

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLERİN YERALTI GÜÇ KABLOLARINA  
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Tek. Öğr. Yusuf Gürcan ŞAHİN**

**Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi**

**Danışman: Yrd.Doç.Dr. Faruk ARAS**

**KOCAELİ, 2006**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLERİN YERALTI GÜÇ KABLOLARINA  
ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Yusuf Gürcan ŞAHİN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 9 Haziran 2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 13 Temmuz 2006**

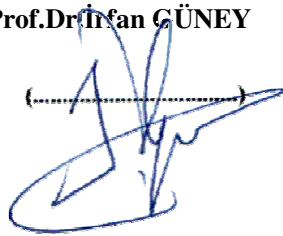
**Tez Danışmanı**

**Yrd.Doç.Dr. Faruk ARAS**

(.....  
  
.....)

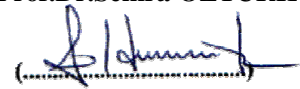
**Üye**

**Prof.Dr.İrfan GÜNEY**

(.....  
  
.....)

**Üye**

**Prof.Dr.Semra ÖZTÜRK**

(.....  
  
.....)

**KOCAELİ, 2006**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

İnsanların ihtiyaçları ve istekleri gün geçtikçe değiştiğinden teknolojide bu duruma ayak uydurmak zorundadır.

Yaşadığımız şehirlerde estetik olmayan, güvensiz olan havai hatların yerini yüksek tesis maliyetine rağmen yeraltı güç kabloları almaya başlamıştır.

Yüksek maliyeti nedeniyle uzun süre kullanılması gereken yeraltı güç kablolarının ömrüne, çevre şartlarından işletim şekline kadar etki eden birçok unsur vardır. Bununla birlikte kabloların ilettiği enerjinin kalitesinin de tesis ömrüne oldukça fazla etki ettiği gözden kaçmış bir noktadır.

Bu çalışmada bu gözden kaçan noktayı ortaya koymak harmonikli ortamda bu tesisin ömrünün nasıl değiştiğini göstermek ve bu durumun üstesinden gelmek için neler yapılabileceği incelenmektedir.

Çalışmam sırasında başta danışman öğretmenin Yrd. Doç.Dr. Faruk Aras olmak üzere çalışma arkadaşlarım, Arş. Gör. Kenan Keleş`e, Arş. Gör Mevlüt Karaçor`a ve Selçuk Üniversite`si Ereğli M.Y.O öğretim görevlilerinden Murat Kale`ye, ölçüm çalışmalarım esnasında gösterdikleri yakın ilgi nedeniyle Hisar Çelik A.Ş`den Hülya Kartal ve Hicabi İkizoğlu`na teşekkür ederim.

Aileme ayrıca teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR.....	viii
ÖZET .....	xi
YABANCI DİLDE ÖZET .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. ENERJİ KALİTESİ ve GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ	
2.1. Giriş.....	8
2.2. Güç Kalitesiyle İlgili Tanımlar.....	9
2.2.1. Güç kalitesini olumsuz etkileyen durumlar.....	10
2.2.2. Olay ve değişimin ayırt edilmesi .....	10
2.2.3. Güç kalitesi bozulmaları.....	11
2.2.4. Güç sistemlerinde harmonikler.....	13
2.2.4.1. Güç sistemlerinde üretilen harmonikler .....	15
2.3 Harmonik Analiz.....	16
2.3.1. Fourier analizi.....	18
2.3.2. Dalga simetrisi .....	21
2.3.3. Simetri kaynaklı sadeleştirmeler.....	21
2.3.4. Tek simetri.....	22
2.3.5. Çift simetri.....	23
2.3.6. Yarı dalga simetrisi .....	24
2.3.7. Çizgi spektrumu .....	26
2.4. Harmoniklerin Zararları .....	28
2.4.1. Metal çekirdekli elektrik makinaları üzerindeki zararları .....	28
2.4.2. Kondansatör üzerindeki zararları .....	28
2.4.3. Devre kesicileri ve sigortalar üzerindeki zararları .....	29
2.4.4. Koruma röleleri üzerindeki zararları .....	29
2.4.5. Ölçü aletleri üzerindeki zararları .....	29
2.5. Harmonik Modelleme .....	29
2.5.1. Seri rezonans.....	31
2.5.2. Paralel rezonans .....	32
2.6. Harmonik ile İlgili Yayınlar .....	33
3. YERALTI GÜÇ KABLolarI ve HARMONİKLİ ORTAMDA AMPASİTE HESABI .....	35
3.1. Yeraltı Güç Kabloları.....	35
3.2. Yeraltı Güç Kablosu Modellenmesi.....	37
3.2.1. Elektrik ve ısı enerjisi benzetişimi.....	38
3.2.2. Isıl direnç .....	39
3.2.3. Kabloda oluşan ısı enerjisi kayıpları .....	40
3.2.3.1. Akıma bağlı kayıplar – Joule Kayıpları.....	40
3.2.3.2. İletken kayıpları .....	40
3.2.3.2.1. Deri etkisi.....	42
3.2.3.2.2. Yaklaşım etkisi.....	43

3.2.3.3. Kılıf, ekran ve zırh kayıpları.....	44
3.2.3.4. Gerilime bağlı kayıplar .....	45
3.3. Isıl Devre Elemanlarının ve Kablo Ampasitesinin Hesaplanması.....	46
4. HARMONİK ÖLÇÜMÜ ve HARMONİK ETKİ MODELİ .....	51
4.1.Harmonik Ölçümü .....	51
4.2.Harmonik Etki Modeli .....	57
4.2.1.Modelin tanıtılması .....	57
5. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME .....	72
5.1. 34,5 KV`luk Yeraltı Güç Kablosuna Harmonik Etkisinin Belirlenmesi.....	72
5.1.1.Harmonikli ortamda 34,5 KV`luk yeraltı güç kablosuna, kablo gömülme derinliğinin etkisi.....	86
5.1.2.Harmonikli ortamda 34,5 KV`luk yeraltı güç kablosuna, merkezden merkeze kablolar arası mesafenin etkisi .....	95
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	106
KAYNAKLAR.....	109
EKLER.....	112
ÖZGEÇMİŞ.....	122

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sırasıyla eski ve yeni şebeke modelleri.....	8
Şekil 2.2. Güç kalitesi bozulmaları ve sinüs (a)ani yükselme ve osilasyon (b)Gerilim Kabarması (c)Darbe (ç)Çentik (d)Çökme (e)Çentik (f)Çok kısa süreli güç Kesintisi (g)Kısa süreli güç kesintisi (ğ)Güç Kesintisi (h)Dengesizlik (ı)Dengesizlik - gerilim dalgalanması (i)Frekans dalgalanması (j)Gürültü (k)Sinüs .....	12
Şekil 2.3. Güç üçgeni.....	15
Şekil 2.4. Sinüs dalgası ve sinüs dalgasını oluşturan fazör hareketi .....	17
Şekil 2.5. Sinüs dalgasını oluşturan fazörlerin 15 dereceyle çizilmesi.....	17
Şekil 2.6. Tek simetri özelliğine haiz bir dalga şekli.....	23
Şekil 2.7. Çift simetri özelliğine haiz bir dalga şekli.....	24
Şekil 2.8. Yarı dalga simetrisi özelliğine haiz bir dalga şekli .....	26
Şekil 2.9. a)Sinüs dalgası b)3.5.7.9. harmoniklerin bindirildiği sinüs ve spektrumu .....	26
Şekil 2.10. Bir OG tesisi .....	30
Şekil 2.11. Şekil (2.10)`daki tesisin harmonik modeli .....	30
Şekil 2.12. a)Seri rezonans önceki devre b)Seri rezonans halindeki devre.....	31
Şekil 2.13. Seri L–C devresi, f–Z eğrisi.....	31
Şekil 2.14. a)Paralel rezonans önceki devre b)Paralel rezonans halindeki devre .....	32
Şekil 2.15. Paralel L–C devresi f–Z eğrisi.....	32
Şekil 2.16. Şebekede kabul edilebilir gerilim değerleri ve süreleri.....	33
Şekil 3.1. Bir yeraltı güç kablosunun katman katman görünüşü .....	37
Şekil 3.2. Elektrik enerjisi akımıyla ısı enerjisi akımının benzetişimi .....	38
Şekil 3.3. Kablo modeli.....	46
Şekil 3.4. Kanaldaki kabloların düz yerleştirilmesi.....	47
Şekil 3.5. Kablonun ısı devre modeli.....	48
Şekil 4.1. Ölçüm yapılan sistemin basitleştirilmiş şeması .....	52
Şekil 4.2. t <sub>I</sub> %THB a)1.faz b)2.faz c)3.faz.....	53
Şekil 4.3. t <sub>I</sub> a)1.faz b)2.faz c)3.faz.....	55
Şekil 4.4. Modelin genel görüntüsü .....	58
Şekil 4.5. Modeli oluşturan alt ana bloklar .....	58
Şekil 4.6. %THB bloğu .....	59
Şekil 4.7. Ampasite azalma faktörünün tespiti.....	59
Şekil 4.8. Değerlendirmenin yapıldığı alt model.....	60
Şekil 4.9. δ`nın elde edilmesinde kullanılan alt model .....	60
Şekil 4.10. Harmonik parametreleri bloğu.....	61
Şekil 4.11. δ hesabı .....	61
Şekil 4.12. Harmonik parametreleri blok bileşenleri.....	62
Şekil 4.13. Kayıp güçlerin belirlendiği blok .....	62
Şekil 4.14. Kayıp güçlerin belirlendiği ana blok.....	63
Şekil 4.15. Kayıp güçlerin belirlendiği ana alt bloklar .....	63
Şekil 4.16. Kayıp güçlerin düzenlenmesi.....	64
Şekil 4.17. r <sub>ac</sub> tespit alt blokları .....	64
Şekil 4.18. r <sub>dc</sub> tesbit bloğu .....	64
Şekil 4.19. Deri etkisi tespit bloğu.....	65

Şekil 4.20. Yaklaşım etkisi tespit bloğu.....	65
Şekil 4.21. $r_{dc}$ , $Y_s$ ve $Y_p$ değerleri kullanılarak $r_{ac}$ 'nin belirlenmesi .....	65
Şekil 4.22. $x_s^2$ tespit bloğu .....	66
Şekil 4.23. $Y_s$ Deri etkisi hesap bloğu .....	66
Şekil 4.24. $x_p^2$ tespit bloğu .....	66
Şekil 4.25. $Y_p$ Yaklaşım etkisi hesap bloğu .....	66
Şekil 4.26. Joule kaybı .....	67
Şekil 4.27. Sıcaklık artış alt modeli .....	67
Şekil 4.28. Toplam ısı direnç bloğu.....	68
Şekil 4.29. $T_1$ ısı direnci tespit bloğu.....	68
Şekil 4.30. $T_3$ ısı direnci tespit bloğu.....	68
Şekil 4.31. $T_4$ ısı direnci tespit bloğu.....	69
Şekil 4.32. Sıcaklık artış belirleme bloğu .....	69
Şekil 4.33.Sıcaklık tespit yapıları a)Toplam sıcaklık b)Toplam harmonik sıcaklık .....	70
Şekil 4.34. Sonuçların düzenlenmesi.....	70
Şekil 4.35. Ömür modeli.....	71
Şekil 4.36. Model parametreleri .....	71
Şekil 5.1: %THB_Toplam kayıp güç a)%0–%100THB b)%0–%20THB .....	72
Şekil 5.2: %THB_Toplam harmonik kayıp gücü a)%0–%100THB b)%0–%20THB .....	73
Şekil 5.3: %THB_Harmonik Kayıp Güçleri a)%0–%100THB b)%0–%20THB....	75
Şekil 5.4: %THB_Toplam sıcaklık a)%0–%100THB b)%0–%20THB .....	76
Şekil 5.5: %THB_Toplam harmonik sıcaklık artışı a)%0–%100THB b)%0–%20THB .....	77
Şekil 5.6: %THB_Harmonik sıcaklık artışları a)%THB_Temel harmonik sıcaklığı b)%0–%100THB c)%0–%20THB ç)%80–%100THB .....	78
Şekil 5.7: Toplam sıcaklık artışı _Bağlı ömür a)0–70°C b)0–3°C .....	80
Şekil 5.8: %THB_Bağlı ömür .....	82
Şekil 5.9: %THB_Ampasite azalma faktörü.....	84
Şekil 5.10: Bağlı ampasite azalma faktörü_Bağlı ömür .....	84
Şekil 5.11: Ampasite_Bağlı ömür a)0 – 650A b)635–650A.....	85
Şekil 5.12: Kablonun gömülme derinliği $T_4$ .....	86
Şekil 5.13: $T_4$ _Derinlik_%THB_Toplam sıcaklık.....	87
Şekil 5.14: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB_Toplam sıcaklık .....	87
Şekil 5.15: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB_Tek tek harmonik sıcaklık artışı .....	88
Şekil 5.16: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB_Toplam harmonik sıcaklık artışı .....	90
Şekil 5.17: Toplam sıcaklık _Bağlı ömür a)400mm b)600mm c)800mm ç)900mm d)1000mm e)1200mm.....	90
Şekil 5.18: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB_Bağlı ömür .....	93
Şekil 5.19: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde Bağlı ampasite azalma faktörü_Bağlı ömür.....	93
Şekil 5.20: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde Ampasite_Bağlı ömür.....	94
Şekil 5.21: Mesafe_Harmoniklerin yaklaşım etkileri.....	95
Şekil 5.22: Mesafe_Harmoniklerin etkin dirençleri .....	96
Şekil 5.23: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB_Temel kayıp güç .....	96
Şekil 5.24: Mesafe_ $T_4$ değerleri .....	97

Şekil 5.25: $T_4$ _Mesafe_%THB_Toplam sıcaklık .....	97
Şekil 5.26: %THB_Tek tek harmonik sıcaklık artışları.....	98
Şekil 5.27: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB_Toplam harmonik sıcaklık artışı .....	99
Şekil 5.28: Mesafe etsini de gösterecek şekilde %THB_Toplam sıcaklık a)%0-%100THB b)%0-%20THB.....	100
Şekil 5.29: Toplam sıcaklık_Bağlı ömür a)41cm b)61cm c)76,6cm ç)81cm d)101cm e)121cm f)131cm g)141cm .....	101
Şekil 5.30: Mesafe etkisi de görülecek şekilde %THB_ Bağlı ömür .....	104
Şekil 5.31: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde Ampasite_Bağlı ömür .....	104



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Bir daire etrafında dönerken y eksenindeki fazörün durumu .....	17
Tablo 2.2. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği`ne göre akım harmonikleri sınırları.....	34
Tablo 3.1. Malzemeye göre $\rho_{20}$ ve $\alpha_{20}$ değerleri .....	42
Tablo 3.2. İletken tipine göre $k_s$ ve $k_p$ değerleri .....	43
Tablo 3.3. Kablo tiplerine göre dielektrik kaybı gerilim sınırı .....	46
Tablo 4.1. Ocak gerilim ve güç değerleri.....	51
Tablo 4.2. Trafo gerilim değerleri ve beslediği yerler .....	51
Tablo 4.3. Ölçüm sonunda elde edilen harmonik ortalama değerleri.....	56
Tablo 4.4. Kablo parametreleri.....	57
Tablo 5.1. %THB, Bağlı ömür değerleri.....	81
Tablo 5.2. Ampasite azalma faktörü, ampasite değerleri.....	83

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Semboller

$h$	: kablo gömülme derinliği, (mm)
$A$	: kutupsal eş değer
$a$	: 0 ve $n$ indisleriyle kullanıldığında Fourier katsayısı
$b$	: $n$ indisyle kullanıldığında Fourier katsayısı
$C$	: kapasite, (F)
$D$	: harmonik gücü, (VA)
$D$	: kablo çapı, (mm)
$d$	: dış çap, (mm)
$f$	: frekans, (Hz)
$f$	: frekans, (Hz)
$I$	: akım, (A)
$i$	: anlık akım, (A)
$k$	: sıcaklık katsayısı
$k$	: iletken tipine göre etki katsayısı
$L$	: endüktans, (H)
$l$	: ömür
$n$	: harmonik sırası
$P$	: aktif Güç, (W)
$Q$	: reaktif Güç, (VAr)
$r$	: sayısal alt indisle birlikte kullanıldığında çap, (mm)
$R$	: elektriksel direnç, ( $\Omega$ )
$r$	: elektriksel direnç, ( $\Omega$ )
$S$	: görünür güç, (VA)
$S$	: iletken kesidi, (mm <sup>2</sup> )
$s$	: kablolar arası uzaklık, (mm)
$t$	: zaman, (s)
$T$	: devir, sayısal alt indisle birlikte kullanıldığında ısı direnç, (K.m/W)
$t$	: sayısal alt indisle birlikte kullanıldığında yalıtkan kalınlığı, (mm)
Tr	: trafo
$v$	: anlık gerilim, (V)
$V$	: etkin gerilim, (V)
$U$	: faz arası nominal gerilim (V)
$W$	: kayıp, (W/m)
$W_r$	: birim uzunluk başına ısı enerjisi kaybı (W)
$X$	: reaktans ( $\Omega$ )
$X$	: etki parametresi
$x$	: değişken
$Y$	: etki katsayısı
$Z$	: birim değerde empedans
$Z$	: empedans, ( $\Omega$ )
$\emptyset$	: faz açısı, (Derece)
$\Delta$	: fark

$A$	: sıcaklık katsayısı, (1/K)
$\gamma$	: harmonik akımının temel bileşene oranını
$\delta$	: ampasite azalma faktörü
$\theta$	: sıcaklık, ( $^{\circ}C$ )
$\lambda$	: iletkenlik, (W / K.m)
$\lambda_1^{\prime}$	: Eddy Kayıpları
$\lambda_1^{\prime\prime}$	: kılıf dolaşım kayıpları
$\pi$	: pi sayısı
$\rho$	: yalıtkan ısıl öz direnci, (K.m/W)
$\rho$	: öz direnç, ( $\Omega.m$ )
$\varphi$	: faz açısı, (Derece)
$\omega$	: açısal frekans (rad/s)

### Alt indisler

0	: başlangıç değeri
1	: iletken ile kılıf arasındaki yalıtkan, r ile kullanıldığında iç,
2	: özel katman, r ile kullanıldığında dış,
20	: $20^{\circ}C$ 'deki
3	: Yalıtkan kılıfın
4	: Toprak
a	: ortam
ac	: alternatif akım
arm	: zırh
c	: iletken
$\chi$	: en yüksek izin verilebilir iletken
C	: kondansatör
d	: dielektrik
dc	: en yüksek işletme sıcaklığında doğru akım
e	: dış, Z ile kullanıldığında eşdeğer
g	: toprak
h	: Harmonik derecesi
hv	: harmonik var
hy	: harmonik yok
I	: akım
i	: yalıtkan
k	: kompanzasyon
kd	: kısa devre
L	: yük
n	: harmonik sırası
p	: yaklaşım etkisi
pa	: paralel
r	: rezonans
s	: deri etkisi
$\sigma$	: toprak
SC	: kısa devre
se	: seri
sh	: kılıf

Ş	: Şebeke
Tr3	: 3. trafo
T <sub>3</sub>	: 3. trafo
V	: gerilim

### **Kısaltmalar**

AA	: Alternatif Akım
AWG	: Amerikan İletken Ölçeği – American Wire Gauge
AIEE	: Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü – American Institute of Electrical Engineers
CIGRE	: Büyük Elektrik Sistemleri Uluslararası Konseyi – International Council on Large Electric Systems
ÇYG	: Çok Yüksek Gerilim
DA	: Doğru Akım
DF	: Bozulma Katsayısı
ERA	: Elektrik Araştırma Kurumu – Electrical Research Association
EEL	: Edison Elektrik Enstitüsü – Edison Electric Institute
HD	: Tek tek harmonik bozulumu
HPFF	: Yüksek Basıncılı Akışkanla Doldurulmuş – High Pressure Fluid Filled
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Kurulu – International Electrotechnical Commission
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü – Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPCEA	: Yalıtılmış Güç Kablosu Mühendisleri Kurumu – Insulated Power Cable Engineers Association
M.M.K.A.M	: Merkezden merkeze kablolar arası mesafe, (mm)
NEC	: Ulusal Elektrik Kanunnamesi(ABD) – National Electrical Code
NELA	: Ulusal Elektrik Işık Kurumu(ABD) – National Electric Light Association
PILC	: Kâğıt Yalıtkanlı Kurşun Kaplamalı–Paper Insulated Lead Covered
OG	: Orta Gerilim
PE	: Polietilen
PVC	: Polivinilklorid
TTB	: Toplam talep bozulması
THB	: Toplam harmonik bozulması
XLPE	: Çapraz bağlı polietilen – Crosslinked Polyethylene

# HARMONİKLERİN YERALTI GÜÇ KABLOLARINA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Yusuf Gürcan ŞAHİN

**Anahtar Kelimeler:** Harmonik, Yeraltı güç kablosu, XLPE, Kablo ömrü, Ampasite

**Özet:** Bu çalışmada harmoniklerin yeraltı güç kablolarına etkilerinin belirlenmesi ve harmonik etkilerinin azaltılması için öneri sunulması amaçlanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için bir OG sistemde harmonik ölçümü yapılmış, alınan harmonik değerleri doğrultusunda bir MATLAB/SIMULINK modeli oluşturulmuş ve bu modelden alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Modelde, ölçüm yapılan tesiste kullanılan kablo ile aynı kablo kullanılmıştır. Sonuç olarak sistemdeki harmoniklerin kablodaki kayıp gücü, buna bağlı olarak sıcaklığı arttırdığı görülmüştür. Bu sıcaklık artışlarının da kabloda ilave ömür kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Bu kayba uğramamak için ampasitenin azaltılması veya tesis şeklinin harmonikli ortam göz önüne alınarak tasarlanması önerilmiştir.

# **DETERMINATION OF HARMONICS EFFECTS ON UNDERGROUND POWER CABLES**

**Yusuf Gürcan ŞAHİN**

**Keywords:** Harmonic, Underground power cable, XLPE, Cable Life, Ampacity

**Abstract:** In this thesis it has been aimed to determine of harmonics effects on underground power cables and to propose reducing methods of these effects. To achive that a harmonic measurement has ben accomplished in a middle voltage system. Under the light of the measured data a MATLAB/SIMULINK model has been constituted and the results of this model has been evaluated. It has been choosen the same cable with real system cable at model. As a result it has been determined that power loss so that the temperature of the cable rises due to harmonics and because of that additional cable life loss occured. To prevent that it has been proposed reducing the ampacity and considering the harmonics while constructing such these underground power systems.

## **BÖLÜM 1**

### **1. 1 Giriş**

Ülkelerin gelişmişliklerinin bir ölçüsü de, tükettikleri elektrik enerjisi miktarıdır. Bir ülkede kişi başına ne kadar çok elektrik enerjisi tüketiliyorsa, o ülke o kadar gelişmiştir denebilir. Örneğin ABD`de 2002 itibarıyla kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi 12558 KWh, Japonya`da 7809 KWh iken ülkemizde bu rakam 1479 KWh olmuştur [1] .

Elektrik enerjisinin tüketilebilmesi için öncelikle üretilmesi ve daha sonra da iletilerek son kullanıcılara aktarılması gerekmektedir. Bu süreçte iletilen enerjinin kalitesi çeşitli sebeplerden oldukça olumsuz etkilenmektedir.

Ülkemizde, elektrik enerjisinin iletimi için daha çok havai hatlar tercih edilmiş olmasına rağmen yeraltı güç kabloları, üretim teknolojilerinde ve döşeme tekniklerinde meydana gelen gelişmeler sayesinde özellikle yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde kullanılmakta ve havai hatlar ile rekabet edebilecek düzeye ulaşmaktadır [2].

İletim ve dağıtım hatlarında havai hat yerine yeraltı güç kablosu kullanılmak istendiğinde durumun ekonomik, teknik ve çevre özellikleri titizlikle incelenmelidir. Yeraltı sistemleri genel olarak nüfus yoğunluğunun olduğu bölgelere elektrik enerjisinin dağıtımında ve güvenliğin veya estetiğin önemli olduğu hallerde tercih edilmektedir. Yeraltı güç kabloları, fabrika ortamlarında iş güvenliği açısından son derece güvenilir olmaktadır. Havai hatların maruz kaldığı rüzgâr, yıldırım gibi doğa olaylarına maruz kalmamaktadır. Buna karşın yeraltı enerji dağıtım sistemlerinde benzer olaylara çok nadir rastlanmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yeraltı sistemlerinin arıza yapma sıklığı düşüktür. Yeraltı güç kablolarının bu getirilerine karşın götürüsü ise maliyetidir. Tüm kablo yalıtıldığı ve döşenmesi ince işçilik

gerektirdiği için tesis maliyeti yüksektir [2]. Bu tesis şeklinin çok pahalı bir yatırım gerektirmesi nedeniyle, ikinci bir kablo tesis etmektense mevcut kablonun mümkün olduğunca yüksek kapasitede ve ömrünü azaltmaksızın uzun yıllar (30–40 yıl için) kullanılması istenmektedir [3].

1800`lü yılların sonlarına doğru akım taşıma kapasitesi üzerine ilk çalışmalar ortaya çıkmıştır. Elektrik güç kablolarının akım taşıma kapasitesi üzerine ilk yayın 1893 yılında Dr. A.E.Kennelly ve 1905 yılında Mie tarafından yapılmıştır [4]. İlk kablo akım taşıma sınırlarını gösteren çizelge, 1920`nin başlarında İngiltere`de yapılmıştır. 1924 yılında yine İngiltere`de ERA Teknoloji Ltd. Şti. tarafından, kağıt yalıtkanlı kablolar için standart sağlamak amacıyla yüklenme akımlarını gösteren bir rapor yayınlanmıştır [4]. Dr.D. H. Simmons 1925 yılında “Yeraltı güç kablolarında elektrikî problemlerin hesaplanması” isimli bir seri çalışmayı yayınlamıştır. NELA 1931 yılında ABD`de kâğıt yalıtkanlı kurşun kaplamalı (PILC) kanala ya da havaya döşenmiş kablolar için ilk akım taşıma kapasitesi tablosunu yayınlamıştır. EEI 1933 yılında NELA`nın yaptığı işi diğer yük katsayılarını da içerecek şekilde genişletmiştir [5].

1930`larda ısı transferi çalışmalarına başlanmıştır. İletken sıcaklığı ve iletken akımı arasındaki ilişkiyi belirlemek için bir takım deneyler İngiliz bilim adamı ve aynı zamanda NEC başkanı olan S.J. Rosch tarafından yapılmıştır. Ancak bu çalışma, lastik kaplı bütün bir bakır iletken ve havada yatay olarak asılı kablolar ile sınırlı kalmakta, toprağa gömülü kabloları ve kılıf kayıplarını içermemekteydi. Rosch, elde ettiği verilerden oluşturduğu daha sonra kendisinin de fark ederek bir düzeltme katsayısının gerekliliğini hissedeceği bu modeli 1938 yılında yayınlamıştır [4].

1951`de Phelps Dodge İletken ve Kablo Şirketi`nden ( Phelps Dodge Wire&Cable Company) W.A. Dei Mar akım taşıma kapasitesi ( current carrying capacity ) yerine “ampere capacity” sözcüklerinden türetilen “ ampacity “ kelimesini literatüre katmıştır [4]. Bu tezde, akım taşıma kapasitesi yerine ampasite kelimesi kullanılmaktadır.



1949 yılında Jack Neher gömülmüş kabloları çevreleyen eş sıcaklık eğrilerini çıkarmış ve bunların dış merkezli daireler halinde kablo ekseninden aşağı doğru saptığını göstermiştir. Bu durum daha sonraları kumlu bir bölgede benzer boru kablolarını yük testine tabi tutmalarından sonra Balaksa, McKean ve Merrel tarafından da detaylı olarak rapor edilmiştir [5].

İlk başarılı ampasite modelini 1957 yılında Neher ve McGrath yayınlamıştır [6]. Başarılı sonuçlar elde edilmesi ile Neher-McGrath Modeli olarak anılmaya başlanan bu model kabloların ampasitesini hesaplamak için kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışma, iletkendeki ısı enerjisi dengesine ve ısı enerjisi akışı ile elektrik akımı akışı arasındaki bir benzetişime dayanan basit bir model olmasına rağmen güncel ampasite hesapları için halen temel olarak alınan bir çalışmadır [3].

IEC tarafından bir standart oluşturulmak üzere, Neher-McGrath Modeli temel alınarak hazırlanan çalışma CIGRE raporu olarak 1964'de Paris'te ortaya konmuştur. Bu rapor 1969 yılında IEC 287 numaralı standart olarak yayınlanmıştır [7].

1982 yılında ikinci kez basılan ve halen kullanılmakta olan bu yayının adı IEC 60287 olarak değiştirilmiştir [8].

AIEE-IPCEA'nın yayınlarında ampasite tabloları Jack Neher ve Martin McGrath'ın 1957 Haziranında yayınladıkları metoda göre hesaplanmaktadır. Bu yayınlar 1995 yılında tekrar elden geçirilip IEEE tarafından yayınlanmıştır.

Yeraltı güç kablolarını oluşturan bileşenlerin başında şüphesiz kablo yalıtkanı gelmektedir. Yalıtkan kullanılmış bir sistemde, yaşlanma kavramı sistemin enerjilendiği ilk günden bozulmanın meydana geldiği son güne kadar devam eden bir süreçtir. Bu iki olay arasındaki zaman, yalıtkan ömrü olarak adlandırılmaktadır [9].

IEC ve IEEE standartlarına göre yaşlanma; yalıtkan malzemenin veya sistemin kullanılabilirliğini etkileyen geri dönüşü olmayan zararlı değişiklikler olarak tanımlanmaktadır. Yaşlanma nedenleri olarak malzemenin zorlanması ve istemeye istemeye de olsa diğer etkenlere maruz bırakılması gösterilebilir. Değişimler

malzemenin kimyasal bileşimine ve fiziksel özelliklerine tesir edebilmektedir. Bu sayede uygun yaşlanma bozulumuna duyarlı özelliklerin gözlemlenmesiyle, yaşlanma teşhisleri ve değerlendirmeleri gerçekleştirilebilmektedir [10].

Yeraltı güç kablolarında yaygın olarak çapraz bağlı polietilen (XLPE) kullanılmaktadır. Bu tezde XLPE yalıtkanlı kabloların kullanılması nedeniyle yalıtkanın yaşlanması üzerine yapılan çalışmalar da incelenmektedir.

McKean ve diğ. [11], yaptığı çalışma ile mikro boşluklar ile delinme gerilimi (40 KV/mm) arasında kabaca bir ilişki olduğunu gözlemiştir. Montanari ve Simoni [10] XLPE kablo modellerinin uzun zaman yaşlanma davranışını incelemiştir. Parpal ve diğ. [12], XLPE kablonun elektriksel yaşlanması sonrasındaki fiziksel karakteristiği üzerine bir çalışma yapmıştır. David, Parpal ve Crine [12], önceden yaşlandırılmış XLPE kablo örneklerinin elektrik ve mekanik gerilim altındaki yaşlanmasını incelemiştir. Fournier ve Robertson [13] XLPE numunenin elektriki yaşlanmasını; yaşlanmamış, laboratuvar ortamında yaşlandırılmış ve işletme koşullarında yaşlanmış numunelerin morfolojilerini elektron mikroskobu kullanarak, elde ettikleri detaylı fotoğraflar yardımıyla karşılaştırmalı olarak inceleyerek gözlemiştir. Yamada ve diğ. [14] yüksek ısıya dayanıklı XLPE yalıtkan malzemesi geliştirdiklerini, bu yeni malzemenin 105 °C deki ısıya bağlı biçim değiştirmesinin 90 °C deki bilindik XLPE`den az olduğunu ifade etmiştir.

Diğer yandan, güç sistemlerinde oluşan harmoniklerin kablo yalıtkanını nasıl etkilediği yanıtlanması gereken bir sorudur. Evlerde ve iş yerlerinde flüoresan lamba, dimer ve bilgisayarlara ilaveten özellikle yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle çalışma karakteristikleri doğrusal olmayan doğrultucu, evirici, kıyıcı, anahtarlamalı güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, akü şarj cihazları vb. güç elektroniği cihazları yoğunlukla kullanılmaktadır. Ayrıca ağır sanayide, özellikle demir çelik endüstrisinde kullanılan endüksiyon ve ark fırınları buna ilaveten şebekenin bünyesine dâhil olan aşırı uyarılmış transformatörler, senkron jeneratörler, meydana gelen açma kapama olayları ve yıldırım düşmesi olayları yüzünden her türlü elektrik sisteminde reaktif güç artışına, güç kayıplarına ve bazen de tehlikeli rezonanslara sebep olabilen harmonikler görülmekte ve buna bağlı olarak iletilen elektrik enerjinin

kalitesi düşmektedir [15,16]. Bu yüzden yeraltı güç kabloları, elektrik enerjisinin üretilmesinde, iletilmesinde ve dönüştürülerek kullanılmasında kullanılan diğer bütün transformatörler, döner makineler, jeneratörler, kondansatörler, iletkenler, anahtarlama elemanları, sigortalar, koruma röleleri, ölçme aygıtları, kontrol aygıtları, iletişim hatları, aydınlatma aygıtları gibi kalitesiz bir enerjiyle çalışmak durumunda yani kalitesiz enerji iletmek durumunda kalmaktadır. Kalitesiz enerjinin bütün bu teçhizata olumsuz etkileri olduğu gibi yeraltı güç kablolarına da olumsuz etkileri olmaktadır. Kalitesiz enerjiden kasıt yeraltı güç kablolarıyla iletilen enerjinin harmonikli bir yapıda olmasıdır.

Tüketicileri ve güç sistemindeki diğer alıcıları olumsuz etkileyen harmonik bozulumu önlemeyi ve azaltmayı amaçlayan IEEE 519–1992 ve IEC 61000–3–2/IEC 61000–3–4 gibi harmonik akım ve gerilimlerini düzenleyen bazı uluslararası standartlar mevcuttur [16].

Bu standartlardan IEEE 519–1992 standardında toplam harmonik bozulumu enerji üreticisiyle, enerji tüketicisi arasındaki genel bağlantı noktasına göre belirlenmektedir [16]. Bu tez çalışması esnasında yapılan ölçümden alınan değerler de bu standarda göre değerlendirilmiştir.

Şebekede temel sinüs dalgasının dışında harmonik akımların akması, kablodan akan akımı saf sinüs akımının üzerine çıkarmakta ve kabloda ek Joule kayıplarına, harmonik gerilimler de ek dielektrik kayıplarına sebep olmaktadır. Ayrıca alternatif akımdan kaynaklanan deri ve yaklaşım etkileri nedeniyle de kablonun beklenenin üzerinde ısınmasıyla kablo izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta çalışmak durumunda kalmaktadır. Tüketici bilgisi dışında gelişen bu olaydan dolayı bu pahalı tesis, ömrü azalarak kullanım dışı kalabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için akım taşıma kapasitesinin harmonik etkiler dikkate alınarak azaltılması veya tesisin harmonikli ortam göz önüne alınarak tasarlanması zorunluluğu doğmaktadır.

Fourier, Jean-Baptiste Joseph'in 1822 de yayınladığı "Analitik Isı Teorisi" isimli çalışmasıyla ortaya koyduğu harmonik analiz dünya çapında kabul görmüş ve birçok

uygulama alanı bulmuştur. Yaklaşık son 200 yıldır birçok matematikçi, araştırmacı ve mühendislik kökenli bilim adamı harmonikler üzerine çalışmıştır. Bu alanda ki en son çalışma, harmonik analize ve düzgün dinamik sistem teorisine çok derin ve yeni ufuklar açan katkılarından dolayı kendisine 2006 Abel ödülünü kazandıran çalışmasıyla İsveç Kraliyet Teknoloji Enstitüsü üyelerinden Lennart Carleson`a aittir [17,18,19] .

Literatüre göz atıldığında harmoniklerin fabrika ortamında ve evlerde kullanılan birçok teçhizata olan etkisi hakkında çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, yeraltı güç kablolarının ihmal edildiği görülmektedir. Birkaç çalışmada harmonik etkilerinin bazen kablo ömrü üzerindeki bazen de ampasite üzerindeki etkilerinin gösterildiği, fakat bu ikisinin ilişkilendirilmesinde eksiklik olduğu görülmektedir. Cavallini ve diğ. [9] sinüsoydal olmayan gerilimin XLPE yalıtkan madde yaşlanmasına olan etkisini çeşitli harmonikli ortamlarda deneysel olarak incelemiş ama ampasiteyle ilişkilendirmemiştir. Parise ve diğ. [20], çalışmalarında kablo ömür kaybını klasik aşırı yüklenme durumunda incelemiş ancak bunu ne harmonikli ortamla ne de ampasiteyle ilişkilendirmiştir. Meliopoulos ve Martin [15] harmonik kayıpları ve ampasite azalma faktörüne ilişkin bir örnek de vererek basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi sunmuş fakat kablo ömrüyle bu durumu ilişkilendirmemiştir. Palmer, Degenef, McKernan ve Halleran [21] boru tipi kablo kayıplarına harmoniklerin etkilerini HPFF boru tipi iletim kablosu için teorik olarak incelemiş ama temel aldıkları kablonun ömrüyle ilişkilendirmemiştir. Hiranrandani [22] harmonik içeren bir ortamda, orta veya yüksek gerilimde değil, 600 V`luk bir sistemle örneklendirerek, ampasite azalma faktörünün hesaplanışını göstermiş, ancak kablo ömrüyle ilişkilendirmemiştir.

Bu tez çalışması yeraltı güç kabloları kullanılarak tesis edilmiş bir OG sisteminde oluşan harmoniklerin sürekli tam yük durumunda kablo ampasitesine ve ömrüne nasıl etki ettiğini ve ömür kaybını azaltmak için önerilen önlemleri incelemektedir. Bu amaç için IEC 60287 standardına ve Arrhenius ömür modeline göre harmoniklerin iletken sıcaklığını ne kadar arttırdığı, bu artışın kablo ömrünü ne kadar etkilediği ve bunu önlemek için kablo ampasitesinin ne kadar azaltılması veya kablonun nasıl tesis edilmesi gerektiği konuları değerlendirilmektedir. Harmonik

kaynaklarının çeşitliliği ve harmonik karakteristiklerinin çok değişken olması dolayısıyla harmoniklerin XLPE yalıtkanlı yeraltı güç kablolarına olan etkilerini tam yük sürekli durumda her bir harmonik için tek tek inceleyerek ortaya koymak çok zor olacağından, her %THB için ortaya koyulması daha uygun görülmüştür. Yapılan harmonik ölçüm temelinde MATLAB/SIMULINK ortamında harmonik etkileri ölçüm yapılan sistemdekiyle aynı kablo kullanılarak harmonik etki modeline uygulanmış ve bilgisayar analiz sonuçları ve eğrileri elde edilmiştir.

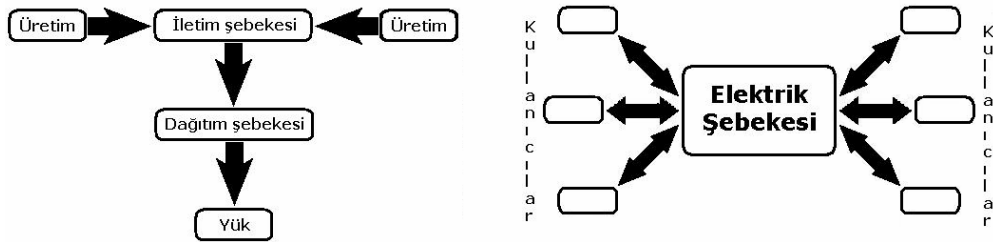
## BÖLÜM 2. ENERJİ KALİTESİ ve GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

### 2.1 Giriş

Uzun yıllardan beri elektrik şebekesi; enerjinin üretilip, iletim hatlarıyla iletiildiği ve dağıtım hatlarıyla da alıcılara aktarıldığı bir yapı olarak değerlendirilmekteydi. Önceleri önemli olan, enerjinin kullanıcıya nasıl ulaştırılacağı iken, teknolojinin gelişmesiyle, dikkatler farklı noktalarda toplanmaya başlamıştır [23].

Elektronik sistemlerdeki enerji akışının denetlenmesi için kullanılan yarı iletkenler geçtiğimiz yirmibeş yıl içinde büyük gelişme kaydetmiştir. Tümlşik devre teknolojisinin yarı iletkenlere uygulanabilmesiyle güç sistemlerinin korunmasında, sürülmesinde ve denetlenmesinde çok olumlu ilerleme görülmüştür. Bunun sonucu olarak da yarı iletkenlerin sanayide oldukça büyük bir kullanım alanı bulmuş, doğrusal olmayan bu sistemlerin kullanımı artmış ve şebekenin aktardığı enerjinin kalitesi bundan etkilenmeye ve en uygun maliyet, şebekenin güvenilirliği derken, güç kalitesi de önem kazanmaya başlamıştır [24].

Buna paralel olarak kullanıcıların şebekeye olan bakış açıları değişmiş; şebeke, üreticilerce sisteme doğrudan enerji aktarımının yapılabildiği, birçok kullanıcının ve hatta şebekenin bütün sisteme olumsuz etkilerinin olduğu kirli bir havuz olarak görülmeye başlamıştır. Eski ve yeni bakış açıları Şekil (2.1)'de verilmektedir [23].



Şekil 2.2: Sırasıyla eski ve yeni şebeke modelleri [23]

Bu durumda araştırmalar şebekeyi kirletenin ne olduğu, bu kirliliğin zararları ve bu zararlardan nasıl korunulabileceği noktalarında yoğunlaşmıştır. Bu araştırmaların sonucunda yapılan çeşitli tanımlamalarla “güç kalitesi” terimi üretilmiştir. Frekansın, dalga şeklinin, gerilim olaylarının ve bunların, kullanılan malzemelere ve cihazlara olan etkilerinin neler olduğunun ortaya çıkarılması amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır [23].

