-iwt)$ olarak farz edilecektir. Yayılım basıncının hesaplanmasında, titreşim yüzeyi küçük elemanlara bölünmüştür. Her bir elemanın

maksimum boyutu kazan duvarının yapısal dalga uzunluğundan çok daha küçüktür. Her bir elemanın tüm noktalarında benzer genlik ve fazda titreşim meydana geldiği farz edilmektedir[10].



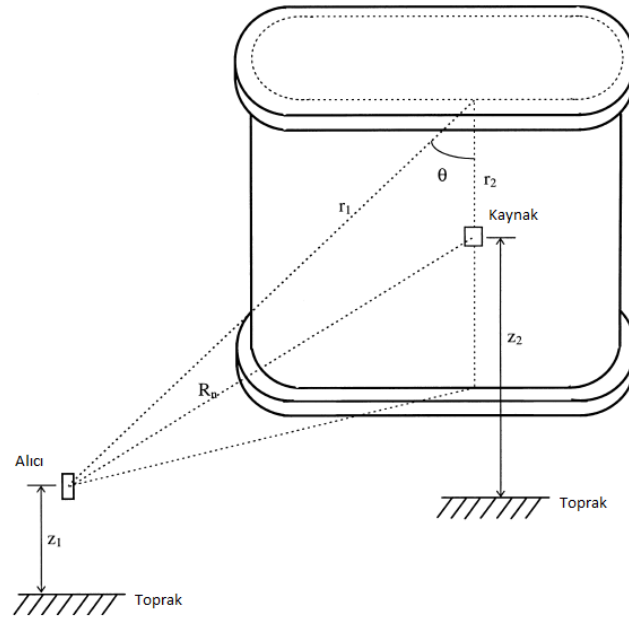
Şekil 4.4 Transformatör kazanının ve topraktan yansıyan görüntüsünün diyagramı[10]

Entegre yüzey S_0 kazan duvar yüzeyi ve topraktan yansıyanın toplamıdır. Gürültü yayılım basıncı Eşitlik 4.16'da verilen Kirchhoff-Helmholtz integral eşitliği ile tanımlanmaktadır[10].

$$p(r) = \frac{p_0}{4\pi} \int_{S_0} G(r, r') a(r') ds \approx \frac{p_0}{4\pi} \sum_{n=1}^N G_n(r, r') a_n(r') \Delta S_n \quad (4.16)$$

p_0 ortam havasının materyal yoğunluğunu, N kaynak elemanlarının toplam sayısı, r' , S_0 yüzeyi üzerindeki kaynak bölgesini ve r yüzeyin dışındaki alıcı bölgeyi, $a_n(r')$ n'inci eleman alanı ΔS_n 'in yüzeye normal ivmelenmesini, $G_n(r, r')$, tank duvarı kenarlarındaki kırılmayı ve topraktan yansıyanı kapsayan n'inci eleman bölgesinin(r' pozisyonunda) birim kaynağından dolayı r pozisyonundaki basınç olarak tanımlanan Green fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır[10].

Transformatör üzerine çalışmak için, kazan duvarı ve kapaklar arasındaki noktalarda esnemez dik açılı kamalar dikkate alınabilir. Kaynak elemanı alıcıya görüldüğü zaman kabuk yüzeyi ve aynı zamanda paneller ile yarı-silindirik kabuklar arasındaki noktalar üzerindeki hiçbir pozisyonda yayınının katkısı yoktur. Çünkü kabuk yüzeyleri ve diğer noktalar pürüzsüzdür. Benzer kaynak için yayınının etkisi, kaynağın alıcı tarafından görünür olmadığı durumda kaynağın alıcı tarafından görünür olduğu durumdan çok daha küçüktür. Bu nedenle yapılan analizlerde kazan duvarındaki iki yarı-silindirik kabuk ile iki ardışık dik açılı kamanın yayınımlı dikkate alınmayacaktır. Yayınım sadece kazan duvarı ile kapaklar arasındaki noktalardan meydana gelmektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere iki adet yayınım yolu mümkündür. Green's fonksiyonunda sadece alıcı tarafından görünür olan kaynak elemanlarının etkisi tanımlanmaktadır[10].



Şekil 4.5 Doğrudan ve tipik kırınım dalga yayılım yollarının geometrisi[10]

$$G_n(r, r') = G_{dir,n}(r, r') + \sum_m G_{diff,n,m}(r, r') \quad (4.17)$$

$G_{dir,n}(r, r')$ alıcıya n 'inci kaynak elemanında doğrudan yayılım olarak tanımlanır ve sadece kaynağın alıcıya görüldüğü hali içerir[10].

$$G_{dir,n}(r, r') = \frac{2e^{ikR_n}}{R_n} \quad (4.18)$$

k , dalga numarasıdır ve Rn Şekil 4.5'te görüldüğü üzere n 'inci kaynak elemanı ile alıcı bölgesi arasındaki uzaklıktır. $G_{diff,n,m}(r,r')$, alıcıya n 'inci kaynak elemanından m 'inci yayılım dalgasını ifade etmektedir[10].

$$G_{diff,n,m}(r,r') = \sqrt{2} \text{sign}(x_{n,m}) \frac{e^{i(kL_{n,m} + \frac{\pi}{4})}}{L_{n,m}} [f(|x_{n,m}|) - ig(|x_{n,m}|)] \quad (4.19)$$

$L_{n,m}$ yayılım köşesine kaynak elemanı ve alıcı bölgesinden en kısa yoldur[10].

$$L_{n,m} \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4.20)$$

$f(|x_{n,m}|)$ ve $g(|x_{n,m}|)$ Fresnel fonksiyonudur.

$$x_{n,m} = -\sqrt{\frac{3kr_1r_2}{\pi L_{n,m}}} \left(\frac{1}{2} + \cos\left(\frac{2\theta}{3}\right) \right) \quad (4.21)$$

θ Şekil 4.5'te görüldüğü üzere kazan duvarının yüzeyi ile r_1 arasındaki açıdır. $L_{n,m}$ ve $x_{n,m}$ yayılım yolu ve kaynak bölgesine bağlıdır[10].

Eşitlik 4.16 basıncın gerçek ve sanal bölümlerini vermektedir ve ilgili eşitlik uzak alanda yayılan ses alanının ayrıntılı bilgisini verebilir. Transformatör kazanının yüzeyine normal yöndeki ses yoğunluğu iki yakın pozisyon r_a ve r_b 'deki basınçların sanal bölümlerinden tahmin edilebilir[10].

$$I(r) = \frac{\text{Im}\{p^*(r_a)p(r_b)\}}{2p_0w\Delta} \quad (4.22)$$

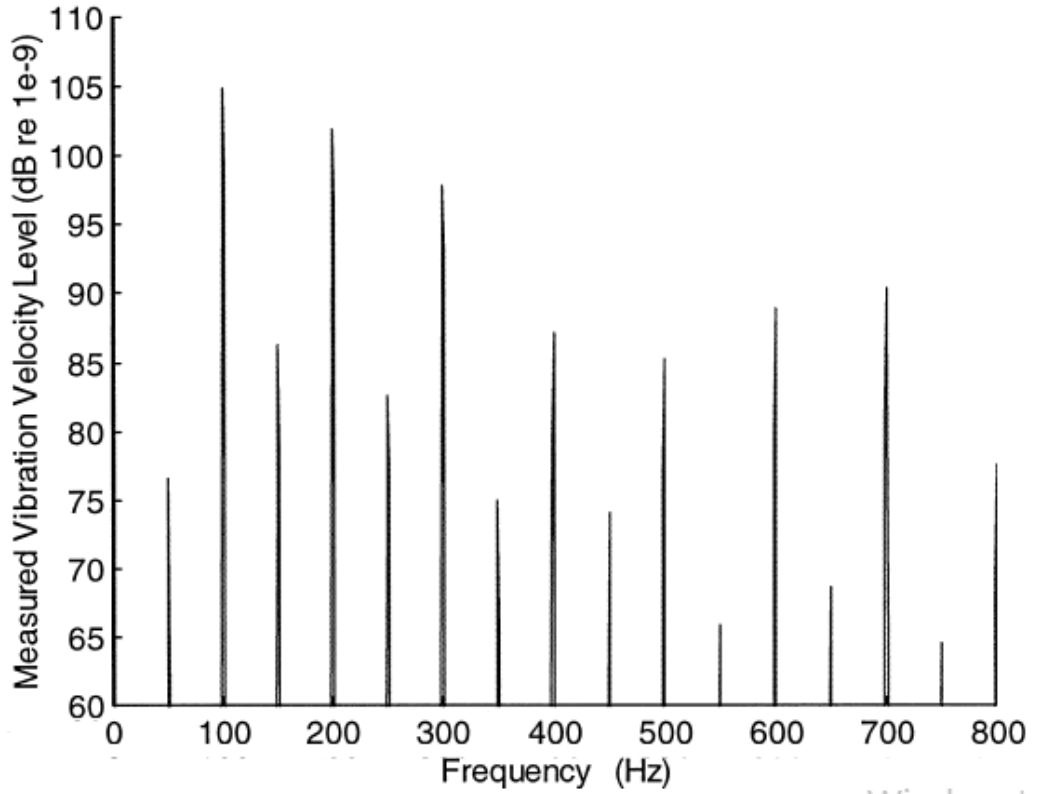
$I(r)$, r bölgesindeki her birim alandaki güç akışını ifade etmektedir. Toplam yayılan ses gücü tank kazan yüzeyi üzerinde ölçülmüş ortalama kare titreşim hızı v^2 ile zaman ve ortam ortalamasından tahmin edilebilir[10].

$$\Pi = \sigma p_0 c S \langle v^2 \rangle \quad (4.23)$$

Teorik olarak tahmin edilebilen S yüzey alanı ve σ yayılım oranıdır.

$$L_{\bar{p}} = L_{p(NEMA)} + 10 \log_{10}(WH) - 20 \log_{10} R_c - 4,4 \quad (4.24)$$

$L_{\bar{p}}$ transformatörden R_c uzaklıktaki düzlem bölgesi üzerindeki referans değer 2×10^{-5} Pa ile birlikte zaman ve ortam ortalama ses basınç seviyesidir. W alıcı tarafından görünen transformatör genişliği ve H transformatör kazanının yüksekliğidir[10]. Transformatör kazan duvarının yüzeyi $0.25 \times 0.30 \text{ m}^2$ 'lik benzer boyutlarda küçük elemanlara ayrılmıştır. Elemanın maksimum boyutuna, yapısal dalga uzunluğunun oranı 100 Hz. te %28.6 ve 200 Hz. %40.5 tir[10]. Farklı periyotlar boyunca gerçekleştirilmiş 5 ölçüm yapılmıştır. Şekil 4.6'da tüm kazan duvarındaki ölçülmüş titreşim hız seviyesi(dB) verilmiştir.



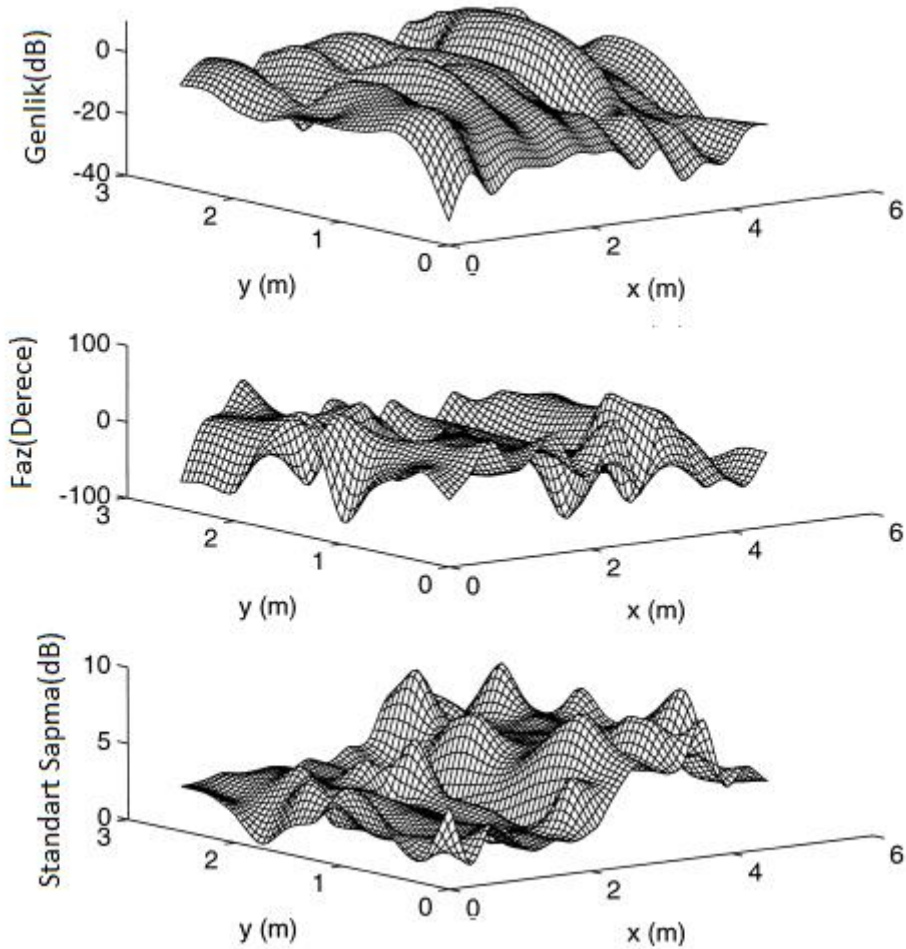
Şekil 4.6 Ölçülmüş titreşim hız seviyesi(dB), 1×10^{-9} referans değer olan v_0 ile kazan duvarının tamamının üzerindeki ortalama ile, $L_v = 10 \log_{10}(\langle \overline{v^2} \rangle / v_0^2)$ [10]

Şekilden görüldüğü üzere kazan duvarındaki en önemli titreşim enerjisi 50'nin katı olan frekanslardan ziyade 100 Hz'in katı olan frekanslardadır. Frekans arttıkça hız seviyesinin düştüğü görülmektedir. Aynı zamanda 100, 200 ve 300 Hz. frekanslarındaki titreşim seviyelerinin bastırılması durumunda transformatördeki toplam titreşim seviyesi önemli ölçüde azalabilir.

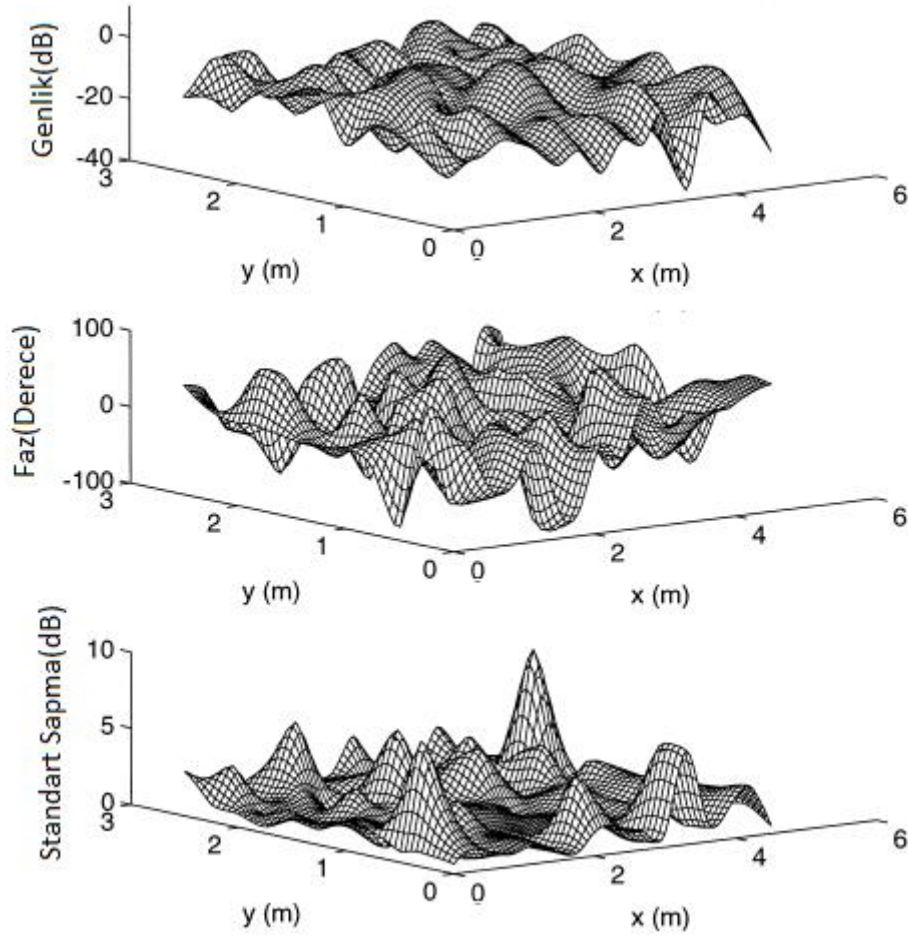
Şekil 4.7 ve 4.8'de 100 ve 200 Hz frekanslarında transformatör kazan duvarının ön tarafında ölçülmüş olan ivmeölçerin transfer fonksiyonunun genlik(dB) ve faz(derece)

grafikleri verilmiştir. Şekillerden de anlaşıldığı üzere titreşim eğrileri farklı frekanslarda farklıdır ve transformatör kazanının simetrik eksenlerinde simetrik değildir. Kenarlara yakın pozisyonlarda titreşim seviyesi nispeten azalmaktadır. İlgili şekillerde aynı zamanda transfer fonksiyon genliğinin standart sapması da verilmiştir. Genellikle standart sapma aralığı 1 dB ile 4 dB arasında değişmekte olup bazen nispeten daha yüksek olmaktadır. Bunun sebeplerinden biri transformatörün sabit yüklenmemesi olabilir. Benzer pozisyonlarda farklı zamanlarda yapılan ölçümlerin sonuçları farklı çıkmaktadır. Özellikle 50'nin katı olan frekanslarda standart sapma yüksektir[10].