şebekenin alçak gerilim tarafında daha fazla harmonik üreten kaynağın çalışıyor olması araştırmacıların kafasında orta gerilim tarafında zararlı harmoniklerin dolaşmayacağı gibi, ayrıca eskiden beri orta gerilim sistemlerinin havai hatlarla tesis edilmesinden ısınma problemlerinin bu tesislerde olmayacağı gibi yanlış bir takım ön yargılar oluşturmuştur. Bununla birlikte şebekenin OG kısmının işletmecilerce umursanmaması ve bu yüzden araştırma geliştiriminin az olması dolayısıyla harmonik etkileri incelenirken yeraltı güç kabloları ihmal edilmiştir. Günümüzde harmonik kaynaklarının ve zararlarının belirlenmesi ve harmoniklerin yeraltı güç sistemlerinde de bertaraf edilmesi gerekliliğiyle karşılaşılmıştır.

## **2.2 Güç Kalitesiyle İlgili Tanımlar**

Güç kalitesi; gerilim ve akım dalga şeklinin sabit genlik ve frekanstaki sinüs dalgasından ne kadar saptığıyla alakalıdır. Akım ve gerilim kalitesi terimlerinin birleşimiyle oluşmuştur [23].

Gerilim kalitesi; gerilim dalga şeklinin sabit genlik ve frekanstaki sinüs dalga şeklinden ne kadar az saptığını ifade eder. Gerilim dalga şekli sinüs şekline ne kadar yakınsa gerilim o kadar kalitelidir denir.

Akım kalitesi; akım dalga şeklinin sabit genlik ve frekanstaki sinüs dalga şeklinden ne kadar az saptığını ifade eder. Akım dalga şekli sinüs şekline ne kadar yakınsa akım o kadar kalitelidir denir.

### **2.2.1 Güç kalitesini olumsuz etkileyen durumlar**

Güç kalitesi, genel olarak değişim ve olay olarak adlandırabileceğimiz, ölçülen akım veya gerilimin karakteristiğine göre iki şekilde bozulur. Bozucu bir etki olarak akım ve gerilim değişimleri; çalışma zamanının herhangi bir anında akım veya gerilim dalga şeklinin, etkin değerinin, frekansının normalinden sapması veya akım veya gerilimin harmonik bozulumu olarak tanımlanabilir. Akım ve gerilim olayları bozucu etki olarak bir eşik değerinin aşılmasıyla başlayıp biten, çalışma zamanının bir süresi boyunca arada sırada meydana gelen gerilim kesilmeleri veya yük anahtarlama akımlarının ortaya çıkması gibi büyük değişimlerdir [23].

### **2.2.2 Olay ve değişimin ayırt edilmesi**

Bu iki durum arasındaki fark her zaman çok bariz değildir ve ölçüm metoduyla ilişkilidir. Ancak bu durum aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir.

Değişimler, çalışma zamanının herhangi bir anında ölçülebilir ama buna karşın olayların ölçülmesi için belli bir akım ve gerilim karakteristiğinin, önceden belirlenmiş bir eşik değerine göre elde edilmesinin beklenmesi gereklidir. Eşik değerleri her zaman biraz keyfi olarak belirlenmektedir ve bu yüzden değişimler ve olaylar arasına hiçbir zaman kesin bir sınır koyulamamaktadır. Bununla beraber bu ikisi arasındaki ayırımın kullanışlı olmasına, hemen hemen bütün güç kalitesi çalışmalarında yapılmakta olmasına rağmen terminolojide bir tutarlılık görülmemektedir [23].

Güç kalitesi bozukluğu hem kullanıcılar hem de şebeke operatörleri tarafından sadece bir probleme neden olduğunda sorun olarak görülmektedir. Gerilim çökmeleri ve harmonikler, birçok kişi tarafından güç kalitesi için bir sorun olarak görülürken, gerilim ve frekans oynamaları yıllar önce şebeke tasarlanırken bilindiği için güç kalitesi sorunu olarak görülmemektedir [23].



### 2.2.3 Güç kalitesi bozulmaları

Güç kalitesi bir nedenden değil birden fazla nedenden bozulmaktadır. Bunlar [25]; Kesinti; şebeke arızaları nedeniyle en az bir yarım dalga boyu süresince gerilimin sıfır değerini almasıdır.

Gerilim darbesi; yük ve şebeke açma kapamaları, kontaklar arasındaki ark ve yıldırım nedeniyle 50 V ile 5 KV genlikli, 0.5 ile 2 ms süreli olan gerilim yükselmesidir.

Çentik; doğrultucuları besleyen trafo ve hat endüktansının anahtarların aktarımını geciktirmesi nedeniyle şebeke geriliminin bir tam dalgasında doğrultucu darbe sayısı kadar tekrarlanan çökmelerdir.

Frekans değişimi; elektrik şebekesi ve jeneratörlerin ayar düzeneklerinin yetersizliği nedeniyle frekansın anma değerinden sapmasıdır.

Gerilim yükselmesi; yük azalması ve şebekedeki ayar zayıflığı nedeniyle gerilimin bir tam dalgadan daha uzun bir süre %110'dan daha büyük bir değere çıkmasıdır.

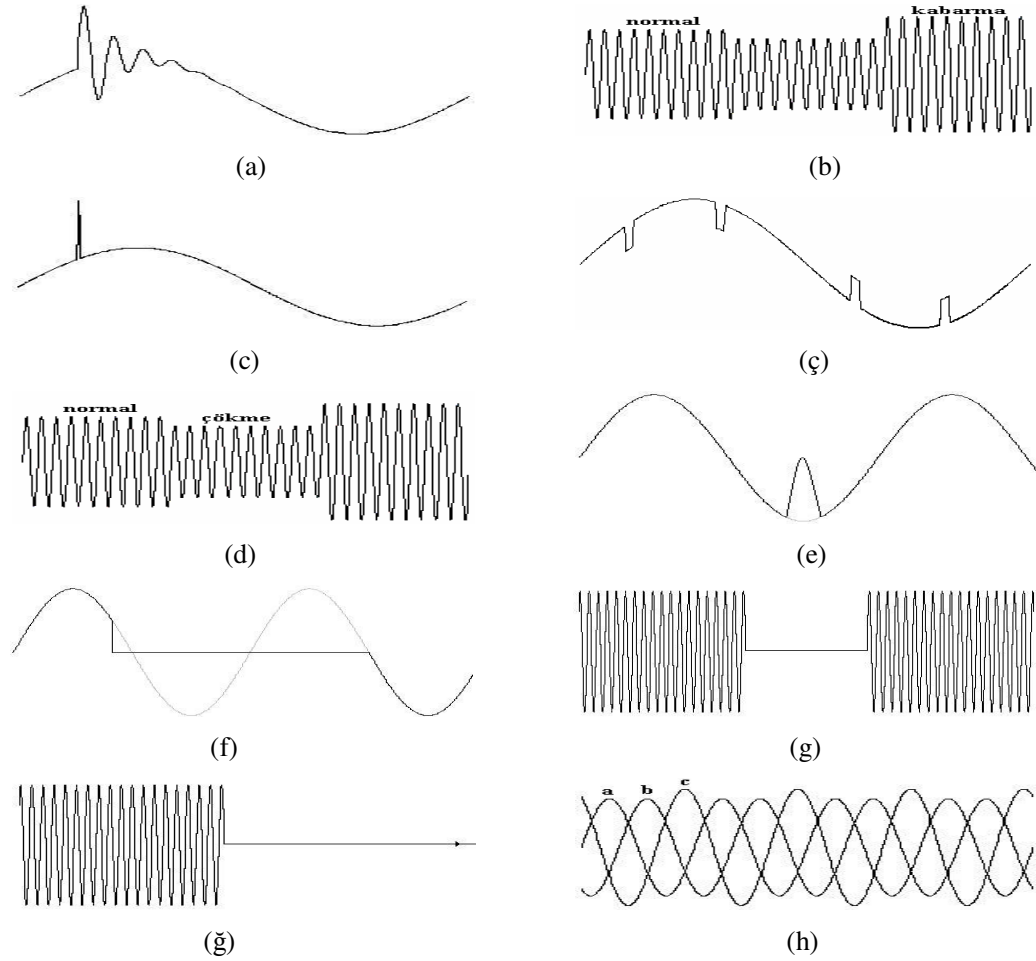
Gerilim düşmesi; şebeke yetersizliği, aşırı yüklenme, büyük motorların yol alması ve kısa devreler nedeniyle gerilimin bir tam dalgadan daha uzun bir süre %80'den daha küçük bir değere düşmesidir.

Gerilim dalgalanması; ark fırını gibi dalgalı aşırı yükler nedeniyle gerilimin periyodik olarak 6–7 tam dalga süresince (8–9 Hz) azalması ve yükselmesidir.

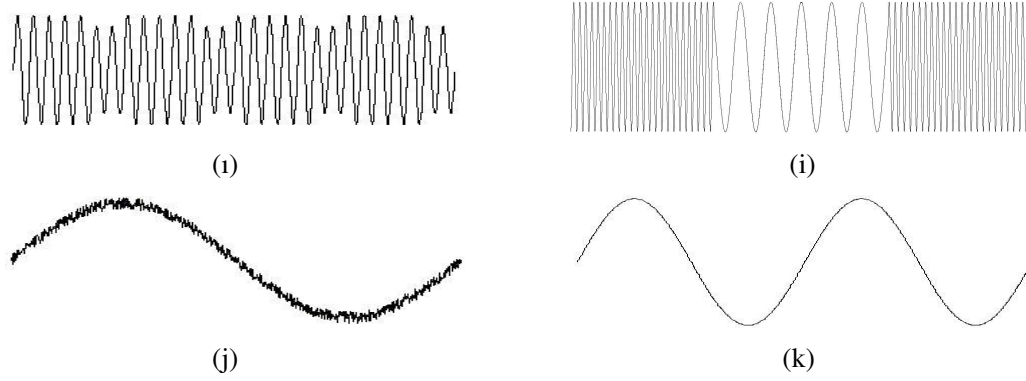
Gürültü (elektromanyetik girişim); anahtarlama güç kaynakları, motor kontrol devreleri, telsiz yayınları ve güç hatları üzerinden yapılan haberleşme nedeniyle genliği 100  $\mu$ V ile 100 V, frekansı 10 KHz ile 1 GHz aralığında olan küçük enerjili bozucu dalgadır.

Doğru gerilim bileşeni; alternatif gerilimin, pozitif yarım dalga ve negatif yarım dalga alanlarının birbirine eşit olmamasıdır.

Harmonik; güç elektroniği devreleri, elektromekanik makinalardaki doyma ve ark ilkesiyle çalışan cihazlar nedeniyle gerilim ve akım dalga biçiminin ideal sinüsten uzaklaşmasıdır. Güç kalitesi bozulmaları ve sinüs Şekil (2.2)'de görülmektedir.



Şekil 2.2: Güç kalitesi bozulmaları ve sinüs (a)ani yükselme ve osilasyon (b)Gerilim Kabarması (c)Darbe (ç)Çentik (d)Çökme (e)Çentik (f)Çok kısa süreli güç kesintisi (g)Kısa süreli güç kesintisi (ğ)Güç kesintisi (h)Dengesizlik (ı)Dengesizlik - gerilim dalgalanması (i)Frekans dalgalanması (j)Gürültü (k)Sinüs [26]



Şekil 2.2: Güç kalitesi bozulmaları ve sinüs (a)ani yükselme ve osilasyon (b)Gerilim Kabarması (c)Darbe (ç)Çentik (d)Çökme (e)Çentik (f)Çok kısa süreli güç kesintisi (g)Kısa süreli güç kesintisi (ğ)Güç kesintisi (h)Dengesizlik (ı)Dengesizlik - gerilim dalgalanması (i)Frekans dalgalanması (j)Gürültü (k)Sinüs [26] “(Devam)”

Bahsi geçen hemen hemen bütün bozulmaların ortak noktası, kendisini taşıyan yeraltı güç sistemlerine olumsuz etkilerinin olması ve harmonik bileşenlerine ayrılarak durumlarının tespit edilip etkilerinin belirlenmesi ve çözüm yollarının buna göre araştırılabilmesidir.

#### 2.2.4 Güç sistemlerinde harmonikler

Teoride enerji kaynakları tamamen sinüs, yükler de tamamen doğrusal kabul edilse de gerçek hayatta ne kaynak sinüs, ne de yük doğrusaldır. Yükün çektiği harmonikli akımın şebekede meydana getirdiği harmonikli gerilim düşümünün besleme noktasındaki gerilim dalga şeklini bozması ya da başka bozucu yükün veya şebeke içindeki, trafo doyumu, rüzgâr veya güneş santrali üretim dengesizliği ve benzeri gibi herhangi bir bozucu olayın şebeke gerilimini kirleterek harmonikli hale getirmesiyle kaynak gerilimi saflığını yitirmektedir [25]. Bu durumda bilindik akım gerilim ve güç eşitliklerinin gerçeğe uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Kaynak gerilimi ve akımı sırasıyla eşitlik (2.1) ve (2.2)'deki gibi yazılabilir [25].

$$v_s = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega_1 t) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin n\omega t \quad (2.1)$$

$$i_s = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(\omega_n t - \varphi_n) \quad (2.2)$$

Gerilimin ve akımın etkin değeri sırasıyla (2.3) ve (2.4)'teki gibi hesaplanabilir

$$V_{etkin} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (2.3)$$

$$I_{etkin} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (2.4)$$

Akım ve gerilim eşitlikleri bu şekilde yeniden düzenlendiğinde aktif güç, reaktif güç ve görünür güç kendiliğinden sırasıyla eşitlik (2.5) (2.6) (2.7)'deki gibi yazılabilir.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.5)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.6)$$

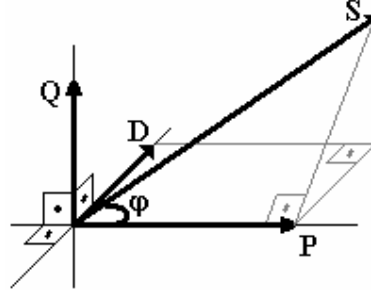
$$S = V_{etkin} I_{etkin} \quad (2.7)$$

Görünür güç harmonikler de hesaba katılarak eşitlik (2.8)'deki gibi yeniden yazılabilir.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.8)$$

Burada  $D$  harmonik gücü olarak ifade edilmektedir.

Bu durumda bilindik güç üçgeni Şekil (2.3)'deki gibi yeniden çizilebilir.



Şekil 2.3: Güç üçgeni

Güç katsayısı da aşağıdaki gibi hesaplanabilir [25]

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.9)$$

#### 2.2.4.1 Güç sistemlerinde üretilen harmonikler

Harmonikler yük tarafında ve şebeke tarafında olmak üzere genel olarak iki kısımda üretilmektedirler. Yük tarafına bakıldığında harmonik kaynağı olarak, elektromekanik cihazlar, periyodik fakat sinüzoidal olmayan akım karakteristikleri yüzünden güç elektroniği devreleri, ne periyodik ne de sinüzoidal olan akım karakteristikleri yüzünden ark ilkesi ile çalışan yükler bulunmakta, şebeke tarafında ise yıldırım, açma kapama olayları, şebeke kararsızlıkları ve salınımları, genellikle doyum problemi yüzünden senkron jeneratör ve transformatörler bulunmaktadır. Bunlar alt başlıklarıyla beraber aşağıdaki gibi sıralanabilir [25];

##### ❖ Harmoniklerin Yük Tarafında Üretilmesi

- Güç elektroniği devreleri
  - bir fazlı doğrultucular
  - üç ve daha çok fazlı doğrultucular
  - alternatif akım kıyıcısı
  - evirici (kaynak olarak)
  - anahtarlamalı güç kaynağı
  - sürücü devreleri
- Ark ilkesiyle çalışan yükler

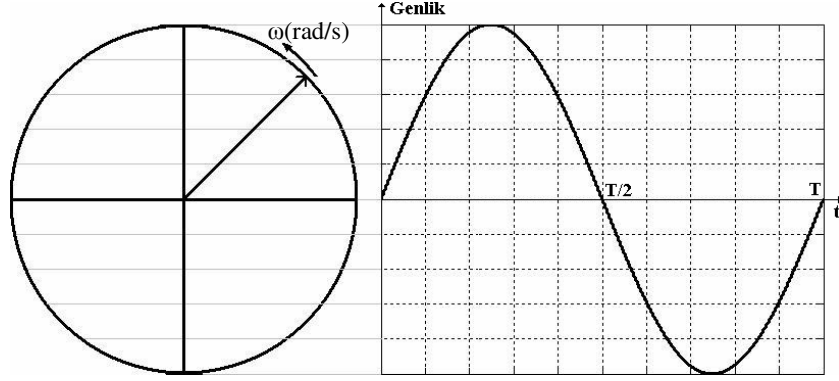
- ark fırınları
- fülöran ve diğer deşarj armatürleri
- Elektromekanik cihazlar
- transformatör
- asenkron ve senkron motorlar
- ❖ Harmoniklerin Şebeke Tarafında Üretilmesi
- Senkron jeneratör ve transformatör
- Yıldırım
- Açma kapama olayları
- Şebeke Kararsızlıkları ve Salınımları

Harmonik kaynaklarını sınıflandırmada bir başka yaklaşım da bunları, bilinen ve kurulu harmonik kaynaklar ve yeni ve potansiyel harmonik kaynaklar olarak sınıflandırmaktır. Birinci gruba transformatör ve asenkron motor gibi çok sık kullanılan elektrik makinaları, ark fırınları ve artık hemen hemen her üretim tesisinde kullanılmaya başlanmış olan doğrultucular, eviriciler, gerilim denetleyicileri, frekans dönüştürücüler, kesintisiz güç sistemleri gibi güç elektroniği devreleri girmektedir; ikinci gruba yeni nesil enerji dönüşüm aygıtları, ulusal şebekeye bağlı alternatif enerji sistemleri, yeni nesil enerji depolama sistemleri vb. girmektedir [27].

Yukarıda sınıflandırılan harmonik kaynaklardan doğan harmonikler Fourier analizi ile bileşenlerine ayrılarak etkileri incelenmektedir.

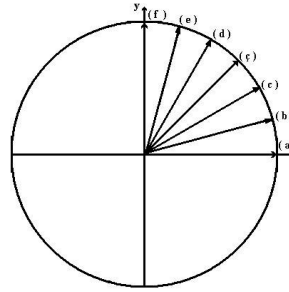
### 2.3 Harmonik Analiz

İleri geri salınım yapan sarkacın hızı veya bir telin titreşimi gibi birçok doğal olguda kendini gösteren sinüs fonksiyonunun elektrik dünyasında öneminin artması, 1800'lerin başında üretilmesinin kolay olması ve transformatör kullanılarak genliğinin kolay değiştirilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı dalgalı akımın doğru akıma tercih edilmesiyle başlamıştır. Şekil (2.4)`te saatin ters yönünde sabit  $\omega$  (rad/s) açısal hızıyla dönen bir fazör, bu fazörün hareketi ve sinüs dalgası görölmektedir. Bu fazörün yatay eksen üzerindeki iz düşümü sinüs fonksiyonudur. Fazörün uzunluğu yani genliği sinüs fonksiyonunun genliğine eşittir [28].



Şekil 2.4: Sinüs dalgası ve sinüsü dalgasını oluşturan fazör hareketi

Gerilimin neden sinüs olduğu Şekil (2.5) deki fazör diyagramına bakılarak anlaşılabilir. Fazör bir daire etrafında dönerken y eksenindeki fazörün aldığı değerlerin bazıları Tablo (2.1) de görülmektedir [29].



Şekil 2.5: Sinüs dalgasını oluşturan fazörlerin 15 dereceyle çizilmesi [29]

Tablo 2.1: Bir daire etrafında dönerken y eksenindeki fazörün durumu

Durum	Faz Açısı (Derece)	Düşey eksenindeki değer
a	0	0
b	15	0.259
c	30	0.5
ç	45	0.707
d	60	0.866
e	75	0.966
f	90	1

Açısal dönme zamana göre artan adımlarla orantılıdır. Pozisyon adımlarına karşılık gelen y eksen değerlerinin tam 360 derece boyunca çizilmesi Şekil (2.4) de görülen sinüs dalgasına yaklaşık bir sonuç vermektedir [29].

### 2.3.1 Fourier analizi

Periyodik bir fonksiyon; temel frekansının tam katlarında ve farklı genliklerde sinüs ve kosinüs fonksiyonlarından oluşmuş trigonometrik bir seri olarak ifade edilebilmektedir. Bu serinin farklı frekans ve genlikteki sinüs ve kosinüs bileşenlerine “harmonik” adı verilmektedir. Periyodik bir dalga şeklinin harmonikleri Fourier analizi ile elde edilen bir Fourier serisi ile açıklanabilir.

Sürekli haldeki gerilim, zamanın periyodik bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [25].

$$V(t) = V_0(t + T) \quad (2.10)$$

Açısal frekans ise,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2.11)$$

Burada  $T$  devir olup,  $f$  çıkış geriliminin frekansıdır ve gerilim açısal frekansa bağlı olarak;

$$V(\omega t) = V(\omega t + 2\pi) \quad (2.12)$$

şeklinde belirlenir. Sinüzoidal olmayan dalgalar karışık dalgalar olarak tanımlanır ve matematiksel olarak;

$$V(t) = V_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + V_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$V(t)$ : Herhangi bir  $t$  anındaki gerilim değeri,

$V_1$  : Ana bileşenin en yüksek değeri,

$V_2$  : İkinci harmonik bileşenin en yüksek değeri,



$V_3$  : Üçüncü harmonik bileşeninin en yüksek değeri,

$V_n$  : n. Harmonik bileşeninin en yüksek değeri,

$\varphi_1$  : Temel dalğanın faz açısı,

$\varphi_2, \varphi_3... \varphi_n$  : Harmoniklerin faz açıları

olarak tanımlanmaktadır. (2.13) ifadesi, (2.14) trigonometrik eşitliği kullanılarak (2.15)'deki biçime dönüştürülebilir [30].

$$\sin(a + b) = \sin a \cdot \cos b + \cos a \cdot \sin b \quad (2.14)$$

$$V(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t \\ + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15) Fourier serisi olarak bilinir ve Fourier teoreminden hareketle  $V(t)$  periyodik fonksiyonu;  $n$  pozitif bir tam sayı olmak üzere frekansları  $n\omega$  olan sinüs ve kosinüslü terimlerden oluşan sonsuz bir seriye açılabilir. Bundan dolayı  $V(t)$  şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_0(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.16)$$

$a_0$  katsayısı, (2.16) fonksiyonun her iki tarafının integralinin aşağıdaki gibi alınması sonucunda;

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) d(\omega t) \quad (2.17)$$

olarak elde edilir.  $a_n$  katsayısı (2.16) fonksiyonun her iki tarafının  $\cos(n\omega t)$  ile çarpılıp aşağıdaki gibi integralinin alınması sonucunda, ortogonallık durumu da göz önüne alınarak;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T V(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (2.18)$$

şeklinde belirlenmektedir.  $b_n$  katsayısı ise yine (2.16) fonksiyonun her iki tarafının  $\sin(n\omega t)$  ile çarpılıp aşağıdaki gibi integralinin alınması sonucunda, ortogonallık durumu da göz önüne alınarak;

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T V(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (2.19)$$

şeklinde bulunmaktadır. Elde edilen  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  katsayılarına Fourier katsayıları adı verilmektedir. Eşitlik (2.20), (2.21) ve (2.22) de  $n$ . harmonik vektörünü ifade eden kutupsal ve karmaşık eşdeğeri ve faz açısı görülmektedir [31].

$$\underline{A}_n = a_n + j b_n \quad (2.20)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.21)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n} \quad (2.22)$$

Birbirinden bağımsız büyüklükler olan  $\omega t$  ler yerine  $x$  koyularak

$$a_n \cos nx + b_n \sin nx = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \sin \left( nx + \arctan \frac{a_n}{b_n} \right) = A_n \sin(nx + \Phi_n) \quad (2.23)$$

elde edilir.  $x$  ile  $\omega t$ 'yi tekrar değiştirerek ve trigonometrik dönüşümü yerine koyarak;

$$V(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (2.24)$$

bulunur ki, burada toplam sembolü açılarak;

$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + V_2 \sin(2\omega t + \Phi_2) + \dots + V_n \sin(n\omega t + \Phi_n) \quad (2.25)$$

elde edilir.

Burada ;

$V(t)$  : Herhangi bir t anındaki çıkış geriliminin ani değeri,

$V_0$  : Doğru bileşenin değeri,

$V_1$  : Temel bileşenin en yüksek değeri,

$V_2$  : İkinci harmonik bileşenin en yüksek değeri,

$V_3$  : Üçüncü harmonik bileşenin en yüksek değeri,

$\phi$  : Gerilim ile akım bileşenleri arasındaki faz farklarıdır.

### 2.3.2 Dalga simetrisi

Tek simetri, çift simetri ve yarı dalga simetrisi tanımları, periyodik bazı dalga şekillerinin sinüs ve kosinüs terimlerinin her ikisini ya da her iki terimin tek harmoniklerini içeriyor olmaları bakımından önem arz etmektedir. Bu tanımları bilmek Fourier serilerinin hesaplanmasında kolaylık sağlar

### 2.3.3 Simetri kaynaklı sadeleştirmeler

Eşitlik (2.17), (2.18), (2.19) iki ayrı integral toplam olarak gösterilebilir

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 V(t) \cos n\omega t dt + \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V(t) \cos n\omega t dt \quad (2.26)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 V(t) \sin n\omega t dt + \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V(t) \sin n\omega t dt \quad (2.27)$$

$[-T/2, 0]$  aralığında  $t$ 'yi  $-t$  ile değiştirerek;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 V(-t) \cos(-n\omega t) d(-t) + \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V(t) \cos n\omega t dt \quad (2.28)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} [V(t) + V(-t)] \cos n\omega t dt \quad (2.29)$$

ve

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^0 V(-t) \sin(-n\omega t) d(-t) + \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V(t) \sin n\omega t dt \quad (2.30)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} [V(t) - V(-t)] \sin n\omega t dt \quad (2.31)$$

elde edilir.

#### 2.3.4 Tek simetri

Verilen fonksiyon,

$$V(t) = -V(-t) \quad (2.32)$$

koşulunu sağlıyorsa tek fonksiyondur. Bu durumda Fourier katsayılarını eşitlik (2.32)'yi, eşitlik (2.29) ve eşitlik (2.30)'da uygulayarak;

$$a_n = 0 \quad (2.33)$$

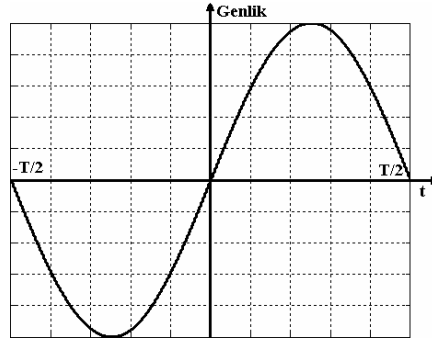
$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} V(t) \sin n\omega t dt \quad (2.34)$$

elde edilebilmektedir.

$a_n$  katsayısının 0 (sıfır) olduğu durum eşitlik (2.16)'da incelendiğinde serinin aşağıdaki gibi sadece sinüs terimlerinden oluştuğu görülmektedir.

$$V(t) = \frac{a_0}{2} + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (2.35)$$

Şekil (2.6)'da bu özelliklere haiz bir dalga şekli görülmektedir.



Şekil 2.6: Tek simetri özelliğine haiz bir dalga şekli

### 2.3.5 Çift simetri

Verilen fonksiyon,

$$V(t) = V(-t) \quad (2.36)$$

koşulunu sağlıyorsa çift fonksiyondur. Bu durumda Fourier katsayılarını (2.36)'yı, (2.29) ve (2.30)'da uygulayarak;

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} V(t) \cos n\omega t dt \quad (2.37)$$

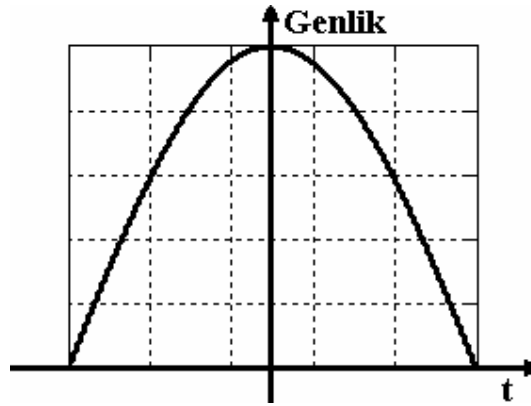
$$b_n = 0 \quad (2.38)$$

elde edilebilmektedir.

$b_n$  katsayısının 0 (sıfır) olduğu durum eşitlik (2.16) da incelendiğinde serinin eşitlik (2.39) daki gibi sadece kosinüs terimlerinden oluştuğu görülmektedir.

$$V(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + \dots \quad (2.39)$$

Şekil (2.7) de bu özelliklere haiz bir dalga şekli görülmektedir.



Şekil 2.7: Çift simetri özelliğine haiz bir dalga şekli

### 2.3.6 Yarı dalga simetrisi

Verilen fonksiyon,

$$V(t) = -V\left(t + \frac{T}{2}\right) \quad (2.40)$$

koşulunu sağlıyorsa yarı dalga simetrisi olan bir fonksiyondur. Eşitlik (2.18)'i kullanarak, integrali dağıtıp  $[-T/2, 0]$  aralığında  $t$ 'yi  $t+T/2$  ile değiştirerek Fourier katsayıları,

n tek ise;

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} V(t) \cos n\omega t dt \quad (2.41)$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} V(t) \sin n\omega t dt \quad (2.42)$$

n çift ise;

$$a_n = 0 \quad (2.43)$$

$$b_n = 0 \quad (2.44)$$

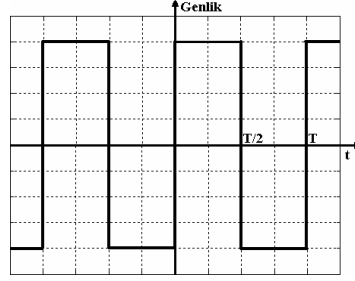
olarak bulunur yani seri de çift harmonikler bulunmaz. Bu koşullara göre  $b_n$  katsayısı eşitlik (2.45)'deki gibi verilmektedir.

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} V(t) \sin n\omega t dt \quad (2.45)$$

$a_n$  ve  $b_n$  katsayısının eşitlik (2.41) ve (2.42)'de aldığı durum eşitlik (2.16)'da incelendiğinde serinin eşitlik (2.46)'daki gibi sadece kosinüs terimlerinden oluştuğu görülmektedir.

$$V(t) = b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3 \omega t + \dots + a_1 \cos \omega t + a_3 \cos 3 \omega t + \dots \quad (2.46)$$

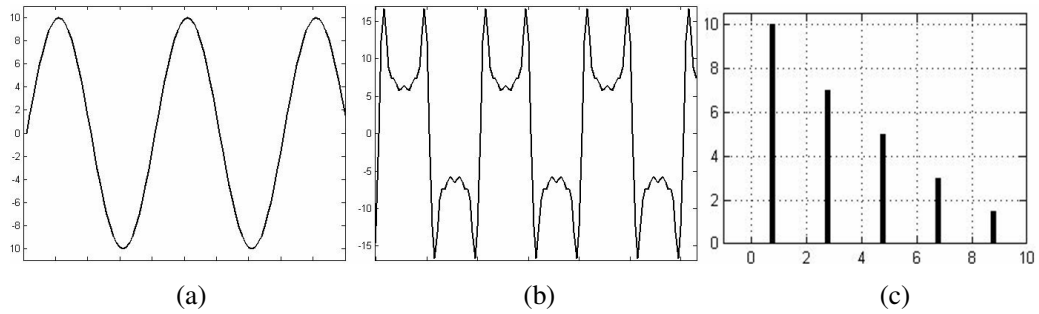
Şekil (2.8)'de bu özelliklere haiz bir dalga şekli görülmektedir [25].



Şekil 2.8: Yarı dalga simetrisi özelliğine haiz bir dalga şekli

### 2.3.7 Çizgi spektrumu

Fourier analizini yaptığımız dalga şekline ait her bir harmoniğin genliğini gösteren çizime çizgi spektrumu adı verilmektedir [28]. Bu çizimde yatayda harmonik sıraları, düşeyde harmoniklerin genlikleri gösterilir. Şekil (2.15) 'te üzerine 3. 5. 7. 9. harmoniklerin bindirildiği sinüs ve yeni periyodik dalga ve bu yeni dalganın çizgi spektrumu görülmektedir. Çizgi spektrumunda sinüsün üzerine bindirilmiş 3. 5. ve 7. harmonikler bar grafik olarak görülmektedir. Temel yani 1. harmonik çizgi spektrumunda görülmemektedir. Harmonik filtrelenirken ya da ölçümleri yapılırken bu çizim şekli çok kullanışlı olmaktadır.



Şekil 2.9: a) Sinüs dalgası b) 3.5.7.9. harmoniklerin bindirildiği sinüs c) 3.5.7.9. harmoniğin bindirildiği sinüsün spektrumu

Kaynakları ve nedenleri çok fazla olan harmonikleri, Fourier analizi ile bileşenlerine ayırarak incelemede, etkilerini belirlemede ve bunları bertaraf etmede somut olarak tanımlanmış harmonik ölçütleri gerekli olmaktadır.



Tek tek harmonik bozulumu her bir akım harmoniği için ayrı ayrı hesaplanabilmekte ve eşitlik (2.47)`deki gibi harmonik akımının etkin akıma oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$HD_I = \frac{I_n}{I_{etkin}} \quad (2.47)$$

Benzer olarak her bir gerilim harmoniği için eşitlik (2.48)`deki gibi yazılabilir.

$$HD_V = \frac{V_n}{V_{etkin}} \quad (2.48)$$

Bozulma katsayısı 1. harmoniğin etkin değerinin, toplam akımın etkin değerine oranı olarak aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$DF = \frac{I_1}{I_{etkin}} \quad (2.49)$$

Gerilimdeki THB (Toplam Harmonik Bozulması) eşitlik (2.50)`de, akımdaki THB de eşitlik (2.51)`deki gibi tanımlanmaktadır.

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.50)$$

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.51)$$

Toplam talep bozulması harmonik akımların karelerinin toplamının karekökünün yük akımına oranı olarak eşitlik (2.52)`deki gibi verilmektedir.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.52)$$

## 2.4 Harmoniklerin Zararları

Harmoniklerin transformatör, döner makinalar, kondansatörler, anahtarlama elemanları, sigortalar, koruma röleleri, ölçme aygıtları, kontrol aygıtları, iletişim hatları, iletim sistemleri, iletkenler, aydınlatma aygıtları ve gerilim düşümü üzerinde olumsuz etkileri vardır.

### 2.4.1 Metal çekirdekli elektrik makinaları üzerindeki zararları

Metal bir çekirdeği bulunan elektrik makinalarının tümü harmonik frekanslarındaki demir ve bakır kayıpları nedeniyle ısınmakta, verimleri ve kullanım süreleri düşmektedir. Döner bir elektrik makinasının endüktif reaktansı harmonik derecelerine bağlı olarak artış göstermektedir. Bu ise makinada harmonik frekanslarında gerilimler indükleyip aynı frekansta akımlar akmasına neden olmakta ve makinanın faydalı akısını olumsuz etkilemek suretiyle momentinde veya ürettiği gerilimde bozulmalar meydana getirmektedir.

### 2.4.2 Kondansatör üzerindeki zararları

Harmonik akım ve gerilimlerin endüktif reaktansa olduğu gibi kapasitif reaktansa da etkisi vardır. Bir kondansatörün kapasitif reaktansı harmonik derecesine bağlı olarak azalma göstermektedir. Bu durumda harmonik frekanslarında yüksek akımlar akmasına, rezonans durumunda ise çok yüksek akımların akmasına neden olmaktadır. Bu akımların sürekliliği dielektriği yaşlandırmakta ve kondansatörün delinmesini kolaylaştırmaktadır.

### **2.4.3 Devre kesicileri ve sigortalar üzerindeki zararları**

Harmoniklerden etkilenen bir diğer eleman devre kesicileridir. Yük akımı harmonik bileşenler içeriyorsa, sinüs dalgası için sıfır geçiş noktasında  $di/dt$  oranı yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu da bir kesicinin devreyi açmasını zorlaştırmaktadır. Aynı durum yarı iletken anahtarlar için de söz konusu olmaktadır. Yüksek  $di/dt$  oranının yanında akımı ısı yoluyla ve manyetik olarak hisseden kesiciler harmoniklerin getirdikleri ilave manyetik ve ısı etkisinden de olumsuz etkilenmektedirler. Sıcaklığa duyarlı olan sigortalarda benzer şekilde harmoniklerden olumsuz etkilenmektedir [32].

### **2.4.4 Koruma röleleri üzerindeki zararları**

Bazı koruma rölelerinin çalışmaları akım veya gerilim eğrisinin önceden belirlenmiş bir noktasına bağlı olmaktadır. Harmoniklerin sinüsün şeklini bozmasından dolayı bu önceden tespit edilmiş noktanın kayması veya çok hızlı değişmesi rölenin çalışma karakteristiğini olumsuz etkilemektedir. Bu da yanlış açmalara neden olmaktadır [32].

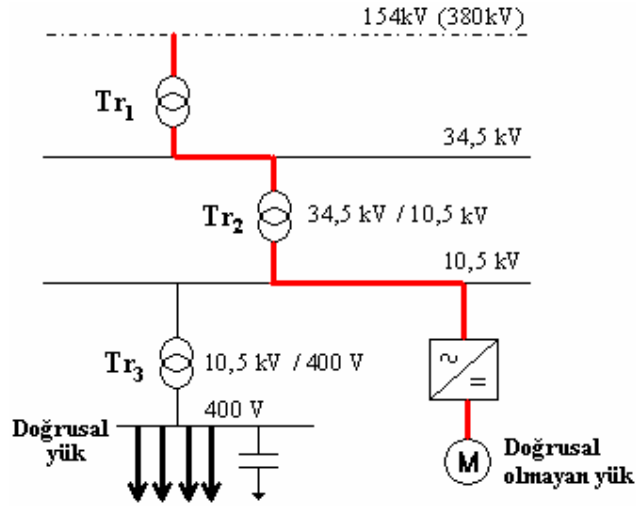
### **2.4.5 Ölçü aletleri üzerindeki zararları**

Endüksiyon prensibine göre çalışan ölçü aletleri, metal çekirdeği bulunan elektrik makinalarının etkilendiği şekilde harmoniklerden etkilenmekte ve sadece sinüs ölçmek için tasarlandıkları için hatalı ölçüm yapmaktadırlar. Harmonikli bir ortamda ölçme yapılacağı zaman dijital olarak ölçüm yapan cihazlar diğerlerine nazaran tavsiye edilmektedir.

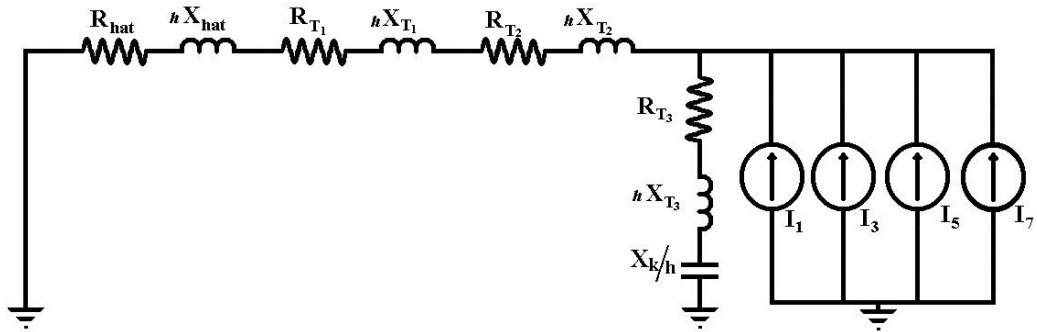
## **2.5 Harmonik Modelleme**

Bir sistemin harmonik modelinin çıkarılması amacıyla ilk önce, harmonik modeli çıkarılacak sistemin çok çok yüksek frekanslı akım veya gerilim bileşeni yoksa kapasiteler ihmal edilerek en basit tek hat eş değeri çıkarılmaktadır. Her bir harmonik kaynağı ürettiği harmonik derecesi kadar akım kaynağıyla ifade edilmektedir. Bu

kaynakların her biri bir harmonik bileşenini göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta endüktansların harmonik frekansıyla çarpılmasının unutulmamasıdır. Örnek olarak Şekil (2.10)`da bir OG tesisinin, motor kontrol birimi ve buna paralel bağlı alçak gerilim yüklerinden ibaret olduğu ve motoru besleyen harmonikli akımın şebekeden kalın yol üzerinden gelmekte ve yol üzerindeki trafo ve iletim hattında harmonikli gerilim düşümleri meydana getirerek, 10.5 KV`luk barayı kirletmekte olduğu gösterilmekte ve buna ilaveten doğrultucu akımına harmonik analizi uygulanıp  $I_{3, 15}$  ve  $I_7$  harmoniklerinin bulunduğu tespit edildiği düşünülmektedir. Buradan hareketle şekil (2.11)`deki harmonik modeli çizilmiştir. [25].



Şekil 2.10: Bir OG tesisi

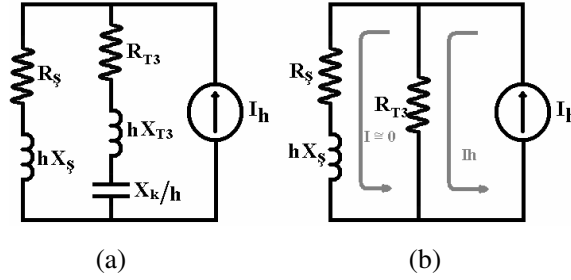


Şekil 2.11: Şekil (2.10)`daki tesisin harmonik modeli

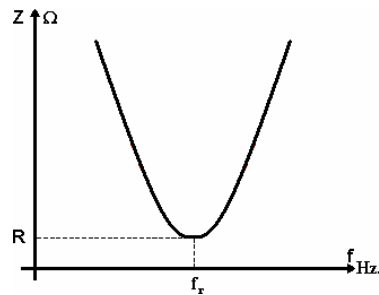
Üzerinde önemle durulması gereken bir diğer nokta eş değer devre empedansı hesaplandıktan sonra rezonans durumunun ortaya çıkması ihtimalidir.