Transformatör kazan duvarı üzerindeki elemanların maksimum boyutlarına yapısal dalga uzunluğunun oranı 200 Hz'in üzeri frekanslarda küçük değildir. Eşitlik 4.16 ve 4.22 sadece 100 ve 200 Hz frekanslarında uzak alan ses basınç ve yoğunluğunu tahmin edebilmektedirler[10].



Şekil 4.7 Transformatörün tank duvarının bir bölümünde 100 Hz. frekansta ivme ölçerden alınmış transfer fonksiyonu a) Genlik b) Faz c) Genliğin standart sapması[10]



Şekil 4.8 Transformatörün tank duvarının bir bölümünde 200 Hz frekansta ivme ölçerden alınmış transfer fonksiyonu a) Genlik b) Faz c) Genliğin standart sapması[10]

Çizelge 3.18’de transformatör kazan duvarının cepheden yüzeyine 5 ve 10 m uzaklıkta ve paralel olan sanal düzlemler($2,8 \times 2,8 \text{ m}^2$) üzerindeki ölçülmüş ve tahmin edilmiş ortalama ses yoğunluk seviyelerinin karşılaştırılması verilmiştir. Tüm tahminler Eşitlik 4.22 kullanılarak elde edilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere tahmin verileri ölçüm verilerinden 100 Hz’te daha yüksek ancak 200 Hz’te daha düşüktür. Tahmin ve ölçüm verileri arasındaki fark küçüktür. Oluşan farkın iki muhtemel sebebi vardır. Bunlardan birisi hesaplamalarda farz edildiği gibi toprağın mükemmel bir yansıtıcı yüzey olmamasıdır. Toprak, az da olsa gürültüyü emmektedir. Aynı zamanda çalışılan transformatörün sol tarafında bulunan diğer transformatörlerin de gürültü yayılımı ölçümleri etkilemiş olabilir. İkinci sebep ise transformatör kazan duvarı üzerinde alınan kaynak eleman boyutlarının fazla büyük alınmış olabileceğidir[10].

Çizelge 4.2 Transformatör kazan duvarının cepheden yüzeyine 5 ve 10 m uzaklıkta ve paralel olan sanal düzlemler(2,8x2,8 m²) ile 15x15 pozisyonlarında ölçülmüş ve tahmin edilmiş ortalama ses yoğunluk seviyelerinin karşılaştırılması[10]

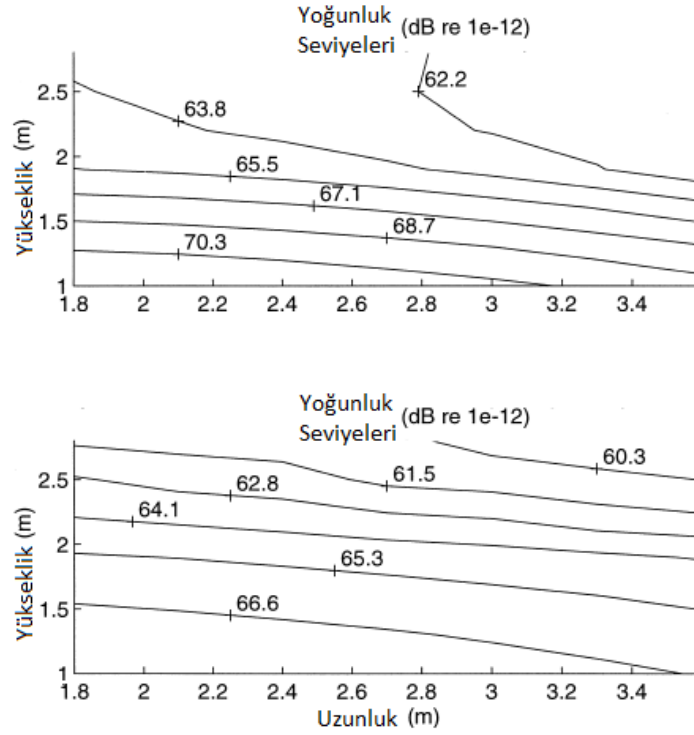
Uzaklık	5 m.		10 m.	
Frekans (Hz.)	100	200	100	200
Tahmin Değeri (dB)	65,3	61,5	63,8	57,1
Ölçüm Değeri (dB)	64,0	62,7	60,9	59,2

Çizelge 4.3’de ise Çizelge 4.4’deki sonuçlar için kullanılan benzer sanal düzlemler ve pozisyonlar alınarak Eşitlik 4.16’nın kullanılmasıyla elde edilmiş tahmin sonuçları ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlgili çizelgeden görüldüğü üzere tahmin sonuçları ile ölçüm sonuçları oldukça yakın çıkmıştır. Ölçüm ile tahmin değerleri arasındaki farkların oluşma nedenleri de yine Çizelge 4.2’deki sebepler ile aynıdır. Ancak iki farklı çizelgede kullanılan iki farklı tahmin metoduyla transformatör üst ve alt kapaklarının gürültü üzerinde ihmal edilebilecek kadar küçük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır[10].

Çizelge 4.3 Transformatör kazan duvarının cepheden yüzeyine 5 ve 10 m uzaklıkta ve paralel olan sanal düzlemler(2,8x2,8 m²) ile 15x15 pozisyonlarında ölçülmüş ve tahmin edilmiş ortalama ses basınç seviyelerinin karşılaştırılması[10].

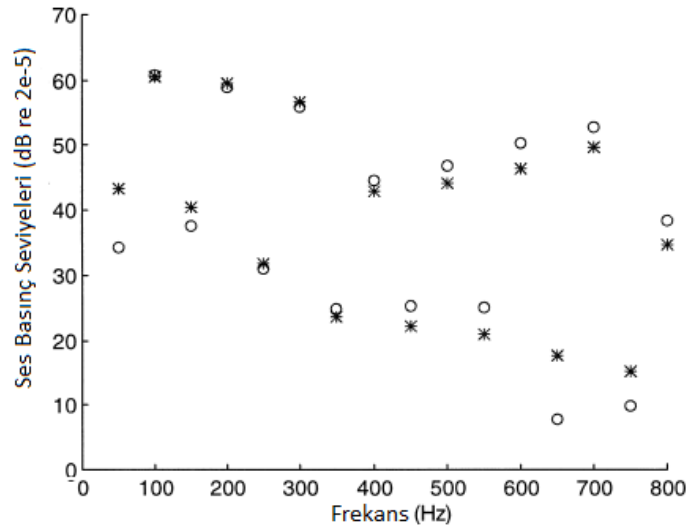
Uzaklık	5 m.		10 m.	
Frekans (Hz.)	100	200	100	200
Tahmin Değeri (dB)	64,6	63,3	62,7	59,3
Ölçüm Değeri (dB)	62,2	62,0	60,5	59,6

Şekil 4.9’da 100 Hz’te tahmin edilen ses yoğunluk konturları verilmiştir. Görüldüğü üzere transformatörden uzaklaştıkça ve toprak seviyesinden yükseldikçe ses yoğunluğu azalmaktadır. Ancak benzer yükseklikte transformatörün sol tarafındaki ses yoğunluğu ile sağındaki yoğunluk farklılık göstermektedir. Bunu sebebi transformatörün sol tarafında bulunan 2 adet transformatördür. İlk transformatör çalışılan transformatörden 4 m ikinci transformatör ise 13 m uzaklıktadır. İkinci transformatörün etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür ancak yakın transformatörün etkisi ile ses yoğunluk seviyesi daha yüksek çıkmaktadır[10].



Şekil 4.9 Transformatörden 5 ve 10 m uzaklıktaki düzlemler üzerinde 100 Hz’teki tahmin edilmiş ses yoğunluk konturları(referans değer 1×10^{-12}) a) 5m b) 10m[10]

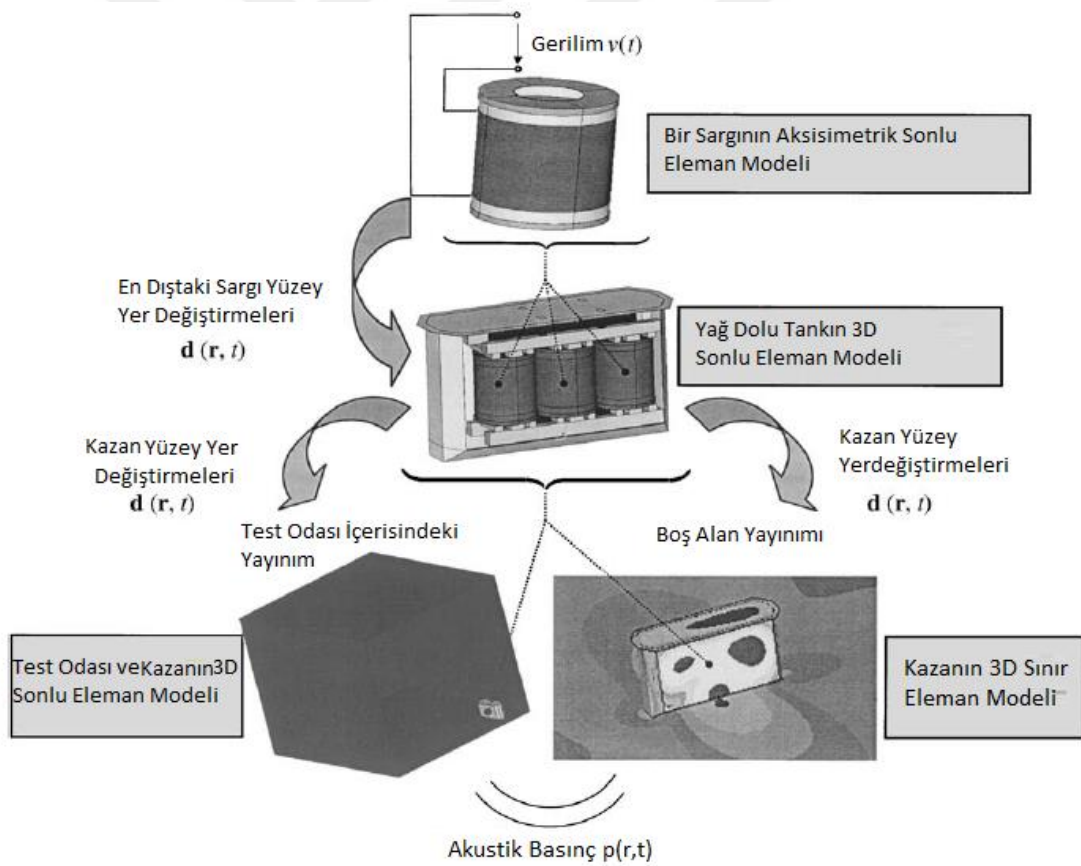
Şekil 4.10’da NEMA pozisyonlarına uygun olarak yapılmış ölçümlerin Eşitlik 4.24’deki tahmin metodunda kullanılarak elde edilmiş olan transformatörden 10 m uzaklıktaki tahmini ses basınç seviyeleri ile ölçülmüş seviyeler verilmiştir. Görüldüğü üzere Eşitlik 4.24 ile ölçüm verilerine oldukça yakın değerlerde tahmin yapılmıştır.



Şekil 4.10 Transformatörden 10 m uzaklıktaki düzlem üzerindeki ölçülmüş(*) ve tahmin edilmiş(o) ortalama ses basınç seviyeleri[10]

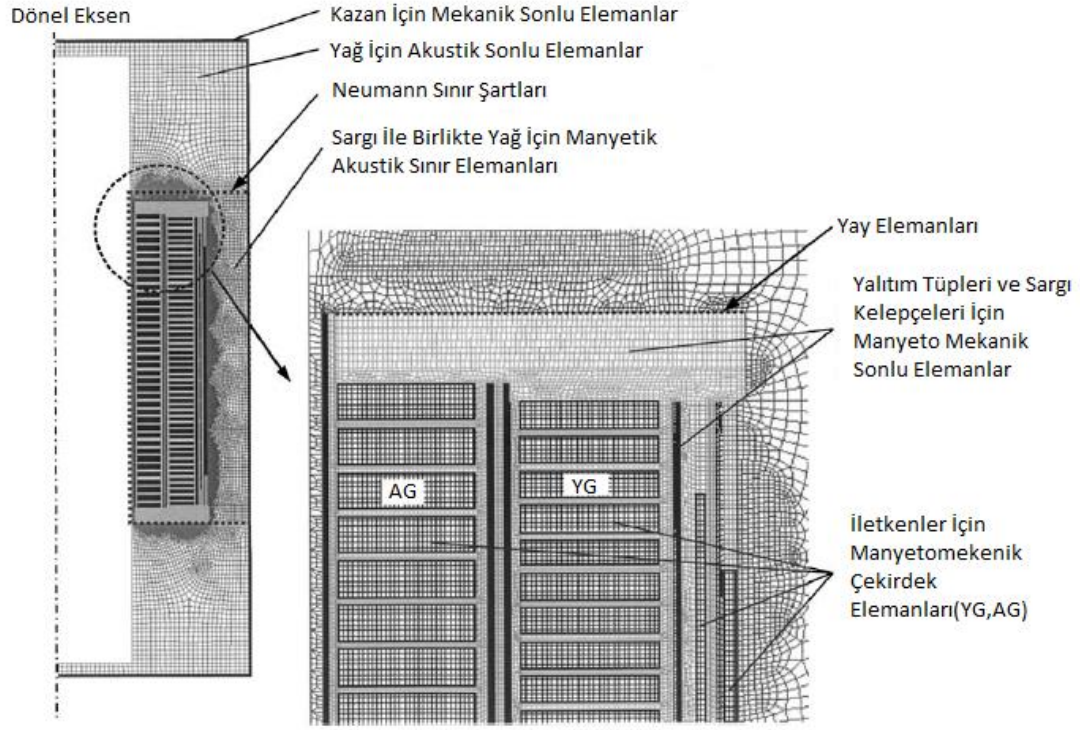
4.1.3 Ses Yoğunluk ve Ses Basınç Tekniklerinin Karşılaştırılması

Rausch vd.[11] transformatörde meydana gelen gürültülerin üç ana sebebi olduğunu belirtmişlerdir. Birincisi yüksüz durumdaki transformatör çekirdeğindeki katmanlarda meydana gelen mıknatıssal büzülmenin neden olduğu gürültüler, ikincisi yağ pompalarının veya fanların sebep olduğu gürültüler, son olarak da yüklü durumdaki transformatör sargılarındaki Lorentz kuvvetleri nedeniyle meydana gelen titreşimler neticesinde oluşan akustik gürültü yayılımıdır. Yüklü durumdaki transformatörün gürültü analizini yapabilmek için elektromanyetik alan, mekanik yer değiştirme alanı, akustik basınç alanı gibi çok alanlı problemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu değerlendirmeleri yapabilmek adına hem sonlu elemanlar metodunu(FEM) hemde sınır elemanlar metodunu(BEM) ihtiva eden bir yazılımı kullanarak simülasyon gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 4.11 Hesaplama şemasının görünümü[11]

Kurulan şemanın ilk etabı yağlı transformatörün bir sargısında iki boyutlu(2D) aksisimetrik akustik manyetomekanik sonlu eleman modeli vasıtasıyla en dıştaki sargı yüzey yer değiştirmelerinin hesaplanmasıdır.