### 2.5.1 Seri rezonans

Şekil (2.12)`de, Şekil (2.11)`deki devrenin eşdeğeri ve seri rezonans halindeki durumu görülmektedir. Şekil (2.12a)`da birinci kol kompanzasyon kondansatörünü, 3. trafonun endüktif direncini ve iç direncini; ikinci kol ise şebekenin geri kalan kısmının endüktif direncini ve iç direncini göstermektedir. Kondansatörlü kolunun herhangi bir harmonik için rezonansa girmesi durumunda, bu kol yaklaşık sıfır empedansa ( $Z \approx 0$ ) sahip olacağından akım tamamen bu koldan akar ve kondansatörlerin akım sınırlarını aşabilir. Endüktif direnç ile kapasitif direnç rezonans frekansında birbirine eşit ( $\omega L = 1/\omega C$ ) olduğundan toplam empedans dirence eşit ( $Z = R$ ) olmaktadır. Seri rezonans, özellikle büyük doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu yerde tehlikeli olabilmektedir. Frekans, Şekil (2.13)`te görüldüğü gibi rezonans frekansından büyükse sistem endüktif, tersi ise kapasitif olarak çalışmaktadır.



Şekil 2.12: a) Seri rezonans öncesi devre b) Seri rezonans halindeki devre



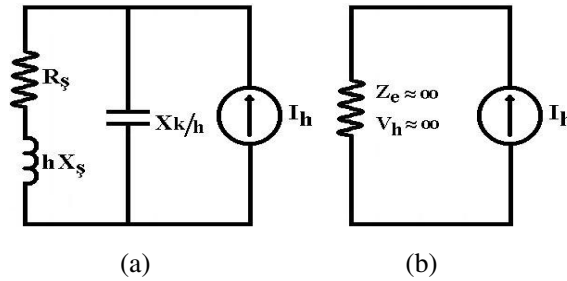
Şekil 2.13: Seri L-C devresi  $f$ - $Z$  eğrisi

Seri rezonans frekansı eşitlik (2.53) teki gibi verilmektedir.

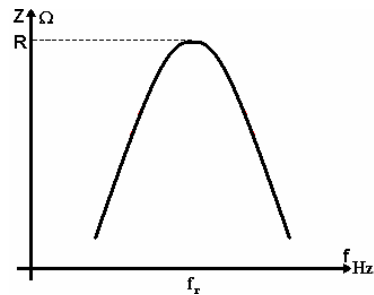
$$f_{se} = f \sqrt{\left( \frac{S_{T_3}}{S_c Z_{T_3}} - \frac{S_L^2}{S_C^2} \right)} \quad (2.53)$$

### 2.5.2 Paralel rezonans

Şekil (2.14) te daha önce Şekil (2.11) de verilen devrenin eş değer devresi ve paralel rezonans halindeki durumu görülmektedir. Şekil (2.14a) da birinci kol kompanzasyon kondansatörünü, ikinci kol ise şebekenin geri kalan kısmının endüktif direncini ve iç direncini göstermektedir. Kompanzasyon kondansatörü ile şebeke endüktansı arasında herhangi bir harmonik için rezonans meydana gelmesi durumunda, eşdeğer empedans yaklaşık sonsuz olacağından ( $Z \approx \infty$ ), akım kaynaklı bu devrede harmonik gerilimi de sonsuza yaklaşır ( $I_h \approx 0$ ;  $V_h = Z_{eş} \cdot I_h$ ) ve kondansatör ve/veya transformatör tahrip olabilir. Şekil (2.15) te paralel L-C devresinin frekans empedans eğrisi görülmektedir [25].



Şekil 2.14: a) Paralel rezonans öncesi devre b) Paralel rezonans halindeki devre

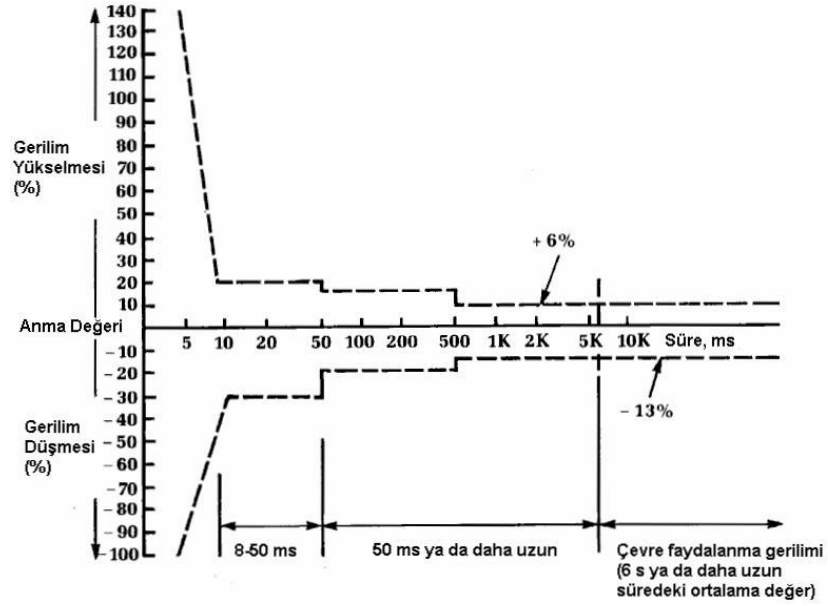


Şekil 2.15: Paralel L – C devresi f – Z eğrisi

Paralel rezonans eşitlik (2.54)'deki gibi verilmektedir [25].

$$f_{pa} = f \sqrt{\left(\frac{S_{sc}}{S_c}\right)} \quad (2.54)$$

Şebekede meydana gelen gerilim yükselmelerinin belli bir kabul edilebilir değeri vardır. Bu durum Şekil (2.16)'daki gibi ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.16: Şebekede kabul edilebilir gerilim değerleri ve süreleri [25]

## 2.6 Harmonikler ile İlgili Yayınlar

Tüketicilerin sinüse mümkün olan en yakın gerilim dalga şekline sahip bir kaynakla beslenmelerini sağlamak, sistem elemanlarını sorunsuz kullanabilmek, güç sisteminin diğer sistemlerin çalışmasını bozmasına engel olmak amacı ile bazı ülkeler iletim sistemleriyle ilgili bir takım sınırlandırmalar getirmişlerdir. Ülkemizde de elektrik iletim sisteminin güvenilir ve düşük maliyetli olarak planlanması, işletilmesi ve tüketicilere kaliteli, yeterli ve düşük maliyetli elektrik enerjisi arz edilebilmesi amacıyla harmonik akım ve gerilimlerini kapsayan bir takım sınırlandırmalar getirilmiştir. Bu amaç için uygulanacak arz güvenilirliği ve kalitesi

koşullarına ilişkin usul ve esasların belirlenmesi amacıyla Elektrik Piyasası Denetleme Kurulunun 10.11.2004 tarihli ve 25639 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” nin dokuzuncu ekinde akım harmonikleri sınırlandırmaları Tablo (2.2)`deki gibi verilmektedir.

Tablo 2.2: Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği`ne göre akım harmonikleri sınırları

h	OG					YG					ÇYG				
	1<U<34.5					34.5<U<154					U>154				
	I <sub>kd</sub> /I <sub>L</sub>					I <sub>kd</sub> /I <sub>L</sub>					I <sub>kd</sub> /I <sub>L</sub>				
	< 20	20-50	50-100	100-1000	> 1000	< 20	20-50	50-100	100-1000	> 1000	< 20	20-50	50-100	100-1000	> 1000
3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35

Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.															
THB	5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5

I<sub>kd</sub>: Ortak kupaaj noktasındaki en yüksek sistem kısa devre akımı

I<sub>L</sub>: Ortak kupaaj noktasındaki en yüksek yük akımının en büyük bileşeni

Ülkelerin kendi ihtiyaçları ve yaptıkları tanımlamalara göre standartları farklılık arz etmektedir. IEEE Güç kalitesi standartlarını belirlemek amacıyla alt çalışma grupları oluşturmuş ve sınıflandırmayı kolaylaştırma amacıyla grupları numaralandırmıştır. EK-1`de bu gruplar ve çalıştıkları konular verilmektedir. IEC`de benzer şekilde yapılmıştır.



## **BÖLÜM 3. YERALTI GÜÇ KABLolarI ve HARMONİKLİ ORTAMDA AMPASİTE HESABI**

### **3.1 Yeraltı Güç Kabloları**

Her elektrik kablosu; iletken ve yalıtkan olmak üzere en az iki kısımdan oluşur ve değişik esaslara göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [33].

#### **İşletme Gerilimlerine Göre Kablolar**

- Alçak gerilim kabloları (1 KV`a kadar.)
- Orta gerilim kabloları (1 KV – 35 KV)
- Yüksek gerilim kabloları (45 KV ve üstü)

#### **Kullanılan Yalıtkan Sentetik Bileşimlere Göre Kablolar,**

- Kâğıt yalıtkanlı kablolar
- PVC ( Polivinilklorid ) kablolar
- PE (Polietilen) kablolar
- XLPE(Çapraz bağlı polietilen) kablolar

#### **İletken Malzemesine Göre Kablolar,**

- Bakır iletkenli kablolar
- Alüminyum iletkenli kablolar

Yeraltı güç kablosu dendiğinde boylu boyunca yalıtılmış ve çeşitli koruyucu kılıflarla kaplanmış tümleşik bir yapı akla gelmelidir. En üst katmandaki elektriki yalıtkanın mekaniki, elektroteknik ve kimyevî bozulmalara karşı korunması gerekmektedir. Bu, koruma yalıtkanın üzerine ilave eşmerkezli katmanlar atmakla mümkün olabilmektedir. En genel yöntem üzeri kılıfüstü veya ceket olarak adlandırılan yalıtkan malzemeyle kaplanmış olan metal bir kılıf kullanmaktır. Bazı kabloların metal kılıfları yoktur. Bu gibi kabloların sadece ceketleri vardır. Bazı kablolarda ise kılıf yerine eşmerkezli nötür iletkenleri vardır. Bu iletkenler esasen

nötür akımına veya sistem arızaları sırasında meydana gelen kısa devre akımlarına bir dönüş yolu olarak kullanılmaktadırlar. Denizaltı veya özel amaçlı kablolarda ilave olarak zırh adı verilen bir katman daha bulunmaktadır. Bu zırh bazı kablolarda bir başka dış katmanla kaplanmıştır.

Kablo tasarımları; her ne kadar müşterek bileşenlerden oluşmuşlarsa da genel olarak gerilim, güç, uygulama vb. birçok etkene bağlı olarak geniş çapta değişim göstermektedir [34].

Yeraltı güç kablosunun en temel işlevi elektrik gücünü önceden belirlenmiş akım ve gerilim sınırları içerisinde iletme. Kablo kılıfına genellikle bakır veya alüminyumdan hem tek damarlı, hem de çok damarlı iletken yerleştirilebilmektedir. Kabloda kullanılan iletken bakırdan olacaksa, herhangi bir ağırlığı taşımak zorunda olmadığı için yumuşak çekme bakırdan yapılmaktadır [2].

İşletme sırasında bu kabloların dış kılıflarında herhangi bir gerilim görülmediğinden bu kablolar toprağa hem doğrudan gömülebilmekte hem de toprağa önceden gömülmüş kanallara yerleştirilebilmektedirler. Yeraltı güç kabloları; gerilimden ve geçici gerilim yükselmelerinden kaynaklanan elektriki, döşeme sırasında meydana gelebilecek sıkışma ve gerilmeden kaynaklanan mekaniki, normal işletme sırasında ısı, döşendiği toprağın içeriğinde bolca çürütücü mineral; element veya organizmanın bulunması veya ortamdaki kimyevi maddeler sebebiyle de kimyevi vb. birçok değişik türdeki zorlanmalara, streslere dayanabilecek şekilde tasarlanmaktadır [34].

Bir yeraltı güç kablosu genel olarak şu bölümlerden oluşur.

- Elektrik akımının iletildiği iletken veya iletkenler
- Toprak – faz gerilimine dayanabilecek yalıtkan
- Yalıtkan çevresindeki elektrik alanını iletkenin etrafında düzgün bir şekilde dağıtan yarı iletken ekran
- Gerilime referans olan, geri dönme ve kısa devre akımlarına yol olan metal kılıf (ekran).

- Mekanik korumayı sağlayan dış kılıf

Bu katmanlar Şekil (3.1)'de görülmektedir.



Şekil 3.1: Bir yeraltı güç kablosunun katman katman görünüşü

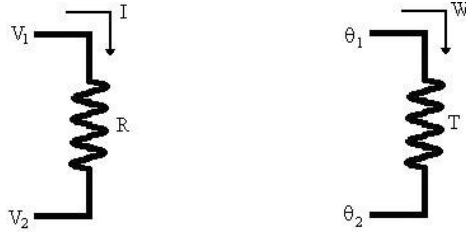
### 3.2 Yeraltı Güç Kablosu Modellenmesi

Yeraltı enerji iletim sistemleri daha önceden belirlenmiş bir gerilimde çalıştıklarından tesisin güç iletim kabiliyetini iletkenin akım taşıma kapasitesi belirlemektedir. İşletme gerilimi kablonun yalıtkanlık düzeyini belirlerken ampasite de iletken kalınlığını belirlemektedir. Büyük iletken kesidi, Joule kayıpları az olacağından yüksek ampasite demektir. Ancak bu durum yalıtkan malzemenin fazla kullanılmasını gerektirir. Bu da ısı dağılımını zorlaştıracığından, ampasitenin sınırlandırılması gerektiği anlamına gelmektedir. Kablodaki ısı kaynakları dâhili ve harici olarak ikiye ayrılabilir [35]. Dâhili ısı kaynakları; iletken akımı; dielektrik kayıpları; zırhtaki, kılıftaki ve diğer koruyucu katmanlardaki akımlardır. Harici ısı kaynakları ise varsa kablo kanalı, bitişik kablolar, başka bir yeraltı sisteminin elemanları gibi üzerinde akım indüklenebilen harici tesis parçaları ve malzemelerdir. Kablonun bozulmaması için ısı artışı kablo bileşenlerinin dayanabileceği en yüksek sıcaklık değerini aşmamalıdır. Dolayısıyla bu ısının kablodan dışarı doğru akması gerekmektedir. Kablo tesisinin bünyesinde bulunan bütün dâhili ve harici malzemeler bu ısı akışına bir direnç göstermektedir. Bu ısının yayılma kabiliyeti de ampasiteyi belirleyen bir diğer etkidir [5].

Ampasite hesaplamalarında ve kablo modellemede kablonun tesis edilme ve işletme koşullarının çok önemli olduğu anlaşılmaktadır. Yeraltı güç kabloları; boru içerisinde tesis edilmektense döşenmesinin daha ucuz ve basit olması, işletme sırasında soğumasının daha kolay olması gibi avantajları nedeniyle çok büyük oranda doğrudan toprağa gömülmektedir. Kablonun tesis edildiği bölgede kablonun kendisinden başka ısı kaynağının olup olmadığına yanısıra kablo tesisinin ilettiği enerjinin kalitesi de ampasiteyi kısıtlayan bir diğer unsur olarak göze çarpmaktadır. Dolayısıyla kablo ısı modelinin çıkarılması bir gereklilik olmaktadır [3].

### 3.2.1 Elektrik ve ısı enerjisi benzetimi

İki ucu arasında potansiyel fark olan iletken bir akım akar. Bu potansiyel fark bir elektron potansiyeli ise bu akıma elektrik enerjisi akımı, bir ısı potansiyeli ise ısı enerjisi akımıdır denebilmektedir. Bu benzetim Şekil (3.2)'de görülmektedir.



Şekil 3.2: Elektrik enerjisi akımıyla ısı enerjisi akımının benzetimi

Şekil (3.2)'de görüldüğü gibi R ile gösterilen elektrik direncinin uçlarındaki elektron potansiyelini gerilim farkı olarak  $V_1$  ve  $V_2$  ifadesiyle, T ile gösterilen ısı direncinin uçlarındaki ısı potansiyelini sıcaklık farkı olarak  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ifadesiyle gösterdiğimizde (3.1) ve (3.2)'deki eşitlikler yazılabilmektedir.

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (3.1)$$

$$W = \frac{\theta_1 - \theta_2}{T} \quad (3.2)$$

(3.1) ifadesi Ohm kanununu verirken (3.2) ifadesi de Ohm kanununa benzemektedir.  $\Delta V$  gerilim düşümü,  $\Delta\theta$  sıcaklık düşümüne;  $I$  akım akışı  $W$  güç akışına ve  $T$  ısıl direnci  $R$  elektriksel direncine karşılık gelmektedir. Bundan dolayı kablo sıcaklığını değerlendirmek için ısı kaybı bileşenleri ve ısı iletim yolundaki değişik katmanların ısıl dirençleri tanımlanmalıdır [5].

### 3.2.2 Isıl direnç

Kablo iletkenince iletilen elektrik enerjisini dış dünyadan yalıtılmak için kullanılan yalıtkan malzemeler elektrik enerjisini yalıtıktıkları gibi ısı enerjisini de yalıtılmakta ve kablo yapısındaki iletken olmayan her malzeme ısı enerjisinin akışına bir zorluk çıkarmaktadır. Yalıtkan malzemenin ısı enerjisine karşı gösterdiği bu zorluğa “ısıl direnç” denmektedir. Kablo iletkenlerinin de bir ısıl direnci olmasına karşın yalıtkan malzemeyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için ihmal edilmekte ve modelde sadece yalıtkanın ısıl dirençleri hesaba katılmaktadır. Kablo silindirik şeklinde düşünüldüğünde birim uzunluk başına ısı enerjisi kaybı [4],

$$Wr = \frac{2 \lambda \pi (\theta_1 - \theta_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.3)$$

olarak verilmektedir. Bu eşitliğin hem payı hem paydası  $\frac{1}{2} \lambda \pi$  ile çarpılarak;

$$Wr = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \lambda \pi}} \quad (3.4)$$

elde edilmekte ve eşitlik (3.2)'ye bakıldığında eşitlik (3.4)'ün paydasının (3.5) ifadesinde görüldüğü gibi birim uzunluk başına ısıl direnci verdiği anlaşılmaktadır.

$$T = \frac{1}{2 \lambda \pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.5)$$

Burada; silindirin iç ve dış yarıçapını sırasıyla  $r_1$  ve  $r_2$  verirken,  $\lambda$  (W/K.m) malzemenin iletkenliğini vermektedir.  $1/\lambda$ ,  $\rho$  ısı öz direnç olarak tanımlanır (K.m/W). Eşitlik (3.5) ısı dirence göre eşitlik (3.6)`daki gibi de yazılabilmektedir.

$$T = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.6)$$

Kablolar ilk enerjilendiklerinde ya da devreden çıkarıldıklarında taşıdıkları elektrik akımının aniden kesilmesine ya da yükselmesine karşın, sıcaklıkları zamana bağlı olarak yavaş yavaş artmakta ya da azalmaktadır. Bu da kablo sistemlerinde geçici durumun özellikle incelenmesi gereğini doğurmaktadır. Bu amaçla kabloların ısı kapasiteleri de modellenmektedir. Sürekli durum analizlerinde böyle bir kapasiteye yer verilmemektedir.

### **3.2.3 Kabloda oluşan ısı enerjisi kayıpları**

Kabloda üretilen ısı enerjisi, “kablo ısı enerjisi kayıpları” olarak ifade edilmekte ve iletken, metal kılıf, ekran, zırh, boru gibi metalik elemanlarda ısı enerjisi olarak kendini gösteren akım kayıpları ve kablo enerjilendiğinde oluşan ve kablonun ısı kapasitesine bağlı olan, dielektrik kayıpları olarak da bilinen, gerilim kayıpları olarak iki kısma ayrılmaktadır.

#### **3.2.3.1 Akıma bağlı kayıplar – Joule kayıpları**

Akıma bağlı kayıplar sistemin metalik elemanlarında Joule kanununa göre oluşan ısı enerjisidir. Bu kayıplara Joule kayıpları da denmektedir.

#### **3.2.3.2 İletken kayıpları**

İçinden akım akan bütün kablolarda ortaya çıkan bu kayıplar  $W$  (W/m) olarak gösterilmekte ve birim zamanda birim uzunluk başına harcanan güç;

$$W_c = I^2 r_{ac} \quad (3.7)$$

olarak ifade edilmektedir.

Anlaşıldığı gibi bu kayıp, iletkenin AA direncinin düşük tutulmasıyla azaltılabilmektedir. İletkenin AA direnci deri etkisi ve yaklaşım etkisi nedeniyle daima doğru akım direncinden daha büyük olmaktadır. “İletkenin AA direnci” terimi kullanıldığında; akım yoğunluğunun deri ve iletkenlerin yaklaşım etkisi sonucunda iletkenin artan görünür direncin DA dirence eklendiği ifade edilmektedir [5]. Bu yüzden iletkenin AA direnci iletken yapılırken mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır [3]. Ancak bu direnç öte yandan iletilen enerjinin kalitesiyle de ilişkilidir. Saflığı bozulan sinüs dalgası üzerindeki düşük genlikli, yüksek frekanslı bileşenler yani harmonikler bu direnci arttırmaktadır. Harmonikli ortamda iletkenin  $r_{ac}$  etkin direncini dolayısıyla buna bağlı olarak artan kayıpları tespit etmek mümkün olmaktadır.

Eşitlik (3.7)'deki  $r_{ac}$  değeri [4,7].

$$r_{ac} = r_{dc} (1 + Y_s + Y_p) \quad (3.8)$$

olarak hesaplanabilmektedir.

İletkenin  $r_{ac}$  etkin direncinin hesaplanabilmesi için gerekli olan  $r_{dc}$  eşitlik (3.9)'daki gibi hesaplanabilmektedir.

$$r_{dc} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (3.9)$$

$\alpha_{20}$ : Sıcaklık katsayısı (Tablo 3.1)

Eşitlik (3.9)'daki  $R_{20}$  eşitlik (3.10)'daki gibi verilmektedir.

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S} \quad (3.10)$$

Bu ifadedeki değerler;

$\rho_{20}$  = iletken malzemenin 20 °C deki öz direncidir ve değeri Tablo (3.1)'de verilmektedir.

S iletkenin kesit alanı (mm<sup>2</sup>) olarak alınmaktadır.

Tablo 3.1 Malzemeye göre  $\rho_{20}$  ve  $\alpha_{20}$  değerleri [8]

Malzeme	$\alpha_{20}$ ( 1/K )	$\rho_{20}$ ( $\Omega$ / km)
a) İletken		
Bakır	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$
Alüminyum	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,8264 \cdot 10^{-8}$
b) Kılıf ve Zırh		
Kurşun veya kurşun alaşımı	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$21,04 \cdot 10^{-8}$
Çelik	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$13,8 \cdot 10^{-8}$
Bronz	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
Paslanmaz çelik	ihmal	$70 \cdot 10^{-8}$
Alüminyum	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$

### 3.2.3.2.1 Deri etkisi

Deri etkisi iletken merkezi civarındaki akım yoğunluğunu düşürmektedir. Homojen bir iletkenin merkezi yakınlarındaki kuvvet çizgilerinin yoğunlaşmasıyla iletken merkezinin civarındaki iletkenin, boyuna bileşeni kenara yakın olan boyuna bileşeninden daha fazla manyetik kuvvet çizgisi tarafından sarmalanır. Bu yüzden iletken merkezindeki zıt emk daha fazladır. Akım yoğunluğunun azalması sonucunda merkez net emk azalır [5]. Manyetik akıların tüm iletkeni kesememelerinden yüzeye doğru birim alan başına endüktans azalır [3]. Bunun sonucunda birim alan başına akım ise yüzeye doğru artar. Bu durum deri etkisi olarak adlandırılır. Deri etkisi yüzünden bir iletkenin alternatif akım taşıdığı zamanki direnciyle, doğru akım taşıdığı zamanki direnci farklı olacak AA direnci DA direncinden büyük olacaktır. Deri etkisi  $Y_s$ 'nin nasıl hesaplanacağı IEC'nin 1982 tarihli 60287 numaralı yayınında belirtilmiştir.



$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0,8X_s^4} \quad (3.11)$$

$$X_s^2 = \frac{8 \pi f}{r_{dc}} 10^{-7} k_s \quad (3.12)$$

$k_s$ : İletkenin tipine göre değişen deri etkisi katsayısıdır ve Tablo 3.2’de verilmektedir.

### 3.2.3.2.2 Yaklaşım etkisi

AA taşıyan iki iletken birbirlerine paralel ya da yakın konumlandırılmışsa iletkenlerden birindeki akım akışı diğer iletkenin kesit alanındaki akı dağılımını aynı yolla da akımını bozar ve böylece iletkenlerin AA dirençleri artar. Bu durum yaklaşım etkisi olarak adlandırılır ve IEC`nin 1982 tarihli 60287 numaralı yayınına göre, iki iletkenli kablo veya tek iletkenli iki kablo durumu için,  $d$  iletken çapı (mm) ve  $s$  iki kablo veya iki iletken arasındaki merkezden merkeze mesafe (mm) olmak üzere eşitlik (3.13)`deki gibi hesaplanmaktadır. İletkenler arası merkezden merkeze mesafe iletken çapının on katını aşarsa bu ilave kayıplar ihmal edilebilmektedir [5].

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} \left( \frac{dc}{s} \right)^2 \left[ 0,312 \left( \frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{X_p^4}{192 + 0,8X_p^4} + 0,27} \right] \quad (3.13)$$

$$X_p^2 = \frac{8 \pi f}{r_{dc}} 10^{-7} k_p \quad (3.14)$$

$k_p$ : İletkenin tipine göre değişen yaklaşım etkisi katsayısıdır ve Tablo (3.2)’de verilmektedir.

Tablo 3.2 İletken tipine göre  $k_s$  ve  $k_p$  değerleri [8]

İletken	$k_s$	$k_p$
Yuvarlak teli	1	0.8
Yuvarlak kompakt	1	0.8
Yuvarlak parçalı	0.435	0.37
Dilimli	1	0.8

Eşitlik (3.7)'deki I akım değeri iletkenin üzerinden akan akımların anlık değerlerinin toplanmasıyla meydana gelen akımı göstermekte olduğundan eşitlik (3.15)'deki gibi yazılabilir.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) \quad (3.15)$$

Harmoniklerin Joule kayıplarına olan etkileri farklı frekans değerlerine sahip sinüzoidal dalgalar göz önüne alınarak eşitlik (3.16)'daki gibi toplam olarak gösterilebilir.

$$W_c = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \cdot (r_{ac})_n \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.16) kullanılarak ve  $n$ . harmonik akımının temel bileşene olan oranı  $\gamma_n$  ile gösterilerek kayıplar eşitlik (3.17)'deki gibi ifade edilebilir.

$$W_c = r_{dc} I^2 \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 \left( \frac{r_{ac}}{r_{dc}} \right)_n \quad (3.17)$$

### 3.2.3.3 Kılıf, ekran ve zırh kayıpları

Kablo iletkeninden akan elektrik akımı kablonun iletken haricindeki diğer metal parçalarında akım indüklemekte ve bu indüklenen akımlar da bu parçalarda kılıf, ekran kayıpları adıyla da adlandırılan Joule kayıplarının oluşmasına neden olmaktadır. Eğer varsa zırh için de aynı şey söz konusudur ve bu durum metal zırhlı iletkenler kullanıldığı sürece meydana gelmektedir. Zırhlı kabloda, kayıpların genliği zırh direncine ve akım genliğine bağlıdır. Mevcut ısı şartları için dağıtılabilecek ısı miktarı belli olduğundan zırhın ürettiği ısı miktarı ne kadar az olursa iletkenin üreteceği ısı miktarı bu bağlamda ampasitesi o kadar artırılabilir. Buradan anlaşılıyor ki zırh kayıpları izin verilebilir ampasiteyi azaltmaktadır. Zırhta üretilen ısı, iletken kayıpları ve dielektrik kayıpları ile birlikte dağıtılmalıdır [5].

$W$  iletken kaybının belli bir oranında meydana gelen bu kayıplar  $\lambda_1, \lambda_2$  kayıp oranı parametreleri ile bulunabilmektedir. Buna göre; kılıf kaybı eşitlik (3.18)`deki gibi, zırh kaybı da eşitlik (3.19)`daki gibi hesaplanabilmektedir [3].

$$W_{sh} = W_c \lambda_1 \quad (3.18)$$

$$W_{arm} = W_c \lambda_2 \quad (3.19)$$

İletken bir malzemenin alternatif bir akıya maruz kalmasıyla oluşan akılar malzemede dolaşmaya başlamakta ve bu dolaşım,  $\lambda_1`$  Eddy kayıpları`na neden olmaktadır. Diğer fazlar veya kablolar tarafından indüklenen akımlar da metal kılıf boyunca dolaşmakta ve bu dolaşım,  $\lambda_1``$  kılıf dolaşım kayıplarına (sirkülasyon kılıf kayıpları) neden olmaktadır. Bu iki kaybın eşitlik (3.20)`deki gibi toplanmasıyla da kılıf kayıpları bulunmaktadır [8]. Bu kayıpları karşılamak için kabloda daha çok güç harcanmaktadır. Adı geçen kayıplar; iletkenlere yakın bir manyetik malzeme olduğunda yüksek ampasiteli iletkenlerde oldukça önemli olabilmektedirler [5].

$$\lambda_1 = \lambda_1` + \lambda_1`` \quad (3.20)$$

Çok büyük çaplı iletkenler haricinde ( $\lambda_1``$ ) ihmal edildiğinden iki veya üç iletkenli kablolarda kılıf kayıpları sadece  $\lambda_1`$  Eddy kayıplarından teşkil olmakta ve IEC`nin 1982 tarihli 60287 numaralı yayınında değişik döşeme şekillerine göre değişik şekillerde hesaplanmaktadır.

### 3.2.3.4 Gerilime bağlı kayıplar

Alternatif akımda dielektrik kayıplar; yalıtkan malzemenin enerji depolamasının bir sonucu olarak kablo yalıtkanında oluşmakta ve  $W_d$  ile ifade edilmektedir. Kablonun elektriksel kapasitesine bağlı olan bu kayıplar kabloya enerji verildiğinde oluşmakta ve dielektrik kayıpları ve şarj akımlarının neden olduğu kayıplar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Büyük oranda gerilime bağlı olduğundan, dağıtım kademesindeki gerilimlerde ihmal edilebilmektedir. Bununla ilgili gerilim sınırları Tablo (3.3)`te verilmektedir.

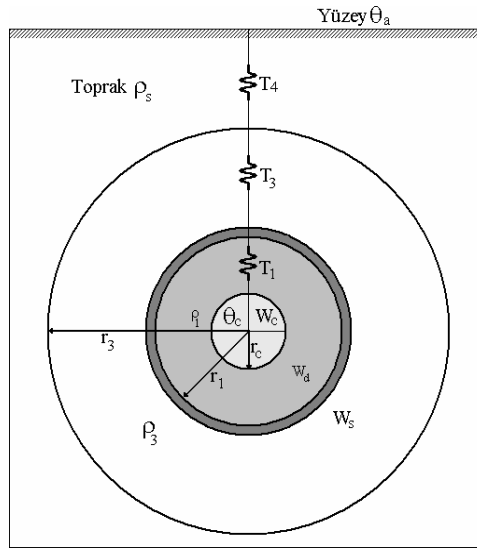
Tablo 3.3: Kablo tiplerine göre dielektrik kaybı gerilim sınırı [8]

Kablo Tipi	V (KV)
Yağlı kâğıt yalıtkanlı	30
Kauçuk yalıtkanlı	15
EPR	15
PVC	6
PE	110
XLPE	45

### 3.3 Isıl Devre Elemanlarının ve Kablo Ampasitesinin Hesaplanması

Genellikle bir kablo Şekil (3.1)'te görülen tabakalardan oluşmaktadır. Bu tabakalardan iletken, yalıtkan ve koruyucu dış kılıf temel tabakadır. Diğer tabakalar kabloyu manyetik, mekanik ya da kimyasal etkilerden korumak amacıyla giydirilmektedir.

Şekil (3.3)'te bir kablo modeli görülmektedir.  $T_1$  iletken ile kılıf arasındaki yalıtkanın ısı direnci,  $T_3$  yalıtkan kılıfın ısı direnci,  $T_4$  toprağın ısı direnci olarak adlandırılmaktadır.  $T_2$  ısı direnci kablo yapısında yağ veya başka özel bir katman olduğu durumunda hesaplama dâhil edilmektedir.  $T_4$  ısı direncinin hesabı ise kabloların toprak içindeki konumları dikkate alınarak yapılmaktadır.



Şekil 3.3: Kablo modeli

Tek iletkenli kablolar için, iletken ile kılıf arasındaki ısı direnç, eşitlik (3.6) dikkate alınarak, eşitlik (3.21)'deki gibi yazılabilmektedir.

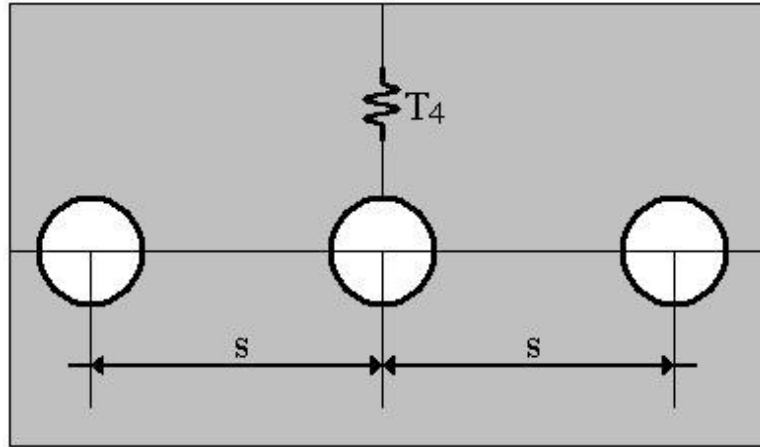
$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right) \quad (3.21)$$

Koruyucu kılıfın ısı direnci  $T_3$  eşitlik (3.22)'deki gibi hesaplanmaktadır;

$$T_3 = \frac{\rho_i}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D_e}\right) \quad (3.22)$$

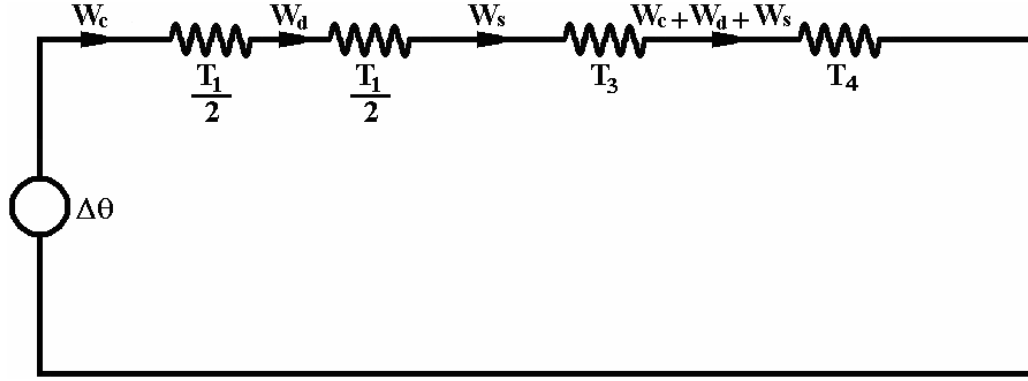
$T_4$  ısı direncinin hesaplanmasında kabloların toprağa döşenme şekilleri önemlidir. Buna göre kablolar Şekil (3.4)'te görüldüğü gibi düz olarak belirli bir  $s$  aralığıyla tesis edilirler ise,  $T_4$ 'ün değeri eşitlik (3.23)'deki gibi olmaktadır.

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \left( \left( \frac{2h}{D_e} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D_e}\right)^2 - 1} \right) \left( \left(\frac{2h}{s}\right)^2 + 1 \right) \right) \quad (3.23)$$



Şekil 3.4: Kanaldaki kabloların düz yerleştirilmesi

Yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla Şekil (3.5)'deki gibi bir kablonun basit ısı devresi modeli oluşturulabilmektedir.



Şekil 3.5: Kablonun ısıl devre modeli

Şekil (3.5)`ten  $\theta_c$  iletken sıcaklığını  $\theta_a$  ortam sıcaklığını göstermek üzere eşitlik (3.24) yazılabilir;

$$\Delta\theta = \theta_c - \theta_a \quad (3.24)$$

Şekil (3.5)`deki devre modeline göre;

$$\theta_c - \theta_a = W_c (T_1 + T_3 + T_4) + W_d \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right) + W_s (T_3 + T_4) \quad (3.25)$$

yazılabilir. Eşitlik (3.18) dikkate alınarak eşitlik (3.25), eşitlik (3.26)`ya dönüşmektedir.

$$\theta_c - \theta_a = W_c (T_1 + T_3 + T_4) + W_d \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right) + (W_c \lambda_1) (T_3 + T_4) \quad (3.26)$$

(3.26) ifadesi  $W_c$  parantezine alınarak eşitlik (3.27) elde edilmektedir.

$$\Delta\theta = W_c [T_1 + (1 + \lambda_1) (T_3 + T_4)] + W_d \left( \frac{T_1}{2} + T_3 + T_4 \right) \quad (3.27)$$

Burada  $W_c$ `nin çarpanına  $T_A$  ve  $W_d$ `nin çarpanına da  $T_B$  dersek eşitlik (3.27), (3.28) ifadesine dönüşür.

$$\Delta\theta = W_c T_A + W_d T_B \quad (3.28)$$

Buradaki  $W_c$  yerine de eşitlik (3.7)'deki ifade yazılacak olursa saf sinüs akım ve gerilimle çalışan bir kablonun ampasitesi (3.29) ifadesindeki gibi yazılabilir;

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d T_B}{T_A r_{ac}}} \quad (3.29)$$

Ancak bu ampasite değeri, saf sinüs akım ve gerilimin varlığında bize gerçek değeri vermektedir. Şebekede saf sinüs akım ve gerilimin var olması çok zordur. Dolayısıyla harmonik etkilerinin de ampasite hesaplamalarına katılması gerekmektedir. Eşitlik (3.17) dikkate alınarak  $r_{ac}/r_{dc}$  oranı harmonik etkisini de içine alacak şekilde eşitlik (3.30)'daki gibi gösterilebilmektedir.

$$\left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_{hv} = \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 \left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_n \quad (3.30)$$

Buradaki direnç oranı, iletkendeki harmoniklerin bir fonksiyonudur [4]. Harmonikler ek Joule kayıplarına yol açmaktadırlar. Ek Joule kayıpları kablo sıcaklığını arttırmaktadır. Dolayısıyla kablo ampasitesi sadece temel sinüsün göz önüne alındığı duruma nazaran daha düşük olmalıdır. Çünkü kabloyu en uygun ömür süresinde kullanabilmenin anahtarı kablo sıcaklığını normal çalışma sıcaklığında tutmaktır. Bundan dolayı harmonikli ortamda kablonun sorunsuz çalışabilmesi için belirlediğimiz harmonikli ampasitenin neden olduğu kayıplarla, kablonun harmoniksiz ortamda sorunsuz çalışabilmesi için üretici firmaca belirlenmiş harmoniksiz ampasite değerinin neden olduğu kayıplar birbirine eşit olmalıdır. Harmonikli ortam için belirlediğimiz yeni ampasite değerine  $I_{hv}$ , harmoniksiz ortam için belirlenmiş ampasite değerine  $I_{hy}$  diyerek durum eşitlik (3.31) ile ifade edilebilmektedir.

$$(I_{hv})^2 \left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_{hv} r_{dc} = (I_{hy})^2 \left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_{hy} r_{dc} \quad (3.31)$$

$I_{hv}$  ile  $I_{hy}$  arasında (3.32) ifadesindeki gibi bir eşitlik kurulabilmektedir.

$$I_{hv} = (1 - \delta) I_{hy} \quad (3.32)$$

Eşitlik (3.31) ve eşitlik (3.32) dikkate alınarak ampasite azalma faktörü  $\delta$ , eşitlik (3.33)'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\delta = 1 - \frac{\sqrt{\left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_{hy}}}{\sqrt{\left(\frac{r_{ac}}{r_{dc}}\right)_{hv}}} \quad (3.33)$$



## BÖLÜM 4. HARMONİK ÖLÇÜMÜ ve HARMONİK ETKİ MODELİ

### 4.1 Harmonik Ölçümü

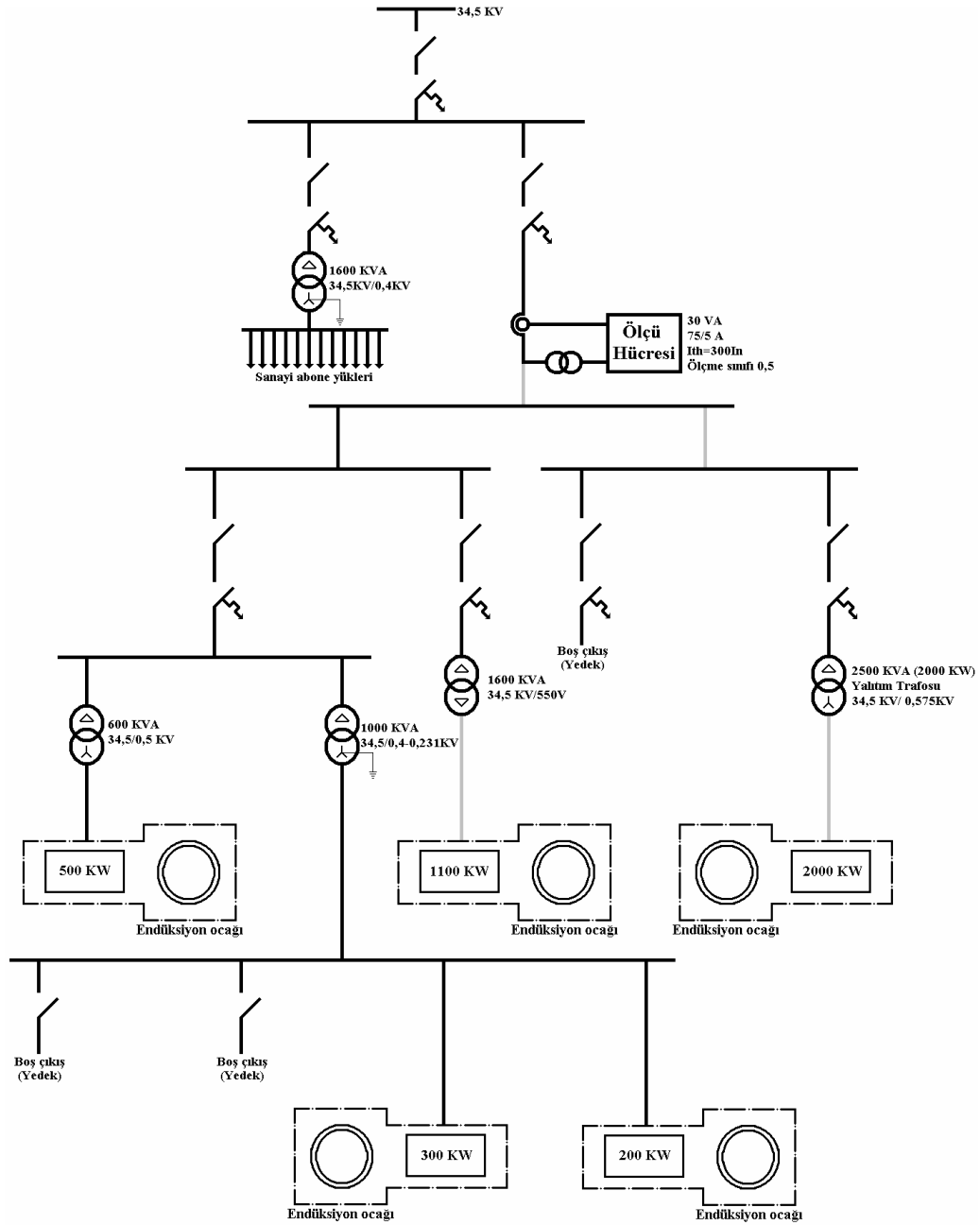
Harmonik etkileri genellikle sistemin alçak gerilim tarafında giderilmeye çalışılmaktadır. Ancak OG tarafında da etkileri oldukça fazla olmaktadır. Orta gerilimde harmoniklerin varlığını göstermek ve modelde kullanılan harmoniklerin birbirine göre oranlarını gerçeğe uygun bir şekilde tespit etmek amacıyla, yasal izinler alındıktan sonra, Kocaeli bölgesinde toplamda 4100 KW'lık 5 adet endüksiyon ocağının kullanılmakta olduğu bir döküm fabrikasında, sadece bu ocakları besleyen 34,5 KV'luk OG sisteminde, üz fazlı olarak bir harmonik ölçümü yapılmıştır. Şekil (4.1)'de bu sistemin basitleştirilmiş şeması görülmektedir. Bu şekilde yeraltı güç kabloları gri olarak çizilmiştir. Sistemde ayrıca Tablo (4.2)'de özellikleri verilen 5 adet trafo bulunmaktadır.

Tablo 4.1: Ocak gerilim ve güç değerleri

Ocak	V	P
1	380 V	200KW
2	380 V	300KW
3	500 V	500KW
4	550 V	1100KW
5	575 V	2000KW
Toplam		4100 KW

Tablo 4.2: Trafo gerilim değerleri ve beslediği yerler

Trafo	V (KV)	S (KVA)	Beslediği yer
1	34,5 / 0,5	600	Endüksiyon ocağı
2	34,5 / 0,4 - 0,231	1000	Endüksiyon ocağı
3	34,5 / 0,4	1600	Sanayi abone yükleri
4	34,5 / 0,55	1600	Endüksiyon ocağı
5	34,5 / 0,575	2500	Endüksiyon ocağı



Şekil 4.1: Ölçüm yapılan sistemin basitleştirilmiş şeması

Bu ölçümden elde edilen her bir faza ait %THB eğrisi Şekil (4.2)`de görülmektedir. Ölçüm yapılan sistem 34,5 KV olmasına rağmen her bir %THB eğrisinin zaman zaman sivrilmesi, zaman zaman da çökmesi dikkat çekmektedir. %THB`nin böylesine değişmesi OG sistemler için de harmonik sorununun var olduğunu ve ne kadar ciddi boyutlarda olabileceğini ortaya koymaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.2:  $t_{\%THB}$  a) 1.faz b) 2.faz c) 3.faz

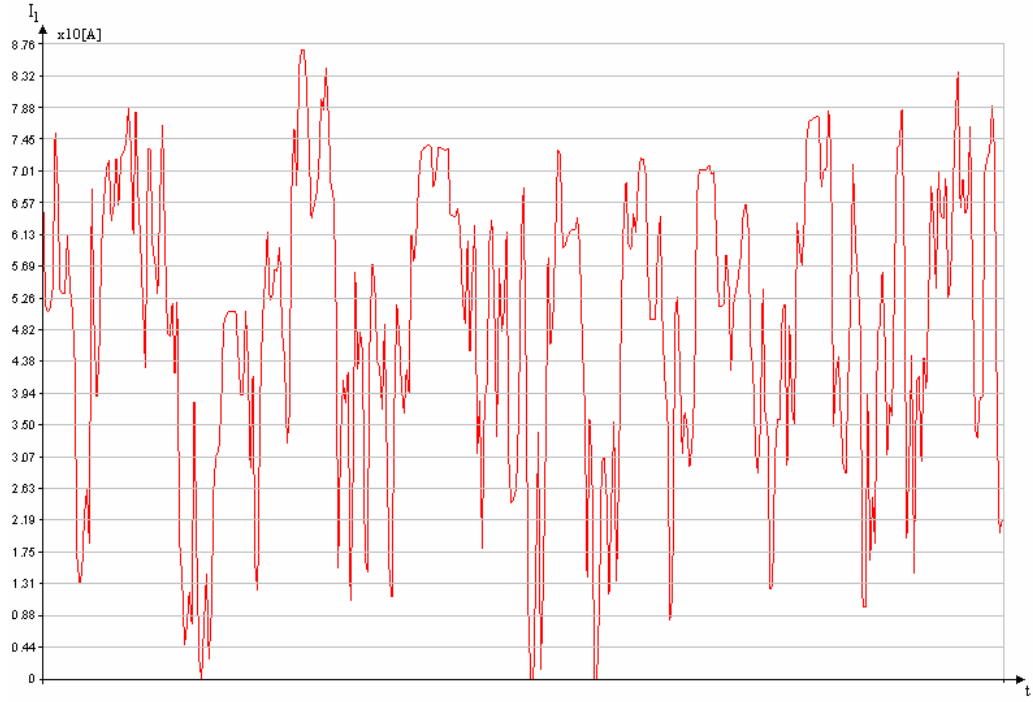


(c)

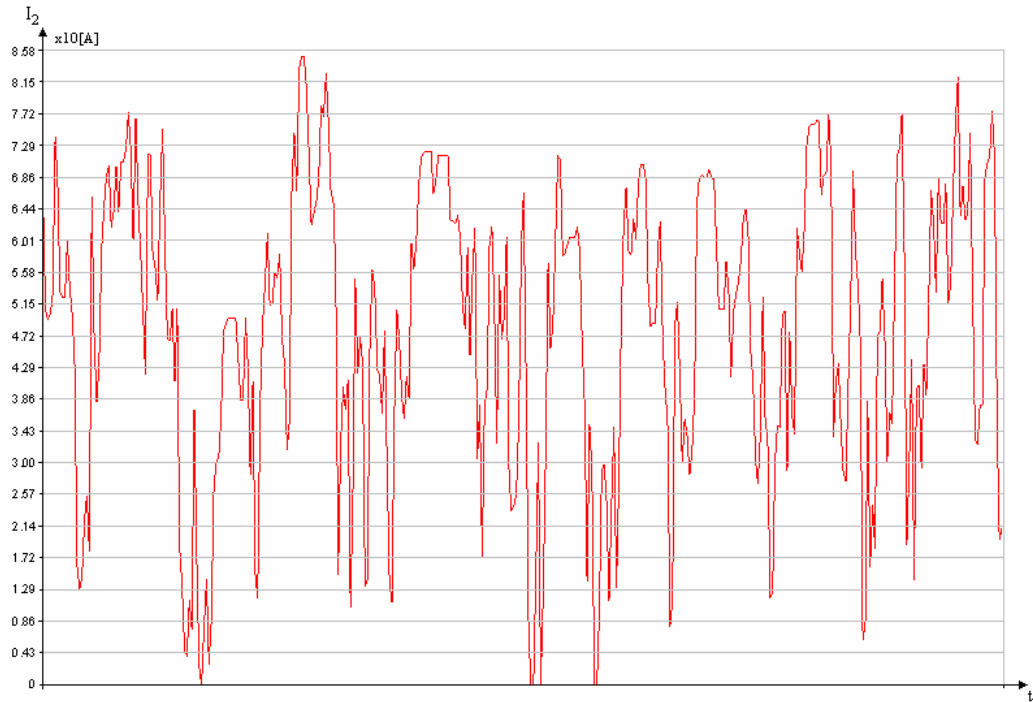
Şekil 4.2: t\_%THB a) 1.faz b) 2.faz c) 3.faz “(Devam)”

%THB`nin böylesine değişmesinin altında akımın çok değişken bir yapıda olması yatmaktadır. Elektriksel olarak temiz bir yükün çektiği akımın etkin değerinin değişmemesi beklenmektedir. Ölçüm yapılan sistemde akımın etkin değerinin değişimine göz atıldığında %THB eğrisine benzer sivrilmeler ve çökmeler görülmektedir.

OG sistemlerindeki harmonikler sadece üretildikleri tesise zarar vermeye kalmayıp ulusal şebeke üzerinden, meydana gelebilecek rezonans durumlarıyla, başka işletmelerdeki sistemlere de zarar verebilmektedir. Bu zarar yeraltı güç kablosu tesisinin devre dışı kalması şeklinde olabilir. Büyük bir işletme böyle bir arıza yüzünden bir süreliğine tamamen durabilir. Buradan da OG sistemlerindeki harmoniklerin hem işletme boyutunda hem de ulusal boyutta bir toplamsallık göstermekte olduğu anlaşılabilir. Ölçüm yapılan sistemin her bir fazına ait akım değerleri Şekil (4.3)`te görülmektedir.

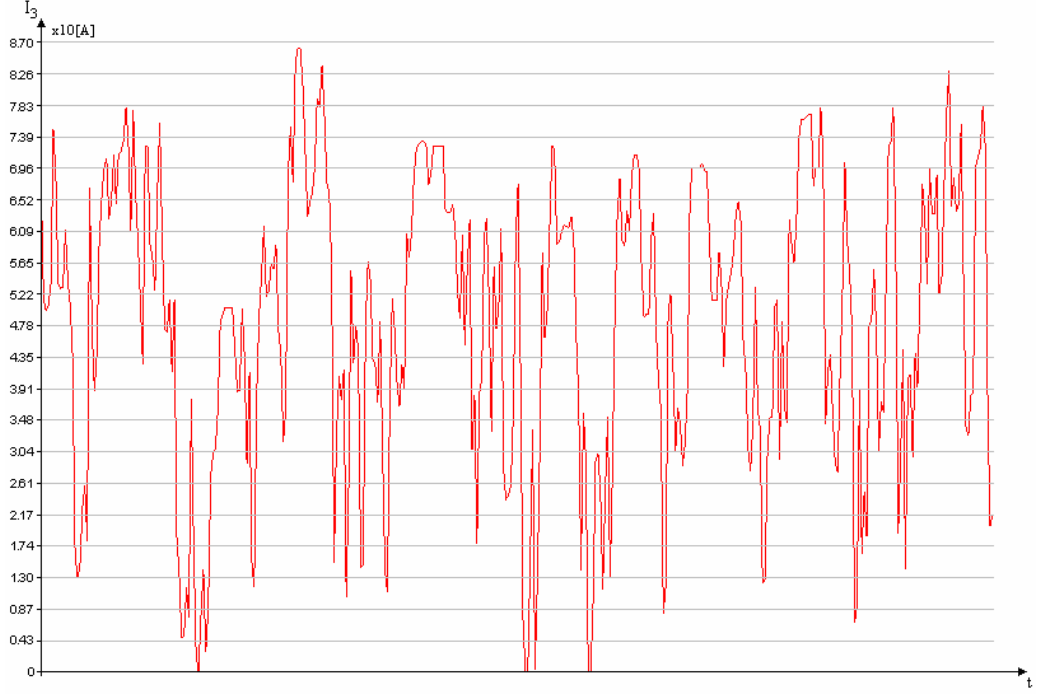


(a)



(b)

Şekil 4.3:  $t_I$  a) 1.faz b) 2.faz c) 3.faz



(c)

Şekil 4.3: t\_I a) 1.faz b) 2.faz c) 3.faz “(Devam)”

Ölçüm sonunda elde edilen harmonik ortalama değerleri Tablo (4.3)`te görülmektedir. Bu değerler, harmonik ölçüm cihazı bu değerleri verdiği için, en yüksek değerlerindeki yüzdelerinden elde edilmiştir.

Tablo 4.3: Ölçüm sonunda elde edilen harmonik ortalama değerleri

	$I_1$ [A]	$I_2$ [A]	$I_3$ [A]	$I_1$ [br]	$I_2$ [br]	$I_3$ [br]
$I_{h1}$	48.77520714	47.72530274	48.39955386	1	1	1
$I_{h3}$	1.087061122	1.653431612	1.802781836	0.022287	0.034645	0.037248
$I_{h5}$	7.103089994	8.435834736	8.570961695	0.145629	0.176758	0.177088
$I_{h7}$	3.559394583	4.303231166	4.40040153	0.072975	0.090167	0.090918
$I_{h9}$	0.809829254	1.031145507	1.006255258	0.016603	0.021606	0.020791
$I_{h11}$	3.205083748	3.618708795	3.625096622	0.065711	0.075824	0.074899
$I_{h13}$	2.416097132	2.598206883	2.730037604	0.049535	0.054441	0.056406
$I_{h15}$	0.621575207	0.916209369	0.912436201	0.012744	0.019198	0.018852
$I_{h17}$	1.365967814	2.022634289	1.930050032	0.028005	0.042381	0.039877
$I_{h19}$	1.253235245	1.623926068	1.696916635	0.025694	0.034027	0.035061
$\%thb$	18.89027951	23.0382401	23.11108913	18.89028	23.03824	23.11109

Modelde  $I_1$  akımına ait harmonik değerleri kullanılmıştır.

## 4.2. Harmonik Etki Modeli

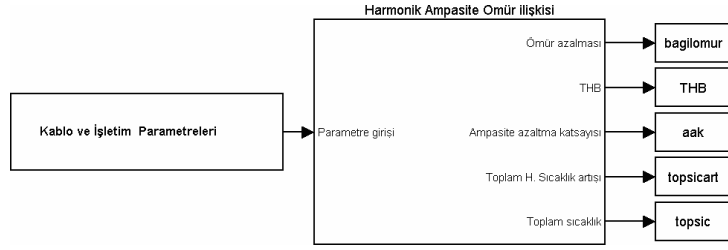
Özellikleri Tablo (4.4)`te verilen XLPE kablo kullanılarak, harmoniklerin kablo ampasitesine ve ömrüne olan etkilerinin belirlenmesi için MATLAB/SIMULINK paket programı vasıtasıyla bir model oluşturulmuştur. Modelde kullanılmak üzere ülkemizde çok kullanıldığından ve ölçüm yapılan sistemle aynı tipte olduğundan bu kablo seçilmiştir.

Tablo 4.4: Kablo parametreleri

Kablo Verileri	Birimi	Sembol	Kablo
İşletim gerilimi (faz-faz)	V	U	35000
İzolasyonlu kablonun akımı	A	I	650
İşletim frekansı	Hz	f	50
İletken kesiti	mm <sup>2</sup>	A	240
Kablo dış çapı	mm	D <sub>c</sub>	40,77
İletken çapı	mm	d <sub>c</sub>	18,37
En yüksek izin verilebilir iletken sıcaklığı	°C	θ <sub>χ</sub>	90
İletkenin cinsi	-	-	Bakır
Yalıtkanın cinsi	-	-	XLPE
Yalıtkanın kalınlığı	mm	t <sub>1</sub>	9
Yalıtkanın ısıl öz direnci	K.m/W	ρ	3,5
Kaplamanın kalınlığı	mm	t <sub>3</sub>	2,2
Kılıf kayıp faktörü	-	λ <sub>1</sub>	0
Kablo döşeme derinliği	m	h	0,9
Toprağın ısıl iletkenliği	W/ K.m	λ <sub>σ</sub>	1,2
Ortam sıcaklığı	°C	θ <sub>a</sub>	20

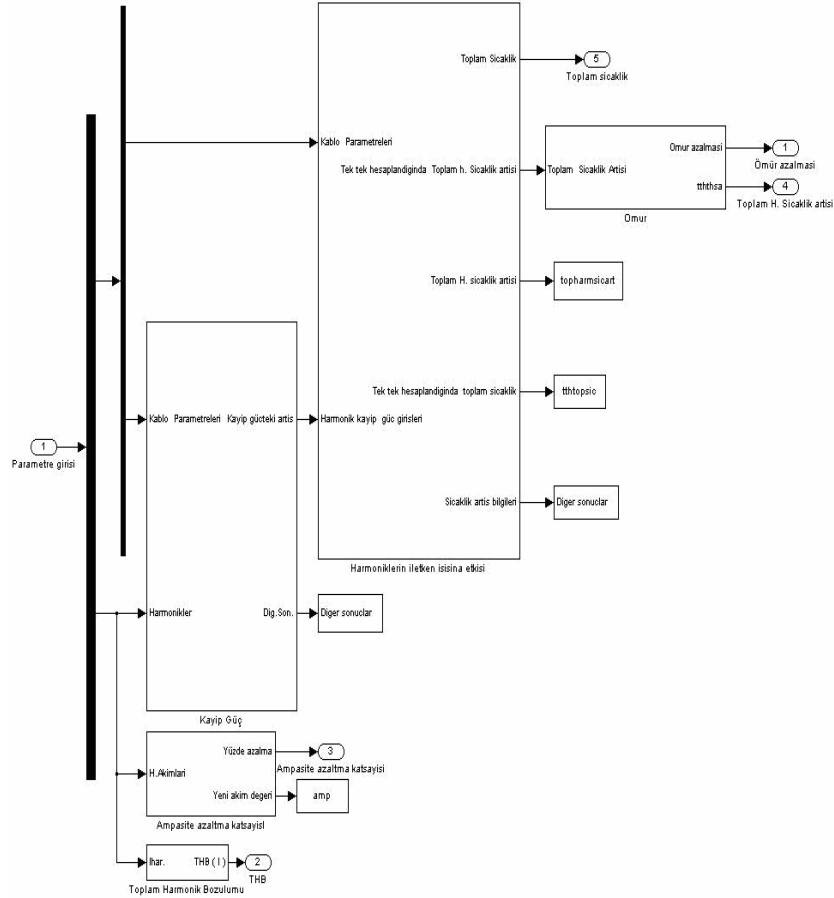
### 4.2.1 Modelin Tanıtılması

Toplam 150 parçadan oluşan bu model, temelde kablo ve işletim parametrelerinin girildiği blok ve gerekli hesaplama ve değerlendirilmelerin yapıldığı diğer blok olmak üzere Şekil (4.4)`te görüldüğü gibi iki ana kısımdan oluşmaktadır. Gerekli parametreler girildiğinde model bu parametreleri değerlendirerek kabloya ait bağlı ömür, toplam sıcaklık artışı, sıcaklık, ampasite azalma faktörü ve toplam harmonik bozulmasını, bunlar arasındaki ilişkiyi ve bu değerlere ulaşmak için bulunan tüm ara değerleri, %0 THB değerinden %100 THB değerine kadar geniş bir aralıkta inceleme olanağı vermektedir.



Şekil 4.4: Modelin genel görüntüsü

Bunu gerçekleştirmek için Şekil (4.5)'te görüldüğü gibi THB'nin, ampasite azalma faktörünün, kayıp güçlerin, sıcaklık artışının belirlendiği toplam 5 adet alt ana blok kullanılmaktadır.



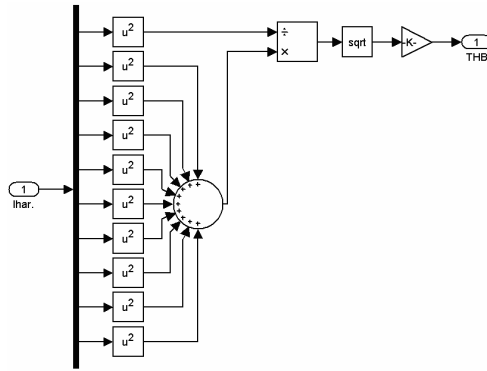
Şekil 4.5: Modeli oluşturan alt ana bloklar

Girilen kablo parametreleri “kayıp güç” alt modeline ve “harmoniklerin iletken ısısına etkisi” alt modeline, harmonik sırası ise “toplam harmonik bozulumu” ve



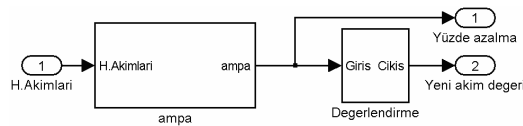
“ampasite azalma faktörü” alt modellerine girmektedir. Harmonik değerlerine göre %THB ve ampasite azalma faktörü, kablo parametrelerinin bir kısmı ve harmonik sırası kullanılarak kayıp güç elde edilmektedir. Elde edilen kayıp güç değerleri ve daha önceden girilmiş kablo parametreleri “harmoniklerin iletken ısısına etkisi” alt modeline aktarılmaktadır. Bu alt modelden toplam harmonik sıcaklık artış değeri elde edilmekte ve bu değer ömür modeline aktarılmaktadır. Sistemden çıkış olarak %THB, ampasite azalma faktörü, yeni akım değeri, temel dalga kayıp gücü, harmoniklerin neden olduğu kayıp güçler, bunların toplamı ve toplam kayıp güç, temel dalganın neden olduğu sıcaklık, harmoniklerin neden olduğu sıcaklıklar, toplam sıcaklık ve bağlı ömür kaybı alınmaktadır.

Bu yapılardan %THB bloğu eşitlik (2.51)`e göre Şekil (4.6)`daki gibi oluşturulmuştur. Bu yapıda gelen harmonik sırasına ve genliklerine göre ortamın %THB değeri tespit edilmektedir.



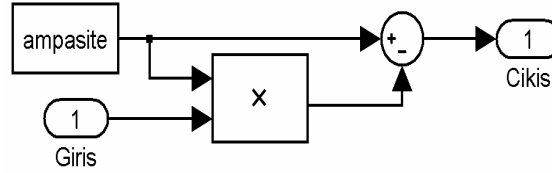
Şekil 4.6 : %THB bloğu

Gelen harmonik sırasına ve genliklerine göre %THB tespiti yanında ampasite azalma faktörü de eşitlik (3.33)`e dayanarak Şekil (4.7)`de görülen alt model yardımıyla tespit edilir.



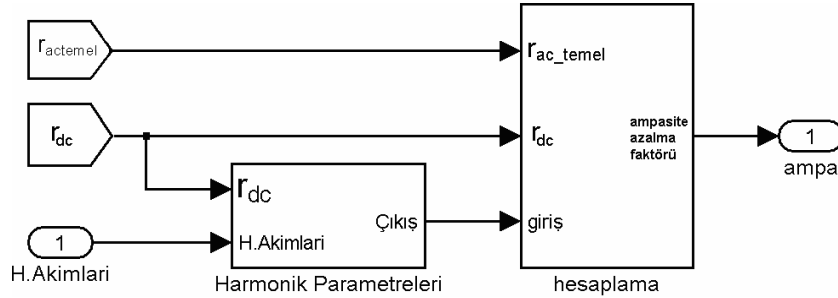
Şekil 4.7: Ampasite azalma faktörünün tespiti

Bu alt model söz konusu faktörün tespit edildiği blok ve bu faktörün değerlendirildiği blok olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Değerlendirme kısmı Şekil (4.8)'den anlaşıldığı gibi elde edilen faktörün karşılık geldiği akım değerini vermektedir.



Şekil 4.8: Değerlendirmenin yapıldığı alt model

Ampasite azalma faktörünün yüzde olarak tespit edildiği “ampa” isimli blok ise Şekil (4.9) da görüldüğü gibi kendi içinde birincisi  $(r_{ac}/r_{dc})_{hv}$  oranının tespiti için gerekli olan harmonik parametrelerinin değerlendirildiği, ikincisi ise bu değerlendirme kullanılarak  $\delta$  ampasite azalma faktörünün belirlendiği alt modelden oluşmaktadır.

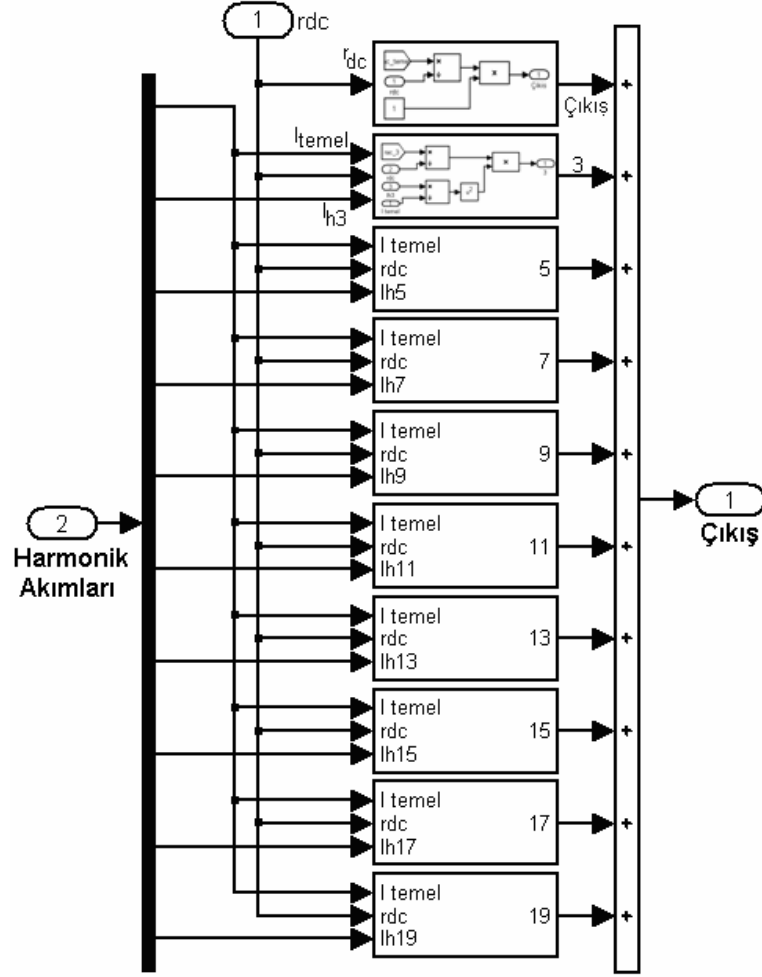


Şekil 4.9:  $\delta$ 'nın elde edilmesinde kullanılan alt model

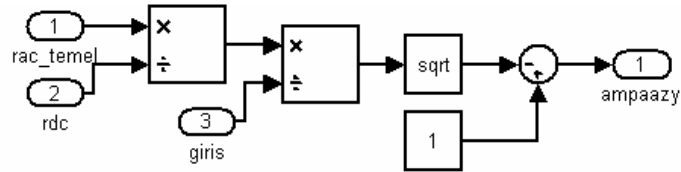
Harmonik parametreleri bloğu direnç ve akım oranlarını belirlemek amacıyla Şekil (4.10)'daki gibi oluşturulmuştur.

Veri, harmonik parametreleri bloğundan geçtikten sonra  $\delta$ 'nın belirlenmesi için tüm gereklilikler yerine getirilmekte ve  $\delta$ 'nın tespiti için geriye kalan hesaplamalar da hesaplama bloğunda Şekil (4.11)'deki gibi yapılmaktadır.

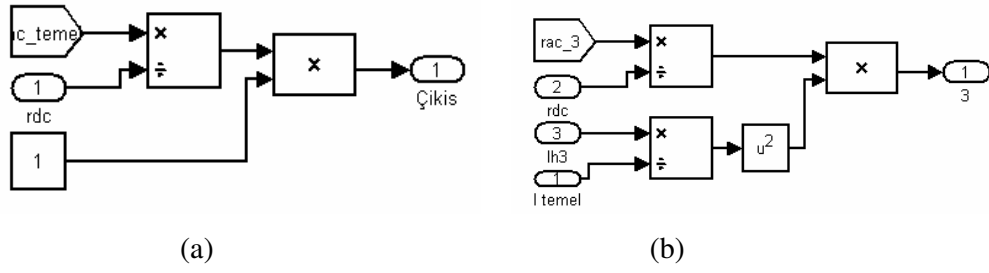
Şekil (4.10)'da görüldüğü gibi harmonik parametreleri bloğunun birinci bileşeni Şekil (4.12a)'daki yapıdan diğer bileşenleri de Şekil (4.12b)'deki yapıdan oluşmaktadır. Bu bloklar her harmoniğe özgü  $(r_{ac}/r_{dc})_{hv}$  ve  $(I_n/I_{temel})$  değerlerini tespit etmektedirler.



Şekil 4.10: Harmonik parametreleri bloğu

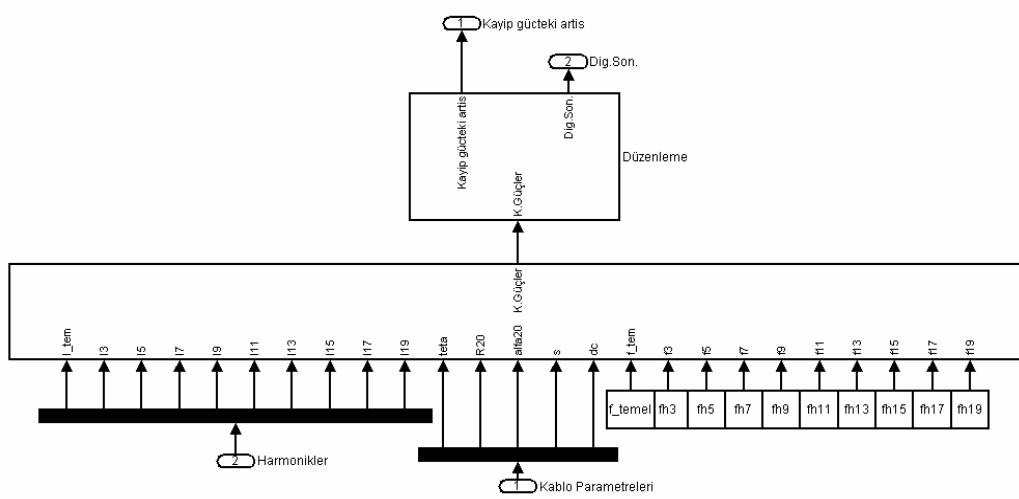


Şekil 4.11:  $\delta$  hesabı



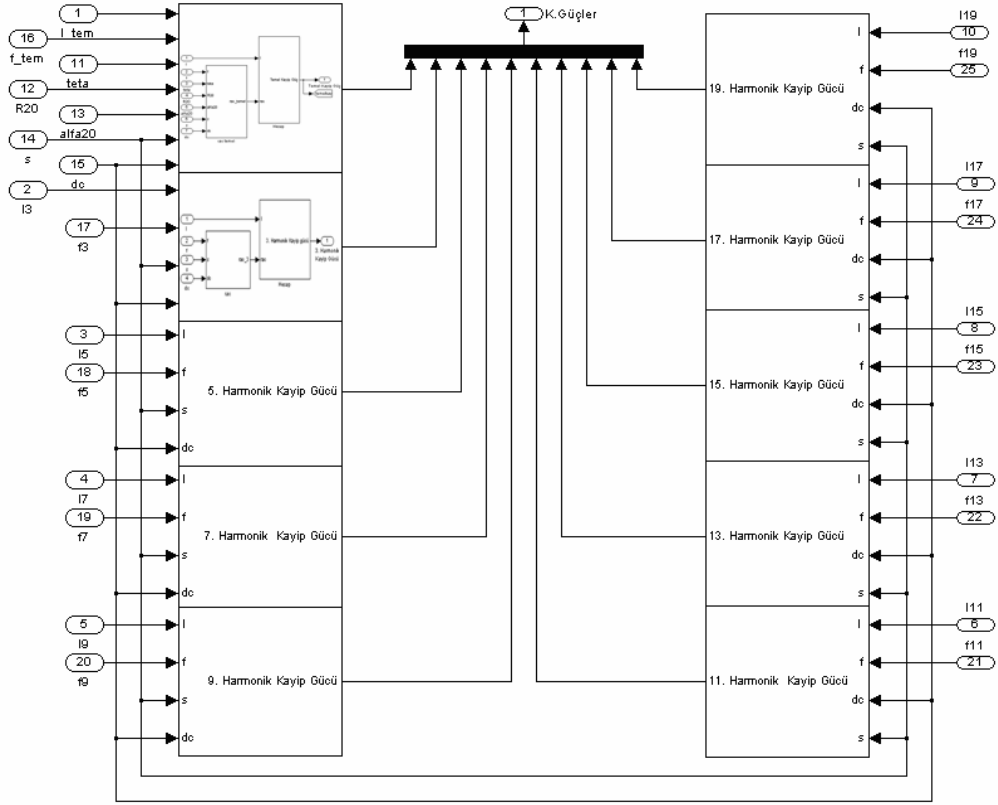
Şekil 4.12: Harmonik parametreleri blok bileşenleri

Kayıp güç bloğunda ise sistemde kaybolan enerji her bir harmonik bileşene göre her %THB değerinde tespit edilmektedir. Bu amaç için birincisi kayıp güçlerin belirlendiği, ikincisi ise buradan elde edilen sonuçların düzenlendiği geçiş kısmı olmak üzere Şekil (4.13)`te görüldüğü gibi iki blok tasarlanmıştır.

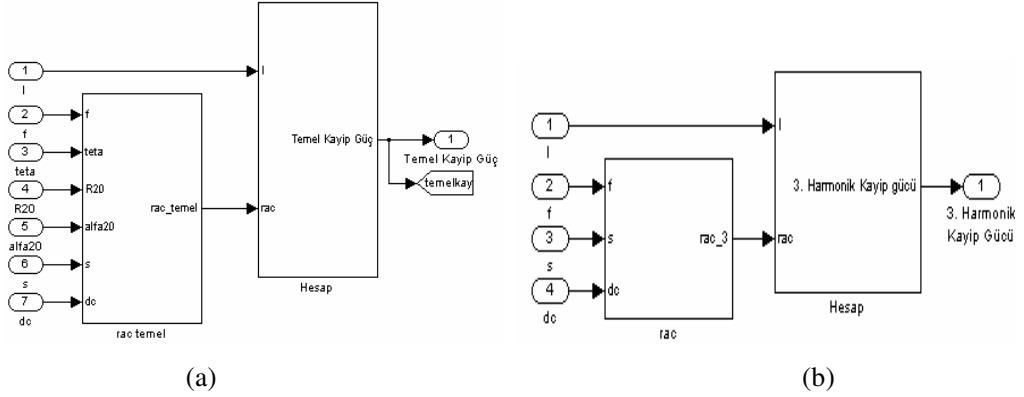


Şekil 4.13: Kayıp güçlerin belirlendiği blok

Şekil (4.14)`te görüldüğü gibi kayıp güçlerin belirlendiği ana bloğun birinci bileşeni Şekil (4.15a)`daki bloktan diğer bileşenleri ise Şekil (4.15b)`deki bloktan oluşmaktadır. Bu blokta her bir harmonik bileşene ait kayıp güçler teker teker tespit edilmektedir.

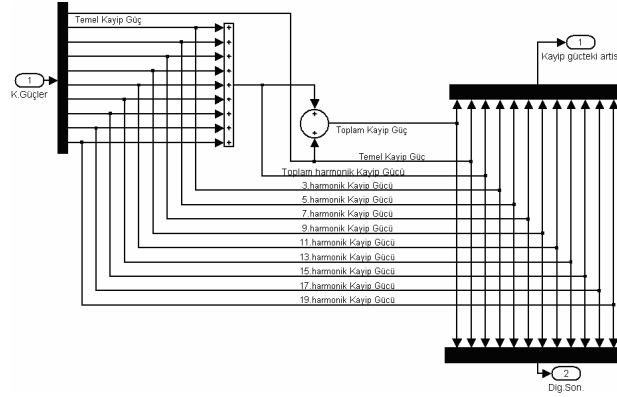


Şekil 4.14: Kayıp güçlerin belirlendiği ana blok



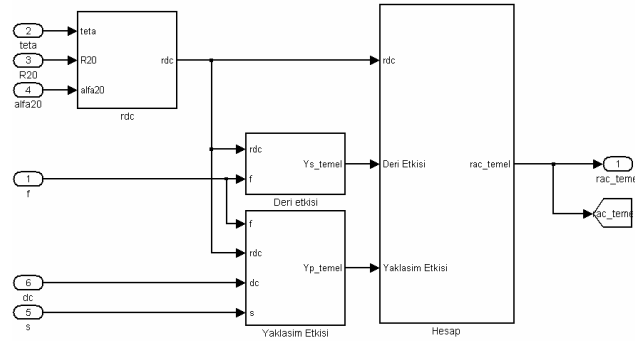
Şekil 4.15: Kayıp güçlerin belirlendiği ana alt bloklar

Elde edilen sonuçlar Şekil (4.16) da görüldüğü gibi düzenleme bloğunda düzenlenip kullanıma hazır hale gelmektedir.



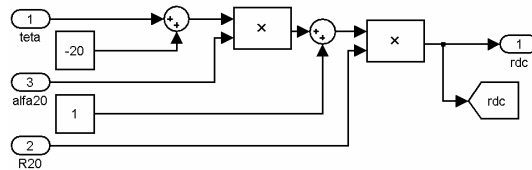
Şekil 4.16: Kayıp güçlerin düzenlenmesi

Kayıp güçlerin belirlenmesinde kullanılan  $r_{ac}$  hesaplama alt modeli Şekil (4.17)'te görülmektedir.



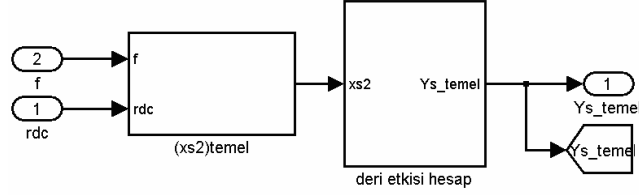
Şekil 4.17:  $r_{ac}$  tespit alt blokları

Kayıp güçlerin belirlenmesi için dört alt bloğa gerek duyulduğu Şekil (4.17)'den anlaşılmaktadır. Bu bloklardan  $r_{dc}$  bloğu Şekil (4.18)'deki gibi oluşturulmuştur. Bu değer sadece bu noktada belirlenmiş olup gerekli görülen yerlere, model içinde karmaşayı önlemek amacıyla buradan dağıtılmıştır.



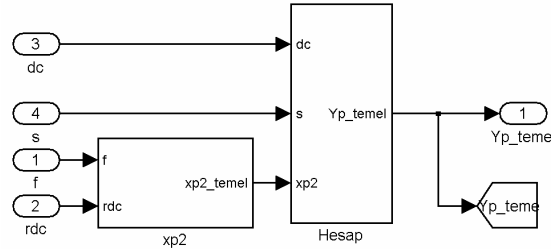
Şekil 4.18:  $r_{dc}$  tespit bloğu

Gerekli diğer parametre deri etkisidir. Öncelikle Şekil (4.19)'da görüldüğü gibi eşitlik (3.12)'e dayanarak  $x_s^2$  terimi belirlenmektedir. Daha sonra eşitlik (3.11)'e dayanarak deri etkisi hesaplanmaktadır.



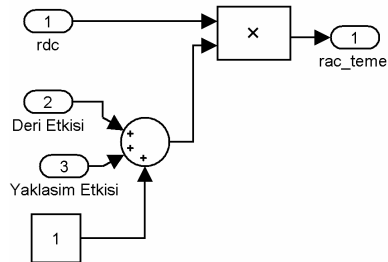
Şekil 4.19: Deri etkisi tespit bloğu

Benzer şekilde gerekli diğer bir parametre yaklaşım etkisidir. Öncelikle Şekil (4.20)'de görüldüğü gibi eşitlik (3.14)'e dayanarak  $x_p^2$  terimi belirlenmektedir. Daha sonra eşitlik (3.13)'e dayanarak yaklaşım etkisi hesaplanmaktadır.



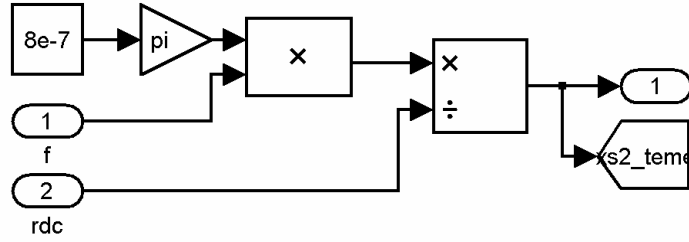
Şekil 4.20: Yaklaşım etkisi tespit bloğu

Elde edilen değerlerin Şekil (4.21)'deki hesap bloğuna aktarılmasıyla  $r_{ac}$  tespit edilmiş olmaktadır. Bu değer sadece bu noktada belirlenmiş olup gerekli görülen yerlere, model içinde karmaşayı önlemek amacıyla, buradan dağıtılmıştır.