Şekil 4.12 Yağlı güç transformatörünün bir bobini için aksisimetrik manyetomekanik sonlu eleman modeli [11]

Sonlu eleman sisteminde, sargıların gerilim yüklü iletkenleri manyetomekanik sargı elemanları kullanılarak ayrıklaştırılır. Her bir bobin arasındaki izolasyon malzemeleri ve tüm sargı kelepçeleri gibi sargı destek platformları manyetomekanik sonlu elemanlar kullanılarak modellenir. Manyetik sonlu elemanlar marifetiyle yüksek geçirgen çekirdeğin tam modeli yerine, bilgisayar modeli aracılığıyla sargı sınırında Neumann sınır koşulları kullanılarak basitleştirilir. Ayrıca kazanı çevreleyen yağ saf akustik sonlu elemanlar ve manyetik akustik sonlu elemanlar kullanılarak ayrıklaştırılır(manyetik akustik bölümler gibi hiçbir bağlantı olmaksızın diferansiyel eşitlikle çözülür). Sonuç olarak kazan standart mekanik sonlu elemanlar kullanılarak modellenir[11].

Yük altındaki güç transformatörünün sargı titreşimlerini doğru bir şekilde simüle edebilmek için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir.

1-) Test alanında yük kontrollü gürültü ölçümünde, transformatör anma akımlarında ve kısa devrede çalıştırılmalıdır. Bu durumda, kısa devre testi boyunca küçük gerilim nedeniyle, çekirdekten yayılan gürültü ihmal edilebilir ve bu nedenle yük altındaki gürültü ile yüksüz gürültü arasındaki net ayrıma ulaşılabilir[11].

2-) Hesaplanmasının zor olması nedeniyle çekirdek bağlantı destekleri sonlu eleman modelinde ihmal edilmiştir. Bu nedenle, sargıda ilave bir eksenel sertlik oluşturan bu desteklerin etkisi, sözde yay elemanları tarafından gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12’de bu yay elemanları üst ve alt sargı destek platformunun dış sınırına yerleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda transformatör üreticilerinin tecrübeleri kullanılarak 85MN/m sertlik kullanılmıştır[11].

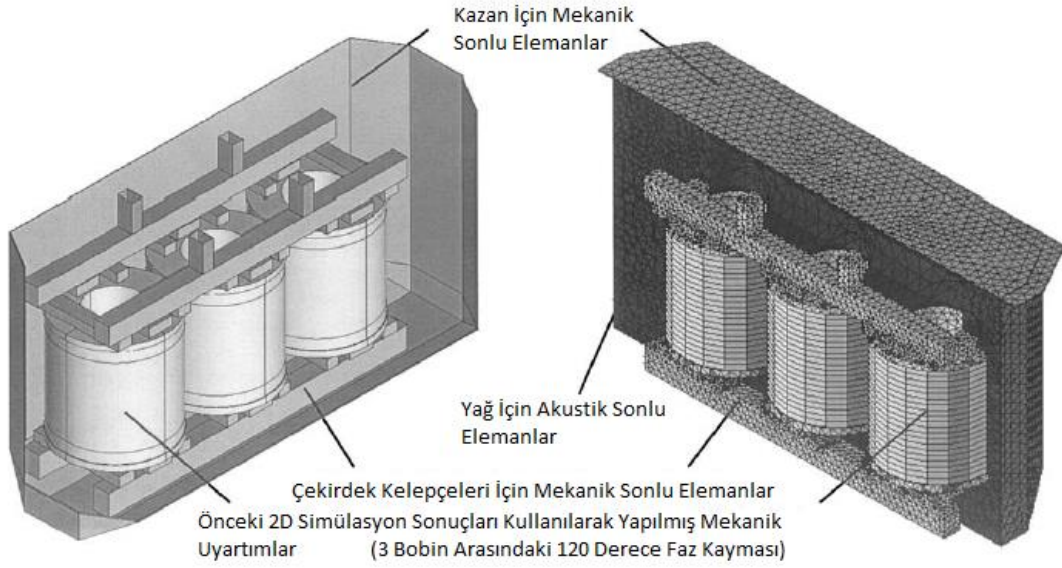
3-) Son olarak, ölçüm sonuçlarında ses basınç seviyeleri ve ölçülen titreşimler üzerinde kademe değiştirici konumunun büyük etkisi ortaya çıkmıştır, sonraki ölçümlerde 3 adet nominal kademe konumu gerçekleştirilmiştir[11].

- Kademe Değiştirici Konum 1: YG sargısı ve her iki kademe sargısı bağlıdır.
- Kademe Değiştirici Konum 2: YG sargısı ve kalın kademe sargısı bağlıdır.
- Kademe Değiştirici Konum 3: Yalnızca YG sargısı bağlıdır.

Sargı yüzey yer değiştirme genliğini hesaplamak amacıyla dinamik analiz kullanılarak yüksek gerilim sargılarının iki besleme terminali arasındaki gerilim için 50 veya 60 Hz. frekansta sinüzoidal uyartım sinyali uygulandı. Bu işlem için güç transformatörünün geometrisi, yoğunluğu, esneklik katsayısı, poisson oranı ve mekanik materyaller için kayıp faktörü gibi giriş parametrelerine dikkat edilmelidir. Çıkış sinyalinin Fourier transformu hesaplanarak spektrumdaki 100 Hz bileşeni çıkartılmalıdır[11].

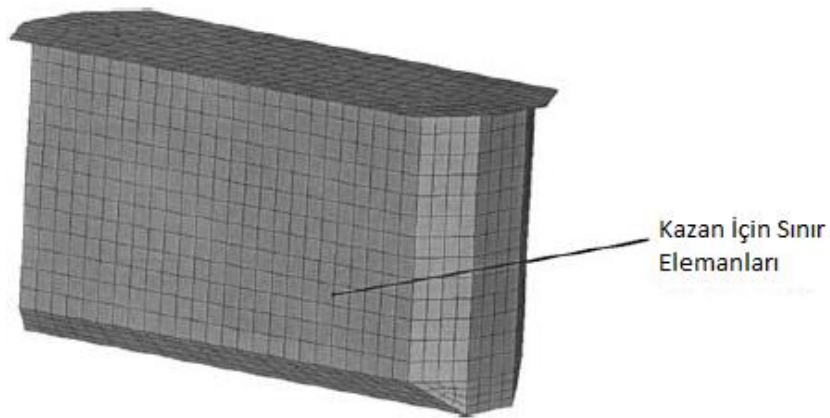
Kurulan şemanın ikinci etabında önceden hesaplanmış sargı yüzey yer değiştirmeleri, yağ kazanının 3 boyutlu akustik mekanik sonlu eleman modeliyle yapılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu sonlu eleman modelinde 3 sargı arasında 120 derecelik faz kayması hesaba katılmıştır[11].

Kazan modelinde çekirdek kelepçeleri, çekirdek kelepçeleri ile kazanın üstü arasındaki bağlantılar mekanik sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Kazanla birlikte yağ akustik sonlu elemanlar kullanılarak ayrıştırılmıştır. Son olarak etap birde yapıldığı gibi çekirdek bağlantı desteklerinin etkisi yerine sözde yay elemanları kullanılmıştır[11].



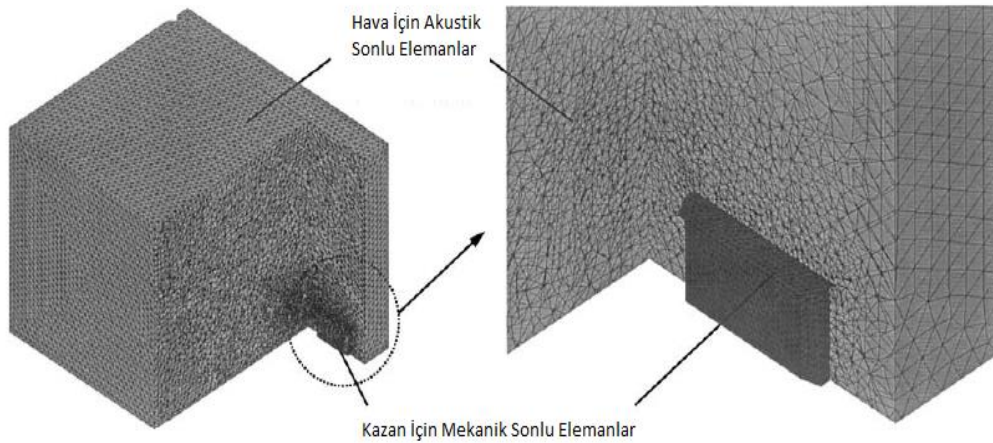
Şekil 4.13 Yağlı transformatörün 3 boyutlu akustik mekanik sonlu eleman modeli[11]

Kurulan şemanın son basamağında önceden hesaplanmış kazan yüzey titreşimleri transformatörden yayılan gürültüyü hesaplamak amacıyla kullanılmıştır. Yüksek gerilim laboratuvarında olduğu gibi kapalı odadaki yayılım ve boş alan yayılımı hesaplanmıştır. Serbest alan ses yayılımını hesaplamak amacıyla Şekil 4.13'te verildiği gibi kazanın tüm yapısı sınır elemanları yöntemi kullanılarak ayrıştırılmıştır. Çekirdekten yayılan gürültü ilk olarak basit 100 Hz tonundadır ve transformatörü çevreleyen titreşimli havanın kazan titreşimi üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Sınır elemanları metodu ivmeölçerden aldığı bilgiler ışığında transformatörden yayılan gürültü miktarını tahmin eden başarılı bir yaklaşımdır. Ancak uygulanan metotta toprağın ideal yansıtıcı olarak kullanılması sebebiyle yarı-uzay sınır koşulları uygulanmalıdır[11].



Şekil 4.14 Transformatör kazanın üç boyutlu(3D) sınır eleman modeli [11]

Yüksek gerilim laboratuvarındaki ses yayılımının hesaplanabilmesi amacıyla Şekil 4.15'te gösterildiği üzere üç boyutlu(3D) akustik mekanik sonlu eleman modeli uygulanmıştır. Transformatör kazanı mekanik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Test odasını çevreleyen hava ise akustik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Tipik yüksek gerilim laboratuvarlarında duvarlar herhangi bir emecek materyal ile kaplanmaz. Dolayısıyla simülasyonlardaki transformatör ideal yansıtıcı duvarlara sahip odanın içine yerleştirilmiştir[11].



Şekil 4.15 Transformatör kazanı ve yüksek gerilim laboratuvarının üç boyutlu(3D) akustik mekanik sonlu eleman modeli[11]

Aksisimetrik sonlu elemanlar modeli marifetiyle gerçekleştirilmiş simülasyonların sonuçları ile yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan bilgilerin karşılaştırılması ile uygulanan yöntemin doğruluğunun kanıtlanması amaçlanmıştır. Çizelge 4.4'de yağ tankı bulunmayan transformatör için yapılmış olan ölçüm ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Değerler birbirine oldukça yakın çıkmıştır[11].

Çizelge 4.4 Yağ tankı bulunmayan transformatörün ölçüm ve simülasyon sonuçları[11]

	Ölçülmüş Değer	Simülasyon
Kademe 1, Dönel Çekirdek İvmeölçer	0,047	0,046
Kademe 1, Eksenel Çekirdek İvmeölçer	0,036	0,037

Çizelge 4.5'te yağ tankı bulunan normal bir güç transformatörü için alınmış ölçüm ve simülasyon sonuçları bulunmaktadır. Yağ tankı olmayan transformatöre göre sonuçlar

yüksek çıkmıştır. Ayrıca dönel çekirdek ivmeölçer genliği aksinel çekirdek ivmeölçerin neredeyse yarısı çıkmıştır. Sonuç olarak aksisimetrik sonlu eleman modeli her iki konfigürasyonda da başarılı tahmin sonuçları vermiştir[11].

Çizelge 4.5 Yağ tanklı transformatörün ölçüm ve simülasyon sonuçları[11]

	Ölçülmüş Değer	Simülasyon
Kademe 1, Dönel Çekirdek İvmeölçer	0,59	0,62
Kademe 1, Aksinel Çekirdek İvmeölçer	0,96	0,99

Temel yaklaşımlar ve simülasyon yöntemlerine binaen yüksek gerilim laboratuvarında EN 60551'e göre yapılan ölçümler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sonuçlar Rausch ve diğerleri tarafından incelenmiştir.

Çizelge 4.6 Kapalı odadaki ses güç seviyelerinin ölçümü ve simülasyonu[11]

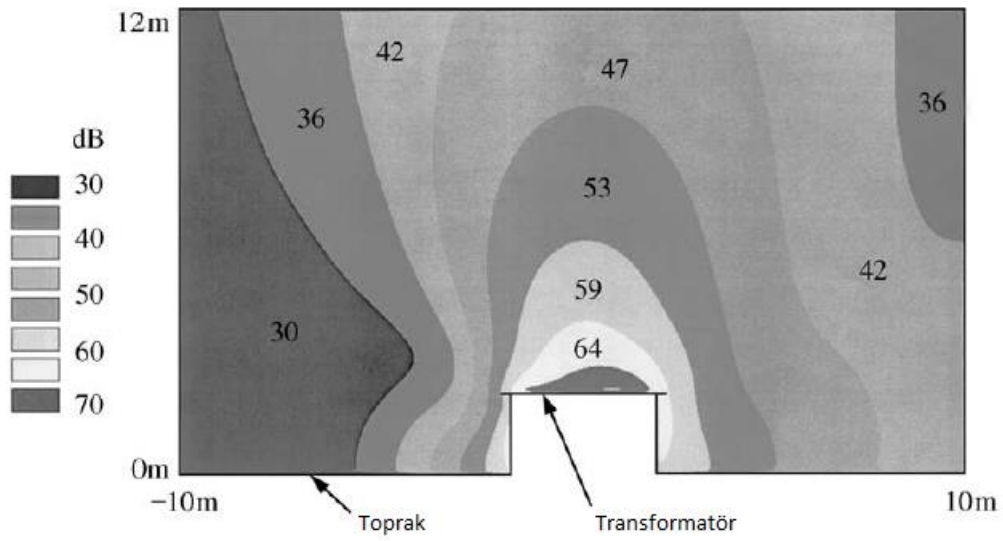
	Ses Güç Seviyesi(dBA)
EN 60551'e Göre Ses Basınç Ölçümü	68
Sonlu Eleman Simülasyonu	66,5

Ölçümler EN 60551 standardına göre transformatörden 0.3 m uzaklıkta ve transformatörün yarı yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. İlgili ölçümle karşılaştırma yapabilmek amacıyla Şekil 4.13'te verilen üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Simülasyon neticesinde A-ağırlıklı ses güç seviyesi Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere ölçüm değerine oldukça yakın çıkmıştır.

Farklı bir yaklaşım olması amacıyla transformatörün yarı-ortam serbest alan ses yayılımı Şekil 4.12'de verilen sınır eleman metoduyla hesaplanmış olup EN 60551'de bahsedilen ses basınç ölçüm metodunun yanı sıra ses yoğunluk ölçüm metoduyla da karşılaştırılmıştır[11].

Çizelge 4.7 Ses güç seviyelerinin ölçülmüş ve simüle edilmiş serbest alan yayılımları[11]

	Ses Güç Seviyesi(dBA)
EN 60551'e Göre Ses Basınç Ölçümü	68
Ses Yoğunluk Ölçümü[41]	61
Sınır Eleman Simülasyonu	59



Şekil 4.16 Serbest alan yayılımı: sınır eleman metoduyla analiz edilmiş transformatör ses basınç seviyeleri[11]

Rausch'a göre bu üç boyutlu ses alan yayılımları transformatör şirketleri için iki önemli bilgi vermektedir.

- İlk olarak sınır eleman metoduyla gerçekleştirilmiş simülasyon sonucu EN 60551 standardına uygun olarak yapılmış olan ses basınç ölçümlerinde 9 dBA daha düşük çıkmıştır ki bu durum da ilgili simülasyon metodunda problem olduğu anlamına gelmektedir. Ancak ilgili standardın ölçüm kurallarına göre 0.3 m uzaklıktan alınan ölçümler transformatörden gelen tepkiyle birlikte normal ses basınç seviyesinin üzerinde sonuç verebilir. Yakın alandan yapılan ölçümlerdeki etkinin azaltılması amacıyla transformatör ses güç seviyelerini tanımlamak için ses yoğunluk ölçümü önerilmiştir. Ses yoğunluk ölçümleri, ses basınç

ölçümlerinde 7 dBA daha düşük değerde çıkmış olup sınır eleman modeline oldukça yakın sonuç vermiştir. Dolayısıyla sonlu ve sınır eleman modellerinin kombine edilmiş hali ideal serbest alan şartları altında yağlı güç transformatörlerinin yük kontrollü gürültü seviyelerinin hesaplanmasında uygun yöntem olarak düşünülebilir[11].

- İkincisi transformatörden yayılan gürültünün farklı yönler doğru yayılmasıdır. Bunun nedeni üç bobinin titreşimindeki 120°'lik faz kaymasıdır. Bu yönler bobinlerin fazları değiştirilerek terse döndürülebilir. Dolayısıyla bu etki şehir merkezine yakın yerlerde transformatörün sadece bir yönde yerleştirilmesi suretiyle yük kontrollü gürültü dağılımının etkisini azaltmak amacıyla kullanılabilir[11].

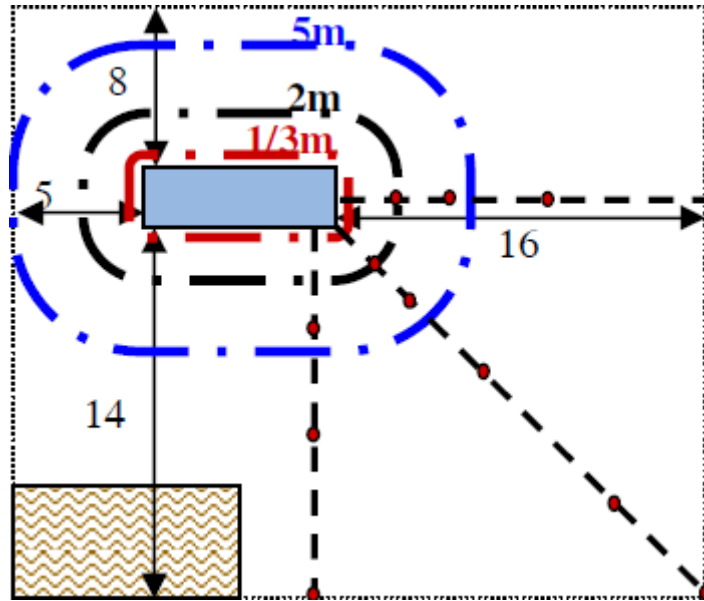
Rausch ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmalarda önemli bir etken olarak gördükleri ölçüm metotları hususunda da kayda değer çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmaya üç ana sebep gereklilik teşkil etmiştir. İlk olarak çevresel etkenlerin ses basınç ölçüm metodundan alınan verilere etki etmesine rağmen ses yoğunluk ölçümlerinde bu etkinin görülmemesidir. İkincisi transformatör duvar ve tavanından yansıyan sesin yayılan gürültüye etki etmemesine rağmen ses basınç ölçüm metodundan alınan verilerde ilgili yansımaların katkısı olması. Son olarak da transformatörün yakın alan gürültü ölçümlerinde meydana gelen reaktif etkisinin uzak alan ölçümlerinde ses yayılımına herhangi bir etkisi olmamasına rağmen gürültü kaynağına yakın ölçümlerde ses basınç ölçüm metodunun bu etkiyi süzememesi. Bu sebepler doğrultusunda Girgis ve diğerleri bazı karşılaştırmalı deneysel gözlemler gerçekleştirmiştir.

İlk olarak İsveç'in sessiz ve küçük bir kasabasında bulunan küçük bir indirici trafo merkezindeki Şekil 4.17'de verilen 16 MVA gücündeki transformatörde gürültü ölçümleri yapılmıştır.



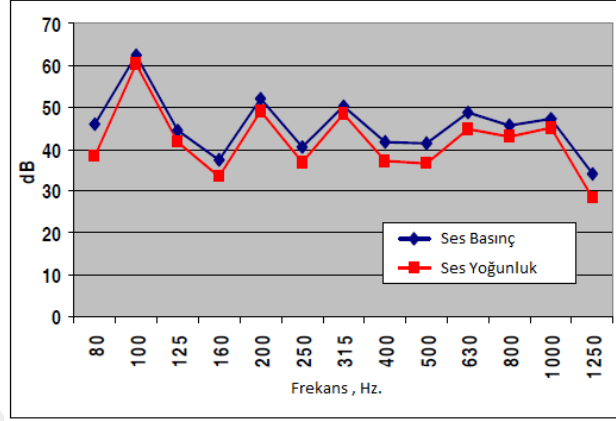
Şekil 4.17 Gürültü ölçümleri yapılan güç transformatörü[41]

Transformatör çevresinde sırasıyla 1/3 m, 2 m ve 5 m uzaklıklarda 3 adet tam kontur çizilmiştir. Ayrıca Şekil 3.94’de görüldüğü üzere transformatöre 3 m, 8 m ve 16 m uzaklıkta 3 adet ölçüm istasyonu kurulmuştur. 1/3 m ve 2 m konturlarında ölçümler 16 pozisyonda ve 2 yükseklikte yapılmıştır. 5 m konturunda ölçümler 10 pozisyonda yapılmıştır. Her bir ölçüm pozisyonundaki proplar 1 m genişliğinde ve 2 m yüksekliğinde bir alanı taramaktadır.



Şekil 4.18 İndirici merkez ölçüm pozisyonları[41]

Ölçümler Bruel&Kjaer tip 2144 gerçek zamanlı analizör ile birlikte B&K yoğunluk probuyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19’da ses basınç ölçümü ve ses yoğunluk ölçümü metotlarıyla ölçülmüş 80-1250 Hz frekans aralığında meydana gelen gürültü seviyeleri verilmiştir.



Şekil 4.19 1/3 m konturda ölçülmüş 16 MVA transformatörün frekans spektrumu[41]

Şekilden de anlaşılacağı üzere transformatör gürültüsüne önemli derecede etkisi olan 100,200 ve 300 Hz frekanslarında iki ölçüm metodu arasındaki fark küçüktür. Bunun nedeni ise çevresel gürültülerin çok az olmasıdır. İki farklı metotla ölçülmüş gürültüler arasındaki farkın nedeni ise yakın alan ölçümlerinde meydana gelen reaktif yansımadır. Ayrıca 630-1000 Hz aralığındaki gürültü sebebi yağ veya su zorlamalı soğutma sistemidir.

Transformatör çevresine çizilmiş olan 3 konturda ve gürültüye sebep olan 3 ana harmonikte ses basınç ölçümü ve ses yoğunluk ölçümü metotları arasındaki farklar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.8 16 MVA transformatörün 3 karakteristik frekansında ölçülmüş gürültü seviyeleri [41]

Uzaklık	Ses Seviyesi(dB)	100 Hz.	200 Hz.	300 Hz.
1/3m	L_p	62,4	52,0	50,3
	L_I	60,2	49,1	48,5
	$[L_p-L_I]$	2,2	2,9	1,8
2m	L_p	56,9	47,3	44,9
	L_I	55,9	45,5	43,3

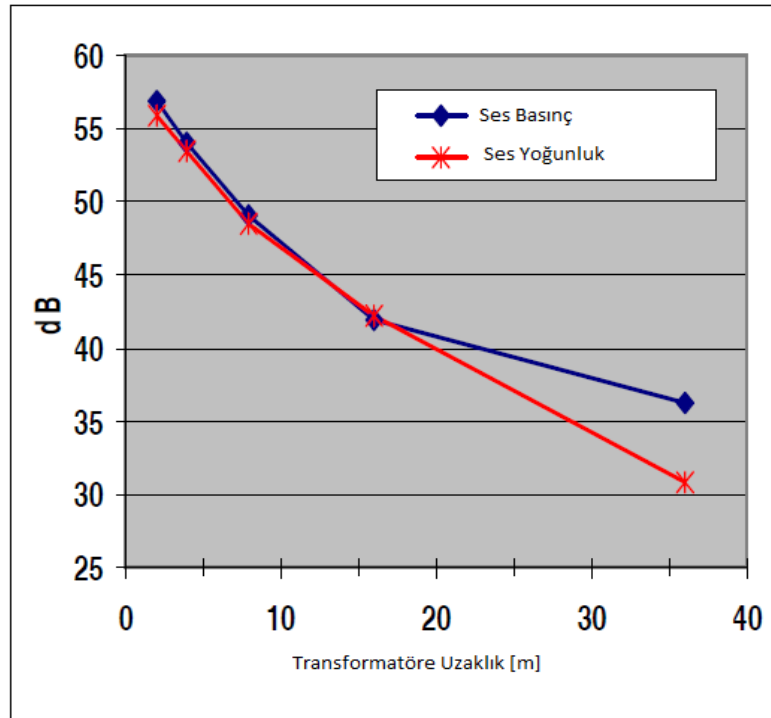
Çizelge 4.8 16 MVA transformatörün 3 karakteristik frekansında ölçülmüş gürültü seviyeleri(devamı) [41]

Uzaklık	Ses Seviyesi(dB)	100 Hz.	200 Hz.	300 Hz.
2m	$[L_p-L_I]$	1,0	1,8	1,6
5m	L_p	53,7	42,1	40,1
	L_I	52,1	39,8	37,3
	$[L_p-L_I]$	1,6	2,3	2,8

(L_p : Ses Basınç Ölçümü, L_I : Ses Yoğunluk Ölçümü)

Çizelgeden görüldüğü üzere 2 m uzaklıktaki gürültü seviyesi ölçümleri ile 1/3 m uzaklıktaki gürültü seviyesi ölçümleri arasındaki fark azalmaktadır. Bu farkın sebebi yakın alan etkisinin 2 m uzaklıkta daha az olmasıdır. 5 m uzaklıkta iki ölçüm metodu arasındaki farkın artmasının sebebi ise ses yoğunluk ölçümü metodunda çevresel gürültülerin etkisinin olmamasıdır.

Şekil 4.20’de transformatör gürültüsünün baskın bileşeni 100 Hz frekansından transformatörden farklı uzaklıklarda alınmış gürültü ölçümlerinin grafiği verilmiştir.



Şekil 4.20 16 MVA transformatörün çevresindeki farklı konturlarda ölçülmüş 100 Hz frekans bileşenindeki gürültü seviyeleri[41]

Çevresel gürültü seviyesinin düşük olması sebebiyle 2. den 16 m uzaklığa kadar olan ölçüm sonuçları her iki metotta da çok yakındır. Ancak 16 m den sonraki uzaklıklarda iki metot arasındaki fark gittikçe artış göstermektedir. Bu artışın sebebi de çevresel gürültü etkileridir.

Girgis vd. [41] de Arizona’da dış alanda bulunan 250 MVA, 230 kV ve 60 Hz. iki adet Ototransformatörün ölçümlerini yapmışlardır. İki transformatörün tasarımı ve şirketleri farklıdır. Ayrıca bu transformatörler farklı şalt sahalarında bulunmaktadır. Transformatörlerin yükleri sırasıyla 102 ve 107 MVA olup transformatörlerden birinin bulunduğu çevredeki gürültü diğerine göre biraz daha fazladır.

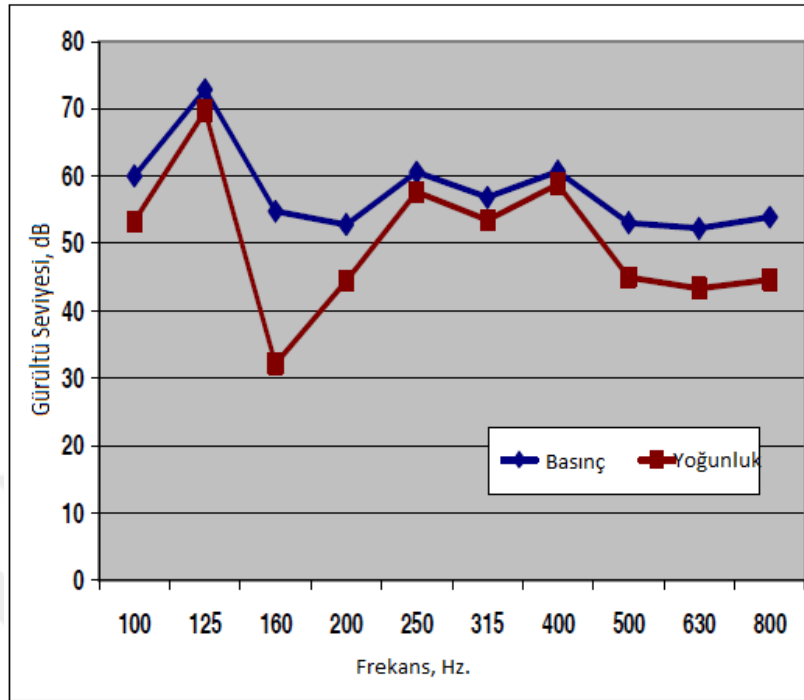


Şekil 4.21 Test edilen transformatörlerden birinin fotoğrafı[41]

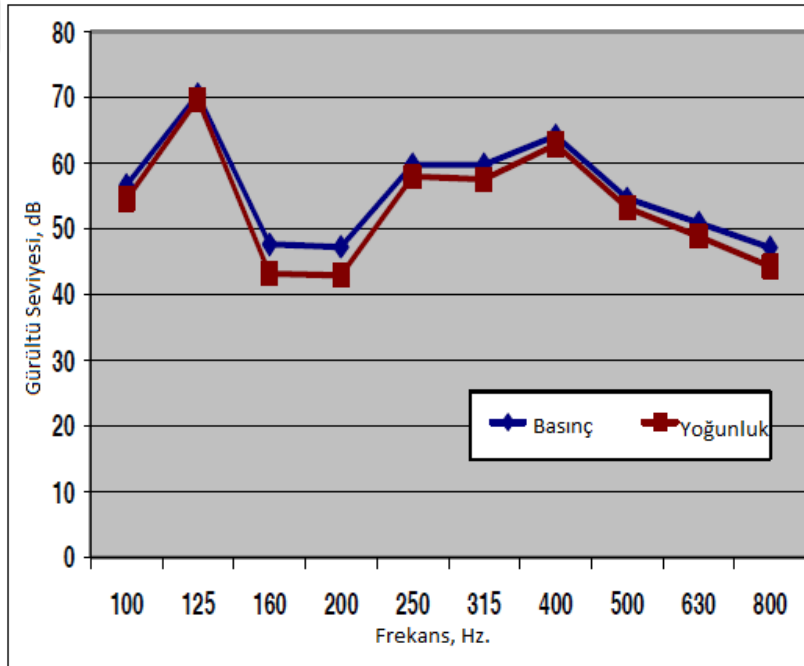
Şekil 4.22’de 1/3 m ve 2 m uzaklıklardaki ses basınç ve ses yoğunluk ölçümlerinin sonuçları grafiksel olarak verilmiştir. Transformatör gürültüsü 120, 240 ve 360 Hz ana frekans bileşenlerinde her iki metodun sonuçları 1-2 dB civarındadır. Diğer frekanslarda ise diğerine göre daha yüksek çevresel gürültü etkenleri bulunan Transformatör-1’deki fark 6 ile 15 dB arasında değişmektedir. Düşük çevresel gürültü etmenleri bulunan

Transformatör-2’de ise iki ölçüm metodu arasındaki fark 3 ile 5 dB çıkmaktadır.

Transformatör-1’deki farkın sebebi çevresel gürültü faktörüdür.



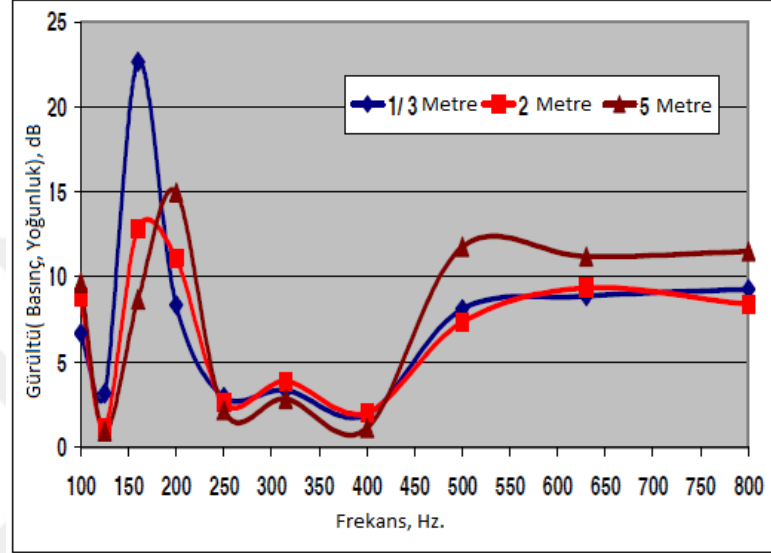
a) Transformatör-1’in Çevresindeki 1/3 m. Konturda



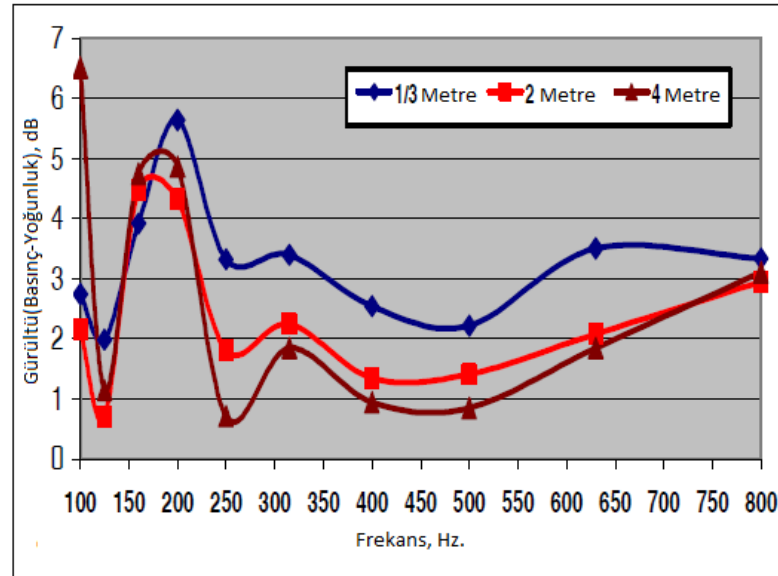
a) Transformatör-2’nin Çevresindeki 2 m. Konturda

Şekil 4.22 250 MVA transformatörlerden yayılan ölçülmüş gürültünün frekans spektrumu[41]

1/3 m , 2 m ve 4 m uzaklıkta yapılan ses basınç ve ses yoğunluk ölçümleri arasındaki fark Şekil 4.23'te verilmiştir. Transformatör gürültüsünün ana frekansında transformatörden 1/3 m uzaklıkta yapılmış olan ses basınç ve ses yoğunluk ölçümleri arasındaki fark 2 ile 3 dB arasında değişmektedir. Transformatörden 2 m uzaklıkta ise bu fark azalarak 1 ile 2 dB arasında çıkmaktadır. Bu fark Transformatörden 4 m ve 5 m uzaklıktayken ise 1 dB'nin altına düşmektedir.