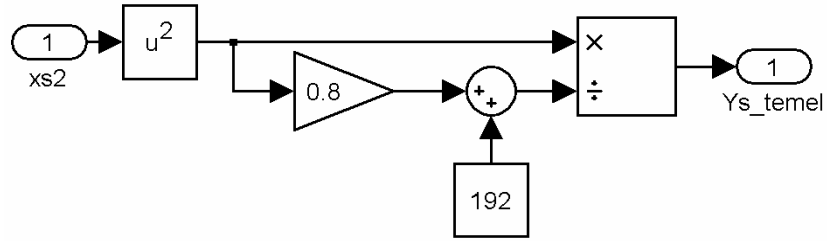


Şekil 4.21:  $r_{dc}$ ,  $Y_s$  ve  $Y_p$  değerleri kullanılarak  $r_{ac}$ 'nin belirlenmesi

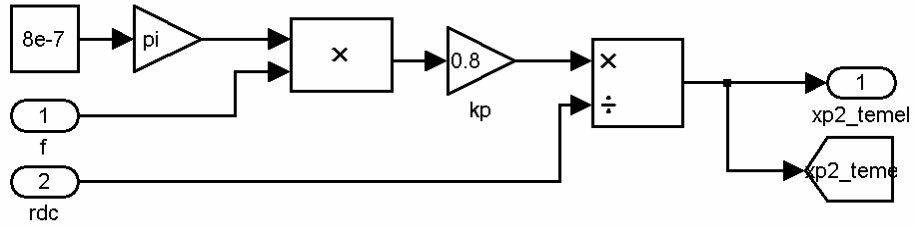
Deri ve yaklaşım etkisinin belirlendiği bloklar Şekil (4.22), (4.23), (4.24) ve (4.25)`te görülmektedir



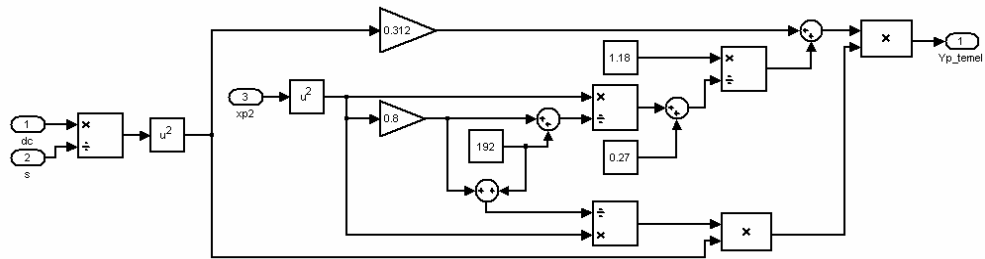
Şekil 4.22:  $x_s^2$  tespit bloğu



Şekil 4.23:  $Y_s$  Deri etkisi hesap bloğu



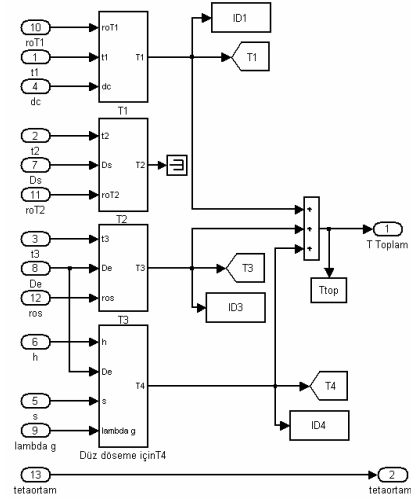
Şekil 4.24:  $x_p^2$  tespit bloğu



Şekil 4.25:  $Y_p$  Yaklaşım etkisi hesap bloğu

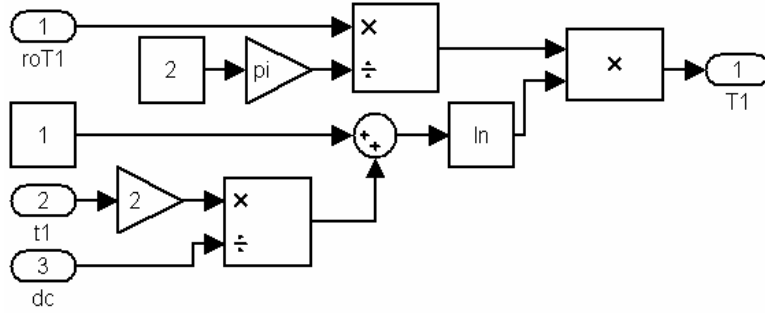




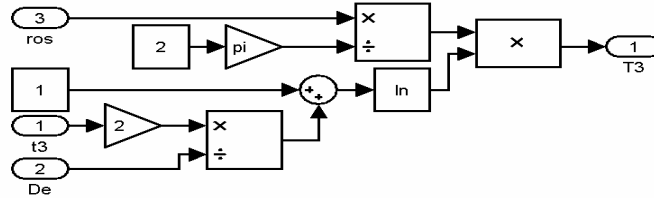


Şekil 4.28: Toplam ısı direnci bloğu

Bu blokta yer alan ısı dirençleri  $T_1$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  olmak üzere sırasıyla eşitlik (3.21)'e, (3.22)'ye ve (3.23)'e dayanılarak Şekil (4.29)'da, (4.30)'da ve (4.31)'de gösterilmiştir. Burada sistemde bulunmadığından dolayı  $T_2$  ısı direncine yine yer verilmemiştir.

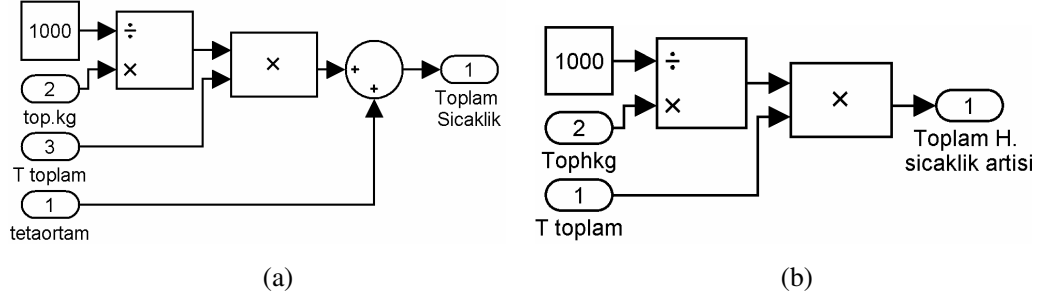


Şekil 4.29:  $T_1$  ısı direnci tespit bloğu



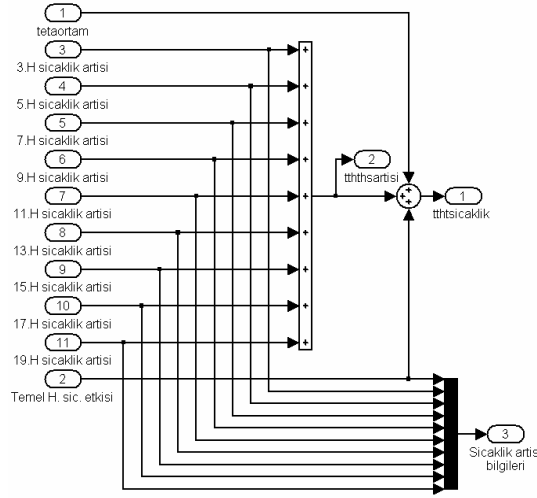
Şekil 4.30:  $T_3$  ısı direnci tespit bloğu





Şekil 4.33: Sıcaklık tespit yapıları a) Toplam sıcaklık b) Toplam harmonik sıcaklığı

Şekil (4.34)`de ise sıcaklık artış sonuçlarının düzenlendiği yapı görülmektedir.

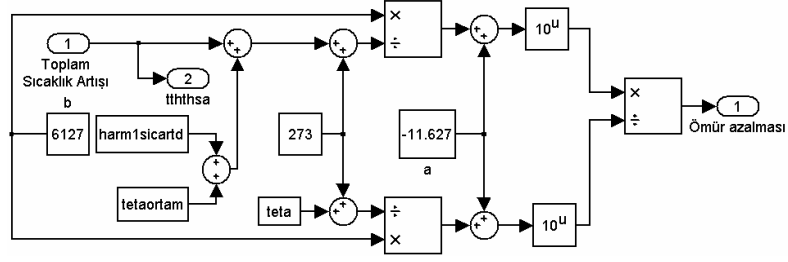


Şekil 4.34: Sonuçların düzenlenmesi

Ömür Arrhenius modeli temelinde eşitlik (5.1)`deki gibi verilmektedir [35].

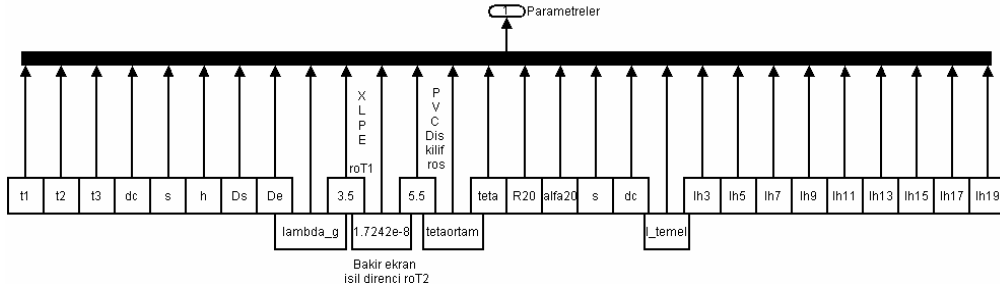
$$\log l(\theta) = a + \frac{b}{(\theta + 273)} \quad (5.1)$$

Eşitlik (5.1)`e dayanarak Şekil (4.35)`deki ömür modeli tasarlanmıştır. Modelin bu kısmında normal işletme sıcaklığındaki ve harmonikli ortamdaki ömür tespit edilip oranlanmakta ve böylece ömür azalması belirlenmektedir.



Şekil 4.35: Ömür modeli

Model için gerekli parametreler ise bir MATLAB m dosyası yardımıyla Şekil (4.36)'da görülen biçimdeki model parametreleri bloğuna gönderilerek modele aktarılmış olur.

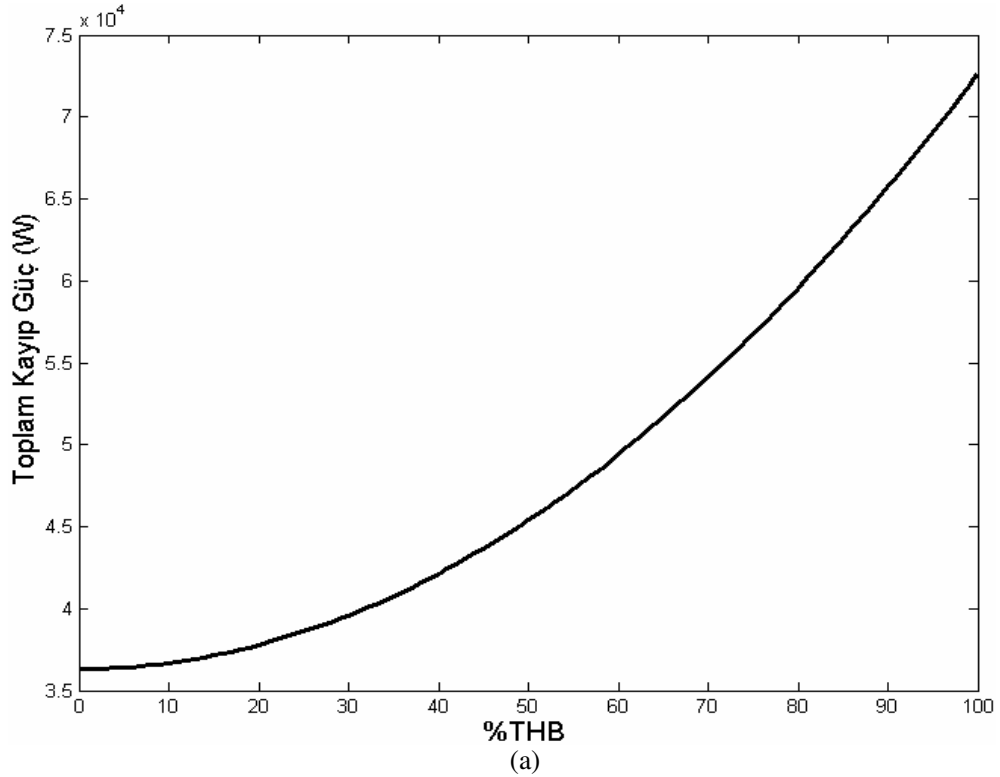


Şekil 4.36: Model parametreleri

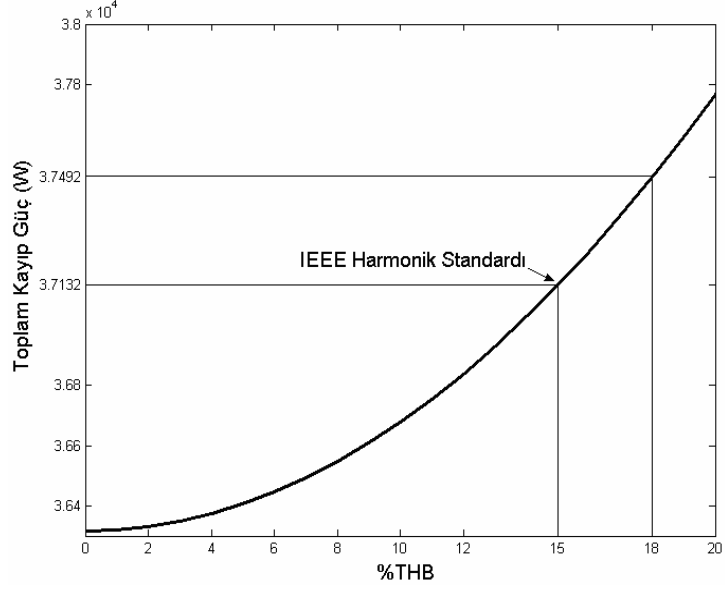
## BÖLÜM 5 . SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

### 5.1 34,5 KV luk Yeraltı Güç Kablosuna Harmoniklerin Etkisinin Belirlenmesi

Bir döküm fabrikasının endüksiyon fırınlarını besleyen OG hattında yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilen harmoniklerin birbirine göre oranları sabit tutularak %100 yük faktörü için elde edilen harmonik sırası ve sistemdeki kablonun parametreleri harmonik etki modeline uygulanmıştır. Modele uygulanan harmonik sırası EK-2 de verilmektedir. EK-2`deki harmonik sırasına göre %THB`ye bağlı olarak kablonun güç kaybı önemli ölçüde artmaktadır. Kayıp güç artışı, birincisi sistemin toplam kayıp gücü, ikincisi ise sistemin toplam harmonik kayıp gücü olmak üzere iki başlık altında, IEEE 519 standardıyla karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Buna göre Şekil (5.1)`de %THB`ye göre, sistemin toplam kayıp gücündeki artış görülmektedir



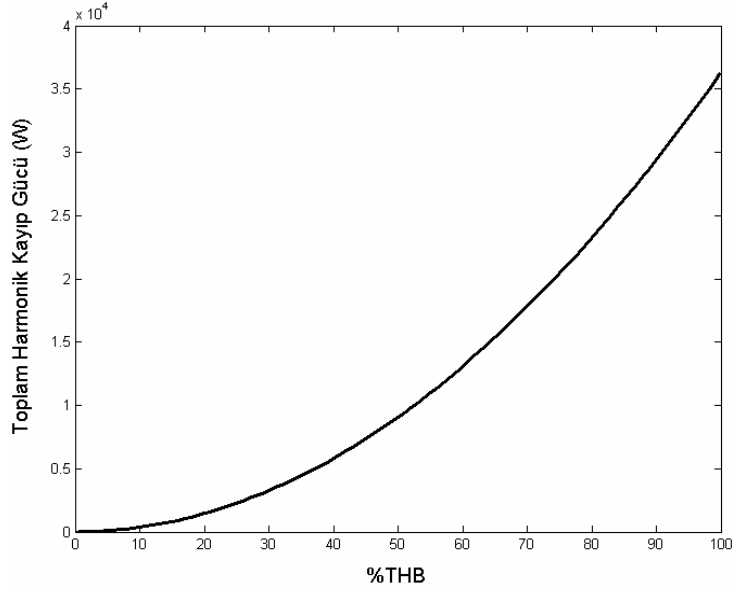
Şekil 5.1: %THB\_Toplam kayıp güç a) %0 – %100 THB b) %0 – %20 THB



(b)

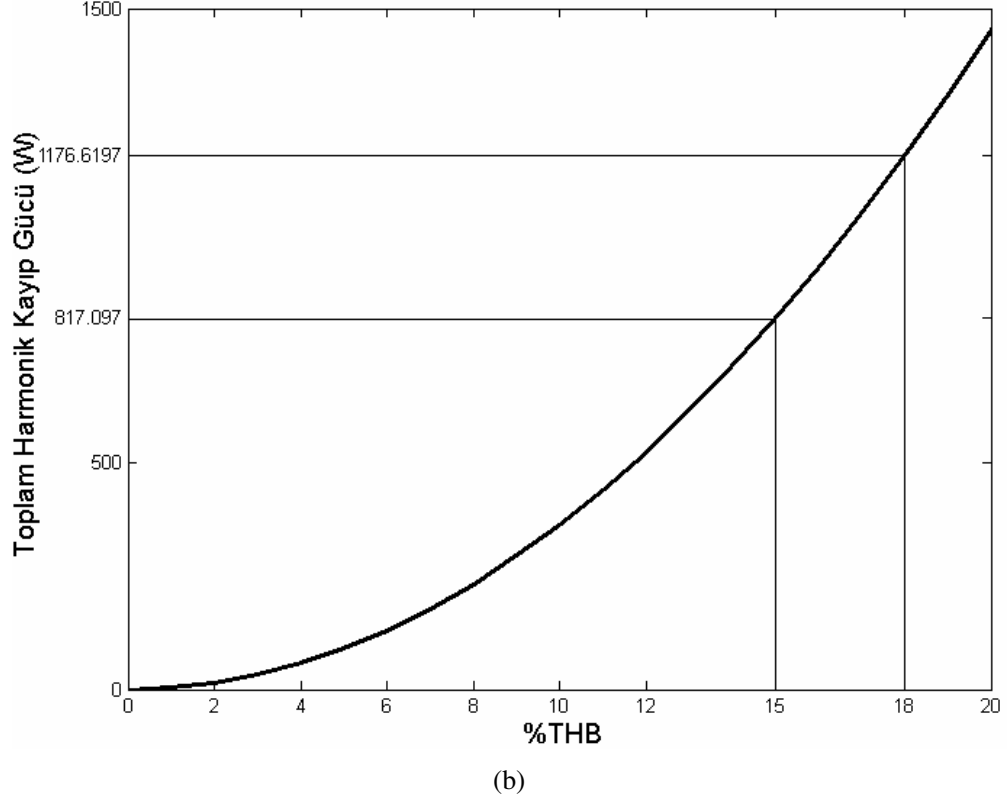
Şekil 5.1: %THB\_Toplam kayıp güç a) %0 – %100 THB b) %0 – %20 THB “(Devam)”

Şekil (5.1)`den anlaşıldığı gibi %THB`ye göre toplam kayıp güç üstel artmaktadır. Şekil (5.2)`de ise %THB`ye göre, toplam harmonik kayıp gücündeki artış görülmektedir.



(a)

Şekil 5.2: %THB\_Toplam harmonik kayıp gücü a) %0 – %100 THB b) %0 – %20 THB

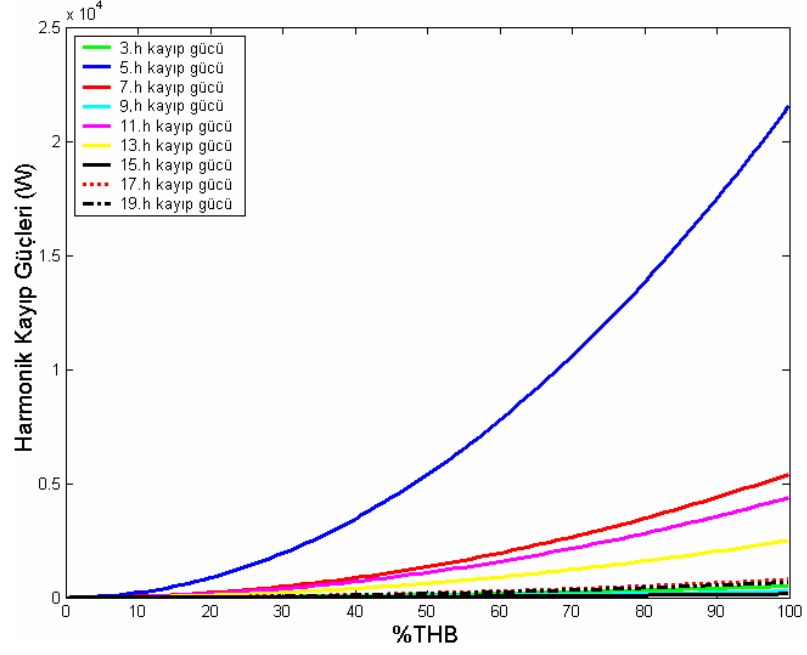


Şekil 5.2: %THB\_Top. Harmonik kayıp gücü a) %0 –%100THB b) %0 – %20THB  
“(Devam)”

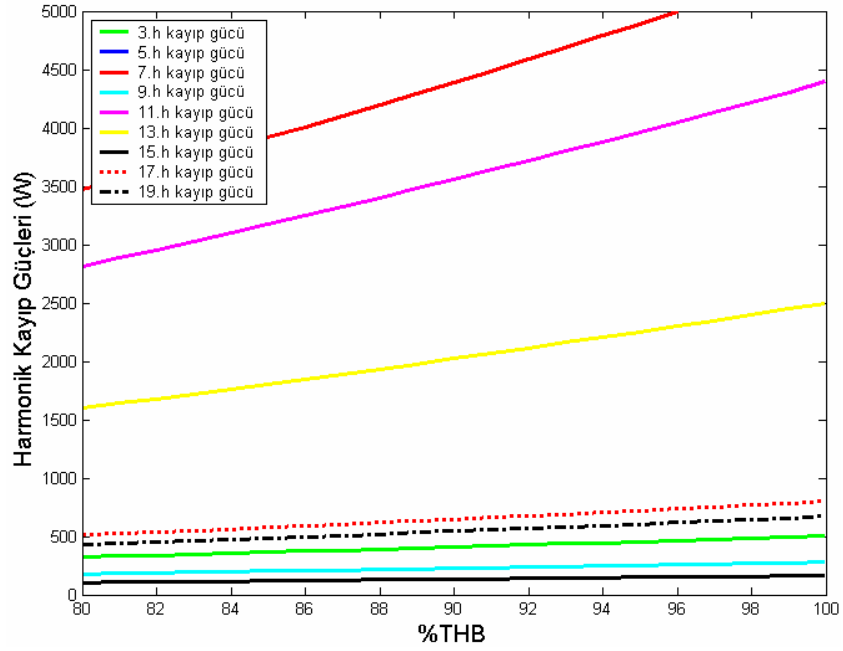
Toplam kayıp güçte meydana gelen artış %THB artışının ilk bölgelerinde önemsiz sayılabilese bile ilerleyen bölgelerde göz ardı edilemez bir durum meydana getirmektedir. Bu toplam güç kaybı her bir harmoniğin neden olduğu kayıpların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Harmoniklerin neden olduğu bu kayıp güç artışı da benzer şekilde üsteldir. %THB arttıkça harmoniklerin neden olduğu kayıplar da beklendiği gibi artmaktadır.

%THB`ye göre meydana gelen kayıp güç sayı değerleri de EK-3`te verilmektedir. Şekil (5.3)`te temel kayıp gücün üstüne gelen harmonik kayıp güçlerinin artış eğrileri görülmektedir. Ölçümü yapılan sistem için harmonik genlik değerine uygun olarak temel bileşenden sonra en çok kayba neden olan harmoniğin 5. harmonik olduğu, en az kayba neden olan harmoniğinde 15. harmonik olduğu görülmektedir.





(a)

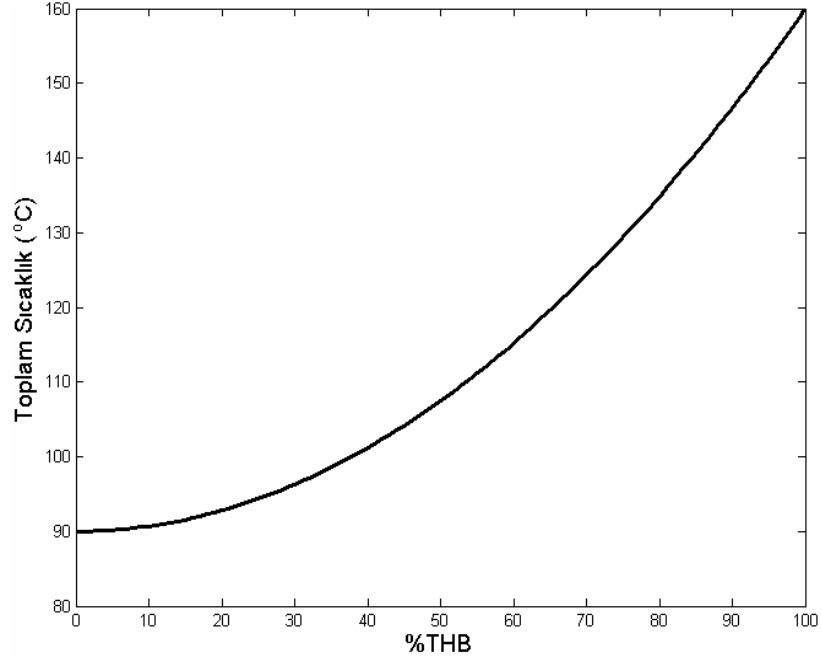


(b)

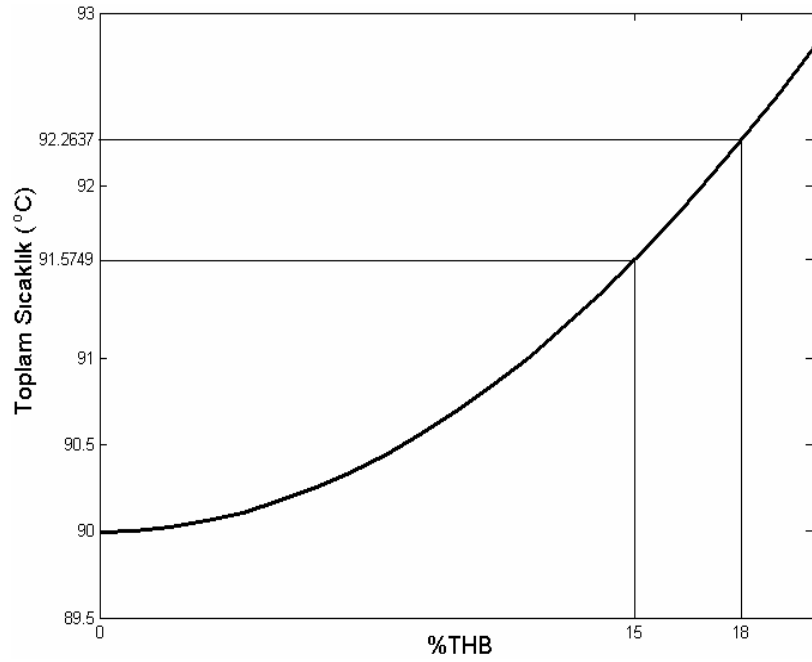
Şekil 5.3: %THB\_ Harmonik Kayıp Güçleri a) %0 –%100THB b) %0 – %20THB

Güç kaybı sıcaklık artışı olarak ortaya çıkmaktadır. Kayba bağlı olarak sistemin sınır sıcaklığı daha fazla artmaktadır. %THB`ye göre meydana gelen sıcaklık artış sayı

değerleri EK-4`te verilmektedir. Buna göre sistemin toplam sıcaklığındaki artış Şekil (5.4)`deki gibi olmaktadır.



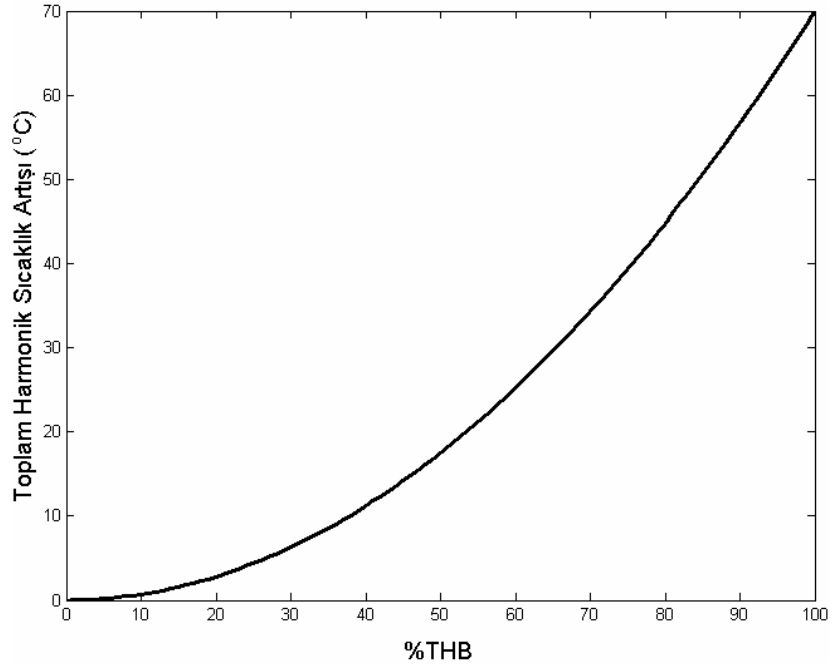
(a)



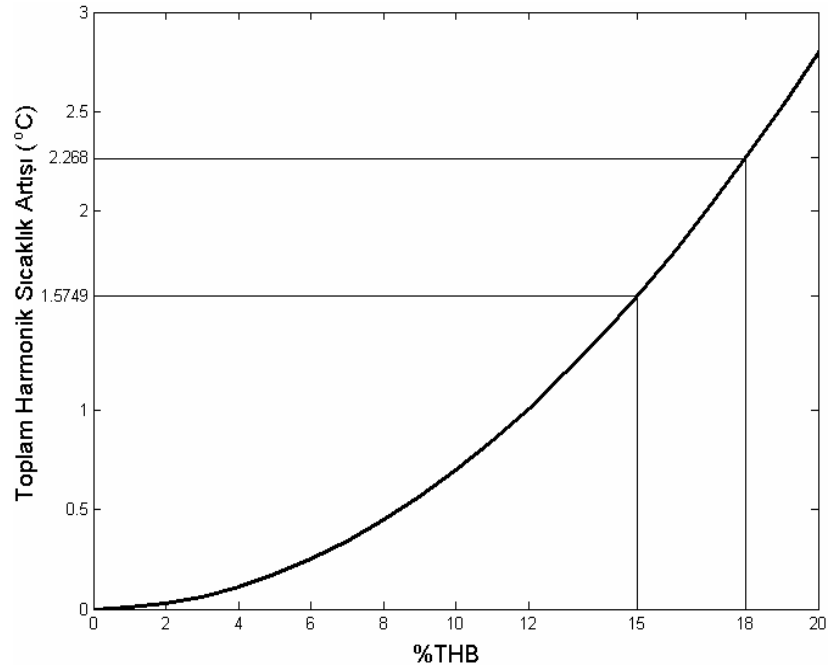
(b)

Şekil 5.4: %THB\_ Toplam sıcaklık a) %0 –%100THB b) %0 – %20THB

Bu artış; temel bileşenin neden olduğu sıcaklığın üzerine, harmonik sıcaklıklarının eklenmesiyle oluşmaktadır. Harmonik akımların neden olduğu sıcaklık artışı ise Şekil (5.5)`te görülmektedir.



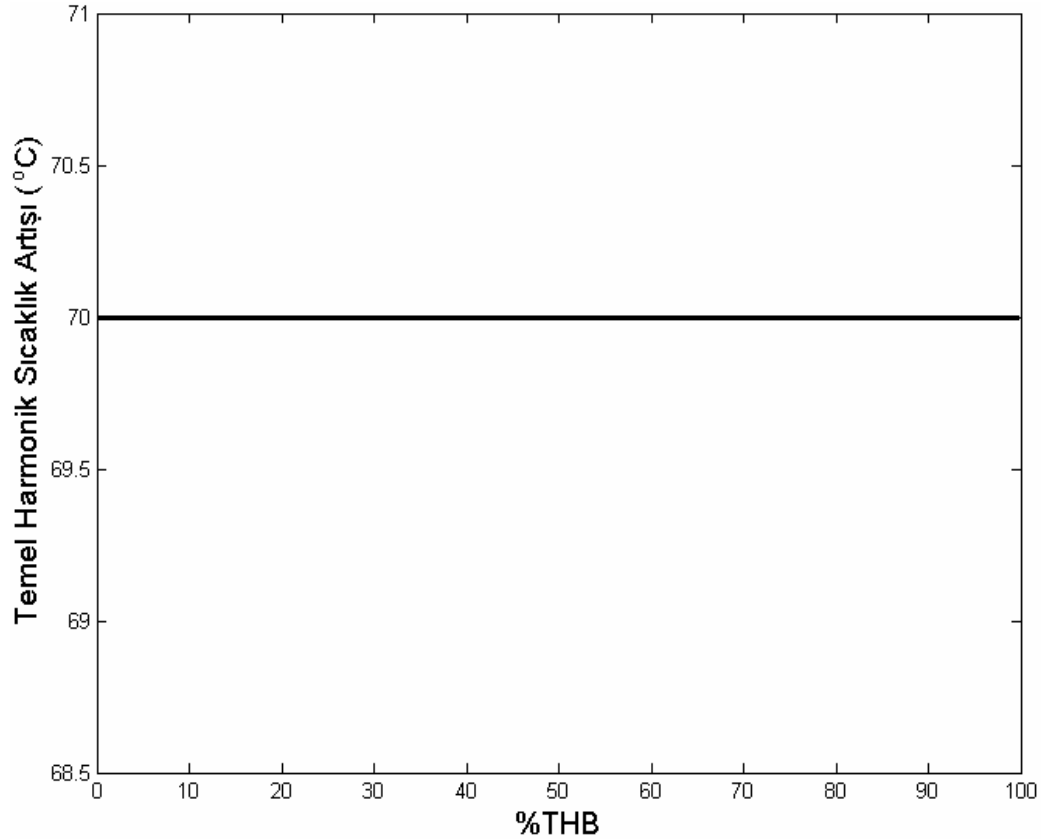
(a)



(b)

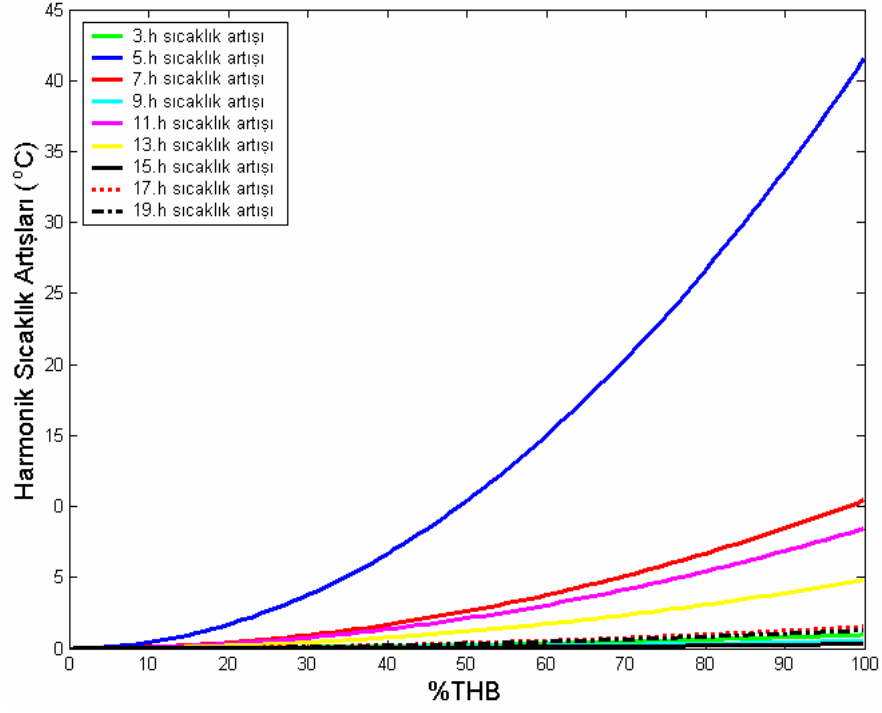
Şekil 5.5: %THB\_Toplam harmonik sıcaklık artışı a) %0 –%100THB b) %0 – %20THB

Şekil (5.4) ve (5.5)`ten görüldüğü gibi kayıp güçlere bağlı olduğundan sıcaklık artışları da üstel bir seyir izlemektedir. %THB`nin küçük değerleri önemli sıcaklık artışlarına neden olmazken, büyüyen %THB ciddi ısınmalara neden olmaktadır. Örneğin %2 THB`de harmonikler 0.027998 °C`lik bir sıcaklık artışına neden olurken %25 THB`de bu değer 4.3747 °C olmaktadır. Şekil (5.6)`da temel bileşenin neden olduğu sıcaklık artışı ve harmonik bileşenlerin neden olduğu sıcaklık artışları görülmektedir. Güç kaybına paralel olarak sistemi en çok 5. harmoniğin ısıttığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde sistemin toplam sıcaklığına en az etkiyi 15. harmoniğin yaptığı görülmektedir. Ölçüm yapılan sistem de 5. harmonik sıcaklığı yaklaşık olarak 1.3882 °C arttırmaktadır. IEEE 519 standardının %15THB`lik üst sınırında ise bu sıcaklık artışı 0.964 °C olmaktadır.