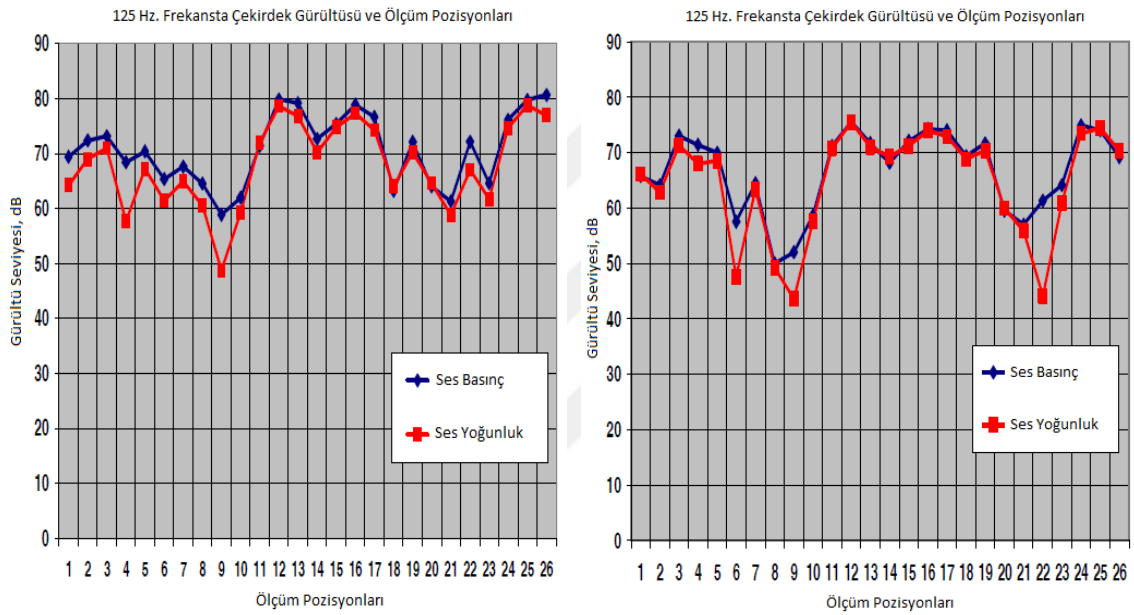
a) Yüksek Çevresel Gürültü Ortamındaki Transformatör



b) Düşük Çevresel Gürültü Altındaki Transformatör

Şekil 4.23 250 MVA transformatörleri etrafında yapılan ses basınç ve ses yoğunluk gürültü ölçümleri arasındaki fark[41]

Transformatörden 1/3 m ve 2 m uzaklıklardaki kontur üzerinde bulunan farklı pozisyonlardaki 125 Hz frekansta ses basınç ve ses yoğunluk metotlarıyla ölçülmüş gürültü seviyelerinin grafiği Şekil 4.24’de verilmiştir. Ses basınç ile ses yoğunluk ölçümleri arasındaki fark radyatör boyunca en küçüktür. Ancak Transformatör tankı boyunca iki ölçüm arasındaki fark en yüksektir. Şekil 4.22 ve Şekil 4.24 yakın alan ölçümlerinde transformatör gürültüsünün ana frekans bileşeninde her iki ölçüm metodu arasında reaktif ses yansımasından kaynaklanan 1-2 dB civarında bir fark oluştuğunu kanıtlamaktadır.

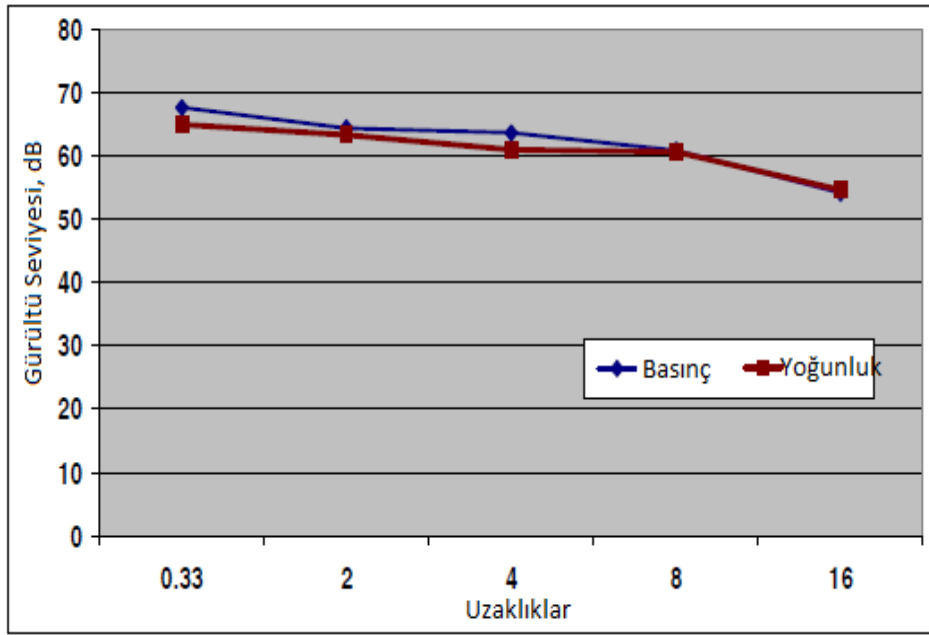


a) 1/3 mt. Konturda

b) 2 mt. Konturda

Şekil 4.24 Düşük çevresel gürültü ortamındaki 250 MVA transformatörün çevresindeki gürültünün 125 Hz bileşeni[41]

Şekil 4.25’te düşük çevresel gürültü koşullarında 250 MVA Transformatörde 125 Hz gürültü bileşenin farklı metrajlardaki uzaklıklara göre değişimi verilmiştir. Şekilden anlaşılacağı üzere 1/3 m uzaklıkta iki ölçüm arasında reaktif etki sebebiyle 2 dB civarında fark oluşmuştur. 2 m’den daha uzak noktalarda ise iki ölçüm metodu sonuçları neredeyse aynı çıkmıştır. Ancak 4m uzaklıktaki ölçümde transformatörün bulunduğu ortamdaki ani bir dış etken sebebiyle farklı çıkmıştır ancak daha önce gösterilen Şekil 4.23(b)’de 4m’deki farkın 1 dB’den daha az olduğu tespit edilmişti. Görüldüğü üzere yakın alan ölçümlerinde meydana gelen reaktif etki transformatörden uzaklaşınca etkisini yitirmektedir.



Şekil 4.25 Düşük çevresel gürültü ortamındaki 250 MVA transformatörün farklı uzaklıklarda ölçülmüş 125 Hz. gürültü bileşeni[41]

Çizelge 4.9’da üç farklı konturda yapılmış olan ölçümler verilmiştir. L_p ses basınç ölçüm değerlerini ve L_I ses yoğunluk ölçüm değerlerini ifade etmektedir. Çizelgeden görüldüğü üzere 1/3 m uzaklıktaki konturda çok düşük çevresel gürültü ortamında bulunan transformatörün ölçülmüş gürültü seviyeleri arasında 1 dB fark vardır. Bu veriden bu transformatörde yakın alan ölçüm sebebiyle meydana gelen reaktif yansıma sesi 1 dB’dir. Aynı transformatörde 2 ve 4 m uzaklıktaki konturlarda alınan ölçümlerde ne reaktif yansımanın nede çevresel gürültü etmenlerinin herhangi bir etkisi olmamıştır. Transformatör-1’de yapılan ölçümlerde ise çevresel gürültü ortamından kaynaklanan farklılar olduğu görülmektedir. Yakın alan gürültü ölçümündeki reaktif yansımanın 1 dB olması sebebiyle çevresel gürültülerin 1/3 m uzaklıktaki konturda gürültü üzerinde 2,1 dB etkisi oluşmuştur. 2 m uzaklıkta 3,2 ve 4 m uzaklıkta ise 4,4 dB çevresel gürültü etkisi görülmektedir. Transformatör gürültüsüne benzemeyen çevresel gürültülerin ses basınç ölçüm metodunda ciddi hatalara sebebiyet verdiği ve transformatör gürültü seviyesinin beklenenden daha yüksek çıktığı görülmektedir.

Çizelge 4.9 Üç farklı konturda iki adet 250 MVA transformatörde ölçülmüş toplam güç seviyeleri(dB(A))[41]

Transformatör	Ölçüm Miktarı	Ölçüm Uzaklığı		
		1/3mt.	2mt.	4mt.
1 (Düşük Çevresel Gürültü Ortamı)	L_p	61,7	60,4	59,3
	L_I	58,6	57,2	54,9
	$[L_p-L_I]$	3,1	3,2	4,4
2 (Çok Düşük Çevresel Gürültü Ortamı)	L_p	62,7	61,0	58,0
	L_I	61,7	61,0	58,2
	$[L_p-L_I]$	1,0	0,0	-0,2

Ölçüm metotlarının araştırılmasından sonra Rausch ve arkadaşlarının[11] araştırmasına konu olan kademe pozisyonlarının gürültü seviyesine etkisi üzerinde durulabilir. Bu hususta yapılan simülasyon neticesinde Çizelge 4.10’da verilen bilgilere erişilmiştir.

Çizelge 4.10 Kademe pozisyonlarının etkisi[11]

	Kademe Pozisyon 1	Kademe Pozisyon 3
Radyal Çekirdek İvmeölçeri	0,033	0,009
Eksenel Sargı Kelepçesi İvmeölçeri	0,044	0,033
Tank Yan Duvarı İvme Ölçeri	0,025	0,009
A-ağırlıklı Ses Güç Seviyesi(dBA)	59	45

Simülasyon sonuçlarına göre radyal titreşimler kademe 3’te(yalnızca YG sargısı bağlı) kademe 1’den(Kademe sargısı ve diğer iki kademe sargıları seri bağlı) çok daha düşük çıkmıştır. Ayrıca eksenel sargı kelepçe titreşimleri de kademe 3’te düşüş göstermiştir. Her iki titreşimde gürültüyü etkileyen parametrelerden olduğu için A-ağırlıklı ses güç seviyesi de %24 oranında azalmıştır.

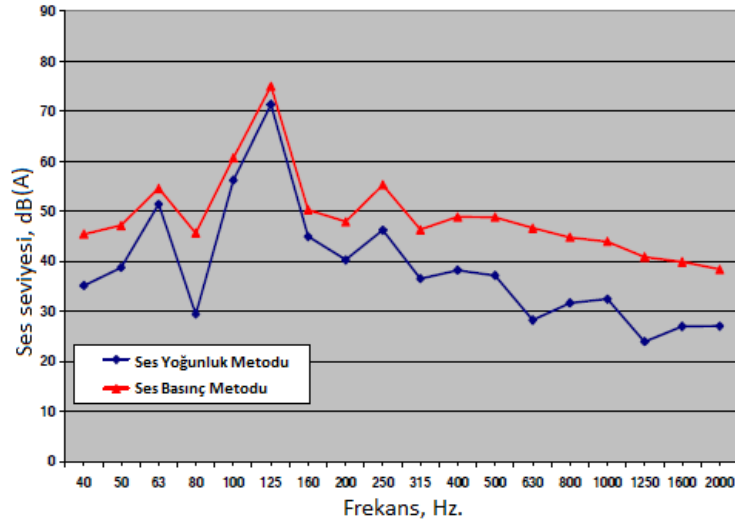
Diğer bir yandan sargıların ve çekirdek desteklerinin sertliğinin gürültü yayılımı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Çizelge 4.11’de verilen değerlere göre 85 MN/m sertlikteki verilerle ilgili sertliğin dikkate alınmadığı durumdaki veriler gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 Sargı destekleri sertliğinin etkisi[11]

	Radyal Çekirdek İvmeölçeri	Eksenel Sargı İvmeölçer	Ses Güç Seviyesi(0,3 m)(dB)
85 MN/m lik sertlik	0,046	0,037	56,8
Sertliğin İhmal Edildiği Durum	0,044	0,62	82,3

Eksenel sargı ivmeölçerinin değeri önemli derecede artarken radyal çekirdek ivmeölçerinin değeri biraz azalmaktadır. Sonuç olarak ses güç seviyesi önemli derecede artmaktadır. Dolayısıyla ilgili sertliğin transformatörden yayılan gürültü seviyesi üzerinde önemli derecede etkisinin bulunduğu görülmektedir.

Ses yoğunluk ölçüm metodunun daha faydalı bir teknik olduğu hususuna R.S.Girgis ve arkadaşları[18] farklı bir çalışmalarında daha değinmişlerdir. Özellikle çevresel gürültülerin ses basınç ölçümünde doğru ölçüm değerleri almanın önüne geçmektedir. Aşağıdaki şekilde 50 MVA transformatörde yapılmış olan iki farklı ölçüm metodunun grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.26 50 MVA transformatörün yük gürültülerinin ölçülmüş frekans spektrumu[18]

Şekilden görüldüğü üzere ses basınç ölçümü sonuçları baskın frekansta(120Hz) 3-4 dB yüksek çıkmıştır. Diğer frekans bileşenlerinde ise aradaki fark daha yüksek çıkmıştır[18].

Yine iki ölçüm arasındaki metodu göstermek amacıyla 11 farklı transformatör üzerinde uygulanmış 120 Hz bileşeni ile toplam gürültü seviyesinin ölçümleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Görüldüğü üzere baskın bileşen ile toplam gürültü arasındaki fark ses yoğunluk ölçümünde 1 dB'nin altında iken ses basınç ölçümünde 2,4 dB'ye kadar çıkmıştır. Bunun başlıca sebebi çevresel gürültülerin ses basınç ölçümü üzerindeki etkisidir.