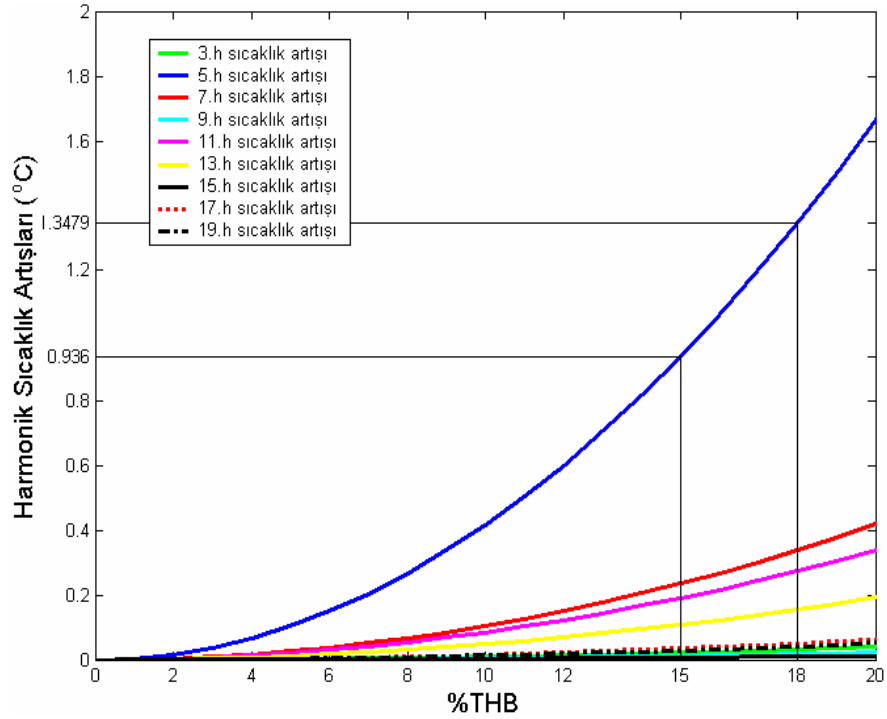


(a)

Şekil 5.6: %THB \_Harmonik sıcaklık artışları a) %THB \_Temel harmonik sıcaklığı b) %0 – %100THB c) %0 – %20THB ç) %80 – %100THB

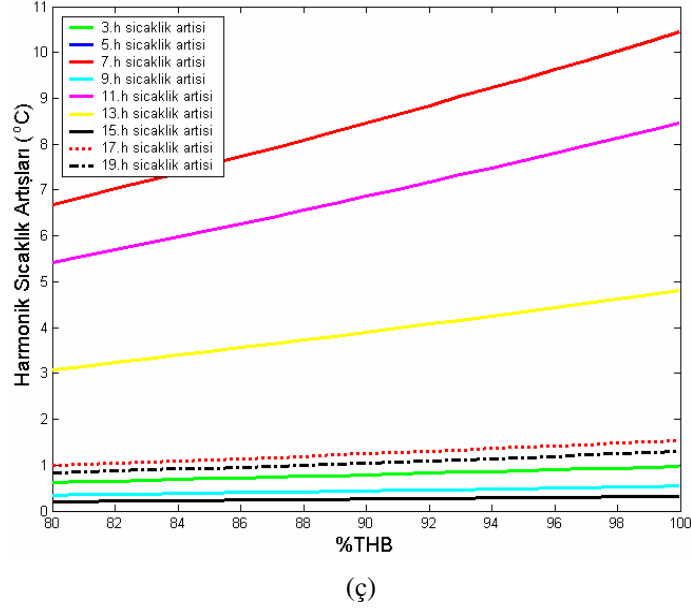


(b)



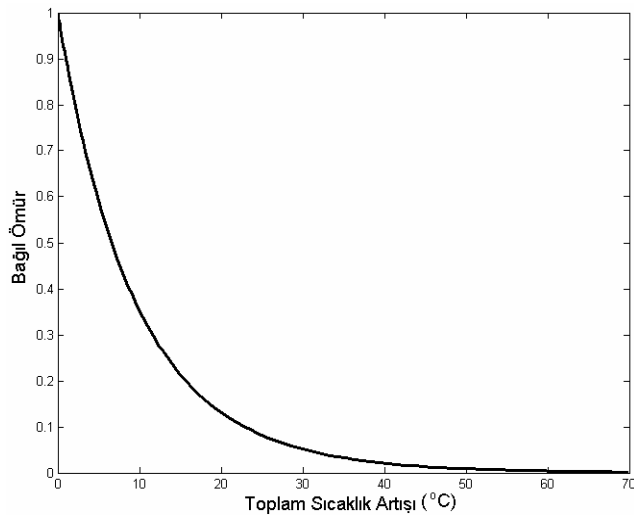
(c)

Şekil 5.6: %THB \_Harmonik sıcaklık artışları a) %THB \_Temel harmonik sıcaklığı b) %0 – %100THB c) %0 – %20THB ç) %80 – %100THB “(Devam)”

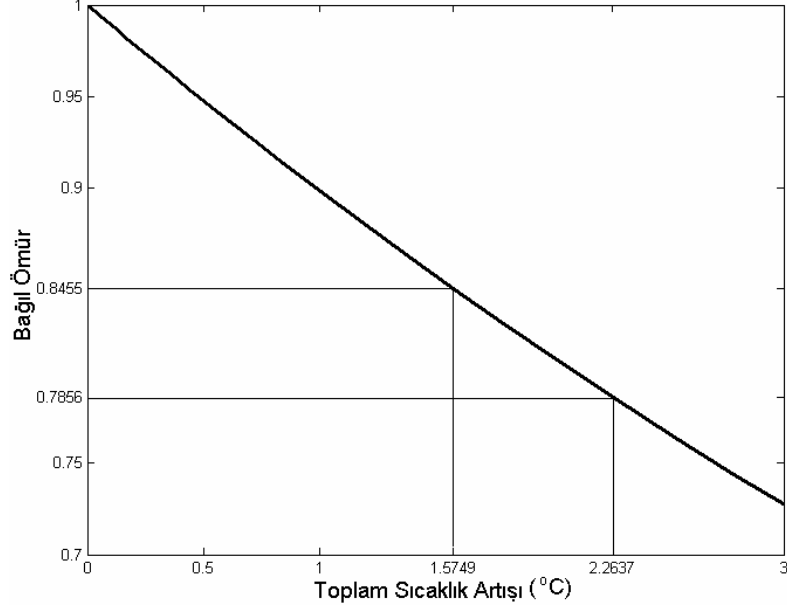


Şekil 5.6: %THB \_Harmonik sıcaklık artışları a) %THB \_Temel harmonik sıcaklığı b) %0 – %100THB c) %0 – %20THB ç) %80 – %100THB “(Devam)”

Harmonik akımların yarattığı ilave elektrik alan şiddetine ek olarak, sıcaklık artışı da eklendiğinde kablo ömrü olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle modelden elde edilen sıcaklık artış bilgileri Arrheneius ömür modeli temelinde değerlendirildiğinde Şekil (5.7) de görüldüğü gibi sistem sıcaklığında meydana gelen artışın kablo ömründe belirgin bir azalmaya yol açtığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.7: Toplam sıcaklık artışı \_Bağıl ömür a)0–70°C b)0–3°C



(b)

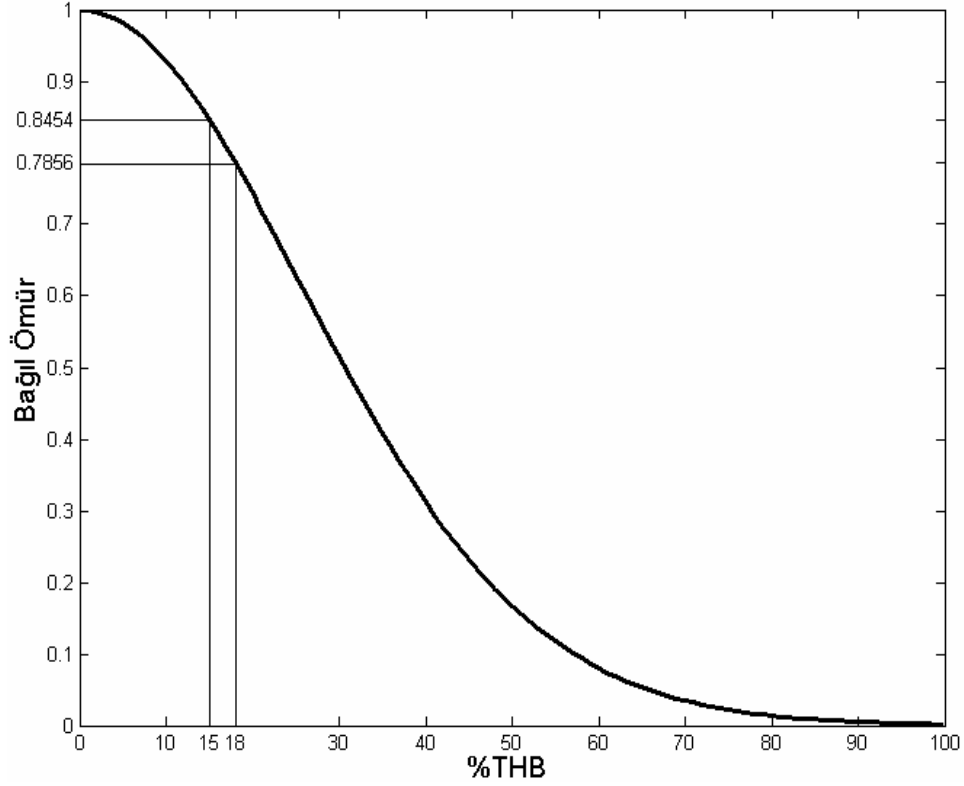
Şekil 5.7: Toplam sıcaklık artışı \_Bağıl ömür a)0– 70°C b)0–3°C“(Devam)”

Sıcaklık artışı kayıp güç artışına o da harmonik bozulmasına bağlı olduğu için %THB`ye göre kablo bağıl ömür ifade edilebilir. Bu duruma ilişkin sayı değerleri Tablo (5.1)` de verilmektedir.

Tablo 5.1: %THB, Bağıl ömür değerleri

%THB	B.Ömür	%THB	B.Ömür	%THB	B.Ömür	%THB	B.Ömür	%THB	B.Ömür
0	1	21	0.72057	42	0.27846	63	0.063104	84	0.0095179
1	0.99925	22	0.69812	43	0.26238	64	0.058139	85	0.0086306
2	0.99701	23	0.67541	44	0.24693	65	0.053517	86	0.0078215
3	0.99328	24	0.65251	45	0.23211	66	0.049218	87	0.0070842
4	0.98808	25	0.62951	46	0.21793	67	0.045224	88	0.0064127
5	0.98145	26	0.60648	47	0.20437	68	0.041518	89	0.0058018
6	0.9734	27	0.58348	48	0.19143	69	0.038084	90	0.0052463
7	0.96398	28	0.56057	49	0.17911	70	0.034905	91	0.0047415
8	0.95323	29	0.53784	50	0.1674	71	0.031965	92	0.0042831
9	0.94119	30	0.51532	51	0.15627	72	0.029249	93	0.0038672
10	0.92793	31	0.49308	52	0.14573	73	0.026742	94	0.00349
11	0.9135	32	0.47117	53	0.13575	74	0.024432	95	0.0031482
12	0.89797	33	0.44963	54	0.12632	75	0.022304	96	0.0028386
13	0.8814	34	0.42851	55	0.11742	76	0.020347	97	0.0025583
14	0.86387	35	0.40785	56	0.10903	77	0.018548	98	0.0023048
15	0.84545	36	0.38768	57	0.10113	78	0.016895	99	0.0020755
16	0.82621	37	0.36804	58	0.093718	79	0.01538	100	0.0018684
17	0.80623	38	0.34894	59	0.086758	80	0.01399		
18	0.7856	39	0.33042	60	0.080237	81	0.012718		
19	0.7644	40	0.31249	61	0.074133	82	0.011554		
20	0.74269	41	0.29517	62	0.068429	83	0.01049		

EK-2`deki harmonik sırasına göre %THB`ye bağılı olarak ömür değişimi Şekil (5.8)`de görölmektedir.



Şekil 5.8: %THB\_Bağılı ömür

Bu Şekilden %THB`ye göre ömrün üstel değiştiği %THB de ki önemsenmeyecek artışların kablo ömründe önemli ölçüde azalmaya yol açtığı anlaşılmaktadır.

Bu ömür kaybını önlemek için ampasitenin kablonun taşıdığı akımın harmonik bileşenleri de göz önünde bulundurulularak yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla her %THB değerinde ampasite azalma faktörü ve %0 THB`deki, kablonun normal ömründe kullanılabilmesi için olması gereken akım değeri bir arada Tablo (5.2)`de verilmiştir. Burada dikkati çeken %3 THB`ye kadar ampasitede kayda değer bir değişme olmazken, kısa devre akımının yük akımına oranının 300 olduğu 34,5 KV luk bir tesiste IEEE 519 standartlarına uygun olan %13lük THB geçildikten sonra ampasite düşme hızının arttığıdır. Bu standardın üst sınırı olan %15



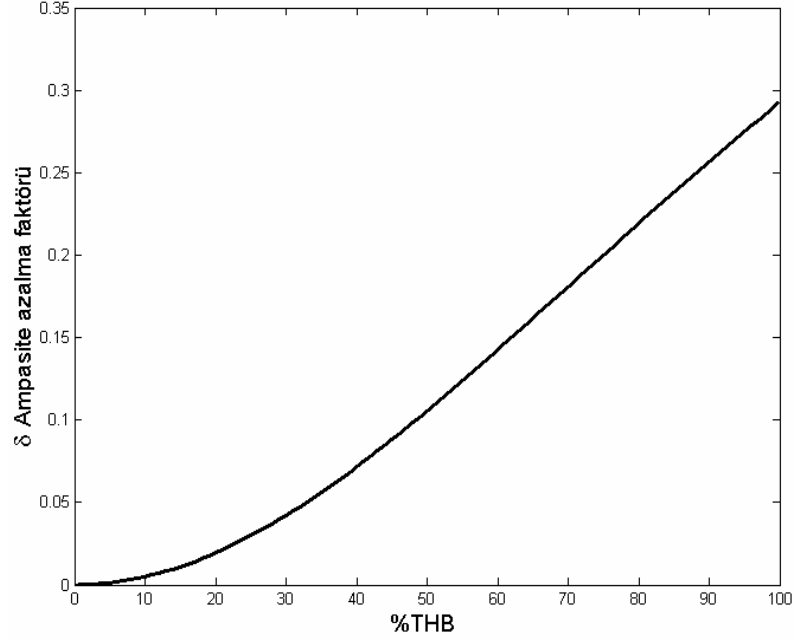
THB`de kablo ömrü tam yüklü sürekli rejimde çalışan bir tesis için 0.84545 katına inmekte yani yaklaşık olarak %15 azalmaktadır.

Tablo 5.2: Ampasite azalma faktörü, ampasite değerleri

%	aaf	I	%	aaf	I	%	aaf	I	%	aaf	I
0	0	650	26	0.0322	629.1	52	0.1128	576.7	78	0.2115	512.5
1	5E-05	650	27	0.0346	627.5	53	0.1164	574.3	79	0.2153	510
2	0.0002	650	28	0.037	625.9	54	0.1201	571.9	80	0.2191	507.6
3	0.00045	650	29	0.0396	624.3	55	0.1238	569.5	81	0.2229	505.1
4	0.0008	649	30	0.0422	622.6	56	0.1275	567.1	82	0.2267	502.6
5	0.00125	649	31	0.0448	620.9	57	0.1312	564.7	83	0.2305	500.2
6	0.0018	649	32	0.0476	619.1	58	0.135	562.3	84	0.2343	497.7
7	0.00244	648	33	0.0504	617.3	59	0.1387	559.8	85	0.2381	495.3
8	0.00318	648	34	0.0532	615.4	60	0.1425	557.4	86	0.2418	492.8
9	0.00403	647	35	0.0561	613.5	61	0.1463	554.9	87	0.2456	490.4
10	0.00496	647	36	0.0591	611.6	62	0.1501	552.4	88	0.2493	488
11	0.006	646	37	0.0621	609.6	63	0.1539	550	89	0.253	485.6
12	0.00712	645	38	0.0652	607.6	64	0.1577	547.5	90	0.2567	483.1
13	0.00834	645	39	0.0683	605.6	65	0.1616	545	91	0.2604	480.7
14	0.00966	644	40	0.0715	603.5	66	0.1654	542.5	92	0.2641	478.4
15	0.01106	643	41	0.0747	601.4	67	0.1692	540	93	0.2677	476
16	0.01256	642	42	0.078	599.3	68	0.1731	537.5	94	0.2714	473.6
17	0.01414	641	43	0.0813	597.1	69	0.1769	535	95	0.275	471.3
18	0.01582	640	44	0.0847	595	70	0.1808	532.5	96	0.2786	468.9
19	0.01758	639	45	0.0881	592.8	71	0.1846	530	97	0.2822	466.6
20	0.01942	637	46	0.0915	590.5	72	0.1885	527.5	98	0.2858	464.2
21	0.02135	636	47	0.095	588.3	73	0.1923	525	99	0.2894	461.9
22	0.02336	635	48	0.0985	586	74	0.1962	522.5	100	0.2929	459.6
23	0.02545	633	49	0.102	583.7	75	0.2	520			
24	0.02761	632	50	0.1056	581.4	76	0.2038	517.5			
25	0.02986	631	51	0.1092	579	77	0.2077	515			

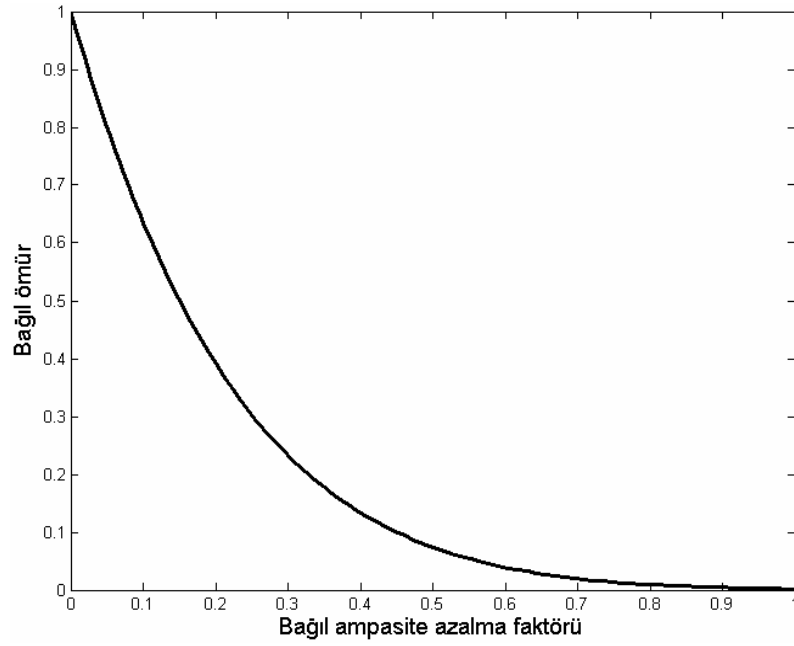
Bu %15 ömür kaybı dikkate alındığında yeraltı güç sistemleri için bu standart değerinin gözden geçirilmesi, yeraltı güç sistemleri için ampasiteyi etkileyen diğer etkenler de göz önüne alınarak ayrı bir harmonik standardının geliştirilmesi düşünülebilir. Çünkü bu değer 30 yıl ömür biçilmiş böyle bir tesisin 25 yılda devre dışı kalması olasılığını doğurmaktadır. Bu olasılık sadece kalitesiz enerjinin neden olduğu bir olasılık olup kablo ömrüne etkiyen başka etkenlerinde varlığı göz önüne alındığında 25 yıl içerisinde her an bir arıza, beklenebilir. İşletmeci açısından bakıldığında apansızın ortaya çıkan bu arıza maliyeti yüksek olan bu tesisin yeniden yapılması veya arızasının giderilmesi ve bu tesisin beslediği sistemlerin uzun süre devre dışı kalması halini doğuracağından işletmeciyi altından kalkılamaz mali zarara sokabilir. Yer altı güç kabloları için bu harmonik standardının ampasite düşme hızının hala yavaş olduğu ve bağlı ömür değerinin 0.94119 olduğu % 9 seviyesine ya da bağlı ömür değerinin 0.92793 olduğu % 10 seviyesine çekilmesi önerilebilir.

Tablo (5.2)`den yola çıkılarak Şekil (5.9) çizilmiştir.

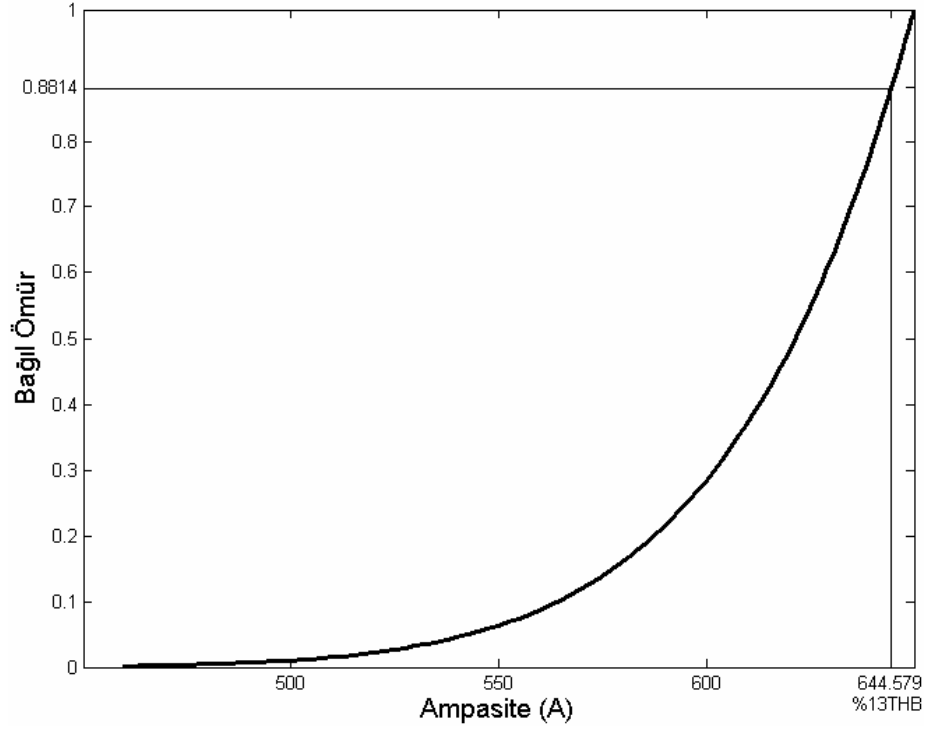


Şekil 5.9: %THB\_ δ Ampasite azalma faktörü

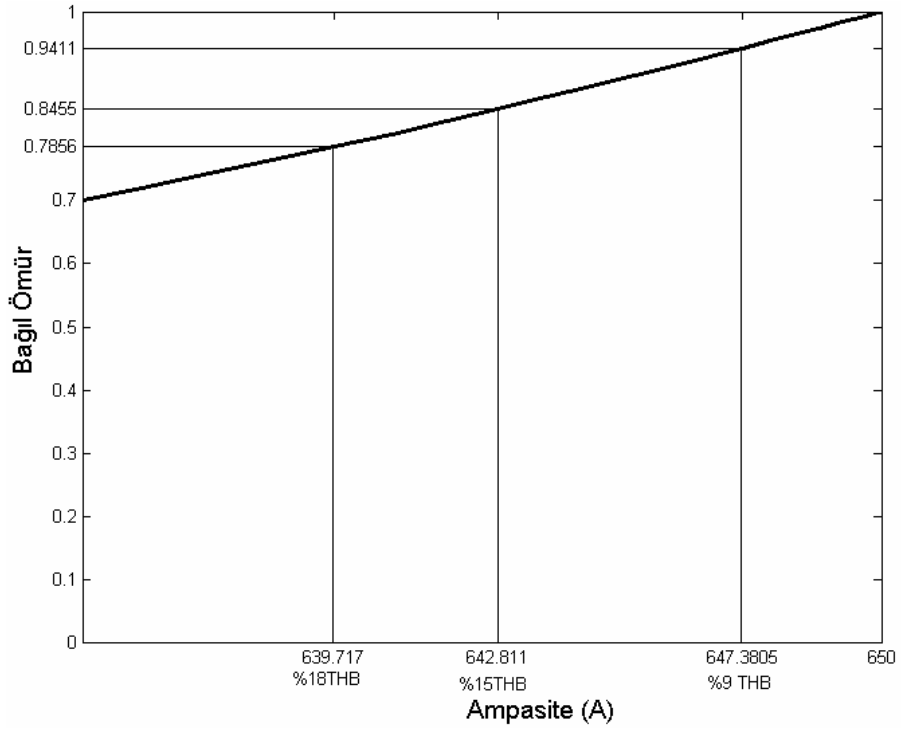
Bağlı ömrün, harmoniklere bağlı olarak değişen ampasiteye göre değişimi Şekil (5.10)`da görülmektedir. Harmoniklerle değişen ampasitenin gerçek değerine göre bağlı ömür grafiği de Şekil (5.11)`de görülmektedir.



Şekil 5.10: Bağlı ampasite azalma faktörü\_Bağlı ömür



(a)



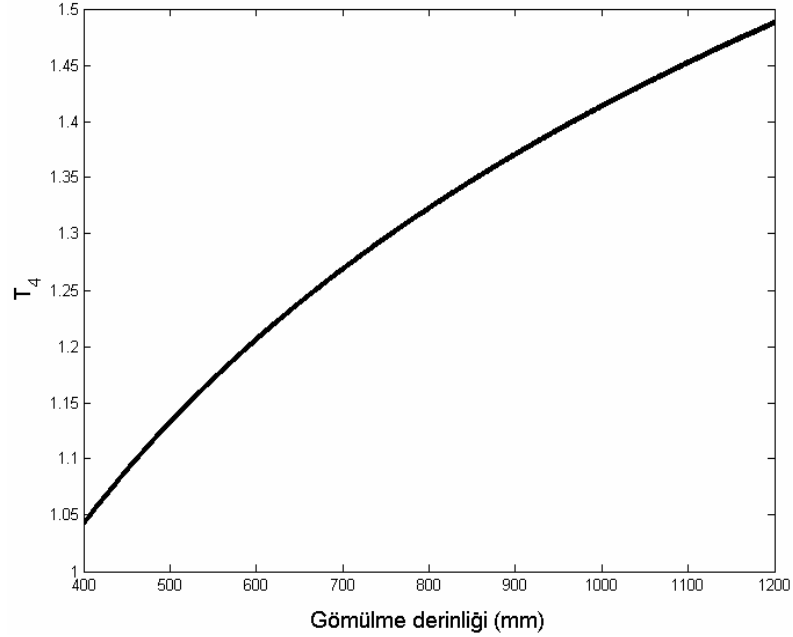
(b)

Şekil 5.11: Ampasite\_Bağlı ömür a) 0 – 650 A b) 635 – 650 A

Ölçüm yaptığımız sistem dikkate alındığında %18 THB`de harmoniklerin 1176.6 W`lık ilave bir kayıp meydana getirerek toplam kayıp gücü 37492 W`a çıkardığı görülmektedir. Bu da sıcaklığın 2.2637 °C artarak 92.2637 °C`ye ulaşmasına neden olmaktadır. Sıcaklıkta meydana gelen bu artış ise kablo ömrünü 0.7856 katına indirmekte yani ömrü yaklaşık olarak %21 azaltmaktadır.

### 5.1.1 Harmonikli ortamda 34,5 KV`luk yeraltı güç kablosuna, kablo gömülme derinliğinin etkisi

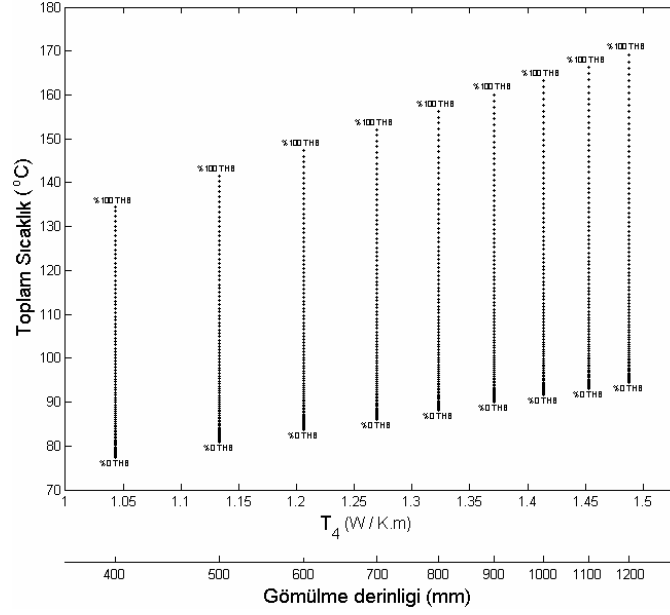
Kablonun gömülme derinliği kablo ampasitesi ve ömrü için önemli bir parametredir. Özellikle harmonikli bir ortam için gömülme derinliği daha da bir önem kazanmaktadır. Kablonun gömülme derinliğinin her %THB değerinde 400 mm`den 1200 mm`ye kadar değiştirilmesi durumundaki  $T_4$  ısıl direncinin kaydettiği değişiklik Şekil (5.12)`de görülmektedir.



Şekil 5.12: Kablonun gömülme derinliği\_  $T_4$

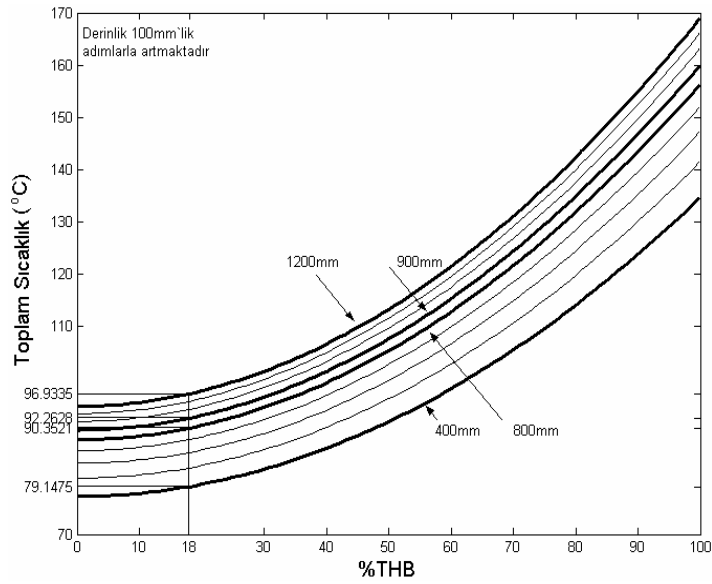
$T_4$  ısıl direncinin böylesine değişmesi kablo daha derine gömüldükçe toplam sıcaklığı arttırmaktadır. Şekil (5.13)`te  $T_4$  ısıl direncinin gömülme derinliğine göre

değişimi ve bu değişim ile birlikte %THB`ye göre de sıcaklığı hangi seviyeye getirdiği görülmektedir.



Şekil 5.13: T<sub>4</sub>\_Derinlik\_%THB\_Toplam sıcaklık

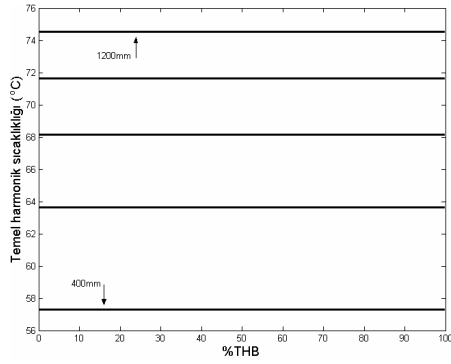
Toplam sıcaklığı %THB`ye göre her derinlik için aynı eksen takımında çizdiğimizde sıcaklığın nasıl değiştiği Şekil (5.14)`te görülmektedir.



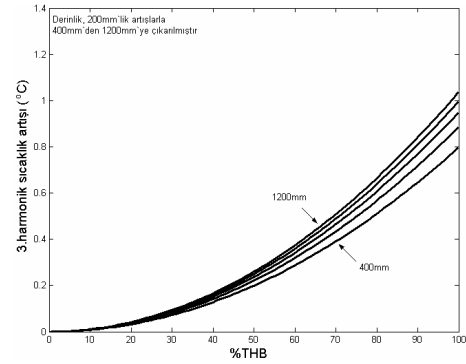
Şekil 5.14: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Toplam sıcaklık

Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi, kurulum aşamasında ark fırını veya endüksiyon fırını gibi yüklerin kullanılacağı yani %THB'nin fazla olacağı tahmininde bulunan tesislerde kablo gömülme derinliği azaltılarak  $T_4$  ısıl direncinin düşürülmesi buna bağlı olarak da kablo sıcaklığının normal değerinde tutulması mümkün olabilir.

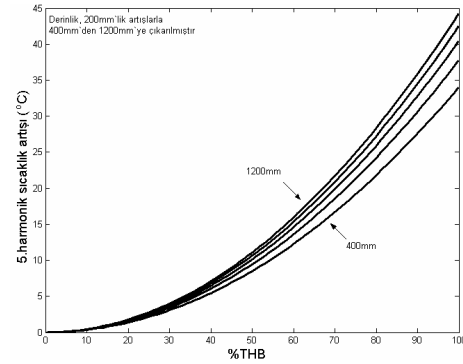
Sıcaklık artışına harmoniklerin etkisi Şekil (5.15)'te tek tek görülmektedir.



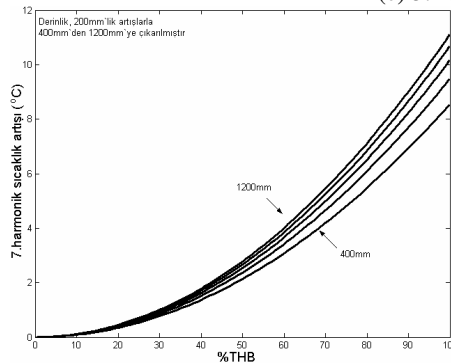
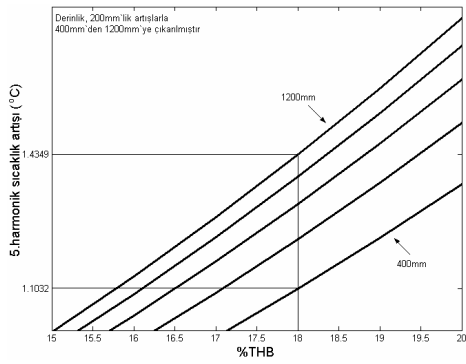
(a) 1.Harmonik sıcaklık artışı



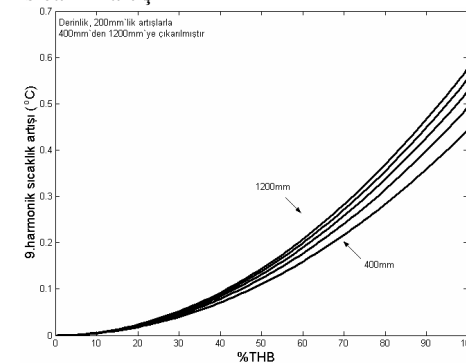
(b) 3.Harmonik sıcaklık artışı



(c) 5.Harmonik sıcaklık artışı

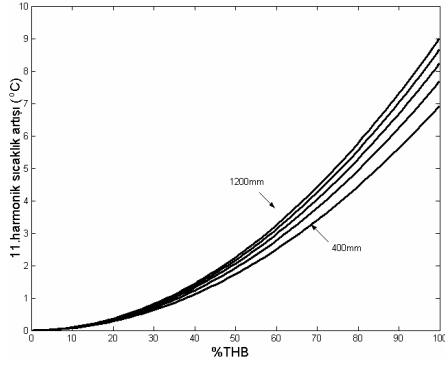


(ç) 7.Harmonik sıcaklık artışı

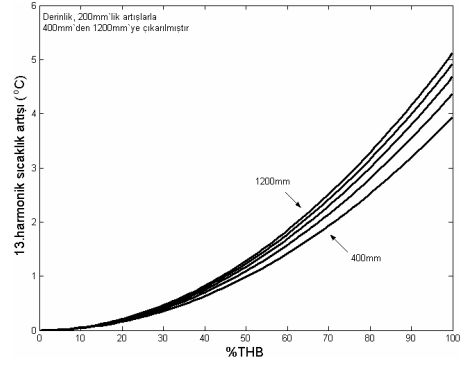


(d) 9.Harmonik sıcaklık artışı

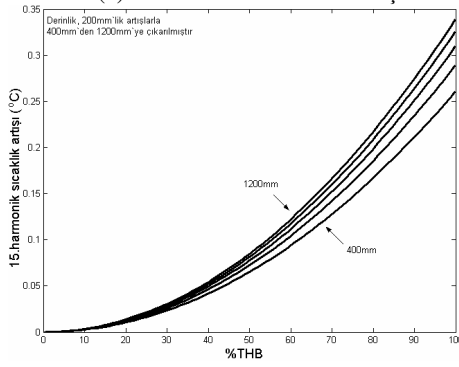
Şekil 5.15: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Tek tek harmonik sıcaklık artışı



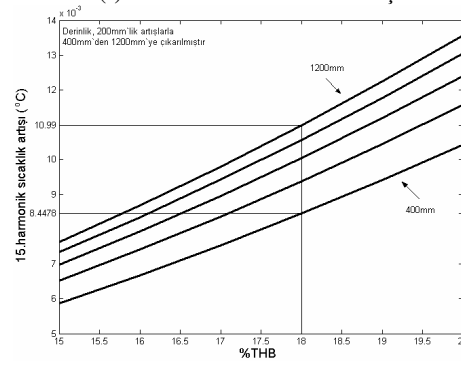
(e) 11.Harmonik sıcaklık artışı



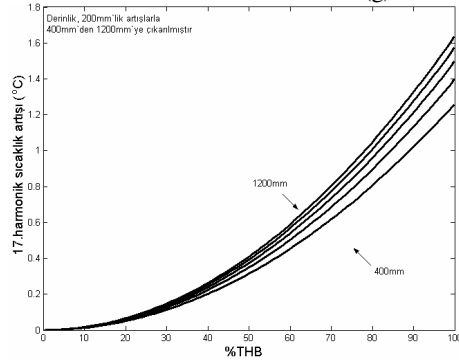
(f) 13.Harmonik sıcaklık artışı



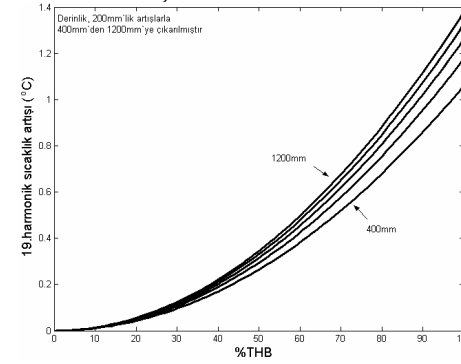
(g) 15.Harmonik sıcaklık artışı



(h) 19.Harmonik sıcaklık artışı



(ğ) 17.Harmonik sıcaklık artışı

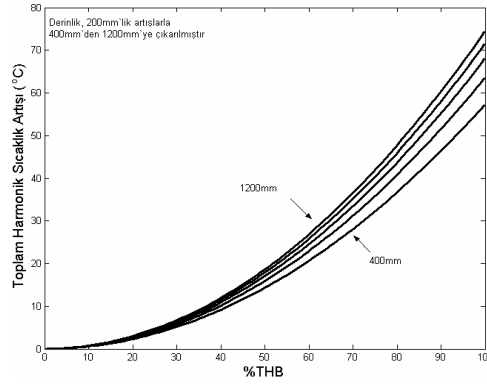


Şekil 5.15: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Tek tek harm.sıc.art.“(Devam)”

Kablo sıcaklığını beklendiği gibi gömülme derinliği ve harmonik genişliğiyle doğru orantılı olarak en çok 5. harmoniğin, en az 15. harmoniğin arttırdığı görülmektedir. Şekil (5.15c) ve Şekil (5.15g) incelendiğinde 5. harmoniğin %18 THB`de ve 1200 mm`de yaklaşık olarak sıcaklığı 1.4349 °C arttırdığı görülürken, aynı harmonik bozulma ve derinlikte 15. harmoniğin sıcaklığı yaklaşık olarak  $10.99 \cdot 10^{-3}$  °C arttırdığı görülebilmektedir. Aynı %THB değerinde kablunun 400 mm derinliğe gömülmesi halinde 5. harmoniğin neden olduğu sıcaklık artışı yaklaşık olarak 1.1032

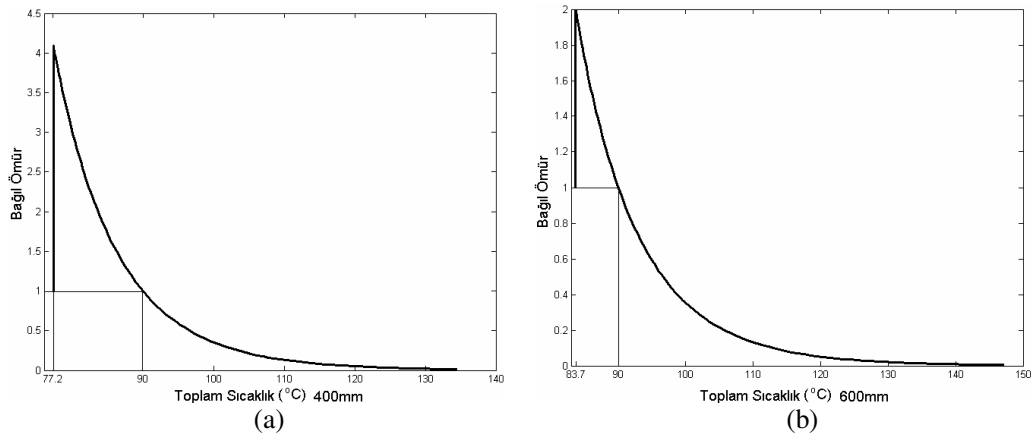
$^{\circ}\text{C}$ 'ye düşerken, 15. harmoniğin neden olduğu sıcaklık artışı yaklaşık olarak  $8.4478 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düştüğü görülmektedir. Burada; kablo gömülme derinliğinin azaltılmasının harmonik etkilerini azaltmada etkin olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil (5.16)'da harmoniklerin derinlik etkisini de gösterecek şekilde neden oldukları sıcaklık artışı toplam olarak görülmektedir.



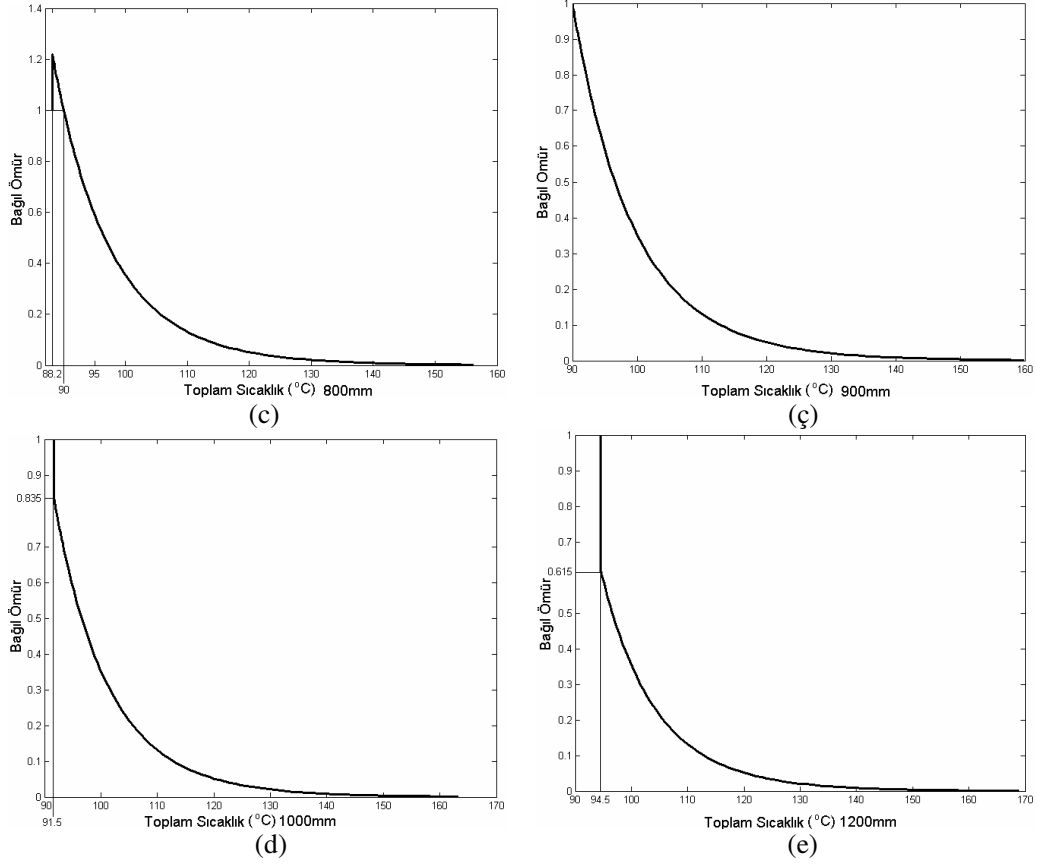
Şekil 5.16: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Toplam harmonik sıcaklık artışı

Sıcaklık artışı ömre etki edeceğinden derinlik etkisini de gösterecek şekilde toplam sıcaklık bağıl ömür ilişkisi Şekil (5.17)'deki gibi ifade edilebilir. Buradan kablo gömülme derinliğinin kablo ömrüne olan etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 5.17: Toplam sıcaklık\_Bağıl ömür a) 400mm b) 600mm c) 800mm ç) 900mm d) 1000mm e) 1200mm





Şekil 5.17: Toplam sıcaklık \_Bağıl ömür a) 400mm b) 600mm c) 800mm ç) 900mm d) 1000mm e) 1200mm “(Devam)”

Şekil (5.17a)`da; kablonun 400 mm`ye gömülmesi halinde ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 4 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 12.8 °C arttırılabileceği görülmektedir. Bu da kablo sıcaklığının harmoniklerden dolayı 12.8 °C arttırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak %42.5 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

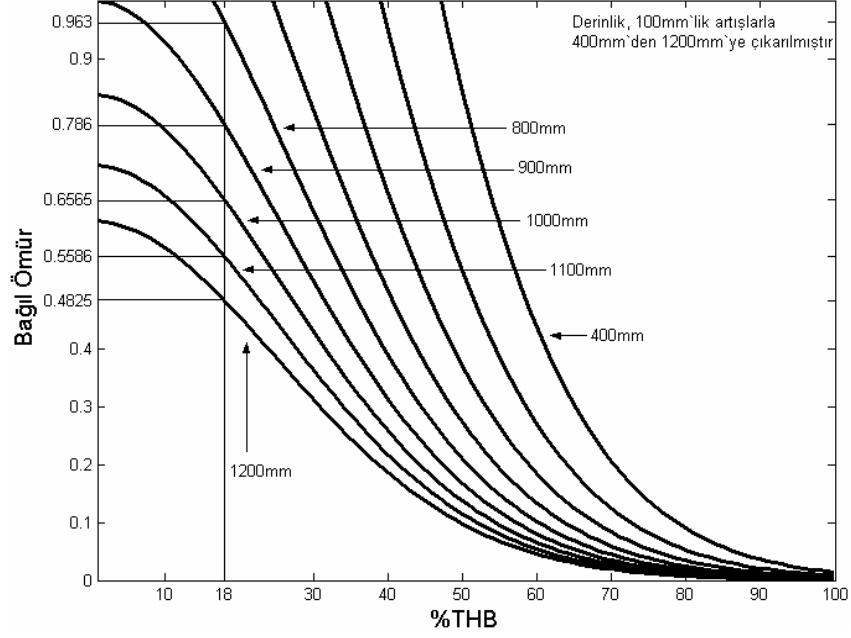
Şekil (5.17b)`de; kablonun 600 mm`ye gömülmesi halinde ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 2 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 6.3 °C arttırılabileceği görülmektedir. Bu da kablo sıcaklığının harmoniklerden dolayı 6.3 °C arttırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak %30 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

Şekil (5.17c)`de; kablonun 800 mm`ye gömülmesi halinde ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 1.2 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 1.8 °C arttırılabileceği görülmektedir. Bu da kablo sıcaklığının harmoniklerden dolayı 1.8 °C arttırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak %16 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

Şekil (5.17d)`de; kablonun 1000 mm`ye gömülmesi halinde ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 0.835 katına indiği, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için 1.5 °C aşağı çekilmesi gerektiği görülmektedir. Bu da harmoniksiz ortamda dahi kablo ampasitesinin azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Yani bu kablo yaklaşık olarak %14 THB koşulunda çalışıyormuş gibi düşünülerek ampasitesinin 644 A indirilmesi gerekmektedir. Bu kablo ömrü azalmaksızın bu şekilde kullanılabilir.