Çizelge 4.12 Güç transformatörlerinin ölçülmüş yük gürültüleri[18]

Transformatör	Ses Yoğunluk Metodu			Ses Basınç Metodu		
	100/120 Hz.	Toplam dB(A)	Fark	100/120 Hz.	Toplam dB(A)	Fark
1	53.7	54.2	0.5	56.3	58.0	1.7
2	55.2	55.4	0.2	58.2	60.3	2.1
3	53.8	53.9	0.1	58.0	59.2	1.2
4	51.1	51.3	0.2	54.1	56.4	2.3
5	56.6	56.9	0.3	59.7	60.8	1.1
6	53.9	54.1	0.2	56.4	58.7	2.3
7	54.2	54.4	0.2	58.5	59.4	0.9
8	59.1	59.8	0.7	63.0	64.9	1.9
9	60.0	60.1	0.1	62.8	63.6	0.8
10	53.7	53.8	0.1	57.5	58.7	1.2
11	60.0	60.2	0.2	64.7	65.1	0.4

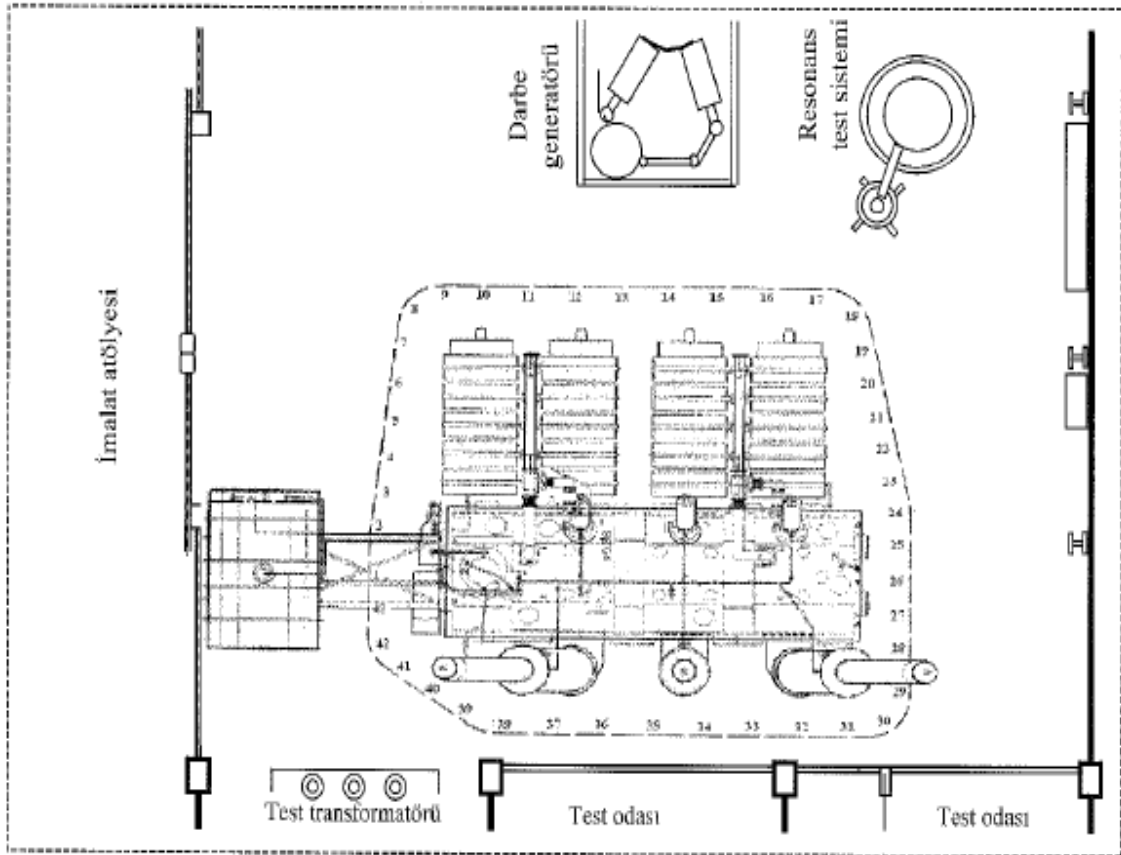
4.2 TEİAŞ'a Ait Transformatörlerde Gürültü Testleri

Türkiye Elektrik İletim A.Ş.(TEİAŞ), tesislerinle kullanılan transformatörlere gürültü testleri yaptırmaktadır. Gürültü seviyesi uluslararası ölçüm metotlarına(IEC 6006-10) uygun olarak ölçülmektedir. Ölçümler Brüel&Kjaer 2260 ile gerçekleştirilmektedir.

4.2.1 250 MVA Ototransformatör

Aşağıda 250 MVA ototransformatörde ikaz geriliminin $3,675\text{kV}(\%100U_n)$ ve $4,293\text{kV}(\%110U_n)$ olduğu durumlar için yapılan gürültü ölçümleri verilmiştir. Test Frekansı 50 Hz., transformatör tankının yüksekliği 3,61 m, mikrofon yüksekliği tankın 1/3 yüksekliğinde 1,2 m ve tankın 2/3 yüksekliğinde 2,41 m olarak belirlenmiştir. Mikrofonlar transformatörden 2 metre uzağa yerleştirilmiştir. Transformatör soğutma sistemi OFAF'tır ve ölçüm esnasında 7 adet fan ve 2 adet pompa servisedir. Test öncesi ve sonrasında testin gerçekleştirildiği ortamın gürültü seviyesi ölçülmüştür[42].

Ölçme planı :



Şekil 4.27 250 MVA ototransformatör ve test ortamı [42]

Çizelge 4.13 Transformatörün bulunduğu ortamın gürültü basıncı seviyesi[42]

Pozisyon	Test Öncesi	Test Sonrası	Pozisyon	Test Öncesi	Test Sonrası
1	48.3	47.3	6	48.7	48.2
2	49.3	47.5	7	47.1	48.2
3	48.2	47.6	8	47.9	48.3
4	47.4	48.0	9		
5	48.6	48.8	10		
Aritmetik/Enerji Ortalaması, $\overline{L_{bgA}}$				48.2	48.0

Aritmetik enerji ortalaması Eşitlik 4.7’de verilen formül kullanılarak elde edilebilmektedir. Test öncesi yapılmış olan ölçümler kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgi}} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (10^{0,1 \times 48,3} + 10^{0,1 \times 49,3} + \dots + 10^{0,1 \times 47,9}) \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{8} \times 533265,8 \right) = 10 \lg(66658,22) = 48,23854$$

Test sonrası yapılmış olan ölçümlerde aynı eşitlikte kullanılarak aritmetik enerji ortalaması tespit edilebilmektedir.

Çizelge 4.14 250 MVA ototransformatörde ölçülmüş gürültü basıncı seviyesi [42]

Ses Basıncı Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 2.0 m; [OFAF, 7 Fan ve 2 pompa serviste], ÖN: Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	67.0	66.5	16	67.0	66.5	31	68.7	68.3
2	66.1	67.5	17	66.5	66.5	32	68.5	67.5
3	65.1	66.6	18	65.4	65.2	33	68.7	67.4
4	65.7	65.3	19	65.7	66.3	34	68.2	67.8
5	66.5	65.2	20	66.9	66.4	35	66.9	67.6
6	65.0	67.7	21	66.6	66.3	36	66.5	67.8

Çizelge 4.14 250 MVA ototransformatörde ölçülmüş gürültü basıncı seviyesi(devamı)[42]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 2.0 m; [OF AF, 7 Fan ve 2 pompa serviste], ÖN: Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
7	66.5	65.7	22	67.6	67.0	37	67.6	66.4
8	66.0	66.5	23	68.1	67.1	38	67.4	66.7
9	68.9	69.4	24	68.0	67.2	39	66.4	67.5
10	66.2	69.8	25	67.6	67.0	40	67.3	66.1
11	66.4	66.5	26	66.9	66.1	41	67.3	66.5
12	67.4	67.5	27	67.6	66.7	42	67.5	66.7
13	68.4	65.8	28	67.6	66.1	43	66.4	67.2
14	65.5	66.2	29	68.6	67.2	44	66.4	66.5
15	66.0	65.7	30	68.0	67.5			
Aritmetik/Ortalama Enerji $\overline{L_{pAO}}$,							67.0 dB(A)	
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)							18.9 dB(A)	
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)							6.7 dB	
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$							60.3 dB(A)	
Garanti Edilen Ses Basınç Seviyesi							65.0 dB(A)	
Tanımlanmış Çevre Uzunluğu							44.0	
Ölçüm Yüzeyinin Alanı(OF AF)							246.8 m ²	
10lg(S/S ₀)							23.9	
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{wA}							84.2 dB(A)	

Yukarıdaki çizelgede verilen ses basınç ölçümleri Eşitlik 4.8’de verilen eşitlikte kullanılarak aritmetik ortalama enerji $\overline{L_{pAO}}$ bulunabilmektedir.

Transformatörün h:1/3 yüksekliğinden alınan ölçümlerin kullanılmasıyla elde edilen sonuç; $\overline{L_{pAO}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{44} \sum_{i=1}^{44} (10^{0,1x67} + 10^{0,1x66,1} + \dots + 10^{0,1x66,4}) \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{44} x 227305320 \right) = 10 \lg(5166030) = 67,13156$

Transformatörün h:2/3 yüksekliğinden alınan ölçümlerin kullanılmasıyla elde edilen sonuç; $\overline{L_{pAO}} = 10 \lg \left(\frac{1}{44} \sum_{i=1}^{44} (10^{0,1x66,5} + 10^{0,1x67,5} + \dots + 10^{0,1x66,5}) \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{44} x 217989935,8 \right) = 10 \lg(4954316,723) = 66,94984$

Bulunan sonuçların aritmetik ortalamasının alınması neticesinde aritmetik ortalama enerji bulunmaktadır.

$$\overline{L_{pAO}} = \frac{\overline{L_{pAO1/3}} + \overline{L_{pAO2/3}}}{2} = \frac{67,13156 + 66,94984}{2} = \mathbf{67,0407 \text{ dB(A)}}$$

Aritmetik enerji ortalaması elde edildikten sonra ölçüm yapılan ortamın aritmetik enerji ortalaması ile arasındaki fark kontrol edilerek 3dB(A)’dan daha yüksek olduğu doğrulanmalıdır.

$$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}} = 67,0 - 48,1 = \mathbf{18,9 \text{ dB(A)}} > 3 \text{ dB(A)}$$

Düzeltilmiş ses basınç seviyesini tespit edebilmek için öncelikle çevresel düzeltme faktörünün bulunması gerekmektedir. K faktörü Eşitlik 4.3’te ifade edilmiştir ve ilgili denkleme göre S ve A parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi S, ölçüm yüzeyinin alanı ve A, test odasının ses emme alanının oranıdır. Transformatöre 2 m uzaklıktaki ölçüm için yüzey alanı Eşitlik 4.5’ten bulunabilmektedir Test odasının ses emme alanının oranı ise Eşitlik 4.6 ile hesaplanmaktadır.

$$S = (h + 2)l_m = (3,61 + 2)x44 = \mathbf{246,8 \text{ m}^2}$$

$$A = \alpha S_v = 0,15x1789 = 268,35$$

$$K = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) = 10 \lg \left(1 + \frac{4}{268,35/246,8} \right) = 10 \times 0,67 = \mathbf{6,7 dB}$$

Düzeltilmiş aritmetik ortalama ses basınç seviyesi $\overline{L_{pA}}$ Eşitlik 4.9 kullanılarak elde edilmektedir.

$$\overline{L_{pA}} = \overline{L_{pAO}} - K = 67,0 - 6,7 = \mathbf{60,3 dB(A)}$$

Hesaplanmış ortalama gürültü gücü seviyesi, L_{wA} , Eşitlik 4.10'da verilmiştir. Eşitlikte ihtiyaç duyulan S parametresi metrekare olarak ölçüm yüzey alanını ve S_0 parametresi referans alanını($1m^2$) ifade etmektedir.

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \log_{10} \frac{S}{S_0} = 60,3 + 10 \lg \frac{246,8}{1} = 60,3 + 23,92345 = \mathbf{84,22345 dB(A)}$$

Yapılan ölçümlerin ilgili denklemlerde kullanılmasıyla ortalama gürültü gücü seviyesi hesaplanmıştır. Nominal akım, nominal frekans ve empedans gerilimindeki A-ağırlıklı gürültü gücü seviyesi $L_{wA,IN}$ ise Eşitlik 4.2'de ifade edilmiştir.

$$L_{wA,IN} \approx 39 + 18 \lg \frac{S_r}{S_p} = 39 + 18 \lg \frac{250}{1} = 39 + 43,16292 = \mathbf{82,16292 dB(A)}$$

Ölçüm verilerinin kullanılması ile elde edilen gürültü gücü ile tahmin edilen gürültü gücü 250MVA ototransformatör için oldukça yakın çıkmıştır.

Çizelge 4.14'den görüldüğü üzere toplam aritmetik ses basınç ortalaması ile ortamın aritmetik ses basınç ortalaması arasında 18,9 dB(A) fark bulunmaktadır. Bu transformatörde 27PHD090 tip 0,27 mm kalınlığında ve 30PH105 tip 0,30 mm kalınlığında yüksek tanecik yönlendirmeli(HGO) silisli saclar kullanılmıştır. İlgili materyallerin manyetik akı yoğunlukları (B8[T]) 1,90-1,91 T olarak verilmektedir. Ishida ve diğerlerinin[6] 1998 yılında çalışmış olduğu araştırma neticesinde materyalin B8 değerinin artması halinde mıknatıssal büzülme ivme seviyesinde azalma eğilimi görülmektedir. Kullanılan materyalin HGO olması ve B8 değerinin yüksek olması sebepleriyle ilgili ototransformatörün çekirdek gürültüleri azaltılmıştır. Ancak transformatörde meydana gelen gürültünün sebebi Bölüm 3.1'de açıklanan diğer

çekirdek parametreleri ile ek olarak mıknatıslanma akımından kaynaklanan boşta akım harmoniklerinin yüksek değerlerde seyretmesi olabilir. Ölçülen boşta akım harmonikleri Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15 250 MVA ototransformatörde ölçülen boşta akım harmonikleri [42]

Gerilim (kV)	Faz	Ölçülen Harmonikler			
		3.	5.	7.	9.
3.674	a1	16.8%	17.5%	10.0%	1.0%
	b1	12.1%	15.3%	8.1%	1.8%
	c1	23.7%	11.3%	7.7%	3.0%

250 MVA Ototransformatörün test geriliminin %110 U_n olması durumunda da aynı ortam şartlarında gürültü ölçümü yapılmıştır. Bu durumda da toplam aritmetik ses basınç ortalaması ile ortamın aritmetik ses basınç ortalaması arasında 24,8 dB(A) fark bulunmaktadır. Görüldüğü üzere test geriliminin artırılması durumunda yaklaşık 6 dB(A) artış meydana gelmiştir. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16 250 MVA ototransformatörde test geriliminin %110 U_n olması durumunda meydana gelen gürültü seviyeleri[42]

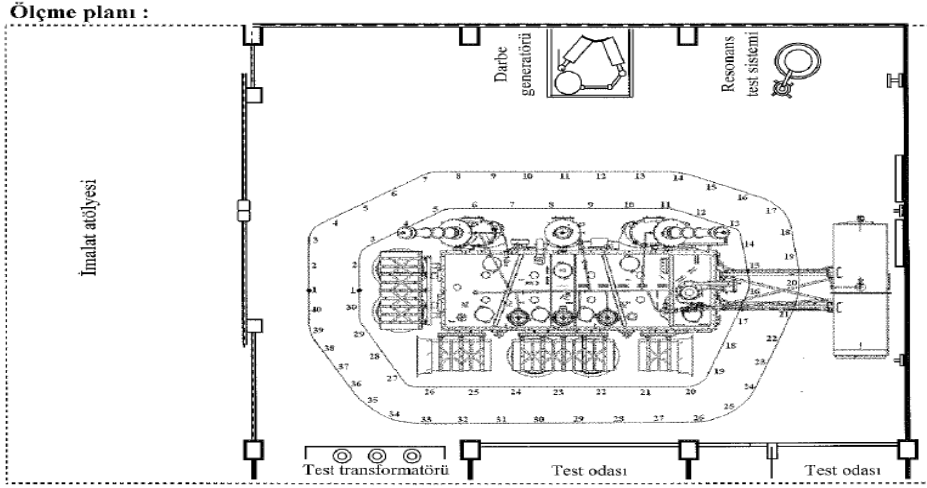
Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 110% U_n ; Ölçüm Uzaklığı, x: 2.0 m; [OFAF, 7 Fan and 2 pompa serviste], ÖN : Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	71.5	72.9	16	74.0	75.8	31	71.5	72.1
2	70.3	72.1	17	74.1	71.7	32	72.5	73.8
3	71.7	71.6	18	71.7	72.6	33	72.4	72.7
4	71.1	72.6	19	70.7	73.1	34	72.8	72.5
5	72.4	74.2	20	72.7	71.5	35	71.1	76.0
6	72.0	74.4	21	72.1	70.2	36	70.8	72.7

Çizelge 4.16 250 MVA ototransformatörde test geriliminin %110 U_n olması durumunda meydana gelen gürültü seviyeleri(devamı)[42]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 110% U_n ; Ölçüm Uzaklığı, x: 2.0 m; [OFAF, 7 Fan and 2 pompa serviste], ÖN : Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
7	75.0	74.5	22	74.0	73.6	37	72.1	72.3
8	74.6	74.3	23	72.6	72.6	38	73.6	70.8
9	75.7	76.9	24	71.0	72.1	39	73.5	73.3
10	73.6	72.9	25	72.9	70.8	40	71.8	70.6
11	73.8	77.9	26	72.1	70.3	41	70.9	72.0
12	75.0	74.6	27	70.6	70.9	42	72.5	70.2
13	74.0	72.8	28	75.0	73.3	43	71.2	75.8
14	71.8	76.5	29	72.6	73.0	44	71.2	73.2
15	71.5	70.6	30	70.8	72.6			
Aritmetik/Ortalama Enerji, $\overline{L_{pAO}}$							72.9 dB(A)	
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)							24.8 dB(A)	
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)							6.7 dB	
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$							66.2 dB(A)	
Garanti Edilmiş Ses Basınç Seviyesi							70.0 dB(A)	
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{WA}							90.2dB(A)	

4.2.2 125 MVA Ototransformatör

Bir diğer örnekte ise TEİAŞ 125 MVA gücündeki bir ototransformatörde ONAN ve ONAF soğutma durumlarında meydana gelen gürültü seviyelerini ölçtürmüştür. Ölçüm yapılan ortamın gürültü seviyesi Çizelge 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.28 125 MVA ototransformatör ve ölçüm ortamı[43]

Çizelge 4.17 Transformatörün bulunduğu ortamın gürültü basıncı seviyesi[43]

Pozisyon	Test Öncesi	Test Sonrası	Pozisyon	Test Öncesi	Test Sonrası
1	50.8	51.0	6	50.5	50.7
2	49.5	50.5	7		
3	49.5	50.4	8		
4	50.2	51.0	9		
5	50.4	51.6	10		
Aritmetik/Enerji Ortalaması, L_{bgA}				50.2	50.9

İkaz gerilimi 36.6 kV, test frekansı 50 Hz, transformatör tankının yüksekliği 3.93 m, mikrofon yüksekliği tankın 1/3 yüksekliğinde 1.31 m ve tankın 2/3 yüksekliğinde 2.62 m olarak belirlenmiştir. Mikrofonlar transformatörden 0.3 m uzağa yerleştirilmiştir. Transformatör soğutma sistemi ONAN olduğu durum için ölçüm sonuçları Çizelge 4.18’de verilmiştir. Meydana gelen gürültü farkı 18,7 dB(A) çıkmıştır.

Çizelge 4.18 ONAN soğutmada 0.3 m mesafeden alınan gürültü seviyeleri[43]

Ses Basıncı Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 0.3 m; [ONAN], ÖN: Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	67.4	65.2	11	71.0	70.6	21	66.9	70.6
2	68.1	67.7	12	72.0	65.5	22	69.7	72.6

Çizelge 4.18 ONAN soğutmada 0.3 m mesafeden alınan gürültü seviyeleri(devamı)[43]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}								
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 0.3 m; [ONAN], ÖN: Ölçüm Noktası								
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
3	66.2	65.7	13	66.0	69.1	23	69.8	69.4
4	68.3	65.6	14	68.7	67.6	24	67.0	68.4
5	68.8	72.1	15	66.6	66.4	25	71.5	67.6
6	68.2	73.2	16	64.0	69.7	26	69.2	70.8
7	72.3	73.5	17	70.1	65.7	27	64.4	64.2
8	72.2	70.8	18	68.8	74.5	28	65.0	68.0
9	71.2	71.0	19	70.1	66.7	29	67.4	67.7
10	72.8	67.9	20	72.5	65.7	30	67.5	66.6
Aritmetik/Ortalama Enerji $\overline{L_{pAO}}$,							69.2 dB(A)	
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)							18.7 dB(A)	
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)							5.0 dB	
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$							64.1 dB(A)	
Garanti Edilen Ses Basınç Seviyesi							70.0 dB(A)	
Tanımlanmış Çevre Uzunluğu							30.0	
Ölçüm Yüzeyinin Alanı(ONAN)							147.5 m ²	
10lg(S/S ₀)							21.7	
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{wA}							85.8 dB(A)	

Ölçüm yüzeyinin alanı S, 250 MVA ototransformatörde yapılan hesaplamalardan farklıdır. Çünkü ölçümler 0.3 m uzaklıktan alınmaktadır ve ilgili denklem Eşitlik 4.4'de ifade edilmiştir.

$$S = 1,25hl_m = 1,25 \times 3,93 \times 30 = 147,5m^2$$

Nominal akım, nominal frekans ve empedans gerilimindeki A-ağırlıklı gürültü gücü seviyesi $L_{WA,IN}$, Eşitlik 4.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18lg \frac{S_r}{S_p} = 39 + 18lg \frac{125}{1} = 39 + 37,74438 = 76,74438 \text{ dB(A)}$$

Görüldüğü üzere 125 MVA ototransformatörde yapılmış ölçümler neticesinde elde edilen sonuç ile tahmin edilen sonuç arasındaki fark büyümüştür. Dolayısıyla tahmin formülüyle elde edilen sonuçların her durumda sağlıklı sonuçlar vermediği anlaşılmaktadır.

ONAF soğutma sisteminde(6 adet fan serviste) 2 metre uzaklıktan ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.19’da verilmiştir. Çevresel düzeltme faktörü 0.3 m uzaklıktan alınan ölçüme göre daha yüksek çıkmaktadır. Bunun sebebi fanların da hesaba katılması neticesinde tanımlanmış çevre uzunluğunun artmasına bağlı olarak ölçüm yüzey alanının büyümesidir. Bu durum aynı zamanda hesaplanmış gürültü gücü seviyesinin de matematiksel olarak artmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 4.19 ONAF soğutmada 2 m mesafeden alınan gürültü seviyeleri[43]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}											
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 2 m; [ONAF], ÖN: Ölçüm Noktası											
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	68.6	68.5	11	72.6	67.3	21	69.6	67.6	31	69.5	72.1
2	68.3	67.7	12	66.0	68.4	22	67.8	69.7	32	69.1	70.1
3	66.6	64.4	13	69.3	67.0	23	69.5	72.1	33	70.7	68.1
4	67.8	66.6	14	70.9	67.6	24	66.5	67.1	34	68.8	69.9
5	65.7	68.1	15	69.7	68.7	25	70.5	68.4	35	67.9	71.9
6	66.4	66.1	16	67.6	69.2	26	69.8	70.5	36	65.9	67.4
7	68.8	66.3	17	69.3	71.2	27	73.9	66.6	37	70.6	67.5
8	72.2	66.5	18	66.3	68.6	28	68.6	70.0	38	68.7	66.4

Çizelge 4.19 ONAF soğutmada 2 m mesafeden alınan gürültü seviyeleri(devamı)[43]

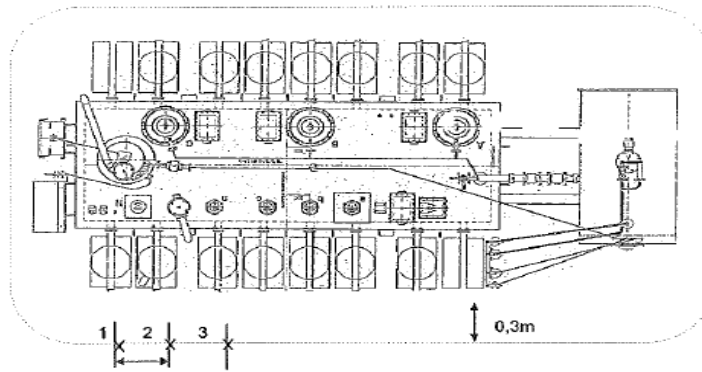
Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi}											
Test Gerilimi: 100% U_n ; Ölçme Mesafesi, x: 2 m; [ONAF], ÖN: Ölçüm Noktası											
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
9	70.2	67.8	19	65.9	69.9	29	70.7	70.7	39	65.2	67.5
10	70.9	67.3	20	69.8	67.8	30	73.7	72.5	40	67.9	67.3
Aritmetik/Ortalama Enerji $\overline{L_{pAO}}$,									69.0 dB(A)		
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)									18.4 dB(A)		
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)									6.6 dB		
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$									62.4 dB(A)		
Garanti Edilen Ses Basınç Seviyesi									70.0 dB(A)		
Tanımlanmış Çevre Uzunluğu									40.0		
Ölçüm Yüzeyinin Alanı(ONAN)									237.3 m ²		
10lg(S/S ₀)									23.8		
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{wA}									86.1 dB(A)		

Aritmetik ortalama enerji sonuçları incelendiğinde ONAF soğutmada 2 metreden alınan ölçümler, ONAN soğutmada 0.3 metreden alınan ölçüm sonuçlarından 0.2 dB(A) daha düşük çıkmıştır. Bu durumun sebebini Girgis vd. [41] de açıklamaktadır. Transformatörün yakın alan gürültü ölçümlerinde meydana gelen reaktif etkinin uzak alan ölçümlerinde ses yayılımına herhangi bir etkisi olmamasına rağmen gürültü kaynağına yakın ölçümlerde ses basınç ölçüm metodunun bu etkiyi süzememesi nedeniyle gürültü seviyesi normalden daha çok ölçülmektedir. Bunun sonucu olarak ONAF soğutma sistemi kullanılırken transformatör gürültü seviyesine çalışan fanların gürültüsü eklenmesine rağmen 0.3 m uzaklıktan ölçülen ONAN soğutma sisteminin gürültü seviyesine göre ONAF daha düşük çıkmıştır. Sonuç olarak yakın alanda

meydana gelen reaktif etkiden dahi daha yüksek gürültü seviyesi bulunmayan fanların transformatör gürültü seviyesi üzerinde baskın kaynak olmadığı anlaşılmaktadır.

4.2.3 50/62,5 MVA Güç Transformatörü

TEİAŞ tarafından yaptırılmış olan Şekil 4.29’da verilen anma gücü 50/62,5 MVA, anma gerilimi 154/33,6 kV ve soğutma sistemi ONAN olan bir güç transformatörünün 0.3 m ve 2 m uzaklıklardan alınmış gürültü seviyesi ölçümleri sırasıyla Çizelge 4.20 ve Çizelge 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.29 50/62,5 MVA güç transformatörü[44]

Ölçüm yapılan ortamın gürültü seviyesi 43.5 dB(A) olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.20 0.3 m uzaklıkta alınan gürültü seviyeleri[44]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi} ; Ölçüm Alanının Ses Basıncı: 43.5 dB(A)											
Ölçme Mesafesi, x: 0.3 m; [ONAN], ÖN: Ölçüm Noktası											
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	55.4	55.4	8	56.5	53.2	15	59.4	57.5	22	56.2	54.5
2	57.0	55.7	9	58.7	55.5	16	58.4	57.4	23	54.0	54.9
3	60.0	57.7	10	56.6	57.5	17	59.6	55.5	24	58.0	54.8
4	51.0	57.1	11	56.6	54.3	18	55.9	55.1	25	53.2	53.0
5	58.7	56.4	12	55.1	57.2	19	53.8	54.5			

Çizelge 4.20 0.3 m uzaklıkta alınan gürültü seviyeleri(devamı)[44]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi} ; Ölçüm Alanının Ses Basıncı: 43.5 dB(A)											
Ölçme Mesafesi, x: 0.3 m; [ONAN], ÖN: Ölçüm Noktası											
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
6	58.2	54.2	13	57.7	57.7	20	57.3	54.6			
7	57.1	55.8	14	59.7	57.6	21	59.8	55.3			
Aritmetik/Ortalama Enerji $\overline{L_{pAO}}$,									56.7 dB(A)		
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)									13.2 dB(A)		
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)									2.37 dB		
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$									54.3 dB(A)		
Garanti Edilen Ses Basınç Seviyesi									60.0 dB(A)		
Tanımlanmış Çevre Uzunluğu									23.2		
Ölçüm Yüzeyinin Alanı(ONAN)									104.7 m ²		
10lg(S/S ₀)									20.2		
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{wA}									74.5 dB(A)		

125 MVA ototransformatörde açıklanan yakın alan reaktif etkisi, gürültü seviyesini yaklaşık olarak 2 dB artırmaktadır. Ancak 50/62,5 MVA güç transformatöründen alınan ölçümlerde ilgili reaktif etkiye rağmen 2 m uzaklıktan alınan ölçümlerin daha yüksek olduğunu görmekteyiz. Bu durumun sebebini Girgis vd. [41] deki çalışmalarında ses basınç ölçüm metoduyla ilgili yaptıkları tespitlerle ilişkilendirebiliriz. Transformatör duvar ve tavanından yansıyan sesin, yayılan gürültüye herhangi bir etkisi olmadığı ifade edilmektedir. Ancak ses basınç metoduyla yapılan ölçümlerde duvar ve tavandan yansıyan ses süzölememektedir. Bu sebeple ölçümü yapılan transformatörün duvar ve tavanından yansıyan sesin, yakın alan reaktif etkisinden daha yüksek olması sebebiyle 2 m uzaklıktan alınan ölçümlerin yüksek çıkmasına katkısı olduğu düşünülebilir. Ayrıca ses basınç ölçüm metodunun çevresel gürültüleri süzemesi sebebiyle ölçüm yapılan

ortamın gürültü seviyesinde meydana gelen bir artış da bu durumun sebebi olarak düşünülebilir.

Çizelge 4.21 2 m uzaklıkta alınan gürültü seviyeleri[44]

Ses Basınç Seviyesi, L_{pAi} ; Ölçüm Alanının Ses Basıncı: 43.5 dB(A)											
Ölçme Mesafesi, x: 2 m; [ONAN], ÖN: Ölçüm Noktası											
ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)		ÖN	Yükseklik (h)	
	(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)		(1/3)	(2/3)
1	63.9	61.3	11	62.0	61.7	21	63.6	63.3	31	62.4	62.5
2	63.4	63.1	12	63.4	61.5	22	63.0	63.3	32	62.2	62.9
3	63.4	63.4	13	62.1	61.4	23	63.1	63.4	33	61.9	63.1
4	63.9	63.4	14	62.4	62.8	24	63.8	63.4	34	62.9	63.3
5	63.8	63.5	15	62.8	63.5	25	63.2	63.1	35	63.7	63.4
6	63.7	63.8	16	63.8	63.3	26	63.8	63.3	36	63.3	63.5
7	63.0	62.9	17	63.5	63.4	27	63.1	63.3	37	63.5	63.1
8	63.9	62.3	18	63.5	63.3	28	63.9	61.8			
9	62.9	61.6	19	63.5	63.4	29	63.4	61.4			
10	62.5	61.8	20	63.3	63.8	30	63.0	61.0			
Aritmetik/Ortalama Enerji $\overline{L_{pAO}}$,									63.05 dB(A)		
$\overline{L_{pAO}} - \max \overline{L_{bgA}}$ (3dB(A)'dan büyük olmalıdır.)									19.55 dB(A)		
Çevresel Düzeltme Faktörü, K (7 dB'den küçük olmalıdır.)									3.86 dB		
Düzeltilmiş Ortalama Ses Basınç Seviyesi, $\overline{L_{pA}}$									59.2 dB(A)		
Tanımlanmış Çevre Uzunluğu									36.8		
Ölçüm Yüzeyinin Alanı(ONAN)									206.4 m ²		
10lg(S/S ₀)									23.2		
Hesaplanmış Ortalama Gürültü Gücü Seviyesi, L_{wA}									82.4 dB(A)		

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güç sistemlerinin önemli yapı taşlarından olan transformatörlerin, elektriksel parametrelerin yanında çevresel etkiler de dikkate alınarak tasarlanması ve işletilmesi gerekmektedir. Özellikle kentsel bölgelerde kullanılan transformatörlerin gürültü seviyelerinin insan sağlığını tehdit etmeyecek düzeyde olması gerekmektedir. Buna karşın transformatörler üzerinde doğaları gereği gürültü oluşması kaçınılmaz bir durumdur.

Transformatörlerde meydana gelen gürültü ile ilgili IEC 60076-10 ve IEEE Std. C57.12.90 standartları kullanılmaktadır. Ülkemizde ise TS EN 60076-10 standardı geçerli durumdadır. Transformatörlerde meydana gelen gürültülerin sınırlandırılması için üst limit getiren herhangi bir standart bulunmamaktadır. Ancak insanları rahatsız eden gürültü seviyelerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Gürültü şiddetinin 65-90dB(A) olması durumunda insanlarda kalp atışının değişimi, solunumun hızlanması ve beyindeki basıncın azalması gibi etkiler görülebilmektedir. İnsanların 120-140dB(A) aralığındaki bir gürültüye maruz kalması ise iç kulakta bozukluğa kadar zarar verebilmektedir. Gürültü şiddetinin 140dB(A)'dan daha yüksek seviyelere çıkması ise kulak zarının patlamasına sebep olmaktadır. Gürültü şiddetine dikkat edilmesinin yanında, gürültünün sürekliliği de önemsenmelidir. Gürültüye maruz kalma süresinin uzaması durumunda beklenenden daha büyük zararlara maruz kalılabilmektedir.

Meydana gelen çevresel gürültülerden rahatsız olan insanlar, haklı olarak bu gürültü kaynaklarına tepki gösterebilmektedir. İnsanların rahatsız olduğu gürültü seviyeleri hakkında TS 9315 ISO 1996-1/T1, TS ISO 1996-2/T1 ve ISO 1996-1:2003 standartları

bulunmaktadır. İlgili standartlara göre çevresel gürültü seviyesinde meydana gelen 15-20 dB'lik artışlara karşı grup reaksiyonları gösterilebilmektedir. Bu bağlamda insanların maruz kaldığı çevresel gürültüleri azaltmak adına, transformatörlerden kaynaklanan gürültülerin bastırılması oldukça önemlidir.

Güç transformatörleri üzerinde yüksüz ve yüke bağlı gürültüler oluşabilmektedir. Yüksüz durum gürültüleri olan çekirdek gürültülerinin meydana gelme sebebi mıknatıslanmadan kaynaklanan çekirdek nüvesindeki elastik uzunluk değişimleridir. Yük gürültüleri yük akımları ile meydana gelen manyetik kuvvetlerin sargılar, tank duvarı ve manyetik kalkan üzerinde titreşim üretmesi sebebiyle meydana gelirler. Bunun yanında güç transformatörleri üzerinde kullanılan soğutma ekipmanları olan fan ve pompa gürültüleri de dikkate alınmalıdır.