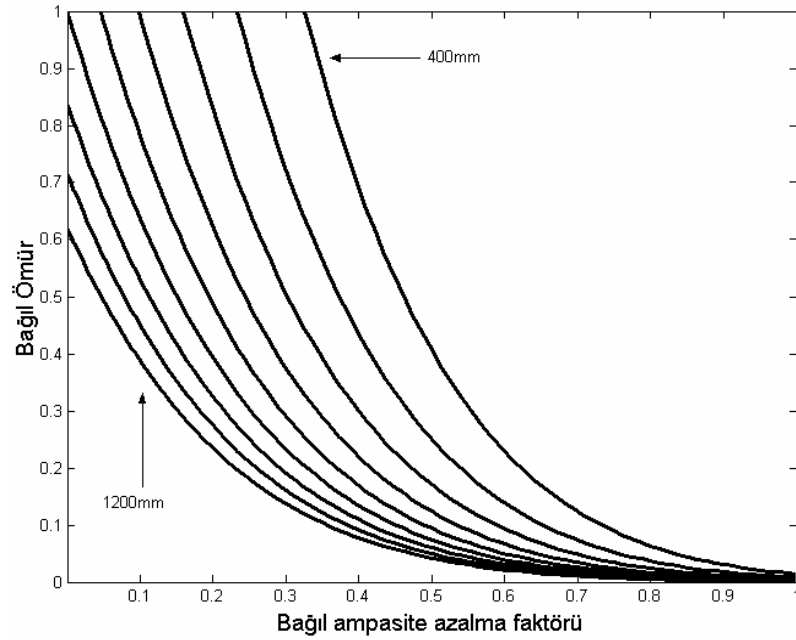
Şekil (5.17d)`de; kablonun 1200 mm`ye gömülmesi halinde ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 0.615 katına indiği, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için 4.5 °C aşağı çekilmesi gerektiği görülmektedir. Bu da harmoniksiz ortamda dahi kablo ampasitesinin azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Yani bu kablo yaklaşık olarak %25.5 THB koşulunda çalışıyormuş gibi düşünülerek ampasitesinin 630 A indirilmesi gerekmektedir. Bu kablo ömrü azalmaksızın bu şekilde kullanılabilir.

Bu sıcaklık artışları harmoniklerin sonucudur. %THB`ye göre bağıl ömür değişimi Şekil (5.18)`de görülmektedir. Bu şekilden anlaşılmaktadır ki; harmonikli ortamda kablo gömülme derinliğini azaltmak bir ömür kazancı sağlamaktadır. Ölçüm yapılan sistemdeki %18`lik THB`de derinlik 1200 mm`den 800 mm`ye indirildiğinde bağıl ömür 0.4825`ten 0.963`e çıkmaktadır. Aynı sistemde derinliğin 900 mm`den 800 mm`ye indirilmesi bağıl ömrü 0.7856`dan 0.963`e çıkarmaktadır. Tesis maliyetinin bu denli yüksek olduğu bir sistemde bu artış dikkate değer olarak görülmektedir.

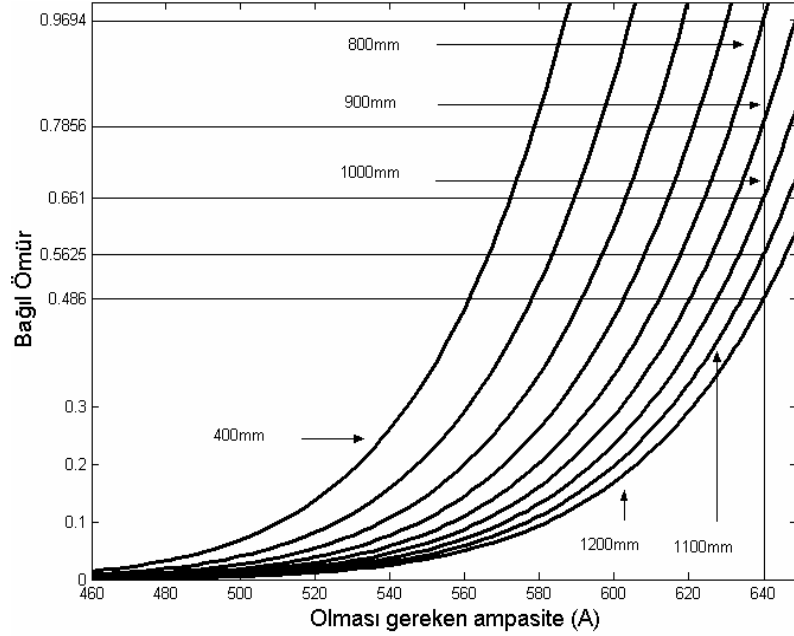


Şekil 5.18: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde %THB\_ Bağıl ömür

Kablo derinliğine göre, tesisin en uygun süre işletimde kalabilmesi için uygulanması gereken ampasite azalma faktörü de değişim göstermektedir. Bağıl ampasite azalma faktörüne göre bağıl ömür Şekil (5.19)'da, ampasiteye göre bağıl ömür de Şekil (5.20)'de görülmektedir.



Şekil 5.19: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde Bağıl ampasite azalma fak.\_ Bağıl ömür



Şekil 5.20: Derinlik etkisini de gösterecek şekilde Ampasite\_Bağıl ömür

Bu grafikte aynı bağıl ömür için yüzeye yakın gömülmüş kablonun daha çok akım taşıyabildiği görülebilmektedir. Ampasitesi 640 A'e düşürülmesi gereken bir kablonun, bu işlem yapılmadığı takdirde ki bağıl ömrü 1200 mm derinlikte 0.486 iken, kablo 800 mm derinliğe çıkarıldığında kablo bağıl ömrünün 0.9694 değerine yükseldiği görülmektedir.

900 mm`de kablo sıcaklığının 92,2637 °C olduğu ölçüm yaptığımız sistem dikkate alındığında, THB`nin %18 olduğu 1200 mm derinlikteki bir kablonun sıcaklığı 96.9335 °C iken aynı kablonun 800 mm derinlikteki sıcaklığı 90.3521 °C olmaktadır. Yani kablo 1200 mm yerine 800 mm derinliğe gömülürse, kablo sıcaklığı izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına oldukça yaklaşmaktadır. Derinliğin azaltılmasıyla sıcaklığın izin verilebilir en yüksek işletme değeri olan 90 °C ve altına ineceği kolaylıkla anlaşılabilir. Bu da kablonun tasarlanan süre boyunca kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

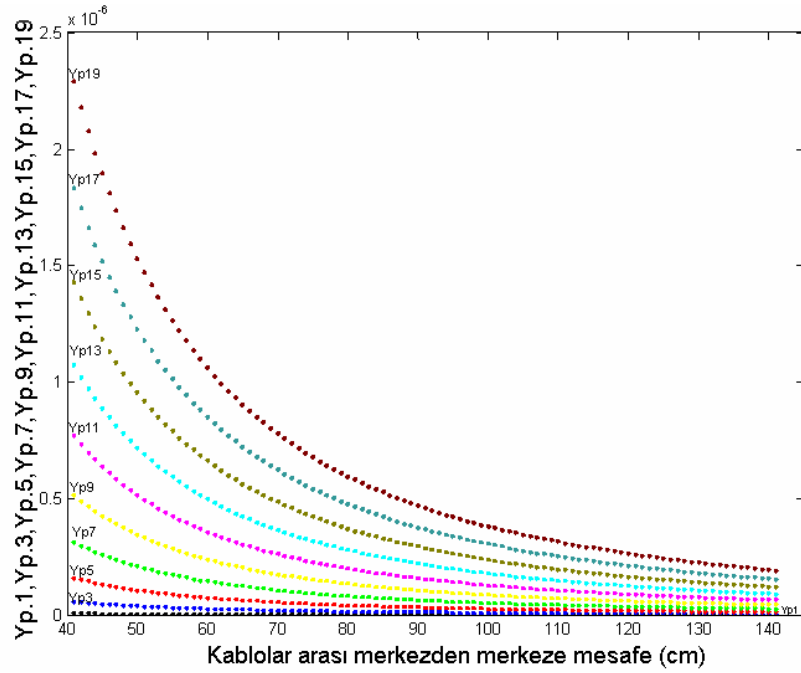
### 5.1.2 Harmonikli ortamda 34,5 KV`luk yeraltı güç kablosuna, merkezden merkeze kablolar arası mesafenin ( M.M.K.A.M ) etkisi

Sistemdeki harmoniklerin varlığına ek olarak kabloların birbirleri arasındaki mesafe de kablo sıcaklığını etkileyen diğer bir öge olmaktadır.

Buradan itibaren “mesafe” sözü kullanılırken “merkezden merkeze kablolar arası mesafe” kastedilmektedir.

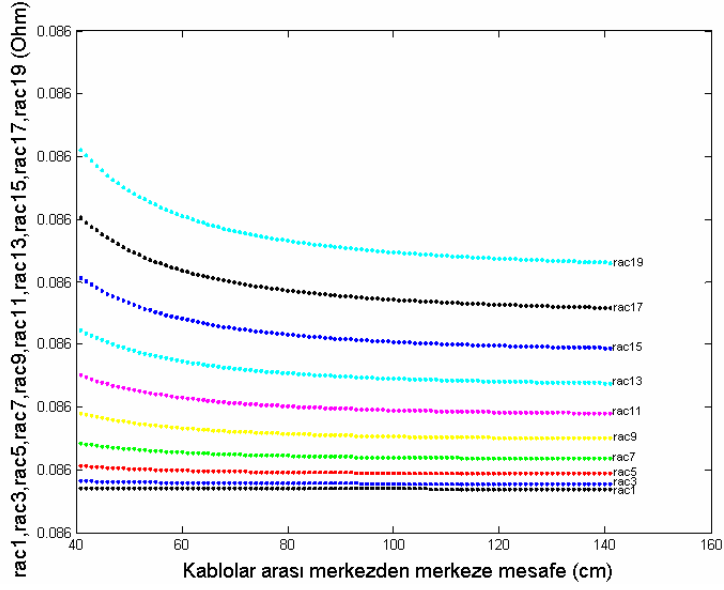
Mesafe, yaklaşım etkisini buna bağlı olarak etkin direnci ve ek olarak  $T_4$  ısıl direncini etkilemektedir.

Şekil (5.21)`de yaklaşım etkisinin mesafeden ve her bir harmonik frekansından nasıl etkilendiği gözlemlenebilmektedir.



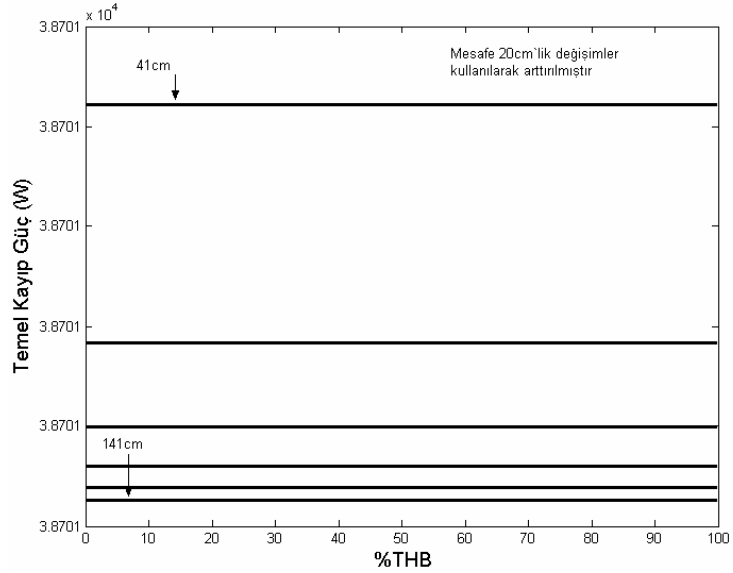
Şekil 5.21: Mesafe\_Harmoniklerin yaklaşım etkileri

Yaklaşım etkisinin değişimi, kablonun etkin direncini de Şekil (5.22)`de görüldüğü gibi değiştirmektedir.



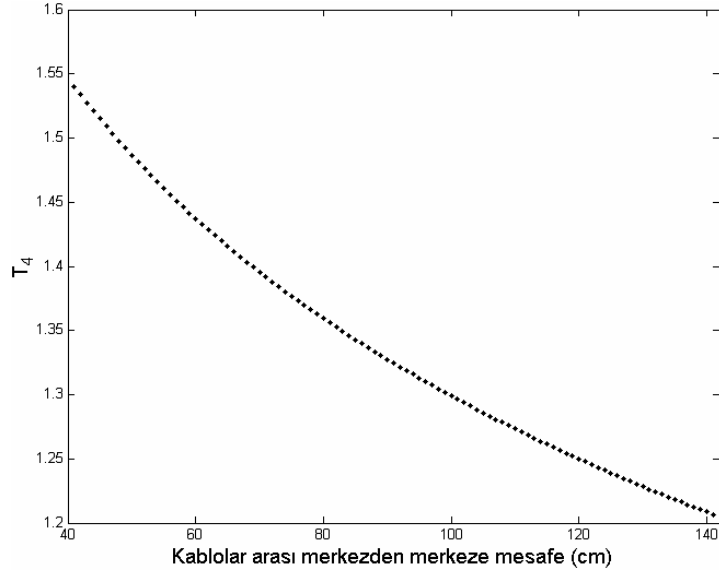
Şekil 5.22: Mesafe\_Harmoniklerin etkin dirençleri

Ölçüm yapılan sistemde yaklaşım etkisi ve etkin direnç değişimlerinin az olduğu açıkça görülmektedir. Buna paralel olarak temel kayıp gücün değişimi de Şekil (5.23)'te görüldüğü gibi çok küçük olmaktadır. Buradan da mesafeden kaynaklanan sıcaklık artışının asıl nedeninin sanıldığı gibi yaklaşım etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.



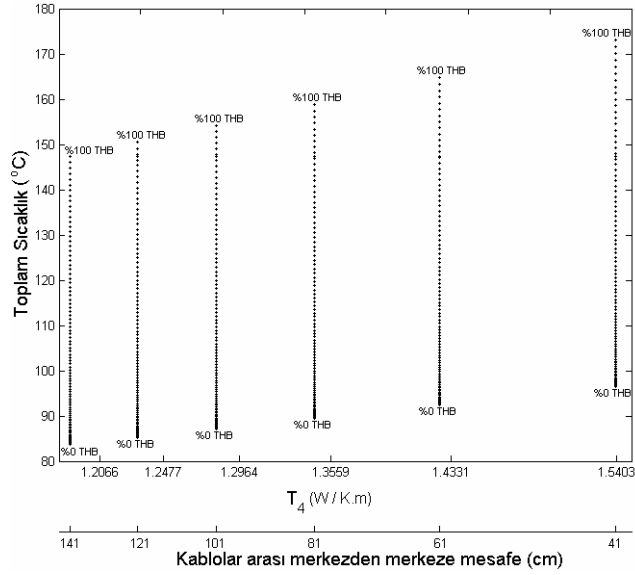
Şekil 5.23: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Temel kayıp güç

Şekil (5.24)`te mesafeye karşın  $T_4$  değerleri görülmektedir.



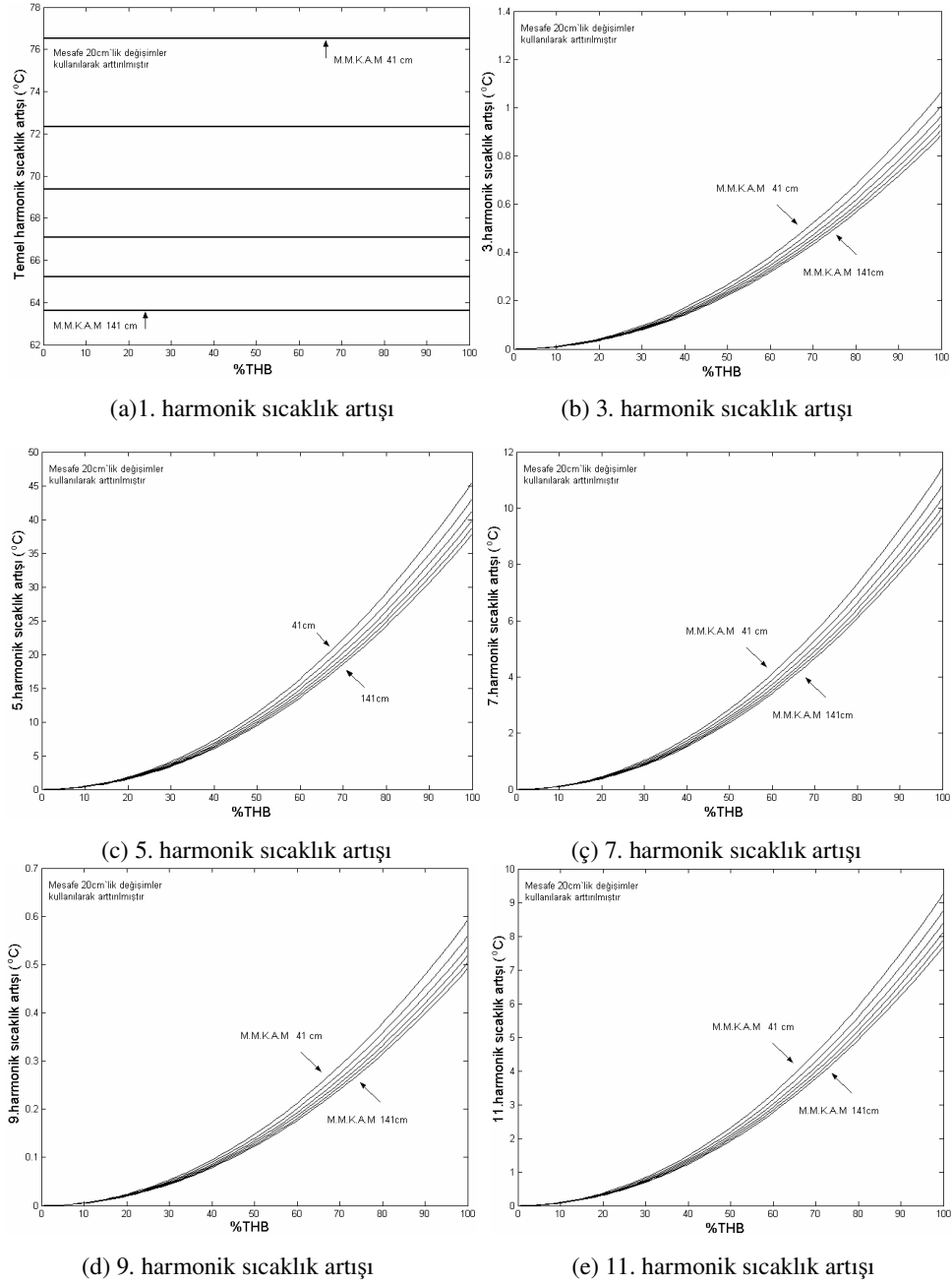
Şekil 5.24: Mesafe\_  $T_4$  değerleri

Buradan  $T_4$ 'ün mesafeden oldukça etkilendiği görülmekte ve sıcaklık artışının temel nedeni olduğu anlaşılmaktadır. Şekil (5.25)`te  $T_4$  ısı direncinin mesafeye göre değişimi ve bu değişim ile birlikte %THB`ye göre de sıcaklığı hangi seviyeye getirdiği görülmektedir.



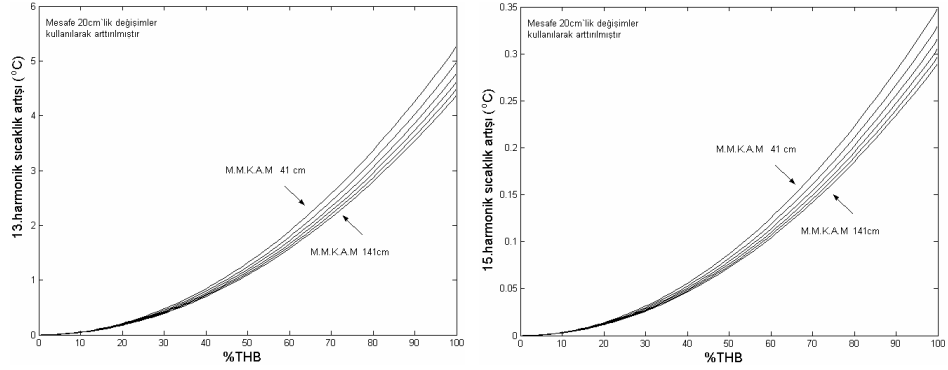
Şekil 5.25:  $T_4$ \_Mesafe\_%THB\_Toplam sıcaklık

Bu sıcaklık artışı tek tek harmonik sıcaklık artışlarının toplamıdır. Mesafe değişimini de gösterecek şekilde tek tek harmonik sıcaklık artışları da Şekil (5.26) da görülmektedir.



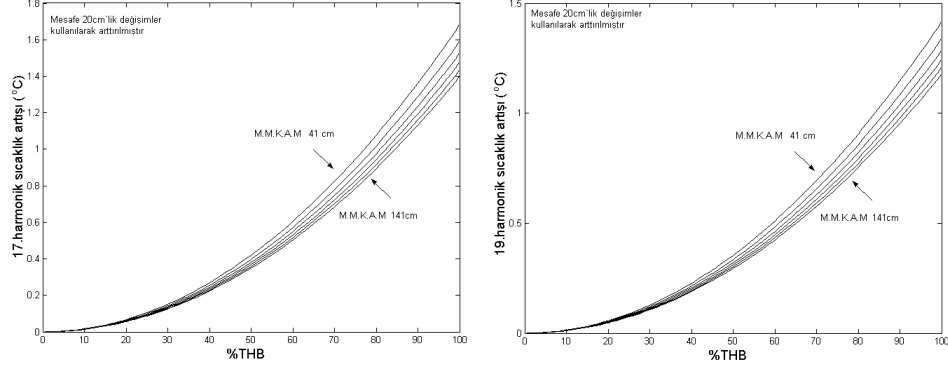
Şekil 5.26: %THB\_Tek tek harmonik sıcaklık artışları





(f) 13. harmonik sıcaklık artışı

(g) 15. harmonik sıcaklık artışı

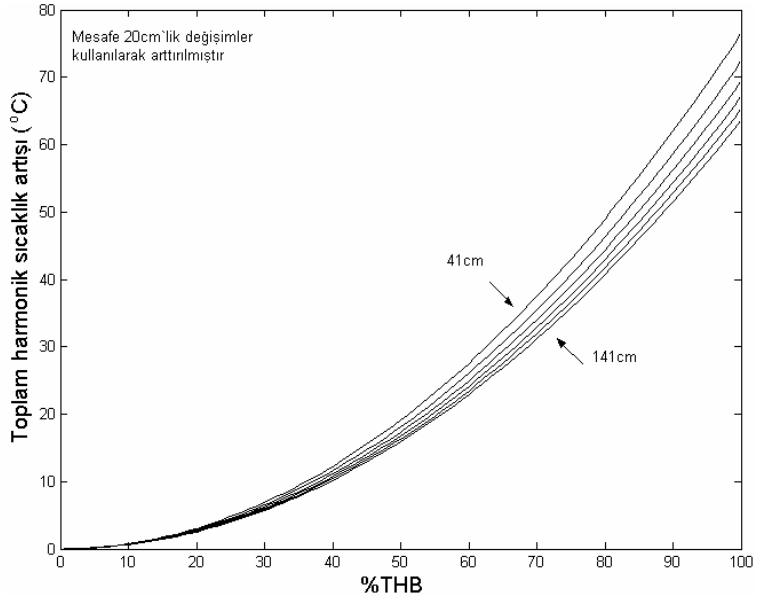


(ę) 17. harmonik sıcaklık artışı

(h) 19. harmonik sıcaklık artışı

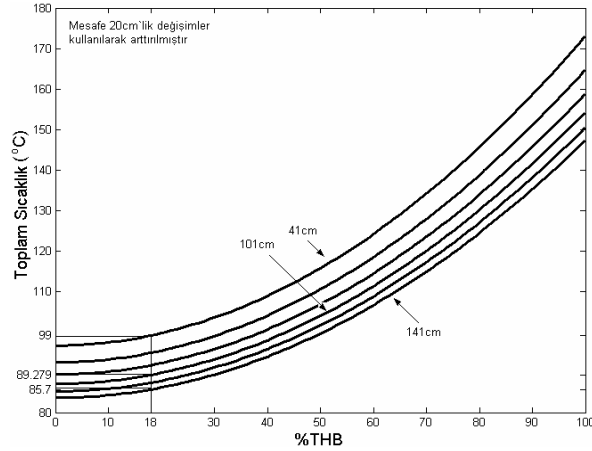
şekil 5.26: %THB\_Tek tek harmonik sıcaklık artışları “(Devam)”

şekil (5.27)`de toplam harmonik sıcaklık artışı görülmektedir.

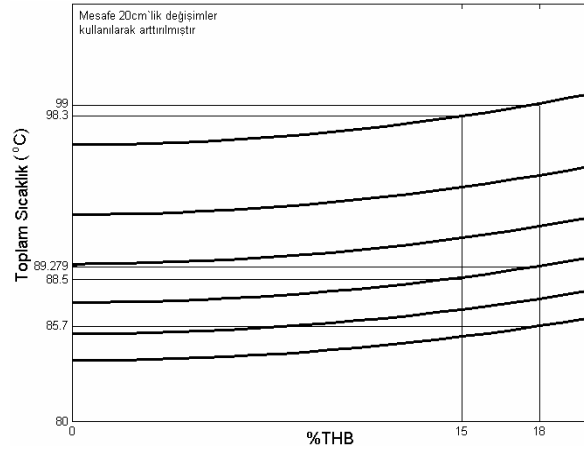


şekil 5.27: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Toplam harmonik sıcaklık artışı

Şekil (5.28a)`da bu etkileşimin sonucu olarak mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB`ye göre toplam sıcaklık eğrisi görülmektedir. Ölçüm yaptığımız sistem dikkate alındığında %18 THB`de mesafe 41 cm, yani kabloların neredeyse birbirine yapışık olduğu durumda, toplam sıcaklık 99 °C iken; mesafe 141 cm`ye çıkarıldığında aynı işletme koşullarında toplam sıcaklık 85.7 °C`ye düşmektedir. Mesafe 101 cm olarak belirlendiği takdirde toplam sıcaklık yaklaşık olarak 89.279 °C olmaktadır. Bu sıcaklık değeri de izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığı değerine çok yakındır. Şekil (5.28b)`de ise ölçüm yapılan sistemin IEEE 519 standardıyla karşılaştırılması görülmektedir. Buradan mesafe etkisinin yanı sıra %THB`nin standarda uygun olsa bile sıcaklığı önemli ölçüde arttırdığı görülebilmektedir.



(a)

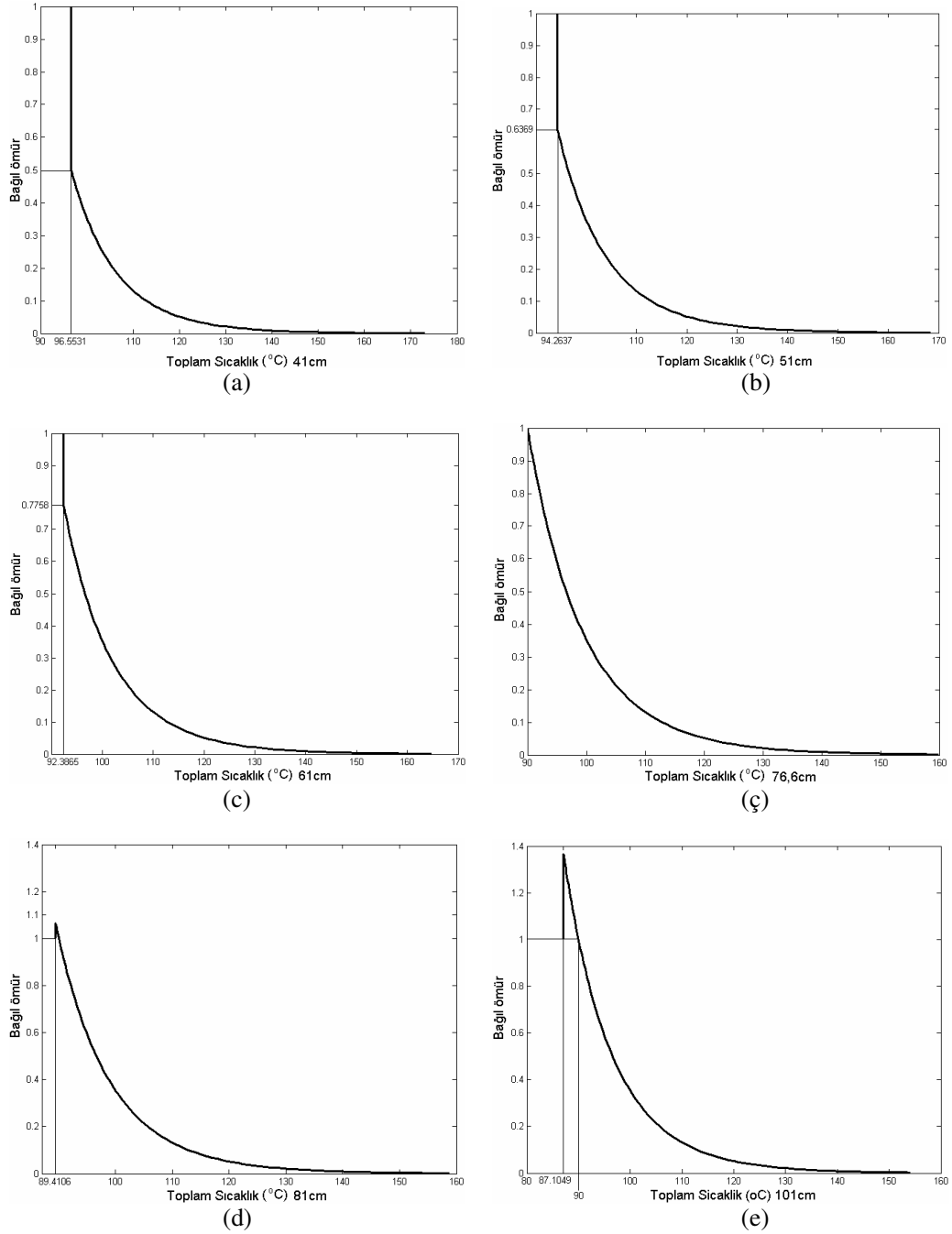


(b)

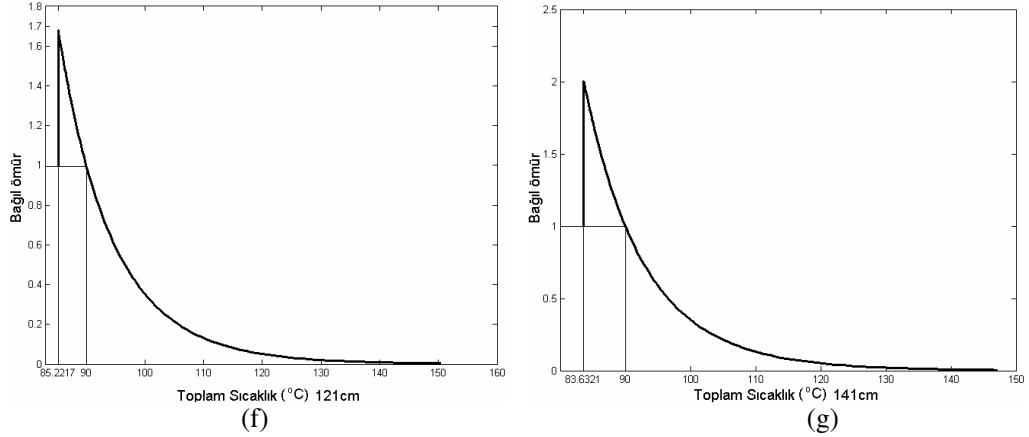
Şekil 5.28: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde %THB\_Toplam sıcaklık

a) %0 – %100 THB b) %0 – %20 THB

Harmoniklerin sıcaklığı böyle değiştirmesi beklendiği gibi ömür kaybını da arttırmaktadır. Mesafe etkisini de gösterecek şekilde toplam sıcaklığa göre çizilen bağil ömür şekil (5.29)`da görülmektedir.



şekil 5.29: Toplam sıcaklık\_ Bağil mr a) 41cm b) 61cm c)76,6cm ) 81cm d) 101cm e) 121cm f) 131cm g) 141cm



Şekil 5.29: Toplam sıcaklık\_Bağılı ömür a) 41cm b) 61cm c)76,6cm ç) 81cm d) 101cm e) 121cm f) 131cm g) 141cm “(Devam)”

Şekil (5.29a)`da görülüyor ki; mesafenin 41 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrü %0 THB için yaklaşık olarak 0.5 katına inmekte, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için yaklaşık olarak 6.5 °C aşağı çekilmesi gerekmektedir. Bu da harmoniksiz ortamda dahi kablo ampasitesinin azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Yani bu kablo yaklaşık olarak %30 THB koşulunda çalışıyormuş gibi düşünülerek ampasitesinin 622.6 A`e indirilmesi gerekmektedir. Bu kablo ömrü azalmaksızın bu şekilde kullanılabilir.

Şekil (5.29b)`den anlaşıldığı gibi; mesafenin 51 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrü %0 THB için yaklaşık olarak 0.6359 katına inmekte, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için yaklaşık olarak 4.3 °C aşağı çekilmesi gerekmektedir. Bu da harmoniksiz ortamda dahi kablo ampasitesinin azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Yani bu kablo yaklaşık olarak %24 THB koşulunda çalışıyormuş gibi düşünülerek ampasitesinin 632 A`e indirilmesi gerekmektedir. Bu kablo ömrü azalmaksızın bu şekilde kullanılabilir.

Şekil (5.29c)`den görüldüğü gibi; Mesafenin 61 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrü %0 THB için yaklaşık olarak 0.78 katına inmekte, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için yaklaşık olarak 2.4 °C aşağı çekilmesi gerekmektedir. Bu da harmoniksiz ortamda dahi kablo ampasitesinin azaltılması gerektiği anlamına gelmektedir. Yani bu kablo yaklaşık olarak %19 THB

koşulunda çalışıyormuş gibi düşünülerek ampasitesinin 639 A`e indirilmesi gerekmektedir. Bu kablo ömrü azalmaksızın bu şekilde kullanılabilir.

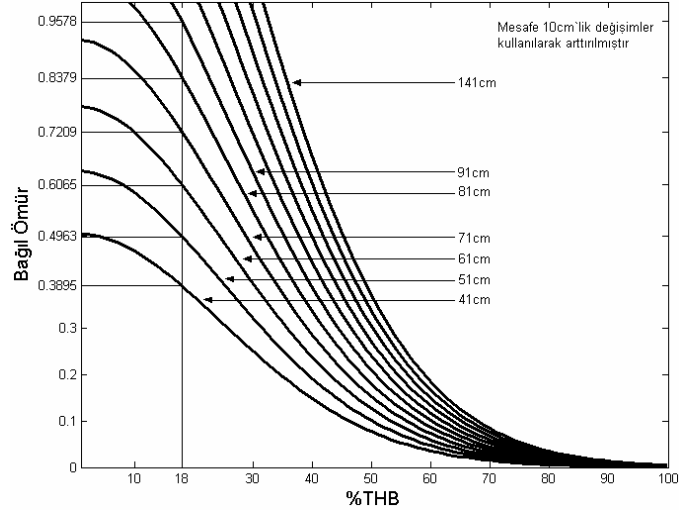
Şekil (5.29d)`de, mesafenin 81 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 1.1 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 0.6 °C artırılabilceği görülmektedir. Bu da harmoniklerden dolayı kablo sıcaklığının 0.6 °C artırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak % 9 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

Şekil (5.29e)`de, mesafenin 101 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 1.4 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 2.9 °C artırılabilceği görülmektedir. Bu da harmoniklerden dolayı kablo sıcaklığının 2.9 °C artırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak % 21 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

Şekil (5.29f)`de, mesafenin 121 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 2 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 4.8 °C artırılabilceği görülmektedir. Bu da harmoniklerden dolayı kablo sıcaklığının 4.8 °C artırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak % 26 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

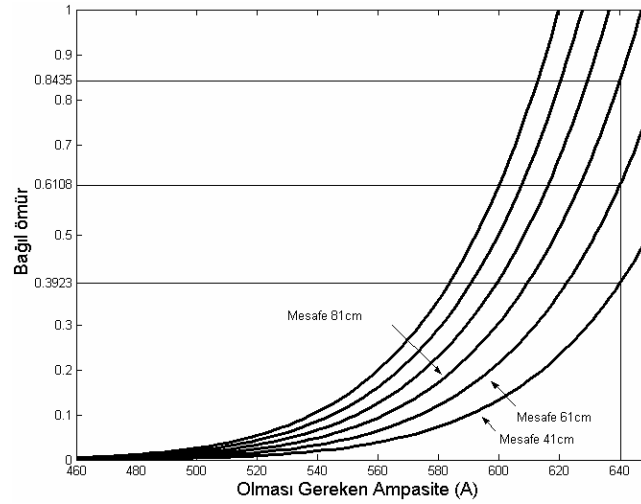
Şekil (5.29g)`de, mesafenin 141 cm`ye getirilmesi halinde kablo ömrünün %0 THB için yaklaşık olarak 1.7 katına çıktığı, kablo sıcaklığının izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına gelmesi için daha 6.4 °C artırılabilceği görülmektedir. Bu da harmoniklerden dolayı kablo sıcaklığının 6.4 °C artırılmasına izin verilebileceği anlamına gelmektedir. Yani bu derinlikte bu kablo yaklaşık olarak % 30 THB koşulunda ömrü azalmaksızın kullanılabilir.

Sıcaklık aynı zamanda %THB`ye de bağlı olduğundan bağlı ömrü mesafe etkisi de görülecek şekilde %THB`ye göre çizmek gerekmektedir. Bu grafik Şekil (5.30)`da görülmektedir.



Şekil 5.30: Mesafe etkisi de görülecek şekilde %THB\_ Bağıl ömür

Sıcaklığın %THB`ye göre böylesine değişimi ampasitenin, mesafenin de göz önüne alınarak azaltılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil (5.31)`de, ölçüm yapılan sistem ve kullanılan örnek kablo için ampasitenin hangi durumda ne kadar azaltılması gerektiği görülmektedir.



Şekil 5.31: Mesafe etkisini de gösterecek şekilde Ampasite\_ Bağıl ömür

Burada; %18 THB yani ampasitenin 640 A olması gereken durumda mesafenin 41 cm`den 81 cm`ye çıkarılması halinde kablo bağıl ömrü 0.3923`ten 0.8435`e çıkmaktadır.

Bu grafiklerden anlaşılıyor ki; mesafenin yaklaşım etkisine buna bağılı olarak etkin dirence, daha çok da  $T_4$  ısıl direncine; dolayısıyla kayıp güce, sıcaklığa etkisi vardır ve bu etki kablo ömrünün değışmesine neden olmaktadır. Kablo ampasitesinin azaltılması gerektiğı hallerde mesafenin açılması kablo ampasitesinin daha az azaltılması sonucunu ya da aynı ampasite değerinde kablo ömrünün uzaması sonucunu doğurmaktadır. Özellikle harmonik bozulunun yüksek olduğu sistemlerde bu durum dikkate değer boyutlardadır.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yeraltı güç kablolarına harmonik etkilerinin belirlenmesi amacıyla 5 adet endüksiyon ocağı kullanılan bir tesiste harmonik ölçümü yapılmıştır. Alınan ölçüm sonuçları OG tesislerinde de harmoniklerin olduğunu ve ciddi boyutlara ulaşabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlardan elde edilen harmonik değerleri, MATLAB/SIMULINK kullanılarak sürekli rejim %100 yük faktörü için oluşturulmuş harmonik etki modelinde örnek yeraltı güç kablosuna uygulanacak harmonik sırasını belirlemiştir. Harmonik etkileri her %THB`de belirlendiğinden harmoniklerin birbirlerine göre oranları sabit tutularak her %THB`deki analiz sonuçları gerçeğe yaklaştırılmıştır.