Transformatörün gürültü kaynaklarının bastırılması insanlarda fizyolojik ve psikolojik etkiler oluşturan çevre gürültülerini azaltmada önemli bir rol oynayacaktır. Bu çalışmada transformatör gürültü kaynakları ortaya konulmuştur ve transformatör gürültü ölçüm metotları açıklanmıştır. TEİAŞ'ın yaptırmış olduğu gürültü testleri incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Yapılan incelemeler neticesinde transformatör çekirdeğinin tasarımındaki birçok parametrenin çekirdek gürültülerini etkilediği görülmüştür. Bu parametrelerden biri de nüve imal metotlarıdır. Endüstride uygulanan metotlardan olan çok basamaklı bindirme metodunun gürültüyü azalttığı görülmüştür. Bir diğer parametre de silisli sac tipleridir. Çekirdekte kullanılan silisli sacın yüksek tanecik yönlendirme metoduyla yapılmış olması ve kalınlığındaki azalmanın gürültü seviyesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Nüvede bulunan basamak sayısındaki artmanın ve her basamakta bulunan plaka sayısındaki azalmanın da gürültü seviyesini azalttığı görülmüştür. Nüvenin dizayn edilmesi esnasında basamaklar birleştirilirken meydana gelen örtüşme uzunluğu, örtüşme kayma uzunluğu ve hava boşluk uzunluğundaki azalmanın gürültü seviyesinde pozitif etki bıraktığı anlaşılmıştır. Çekirdeğe somun ve kelepçeler marifetiyle uygulanan sıkma gerilimlerinin belirlenen optimum değerlerden daha yüksek değerlerde olması, gürültü seviyesinde artış meydana getirebilmektedir. Çekirdek gürültülerinde en önemli parametreler arasında olan kritik indüksiyon değerinin az olması ise gürültü

seviyesini etkili şekilde artırabilmektedir. Çünkü uygulanan akı yoğunluğunun nüvenin doyma indüksiyonundan, bir diğer deyişle kritik indüksiyon değerinden daha yüksek olması halinde yüzey titreşimleri artarak gürültü artışı meydana getirmektedir. Son olarak çekirdek gürültüsünü etkileyen parametrelerden biri de manyetik kuvvetler sebebiyle silisli saclarda oluşan boyutsal değişiklikler olan mıknatıssal büzülmedir. Bu parametrenin aslında gürültüyle net bir ilişki içerisinde olmadığı görülmektedir. Gürültü ile tepeden tepeye mıknatıssal büzülme arasındaki tutarsızlığın sebebi gürültü ile mıknatıssal büzülme üzerinde baskın olan bileşenlerin farklılık göstermesidir. Örneğin 1.7T indüksiyon altında, 100 Hz bileşeninde meydana gelen mıknatıssal büzülme değerindeki artış ile gürültü seviyesi arasında ilişki bulunmazken, 300 Hz bileşeninde önemli ölçüde benzerlik görülmektedir. Dolayısıyla bazı harmonik bileşenlerde meydana gelen mıknatıssal büzülme artışı, gürültü seviyesinde de artışa sebep olabilmektedir.

Güç elektroniği teknolojisinin gelişmesine binaen kullanımının yaygınlaşması ile rüzgar türbinleri ve güneş enerji santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının artış göstermesi, yük gürültüleri üzerinde artışa sebebiyet vermektedir. Yük akımında meydana gelen farklı frekanslardaki harmonikler, gürültü seviyesinde artış meydana getirebilmektedir. Sabit bileşen dışında, çift frekans bileşeni ile toplam ve fark frekans bileşenleri bazı frekanslarda çıkışarak gürültü seviyesini beklenenden daha yüksek seviyelerde artırabilmektedir. Dolayısıyla yük gürültülerini etkileyen önemli parametrenin yük akımlarındaki harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca transformatörün fazla yüklenmesi de gürültü seviyesini artıran diğer bir parametre olarak görülmüştür.

Genel olarak gürültü seviyesinin ölçülmesi amacıyla ses basınç ve ses yoğunluk olmak üzere iki farklı metot bulunmaktadır. Ancak ses yoğunluk problemleriyle yapılan ölçümlerle elde edilen verilerin daha doğru olduğu görülmektedir. Çünkü ses basınç metoduyla yapılan gürültü ölçümlerinde, diğer çevresel etkenlerin süzülememesi sebebiyle ölçüm sonuçları normalden yüksek çıkabilmektedir. Ayrıca transformatör duvar ve tavanından yansıyan seslerin yayılan gürültüye etki etmemesine rağmen ses basınç ölçüm metodundan alınan verilerde ilgili yansımaların katkısı olması da gürültü seviyesini

normalden yüksek çıkarabilmektedir. Son olarak transformatörün yakın alan gürültü ölçümlerinde meydana gelen reaktif etkinin, uzak alan ölçümlerinde ses yayılımına herhangi bir etkisi olmamasına rağmen gürültü kaynağına yakın ölçümlerde ses basınç ölçüm metodunun bu etkiyi süzememesi de ölçüm sonuçlarının yüksek çıkmasına sebep olabilmektedir. Ses basınç metoduyla yapılan ölçümlerde çevresel düzeltme faktörü kullanılarak, bulunan sonuçlar 7dB'e kadar düşürülmektedir. Ancak ses basınç metodunda çevresel düzeltme faktörünün kullanılmasına rağmen ses yoğunluk metodunun daha sağlıklı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, TEİAŞ'ın gürültü ölçümünü yaptırmış olduğu transformatörlerin gürültü seviyeleri incelenmiş ve yorumlanmıştır. 250 MVA gücündeki ototransformatörde gerçekleştirilen gürültü ölçümleri neticesinde ikaz gerilimlerinin %100Un yerine %110Un olarak uygulanması halinde gürültü seviyesinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca miknatıslanma akımı sebebiyle meydana gelen boşta akım harmoniklerinin de gürültü seviyesi üzerinde etkin olduğu görülmüştür. 125 MVA gücündeki ototransformatörde yapılan ölçümler neticesinde ise ONAN ve ONAF soğutma durumlarındaki gürültü seviyeleri incelenmiştir. Bu ölçüm sonuçlarında ses basınç metoduyla yapılan ölçümlerde süzülemeyen yakın alan reaktif etkisi görülmektedir. ONAF durumundaki bir transformatörde ses basınç metoduyla yapılan ölçümler 2m uzaklıktan yapılmaktadır. Ancak ONAN soğutma durumundaki transformatörlerde 0.3m uzaklıktan ölçüm alınmaktadır. ONAF modunda meydana gelen gürültü şiddetinin daha yüksek olması beklenirken, reaktif yakın alan etkisi sebebiyle ONAN modundaki gürültü seviyesinin daha yüksek seviyelerde olduğu görülmüştür. Son örneğimiz olan 50/62,5 MVA güç transformatöründe, aynı şartlar altında yapılan 0.3m ve 2m uzaklıklardan alınan ölçümlerde, ses basınç metodunun diğer çevresel gürültüleri süzememesi sebebiyle 2m'den alınan ölçüm sonuçlarının oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Yapılan incelemelere binaen ölçüm sonuçlarını, kullanılan metodun özelliklerini de dikkate alarak yorumlamakta fayda olduğu görülmektedir.

Tespit edilen bilgiler ışığında modern transformatörlerin tasarımı ve kullanılan materyallerin geliştirilmesi neticesinde yüksüz durum gürültüleri olarak ifade edilen

gerilim altındaki çekirdek gürültüleri genellikle baskın gürültü problemi olmaktan çıkmıştır. Pompa ve fan gürültüleri ise yüksüz durum gürültülerinden daha az etki yapması sebebiyle baskın gürültü kaynağı olarak düşünölememektedir. Transformator gürültülerinin baskın gürültü kaynağı genellikle yük altında meydana gelen manyetik sızıntı akılarıyla oluşan yük gürültüleri olmaktadır. Bu doğrultuda yük akımlarında bulunan harmonikler sönümlenmeli, transformator uyartım gerilimi %100 U_n 'den yüksek olmamalı ve transformator fazla yüklenmemelidir.



KAYNAKLAR

- [1] Garcia, B., Burgos, J.C., ve Alonso, A., (2005). "Winding Deformations Detection in Power Transformers by Tank Vibrations Monitoring", Electric Power Systems Research, 74: 129-138.
- [2] Phophongviwat, T., (2013). Investigation of the Influence of Magnetostriction and Magnetic Forces on Transformer Core Noise and Vibration, Doctoral Thesis, Cardiff University Wolfson Centre for Magnetism Cardiff School of Engineering, Wales.
- [3] Valkovic, Z.,(1994). "Effect of Electrical Steel Grade on Transformer Core Audible Noise" , Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 133: 607-609.
- [4] Valkovic, Z., (1996). "Investigations of Core Noise Levels Using a Dry-Type Transformer Model", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160: 205-206.
- [5] Ilo, A., Weiser, B., Booth, T. ve Pfützner, H., (1996). "Influence of Geometric Parameters on the Magnetic Properties of Model Transformer Cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160: 38-40
- [6] Ishida, M., Okabe, S. ve Sato, K., (1998). "Analysis of Noise Emitted from Three-Phase-Stacked Transformer Model Core" , Kawasaki Steel Technical Report, 39.
- [7] Weiser, B., Pfützner, H., Member, IEEE ve J. Anger, (2000). "Relevance of Magnetostriction and Forces for the Generation of Audible Noise of Transformer Cores" , IEEE Transactions on Magnetism, 36: 3759-3777.
- [8] Weiser, B., Hasenzagl, A., Booth, T. ve Pfützner, H., (1996). "Mechanisms of Noise Generation of Model Transformer Cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 160: 207-209.
- [9] Mizokami, M. ve Kurosaki, Y., (2015). "Noise Variation by Compressive Stress on the Model Core of Power Transformers" , Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 381: 208-214.
- [10] Ming, R.S., Pan, J., Norton, M.P., Wende, S., Huang, H., (1999). "The Sound-Field Characterisation of a Power Transformer", Applied Acoustics, 56: 257-272.

- [11] Rausch, M., Kaltenbacher, M., Landes, H. ve Lerch, R., (2002). "Combination Of Finite And Boundary Element Methods in Investigation And Prediction Of Load-Controlled Noise Of Power Transformers", Journal of Sound and Vibration, 250: 323-338.
- [12] Snell, D., (2008). "Measurement of Noise Associated with Model Transformer Cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320: 535-538.
- [13] Krell, C., Baumgartinger, N., Krismanic, G., Leiss, E. ve Pfützner, H., (2000). "Relevance of Multidirectional Magnetostriction for the Noise Generation of Transformer Cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 215: 634-636.
- [14] Snell, D., (2008). "Noise Generated by Model Step Lap Core Configurations of Grain Oriented Electrical Steel", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320: 887-890.
- [15] Ertl, M. ve Voss, S., (2014). "The Role of Load Harmonics in Audible Noise of Electrical Transformers", Journal of Sound and Vibration, 333: 2253-2270.
- [16] Peter, H., Andreas, H., Manfred, K., Florian, B., Markus, D., Hans, I. ve Alexander, H., (2008). "3D-FEM Simulation for Investigation of Load Noise of Power Transformers Verified by Measurements", 18th International Conference on Electrical Machines, 6-9 September 2008, Vilamoura.
- [17] Ertl, M. ve Probst, W., (2006). "Investigation of the Origin of Load-Controlled Vibration of Large Power Transformers by Coupled 3D-FEM Analysis", International Conference On Power System Technology, 22-26 October 2006, Chongqing.
- [18] Girgis, R.S., Bernesjö, M. ve Anger, J., (2009). "Comprehensive Analysis of Load Noise of Power Transformers", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 26-30 July 2009, Calgary.
- [19] Yıldız Teknik Üniversitesi Araştırmacı Bilgi Sistemi(YARBİS), Transformatörler, www.yarbis1.yildiz.edu.tr/webuserCourseMaterials/okur_ecd0e26c1b54bd74d65154fd027e2d9f.pdf, 11 Eylül 2015.
- [20] Kabalcı, E., (2014), Transformatörler, https://ekblc.files.Wordpress.com/2014/02/transformatc3b6rler_pp2.pdf, 19 Eylül 2015.
- [21] MEB, (2012). Güç Transformatörleri, Yayın no: 52EE0125, Ankara.
- [22] ABB, (2002). PowerIT Liquid-Filled GroundMount Transformer, <http://www.abb.com/>, 13 Eylül 2015.
- [23] ELTAŞ, (2012). Dağıtım ve Güç Transformatörleri, www.eltas.com.tr, 13 Eylül 2015.
- [24] MEB, (2015). Transformatörler, <http://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/1EnerjiUretimilletimiVeDagitimi/unite9.pdf>, 17 Eylül 2015.
- [25] Astor Power, (2010). Dağıtım ve Güç Transformatörleri, www.astorpower.com, 15 Eylül 2015.

- [26] TEİAŞ, (1987). Güç Transformatörleri, Yayın no:10, Manisa.
- [27] Trafo Kazanı, Trafo Kazanı İmalatı, www.trafokazani.net, 23 Eylül 2015.
- [28] Elektrik Haber, Transformatörlerin Yapısı, İşletme, Bakım ve Onarımı, www.elektrikhaber.com, 21 Eylül 2015.
- [29] Legrand, Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatörler, <http://www.legrand.com.tr/pdf/ZUCCHINI-KAT.pdf>, 15 Eylül 2015.
- [30] Bilgili, S., Gürtepe, E., Türkel, E., Altınoluk, A.M., Hüsmen, N., Bütün, A. ve Ertorun, H., (2011). Çevresel Gürültü Ölçüm ve Değerlendirme Klavuzu, <http://gurultu.cevreorman.gov.tr/gurultu/Files/Gurultu/Dokumanlar/Kilavuz.pdf>, 18 Ocak 2016.
- [31] Carlson, A., Fuhr, J., Schemel, G. ve Wegscheider, F., (2003). Testing of Power Transformers, 1. Baskı, Pro Print, Zürich.
- [32] Cogent Power, Multi Step Lap Core Technical Data, www.cogentpowerinc.com, 24 Ekim 2015.
- [33] Arıkan, O., (2009), Harmonikler, http://www.slideshare.net/ka_ka/teia-harmonikler-02112009, 12 Ocak 2016.
- [34] Brown University, Introduction to Dynamics and Vibrations, <http://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/>, 08 Ocak 2016.
- [35] Wikipedia, Vibration, <https://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>, 12 Ocak 2016.
- [36] Online Electrical Engineering Study Site, Transformer Cooling System and Methods, <http://www.electrical4u.com/transformer-cooling-system-and-methods/>, 20 Ocak 2016.
- [37] MEB, (2011). YG Tesislerinde Trafo Sistemleri Bakımı, Yayın no: 52EE0280, Ankara
- [38] Kulkarni, S.V. ve Khaparde, S.A., (2004). Transformer Engineering: Design and Practice, https://books.google.nl/books?id=qy4QT0BIV0MC&pg=PA55&hl=tr&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false, 25 Ocak 2016.
- [39] IEC 60076-10, (2001). Power Transformers-Part 10: Determination of Sound Levels, IEC, 1. Baskı, Geneva.
- [40] Brüel&Kjaer, Sound Level Meters, <http://www.bksv.com>, 17 Nisan 2016.
- [41] Girgis, R.S., Garner, K., Bernesjö, M. ve Anger, J., (2008). “Measuring No – Load and Load noise of Power Transformers Using the Sound Pressure and Sound Intensity Methods – Part – I: Outdoors measurements”, Power and Energy Society General Meeting, 20-24 July 2008, Pittsburgh.
- [42] TEİAŞ, (2012). 250 MVA Ototransformatörün Gürültü Ölçümü, İstanbul.
- [43] TEİAŞ, (2012). 125 MVA Ototransformatörün Gürültü Ölçümü, İstanbul.
- [44] TEİAŞ, (2011). 50/62,5 MVA Güç Transformatörünün Gürültü Ölçümü, Kocaeli.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Erdi DOĞAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.08.1989 / Elazığ
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : edoganenerji@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Elektrik Elektronik	Fatih Üniversitesi	2011
Lise	Fen	Elazığ Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-Devam Ediyor	Türkiye Elektrik İletim A.Ş	Elektrik Mühendisi
2013-2015	İstanbul Enerji A.Ş	Elektrik Mühendisi
2012-2013	Ses Elektrik Ltd. Şti.	Elektrik Mühendisi
2011-2012	ATR Mühendislik	Elektrik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. E.Doğan, B. Kekezoğlu. Power Transformer Noise, Noise Tests and Example Test Results. World Academy of Science Engineering and Technology, ICPEEE 2016.