%THB`nin küçük değerleri önemli sıcaklık artışlarına neden olmazken, büyüyen %THB ciddi ısınmalara neden olmaktadır. Örneğin %2 THB`de harmonikler 0.027998 °C`lik bir sıcaklık artışına neden olurken %25 THB`de bu değer 4.3747 °C olmaktadır.

Ölçüm yapılan sistemde var olan %18`lik THB IEEE 519 standartlarının üzerindedir. Modelde kullanılan örnek kabloya göre %18 THB`de harmoniklerin 1176.6 W`lık ilave bir kayıp meydana getirerek toplam kayıp gücü 37492 W`a çıkarmaktadır. Bu da sıcaklığın 2.2637 °C artarak 92.2637 °C`ye ulaşmasına neden olmaktadır. Sıcaklıkta meydana gelen bu artış ise kablo ömrünü 0.7856 katına indirmekte yani ömrü %21 azaltmaktadır. Bu ömür kaybının giderilmesi için ampasitenin 640 A`e indirilmesi gerekmektedir.

Ölçüm yapılan sistemde kullanılan örnek kabloya göre %3 THB`ye kadar ampasitede kayda değer bir değişme olmazken, kısa devre akımının yük akımına oranının 300 olduğu 34,5 KV luk bir tesiste IEEE 519 standartlarına uygun olan %13`lük THB geçildikten sonra ampasite düşme hızı artmaktadır. Bu standardın üst sınırı olan %15 THB`de kablo ömrü tam yüklü sürekli rejimde çalışan bir tesis için 0.84545 katına inmekte yani yaklaşık olarak %15 azalmaktadır. Bu %15 ömür kaybı dikkate



alındığında yeraltı güç sistemleri için bu standart değerinin gözden geçirilmesi, yeraltı güç sistemleri için ampasiteyi etkileyen diğer etkenler de göz önüne alınarak ayrı bir harmonik standardının geliştirilmesi düşünülebilir.

Kurulum aşamasında ark fırını veya endüksiyon fırını gibi yüklerin kullanılacağı yani %THB`nin fazla olacağı tahmininde bulunan tesislerde kablo gömülme derinliği azaltılarak  $T_4$  ısıl direncinin düşürülmesi buna bağlı olarak da kablo sıcaklığının normal değerinde tutulması mümkün olabilir.

Harmonik etki modelinden, kablonun gömülme derinliğinin her %THB değerinde 400 mm`den 1200 mm`ye kadar değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlara göre, THB`nin %18 olduğu ölçüm yapılan sistemde 1200mm derinlikteki bir kablonun sıcaklığı 96.9335 °C iken aynı kablonun 800mm derinlikteki sıcaklığı 90.3521 °C olmaktadır. Yani kablo 1200mm yerine 800mm derinliğe gömüldüğünde, kablo sıcaklığı izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığına oldukça yaklaşmaktadır. Derinliğin azaltılmasıyla sıcaklığın izin verilebilir en yüksek işletme değeri olan 90 °C ve altına ineceği kolaylıkla anlaşılabilir. Bu da kablonun tasarlanan süre boyunca kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Ölçüm yapılan sistem dikkate alındığında %18`lik THB`de derinlik 900 mm`den 800mm`ye indirildiğinde bağlı ömür 0.7856`dan 0.9694`e çıkmaktadır.

Kablo gömülme derinliğine benzer şekilde mesafe arttırılarak  $T_4$  ısıl direncinin düşürülmesi buna bağlı olarak da kablo sıcaklığının normal değerinde tutulması mümkün olabilir.

%18 THB`de mesafe 41cm, yani kabloların neredeyse birbirine yapışık olduğu durumda, toplam sıcaklık 99 °C iken; mesafe 141 cm`ye çıkarıldığında aynı işletme koşullarında toplam sıcaklık 85.7 °C`ye düşmektedir. Mesafe 101cm olarak belirlendiği takdirde toplam sıcaklık yaklaşık olarak 89.3 °C olmaktadır. Bu sıcaklık değeri de izin verilebilir en yüksek işletme sıcaklığı değerine çok yakın olmaktadır.

Ölçüm yapılan sistem dikkate alındığında %18 THB koşulunda mesafenin 76.6 cm`den 91 cm`ye çıkarılmasıyla kablo bağıl ömrü 0.7856`dan 0.9578`e çıkmaktadır.

%THB`nin IEEE 519 standardına uygun olsa bile sıcaklığı önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir.

Yukarıdaki sonuçlara bilgisayar analizi yapılarak ulaşılmıştır. Sonuçların bir de deneysel yoldan elde edilip bilgisayar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılması önerilmektedir. Bunun için harmonik kaynağı gerekmektedir. İleriki dönemde böyle bir çalışma yapılması düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. TEDAŞ, *OECD Tüketim Kayıp* [online], Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi, [http://www.tedas.gov.tr/29,Istatistiki\\_Bilgiler.html/2004yili\\_istatistikleri.zip](http://www.tedas.gov.tr/29,Istatistiki_Bilgiler.html/2004yili_istatistikleri.zip) (Ziyaret tarihi: 16 Mart 2006).
2. Whitaker J.C. “AC Power Systems Handbook-Second Edition” **Boca Raton: CRC Pres LLC**, (77 – 78 ), (1999)
3. Aras, F.. “Elektrik ve ısı gerilmeler altında 154 KV XLPE yeraltı güç kablosunun yaşlanma davranışının deneysel incelenmesi ve ampasite ile ilişkilendirilmesi” , Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmit, 1 – 2, 21 – 37 (2000)
4. Anders, G.J. 1997. “Rating of Electric Power Cables. Anpacity Computations for Transmission, Distribution and industrial Applications”, **IEEE Press**, New York. 16 – 20, 197 – 221 (1997)
5. Thue, W.A (Ed).. “Electrical Power Cable Engineering”, **Marcel Dekker Incorporated**, New York, 176 – 191 (1998)
6. Neher, J.H. and M.cGRATH, “The calculation of the temperature rise and bad capability of cable systems” AIEE Trans.V:76, pp 752 – 772. (1957)
7. IEC Yayımı 287 (1969) Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General
8. IEC Yayımı 287 (1982) ( Daha sonra 60 287 ) Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General.
9. Cavallini, A. .Fabiani, D. . Mazzanti, G.. Montanari, G.C. .”The effect of power system harmonics on cable endurance: A critical review to IEEE Std.519 voltage distortion limits” **IEEE IAS 35th Annual Meeting**, Roma, Italy, 3172 – 3179. (2000)
10. Montanari, G.C..Simoni L.. “Aging phenomenology and modelling”, **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, Vol.28 No.5, 755 – 776 (1993)
11. A. L. McKean, D. Tsuji, M. C. Doepken and A. Zidon, “Breakdown Mechanism Studies in XLPE Cable”, **IEEE Transactions PAS**, Vol. 97, pp. 1167 – 1175 (1978)

12. Dang,C.,Parpal,J.L.,Crine,L.J.. “Electrical Aging of Extruded Dielectric Cables Review of Existing Theories and Data”**IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation** Vol. 3 No. 2, April 1996 237 – 247 IREQ, Varennes, Qubbec, Canada (1996)
13. D.Fournier, C.Robertson. “Morphological Study of Aging Phenomena in XLPE by TEM Technique” **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics** Volume 34, Issue 9 1621 – 1628 (1998)
14. H.Yamada, S.Nakagawa, S. Katakai, K. Kishi, T.Nakanishi, Y.Murata. “Development of Heat-resistant XILPE Cable and Accessories” **Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials** 776 – 781 Japonya (2003)
15. Meliopoulos, S.A.P. . Martin, M.A.Jr. . “Calculation of secondary cable losses and ampacity in the presence of harmonics” **IEEE Transactions on Power Delivery**, 7,2,451–459,(1992)
16. Altınay, M.. “Buck tipi darbe genişlik ayarlı doğrultucunun geliştirilmiş durum uzay ortalama yöntemi ile modellenmesi”, Doktora tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmit, 1 – 2, (2005)
17. Abelprisen, The Niels Henrik Abel Memorial Fund, <http://www.abelprisen.no/en/> (**Ziyaret tarihi: 31 Mart 2006**)
18. Abelprisen, The Niels Henrik Abel Memorial Fund, [http://www.abelprisen.no/nedlastning/2006/english\\_2006\\_press.pdf](http://www.abelprisen.no/nedlastning/2006/english_2006_press.pdf) (**Ziyaret tarihi: 31 Mart 2006**)
19. CNNTürk,[http://www.cnnturk.com/BILIM\\_TEKNOLOJI/BILIM/haber\\_detay.asp?PID=15&haberID=165699](http://www.cnnturk.com/BILIM_TEKNOLOJI/BILIM/haber_detay.asp?PID=15&haberID=165699) (**Ziyaret tarihi: 31 Mart 2006**)
20. G.Parise, G.Rubino,M. Ricci. “Life loss of insulated power cables: An integrative criterium to improve the ANSI / IEEE and the CENELEC / IEC method for overload protection” **Industry Applications Conference, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE** Vol. 4 2449 – 2454 (1996 )
21. J.A.Palmer, R.C.Degeneff,; T.M. McKernan, T.M.Halleran. “Pipe-type cable ampacities in the presence of harmonics” **IEEE Transactions on Power Delivery** Vol. 8, Issue 4 1689 – 1695 (1993)
22. A.Hiranandani, “Calculation of cable ampacities including the effects of harmonics”**Industry Applications Magazine, IEEE** Vol 4, Issue 2 42 – 51 (1998)

### 23. KAYNAKLAR

24. Bollen, M.H.J. . “What is power quality? ”*Electric Power Systems Research*, 66 5–14 (2003)
25. Austria, 2004 *Evolution of Power Semiconductor Devices* [online], Vienna University of Tecnology, <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/park/node14.html> (**Ziyaret tarihi: 5 Mayıs 2006**)
26. Tuncay, Nejat “Power System Harmonics” Ders notu, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (2003)
27. Wollongong University - Integral Energy” Understanding power quality” *Power Quality Centre Tecncial Report*, <http://www.elec.uow.edu.au/iepqrc/files/technote1.pdf> 1 – 5 (1998)
28. Amaç A.E. “Yeni aktif filtre topolojileri kullanılarak akım ve gerilim harmoniklerinin azaltılması ve kesintisiz güç kaynağı sistemlerine uygulanması” Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, (2003)
29. Nahvi M., Edminister J.,”Elektrik Devreleri”,3. Baskı, ISBN-975-591-039-5, Çeviri Dr.Aydemir T.M, Dr. Nakiboğlu C.K.,*McGraw-Hill, Nobel Yayın Dağıtım Ankara* 404 – 410 (1999)
30. Bingham, Richard P. “Harmonics - Understanding the Facts - Part 1”[[www.dranetz-bmi.com/pdf/harmonicspart1.pdf](http://www.dranetz-bmi.com/pdf/harmonicspart1.pdf)] (**Ziyaret tarihi : 08 Mayıs 2006**)
31. Kılıç, F.,” PWM kontrollü sincap kafesli bir asenkron motorun dinamik davranışı ve simülasyonu” Yüksek Lisans Tezi,*Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 12-16 (2004)
32. Ergün,A.,”Güç sistemlerinde harmoniklerin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 78-83 (1997)
33. Wagner V.E “ Effects of Harmonics on Equipment” IEEE Transactions on Power Dwlivery. Vol. 8. No. 2 (1993)
34. Adak, Süleyman 2005 “*Kablolarda Akım Taşıma Kapasitesinin Sıcaklıkla Değişimi*” <http://www.etmd.org.tr/yazilar.asp> ( **1 mayıs 2006** )
35. Carlos V., Hernandez N.N., Hernandez F. Ed. Grigsby, L.L. “*The Electric Power Engineering Handbook*”, *Boca Raton: CRC Press LLC, IEEE Press* 422 – 426 2001
36. Natarajan, R., “Computer Aided Power System Analysis”, ISBN-08247-0699-4, *Marcel Dekker Incorporated*, 231 – 250 (2002)

- **IEEE SCC–22: Güç Kalitesi Standartları Düzenleme Kurulu**
  - **IEEE 1159: Elektrik Güç Kalitesi Gözleme**
    - **IEEE 1159.1: Veri doğrulama gereklilikleri ve kaydediciler rehberi**
    - **IEEE 1159.2: Güç kalitesi olaylarının nitelendirilmesi**
    - **IEEE 1159.3: Güç kalitesi veri değişiminde veri dosyası formatı**
  - **IEEE P1564: Gerilim çökme indeksleri**
  - **IEEE 1346: Süreç elemanlarıyla güç sistem uyumluluğu**
  - **IEEE P1100: Güç ve topraklamada elektronik elemanlar**
  - **IEEE 1433: Güç kalitesi tanımlamaları**
  - **IEEE P1453: Gerilim Dalgalanması**
  - **IEEE 519: Elektrik güç sistemlerinde harmonik kontrolü**
  - **Harmonik çalışma grubu**
    - **Tek faz harmonik çalışma kolu**
    - **IEEE P519A: Güç Sistemlerine harmonik sınırlarını uygulama rehberi**
    - **Ara Harmonik Çalışma grubu**
      - **Harmonik modelleme ve benzetim çalışma grubu**
        - **Kesinti önleyici cihazlar kurulu**
  - **IEEE P446: Acil ve yedek güç**
  - **IEEE P1409: Dağıtım itiyat gücü**
  - **IEEE P1547: Dağıtılmış Kaynaklar ve Elektrik güç sistemlerinin aralarında bağlanması**
- **IEC Güç kalitesi standartları**
  - **IEC Güç kalitesi standartları numaralandırma sistemi**
    - **61000–1-X-: Tanımlar ve yöntemler**

- **61000-2-X-:** Yerleşkeler (örneğin 61000-2-4 Endüstriyel yerleşkelerde uyumluluk seviyeleri)
  - **61000-3-X-:** Sınırlamalar (örneğin 61000-3-4 Harmonik yayım sınırlamaları )
  - **61000-4-X-:** Deney ve ölçüm (örneğin 61000-4-30 güç kalitesi ölçümleri)
  - **61000-5-X- :** Yükleme ve azaltma
  - **61000-6-X- :** Genel koruma ve yayım standartları
- **IEC SC77A:** Alçak frekans elektromanyetik uyumluluk kavramı – Amerikan terminolojisindeki güç kalitesi kavramı
    - **TC77/WG 1:** Terminoloji (Ana teknik komitenin bir parçası )
    - **SC77A/WG1:** Harmonikler ve diğer alçak frekans bozunumları
    - **SC77A/WG6:** Alçak frekans koruma deneyleri
    - **SC77A/WG2:** Gerilim dalgalanmaları ve diğer alçak frekans bozunumları
    - **SC 77A/WG8:** Şebeke frekansıyla ilişkili elektromanyetik uyumluluk
    - **SC 77A/WG 9:** Güç kalitesi ölçüm yöntemleri
    - **SC 77A/PT 61000-3-1:** Elektromanyetik uyumluluk.

### **Güç kalitesi standartlarıyla alakalı diğer standartlar**

**UIE:** Uluslararası Elektrik Uygulamaları Birliği ( International Union for Electricity Applications )

**CENELEC:** Elektroteknik Standartlar Avrupa Kurulu ( European Committee for Electrotechnical Standardization )

**UNIPEDDE:** Uluslar arası Elektrik Enerjisi üretici ve dağıtıcıları Birliği( International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy )

**ANSI:** Amerikan Ulusal Standartları Enstitüsü Institute ( American National Standards )

EK-2 : Matlab kullanılarak türetilip analizi yapılan harmonik sıraları

<i>%thb</i>	<i>Ih1 A</i>	<i>Ih3 A</i>	<i>Ih5 A</i>	<i>Ih7 A</i>	<i>Ih9 A</i>	<i>Ih11 A</i>	<i>Ih13 A</i>	<i>Ih15 A</i>	<i>Ih17 A</i>	<i>Ih19 A</i>
0	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	650	0.85365	5.0854	2.52	0.59172	2.0773	1.5966	0.45269	1.016	0.92626
2	650	1.7073	10.171	5.04	1.1834	4.1545	3.1932	0.90538	2.0321	1.8525
3	650	2.561	15.256	7.5601	1.7752	6.2318	4.7898	1.3581	3.0481	2.7788
4	650	3.4146	20.342	10.08	2.3669	8.3091	6.3864	1.8108	4.0641	3.705
5	650	4.2683	25.427	12.6	2.9586	10.386	7.983	2.2635	5.0802	4.6313
6	650	5.1219	30.512	15.12	3.5503	12.464	9.5796	2.7161	6.0962	5.5576
7	650	5.9756	35.598	17.64	4.142	14.541	11.176	3.1688	7.1122	6.4838
8	650	6.8292	40.683	20.16	4.7338	16.618	12.773	3.6215	8.1282	7.4101
9	650	7.6829	45.769	22.68	5.3255	18.695	14.369	4.0742	9.1443	8.3363
10	650	8.5365	50.854	25.2	5.9172	20.773	15.966	4.5269	10.16	9.2626
11	650	9.3902	55.939	27.72	6.5089	22.85	17.563	4.9796	11.176	10.189
12	650	10.244	61.025	30.24	7.1006	24.927	19.159	5.4323	12.192	11.115
13	650	11.097	66.11	32.76	7.6924	27.004	20.756	5.885	13.208	12.041
14	650	11.951	71.196	35.28	8.2841	29.082	22.352	6.3377	14.224	12.968
15	650	12.805	76.281	37.8	8.8758	31.159	23.949	6.7904	15.24	13.894
16	650	13.658	81.366	40.32	9.4675	33.236	25.545	7.2431	16.256	14.82
17	650	14.512	86.452	42.84	10.059	35.314	27.142	7.6958	17.273	15.746
18	650	15.366	91.537	45.36	10.651	37.391	28.739	8.1484	18.289	16.673
19	650	16.219	96.623	47.88	11.243	39.468	30.335	8.6011	19.305	17.599
20	650	17.073	101.71	50.4	11.834	41.545	31.932	9.0538	20.321	18.525
21	650	17.927	106.79	52.92	12.426	43.623	33.528	9.5065	21.337	19.451
22	650	18.78	111.88	55.44	13.018	45.7	35.125	9.9592	22.353	20.378
23	650	19.634	116.96	57.96	13.61	47.777	36.722	10.412	23.369	21.304
24	650	20.488	122.05	60.48	14.201	49.854	38.318	10.865	24.385	22.23
25	650	21.341	127.14	63	14.793	51.932	39.915	11.317	25.401	23.156
26	650	22.195	132.22	65.52	15.385	54.009	41.511	11.77	26.417	24.083
27	650	23.049	137.31	68.04	15.976	56.086	43.108	12.223	27.433	25.009
28	650	23.902	142.39	70.561	16.568	58.163	44.705	12.675	28.449	25.935
29	650	24.756	147.48	73.081	17.16	60.241	46.301	13.128	29.465	26.862
30	650	25.61	152.56	75.601	17.752	62.318	47.898	13.581	30.481	27.788
31	650	26.463	157.65	78.121	18.343	64.395	49.494	14.033	31.497	28.714
32	650	27.317	162.73	80.641	18.935	66.473	51.091	14.486	32.513	29.64
33	650	28.17	167.82	83.161	19.527	68.55	52.688	14.939	33.529	30.567
34	650	29.024	172.9	85.681	20.118	70.627	54.284	15.392	34.545	31.493
35	650	29.878	177.99	88.201	20.71	72.704	55.881	15.844	35.561	32.419
36	650	30.731	183.07	90.721	21.302	74.782	57.477	16.297	36.577	33.345
37	650	31.585	188.16	93.241	21.894	76.859	59.074	16.75	37.593	34.272
38	650	32.439	193.25	95.761	22.485	78.936	60.671	17.202	38.609	35.198
39	650	33.292	198.33	98.281	23.077	81.013	62.267	17.655	39.625	36.124
40	650	34.146	203.42	100.8	23.669	83.091	63.864	18.108	40.641	37.05
41	650	35	208.5	103.32	24.261	85.168	65.46	18.56	41.657	37.977
42	650	35.853	213.59	105.84	24.852	87.245	67.057	19.013	42.673	38.903
43	650	36.707	218.67	108.36	25.444	89.322	68.654	19.466	43.689	39.829
44	650	37.561	223.76	110.88	26.036	91.4	70.25	19.918	44.705	40.755
45	650	38.414	228.84	113.4	26.627	93.477	71.847	20.371	45.721	41.682
46	650	39.268	233.93	115.92	27.219	95.554	73.443	20.824	46.737	42.608
47	650	40.122	239.01	118.44	27.811	97.632	75.04	21.276	47.753	43.534
48	650	40.975	244.1	120.96	28.403	99.709	76.636	21.729	48.769	44.46
49	650	41.829	249.18	123.48	28.994	101.79	78.233	22.182	49.785	45.387
50	650	42.683	254.27	126	29.586	103.86	79.83	22.635	50.802	46.313



Matlab kullanılarak türetilip analizi yapılan harmonik sıraları “(Devam)”

<b>%thb</b>	<b>Ih1 A</b>	<b>Ih3 A</b>	<b>Ih5 A</b>	<b>Ih7 A</b>	<b>Ih9 A</b>	<b>Ih11 A</b>	<b>Ih13 A</b>	<b>Ih15 A</b>	<b>Ih17 A</b>	<b>Ih19 A</b>
51	650	43.536	259.36	128.52	30.178	105.94	81.426	23.087	51.818	47.239
52	650	44.39	264.44	131.04	30.769	108.02	83.023	23.54	52.834	48.165
53	650	45.243	269.53	133.56	31.361	110.1	84.619	23.993	53.85	49.092
54	650	46.097	274.61	136.08	31.953	112.17	86.216	24.445	54.866	50.018
55	650	46.951	279.7	138.6	32.545	114.25	87.813	24.898	55.882	50.944
56	650	47.804	284.78	141.12	33.136	116.33	89.409	25.351	56.898	51.87
57	650	48.658	289.87	143.64	33.728	118.4	91.006	25.803	57.914	52.797
58	650	49.512	294.95	146.16	34.32	120.48	92.602	26.256	58.93	53.723
59	650	50.365	300.04	148.68	34.911	122.56	94.199	26.709	59.946	54.649
60	650	51.219	305.12	151.2	35.503	124.64	95.796	27.161	60.962	55.576
61	650	52.073	310.21	153.72	36.095	126.71	97.392	27.614	61.978	56.502
62	650	52.926	315.29	156.24	36.687	128.79	98.989	28.067	62.994	57.428
63	650	53.78	320.38	158.76	37.278	130.87	100.59	28.52	64.01	58.354
64	650	54.634	325.47	161.28	37.87	132.95	102.18	28.972	65.026	59.281
65	650	55.487	330.55	163.8	38.462	135.02	103.78	29.425	66.042	60.207
66	650	56.341	335.64	166.32	39.054	137.1	105.38	29.878	67.058	61.133
67	650	57.195	340.72	168.84	39.645	139.18	106.97	30.33	68.074	62.059
68	650	58.048	345.81	171.36	40.237	141.25	108.57	30.783	69.09	62.986
69	650	58.902	350.89	173.88	40.829	143.33	110.16	31.236	70.106	63.912
70	650	59.756	355.98	176.4	41.42	145.41	111.76	31.688	71.122	64.838
71	650	60.609	361.06	178.92	42.012	147.49	113.36	32.141	72.138	65.764
72	650	61.463	366.15	181.44	42.604	149.56	114.95	32.594	73.154	66.691
73	650	62.317	371.23	183.96	43.196	151.64	116.55	33.046	74.17	67.617
74	650	63.17	376.32	186.48	43.787	153.72	118.15	33.499	75.186	68.543
75	650	64.024	381.41	189	44.379	155.79	119.74	33.952	76.202	69.469
76	650	64.877	386.49	191.52	44.971	157.87	121.34	34.405	77.218	70.396
77	650	65.731	391.58	194.04	45.562	159.95	122.94	34.857	78.234	71.322
78	650	66.585	396.66	196.56	46.154	162.03	124.53	35.31	79.25	72.248
79	650	67.438	401.75	199.08	46.746	164.1	126.13	35.763	80.266	73.174
80	650	68.292	406.83	201.6	47.338	166.18	127.73	36.215	81.282	74.101
81	650	69.146	411.92	204.12	47.929	168.26	129.32	36.668	82.298	75.027
82	650	69.999	417	206.64	48.521	170.34	130.92	37.121	83.314	75.953
83	650	70.853	422.09	209.16	49.113	172.41	132.52	37.573	84.331	76.879
84	650	71.707	427.17	211.68	49.704	174.49	134.11	38.026	85.347	77.806
85	650	72.56	432.26	214.2	50.296	176.57	135.71	38.479	86.363	78.732
86	650	73.414	437.34	216.72	50.888	178.64	137.31	38.931	87.379	79.658
87	650	74.268	442.43	219.24	51.48	180.72	138.9	39.384	88.395	80.585
88	650	75.121	447.52	221.76	52.071	182.8	140.5	39.837	89.411	81.511
89	650	75.975	452.6	224.28	52.663	184.88	142.1	40.29	90.427	82.437
90	650	76.829	457.69	226.8	53.255	186.95	143.69	40.742	91.443	83.363
91	650	77.682	462.77	229.32	53.847	189.03	145.29	41.195	92.459	84.29
92	650	78.536	467.86	231.84	54.438	191.11	146.89	41.648	93.475	85.216
93	650	79.39	472.94	234.36	55.03	193.19	148.48	42.1	94.491	86.142
94	650	80.243	478.03	236.88	55.622	195.26	150.08	42.553	95.507	87.068
95	650	81.097	483.11	239.4	56.213	197.34	151.68	43.006	96.523	87.995
96	650	81.95	488.2	241.92	56.805	199.42	153.27	43.458	97.539	88.921
97	650	82.804	493.28	244.44	57.397	201.49	154.87	43.911	98.555	89.847
98	650	83.658	498.37	246.96	57.989	203.57	156.47	44.364	99.571	90.773
99	650	84.511	503.45	249.48	58.58	205.65	158.06	44.816	100.59	91.7
100	650	85.365	508.54	252	59.172	207.73	159.66	45.269	101.6	92.626

## %THB`ye göre kayıp güçler

% THB	KGh1 W	KGh3 W	KGh5 W	KGh7 W	KGh9 W	KGh11 W	KGh13 W	KGh15 W	KGh17 W	KGh19 W	THKG W	TKG W
0	36315	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36315
1	36315	0.062636	2.2229	0.54585	0.030095	0.37089	0.21911	0.017614	0.088732	0.073745	3.6315	36319
2	36315	0.25054	8.8915	2.1834	0.12038	1.4836	0.87642	0.070458	0.35493	0.29498	14.526	36330
3	36315	0.56372	20.006	4.9126	0.27086	3.338	1.972	0.15853	0.79859	0.6637	32.684	36348
4	36315	1.0022	35.566	8.7336	0.48152	5.9343	3.5057	0.28183	1.4197	1.1799	58.105	36373
5	36315	1.5659	55.572	13.646	0.75238	9.2723	5.4776	0.44036	2.2183	1.8436	90.789	36406
6	36315	2.2549	80.023	19.651	1.0834	13.352	7.8878	0.63412	3.1943	2.6548	130.74	36446
7	36315	3.0692	108.92	26.747	1.4747	18.174	10.736	0.86311	4.3479	3.6135	177.95	36493
8	36315	4.0087	142.26	34.934	1.9261	23.737	14.023	1.1273	5.6788	4.7197	232.42	36548
9	36315	5.0735	180.05	44.214	2.4377	30.042	17.748	1.4268	7.1873	5.9733	294.15	36610
10	36315	6.2636	222.29	54.585	3.0095	37.089	21.911	1.7614	8.8732	7.3745	363.15	36679
11	36315	7.579	268.97	66.048	3.6415	44.878	26.512	2.1314	10.737	8.9231	439.42	36755
12	36315	9.0196	320.09	78.602	4.3337	53.409	31.551	2.5365	12.777	10.619	522.94	36838
13	36315	10.585	375.67	92.248	5.0861	62.681	37.029	2.9768	14.996	12.463	613.73	36929
14	36315	12.277	435.68	106.99	5.8987	72.695	42.945	3.4524	17.391	14.454	711.78	37027
15	36315	14.093	500.15	122.82	6.7714	83.451	49.299	3.9633	19.965	16.593	817.1	37132
16	36315	16.035	569.06	139.74	7.7044	94.949	56.091	4.5093	22.715	18.879	929.67	37245
17	36315	18.102	642.41	157.75	8.6975	107.19	63.322	5.0906	25.644	21.312	1049.5	37365
18	36315	20.294	720.21	176.85	9.7508	120.17	70.99	5.7071	28.749	23.893	1176.6	37492
19	36315	22.612	802.46	197.05	10.864	133.89	79.097	6.3588	32.032	26.622	1311	37626
20	36315	25.054	889.15	218.34	12.038	148.36	87.642	7.0458	35.493	29.498	1452.6	37768
21	36315	27.623	980.29	240.72	13.272	163.56	96.626	7.768	39.131	32.521	1601.5	37917
22	36315	30.316	1075.9	264.19	14.566	179.51	106.05	8.5254	42.946	35.692	1757.7	38073
23	36315	33.134	1175.9	288.75	15.92	196.2	115.91	9.3181	46.939	39.011	1921.1	38236
24	36315	36.078	1280.4	314.41	17.335	213.63	126.2	10.146	51.11	42.477	2091.8	38407
25	36315	39.148	1389.3	341.15	18.809	231.81	136.94	11.009	55.457	46.09	2269.7	38585
26	36315	42.342	1502.7	368.99	20.344	250.72	148.12	11.907	59.983	49.851	2454.9	38770
27	36315	45.662	1620.5	397.92	21.939	270.38	159.73	12.841	64.686	53.76	2647.4	38963
28	36315	49.107	1742.7	427.94	23.595	290.78	171.78	13.81	69.566	57.816	2847.1	39163
29	36315	52.677	1869.4	459.06	25.31	311.92	184.27	14.814	74.623	62.019	3054.1	39370
30	36315	56.372	2000.6	491.26	27.086	333.8	197.2	15.853	79.859	66.37	3268.4	39584
31	36315	60.193	2136.2	524.56	28.921	356.43	210.56	16.928	85.271	70.869	3489.9	39805
32	36315	64.139	2276.2	558.95	30.817	379.79	224.36	18.037	90.861	75.515	3718.7	40034
33	36315	68.211	2420.7	594.43	32.774	403.9	238.61	19.182	96.629	80.308	3954.7	40270
34	36315	72.407	2569.6	631	34.79	428.75	253.29	20.362	102.57	85.249	4198.1	40513
35	36315	76.729	2723	668.66	36.867	454.34	268.4	21.578	108.7	90.337	4448.6	40764
36	36315	81.176	2880.8	707.42	39.003	480.68	283.96	22.828	115	95.573	4706.5	41022
37	36315	85.749	3043.1	747.27	41.2	507.75	299.96	24.114	121.47	100.96	4971.6	41287
38	36315	90.446	3209.8	788.2	43.457	535.57	316.39	25.435	128.13	106.49	5243.9	41559
39	36315	95.269	3381	830.23	45.775	564.13	333.26	26.792	134.96	112.17	5523.6	41839
40	36315	100.22	3556.6	873.36	48.152	593.43	350.57	28.183	141.97	117.99	5810.5	42126
41	36315	105.29	3736.6	917.57	50.59	623.47	368.32	29.61	149.16	123.96	6104.6	42420
42	36315	110.49	3921.1	962.88	53.088	654.26	386.5	31.072	156.52	130.09	6406	42721
43	36315	115.81	4110.1	1009.3	55.646	685.78	405.13	32.569	164.07	136.35	6714.7	43030
44	36315	121.26	4303.5	1056.8	58.264	718.05	424.19	34.102	171.78	142.77	7030.7	43346
45	36315	126.84	4501.3	1105.3	60.943	751.06	443.69	35.669	179.68	149.33	7353.9	43669
46	36315	132.54	4703.6	1155	63.681	784.81	463.63	37.272	187.76	156.04	7684.3	44000
47	36315	138.36	4910.3	1205.8	66.48	819.3	484	38.91	196.01	162.9	8022.1	44337
48	36315	144.31	5121.5	1257.6	69.339	854.54	504.82	40.584	204.44	169.91	8367.1	44682
49	36315	150.39	5337.1	1310.6	72.258	890.52	526.07	42.292	213.05	177.06	8719.3	45035
50	36315	156.59	5557.2	1364.6	75.238	927.23	547.76	44.036	221.83	184.36	9078.9	45394

%THB`ye göre Kayıp Güçler “(Devam)”

% THB	KGh1 W	KGh3 W	KGh5 W	KGh7 W	KGh9 W	KGh11 W	KGh13 W	KGh15 W	KGh17 W	KGh19 W	THKG W	TKG W
51	36315	162.92	5781.7	1419.8	78.278	964.69	569.89	45.815	230.79	191.81	9445.6	45761
52	36315	169.37	6010.6	1476	81.377	1002.9	592.46	47.63	239.93	199.41	9819.7	46135
53	36315	175.94	6244	1533.3	84.537	1041.8	615.47	49.479	249.25	207.15	10201	46516
54	36315	182.65	6481.9	1591.7	87.758	1081.5	638.91	51.364	258.74	215.04	10590	46905
55	36315	189.47	6724.2	1651.2	91.038	1122	662.8	53.284	268.41	223.08	10985	47301
56	36315	196.43	6970.9	1711.8	94.378	1163.1	687.12	55.239	278.26	231.26	11389	47704
57	36315	203.5	7222.1	1773.5	97.779	1205	711.87	57.229	288.29	239.6	11799	48114
58	36315	210.71	7477.7	1836.2	101.24	1247.7	737.07	59.255	298.49	248.08	12217	48532
59	36315	218.04	7737.8	1900.1	104.76	1291.1	762.71	61.316	308.88	256.71	12641	48957
60	36315	225.49	8002.3	1965.1	108.34	1335.2	788.78	63.412	319.43	265.48	13074	49389
61	36315	233.07	8271.3	2031.1	111.98	1380.1	815.29	65.543	330.17	274.4	13513	49828
62	36315	240.77	8544.7	2098.2	115.69	1425.7	842.24	67.71	341.09	283.47	13960	50275
63	36315	248.6	8822.6	2166.5	119.45	1472.1	869.63	69.912	352.18	292.69	14414	50729
64	36315	256.56	9104.9	2235.8	123.27	1519.2	897.46	72.149	363.45	302.06	14875	51190
65	36315	264.64	9391.6	2306.2	127.15	1567	925.72	74.421	374.89	311.57	15343	51659
66	36315	272.84	9682.8	2377.7	131.09	1615.6	954.43	76.729	386.52	321.23	15819	52134
67	36315	281.17	9978.5	2450.3	135.1	1664.9	983.57	79.071	398.32	331.04	16302	52617
68	36315	289.63	10279	2524	139.16	1715	1013.1	81.449	410.3	341	16792	53108
69	36315	298.21	10583	2598.8	143.28	1765.8	1043.2	83.863	422.45	351.1	17290	53605
70	36315	306.92	10892	2674.7	147.47	1817.4	1073.6	86.311	434.79	361.35	17795	54110
71	36315	315.75	11206	2751.6	151.71	1869.7	1104.5	88.795	447.3	371.75	18307	54622
72	36315	324.71	11523	2829.7	156.01	1922.7	1135.8	91.313	459.99	382.29	18826	55141
73	36315	333.79	11846	2908.8	160.38	1976.5	1167.6	93.868	472.85	392.99	19352	55668
74	36315	343	12172	2989.1	164.8	2031	1199.8	96.457	485.9	403.83	19886	56202
75	36315	352.33	12504	3070.4	169.29	2086.3	1232.5	99.081	499.12	414.81	20427	56743
76	36315	361.79	12839	3152.8	173.83	2142.3	1265.6	101.74	512.52	425.95	20976	57291
77	36315	371.37	13179	3236.3	178.43	2199	1299.1	104.44	526.09	437.23	21531	57847
78	36315	381.08	13524	3320.9	183.1	2256.5	1333	107.17	539.84	448.66	22094	58410
79	36315	390.91	13873	3406.6	187.82	2314.7	1367.4	109.93	553.78	460.24	22664	58980
80	36315	400.87	14226	3493.4	192.61	2373.7	1402.3	112.73	567.88	471.97	23242	59557
81	36315	410.96	14584	3581.3	197.45	2433.4	1437.6	115.57	582.17	483.84	23827	60142
82	36315	421.16	14947	3670.3	202.36	2493.9	1473.3	118.44	596.63	495.86	24418	60734
83	36315	431.5	15313	3760.3	207.33	2555.1	1509.4	121.35	611.27	508.03	25018	61333
84	36315	441.96	15685	3851.5	212.35	2617	1546	124.29	626.09	520.34	25624	61940
85	36315	452.55	16060	3943.8	217.44	2679.7	1583	127.26	641.09	532.81	26238	62553
86	36315	463.26	16440	4037.1	222.58	2743.1	1620.5	130.28	656.26	545.42	26859	63174
87	36315	474.09	16825	4131.5	227.79	2807.3	1658.4	133.32	671.61	558.17	27487	63803
88	36315	485.05	17214	4227	233.06	2872.2	1696.8	136.41	687.14	571.08	28123	64438
89	36315	496.14	17607	4323.7	238.38	2937.8	1735.5	139.52	702.85	584.13	28765	65081
90	36315	507.35	18005	4421.4	243.77	3004.2	1774.8	142.68	718.73	597.33	29415	65731
91	36315	518.69	18408	4520.2	249.22	3071.4	1814.4	145.87	734.79	610.68	30073	66388
92	36315	530.15	18814	4620.1	254.73	3139.2	1854.5	149.09	751.03	624.18	30737	67053
93	36315	541.74	19226	4721	260.29	3207.9	1895	152.35	767.44	637.82	31409	67725
94	36315	553.45	19641	4823.1	265.92	3277.2	1936	155.64	784.03	651.61	32088	68404
95	36315	565.29	20061	4926.3	271.61	3347.3	1977.4	158.97	800.81	665.55	32775	69090
96	36315	577.25	20486	5030.5	277.36	3418.2	2019.3	162.34	817.75	679.63	33468	69784
97	36315	589.34	20915	5135.9	283.17	3489.7	2061.6	165.73	834.88	693.86	34169	70485
98	36315	601.56	21348	5242.3	289.03	3562.1	2104.3	169.17	852.18	708.24	34877	71193
99	36315	613.9	21786	5349.9	294.96	3635.1	2147.5	172.64	869.66	722.77	35593	71908
100	36315	626.36	22229	5458.5	300.95	3708.9	2191.1	176.14	887.32	737.45	36315	72631

## Harmoniklerin sıcaklık artışları

<b>%</b> <b>THB</b>	<b>Ih1</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih3</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih5</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih7</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih9</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih11</b> <b>Sic.Art °C</b>
0	69.996	0	0	0	0	0
1	69.996	0.00012073	0.0042845	0.0010521	5.8007e-005	0.00071488
2	69.996	0.00048291	0.017138	0.0042084	0.00023203	0.0028595
3	69.996	0.0010865	0.03856	0.0094688	0.00052206	0.0064339
4	69.996	0.0019316	0.068551	0.016833	0.00092811	0.011438
5	69.996	0.0030182	0.10711	0.026302	0.0014502	0.017872
6	69.996	0.0043462	0.15424	0.037875	0.0020882	0.025736
7	69.996	0.0059156	0.20994	0.051552	0.0028423	0.035029
8	69.996	0.0077266	0.27421	0.067334	0.0037124	0.045752
9	69.996	0.0097789	0.34704	0.085219	0.0046985	0.057905
10	69.996	0.012073	0.42845	0.10521	0.0058007	0.071488
11	69.996	0.014608	0.51842	0.1273	0.0070188	0.0865
12	69.996	0.017385	0.61696	0.1515	0.008353	0.10294
13	69.996	0.020403	0.72407	0.1778	0.0098031	0.12081
14	69.996	0.023663	0.83975	0.20621	0.011369	0.14012
15	69.996	0.027164	0.964	0.23672	0.013052	0.16085
16	69.996	0.030906	1.0968	0.26934	0.01485	0.18301
17	69.996	0.03489	1.2382	0.30405	0.016764	0.2066
18	69.996	0.039116	1.3882	0.34088	0.018794	0.23162
19	69.996	0.043583	1.5467	0.3798	0.02094	0.25807
20	69.996	0.048291	1.7138	0.42084	0.023203	0.28595
21	69.996	0.053241	1.8894	0.46397	0.025581	0.31526
22	69.996	0.058432	2.0737	0.50921	0.028075	0.346
23	69.996	0.063865	2.2665	0.55656	0.030686	0.37817
24	69.996	0.069539	2.4678	0.606	0.033412	0.41177
25	69.996	0.075455	2.6778	0.65756	0.036254	0.4468
<b>%</b> <b>THB</b>	<b>Ih13</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih15</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih17</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Ih19</b> <b>Sic.Art °C</b>	<b>Top.Harm</b> <b>Sic.Art °C.</b>	<b>Top.Sic</b> <b>°C</b>
0	0	0	0	0	0	89.996
1	0.00042231	3.3951e-005	0.00017103	0.00014214	0.0069996	90.003
2	0.0016893	0.0001358	0.0006841	0.00056856	0.027998	90.024
3	0.0038008	0.00030556	0.0015392	0.0012792	0.062996	90.059
4	0.006757	0.00054321	0.0027364	0.0022742	0.11199	90.108
5	0.010558	0.00084877	0.0042756	0.0035535	0.17499	90.171
6	0.015203	0.0012222	0.0061569	0.005117	0.25199	90.248
7	0.020693	0.0016636	0.0083803	0.0069648	0.34298	90.339
8	0.027028	0.0021729	0.010946	0.0090969	0.44797	90.444
9	0.034207	0.00275	0.013853	0.011513	0.56697	90.563
10	0.042231	0.0033951	0.017103	0.014214	0.69996	90.696
11	0.0511	0.0041081	0.020694	0.017199	0.84695	90.843
12	0.060813	0.0048889	0.024628	0.020468	1.0079	91.004
13	0.071371	0.0057377	0.028903	0.024021	1.1829	91.179
14	0.082774	0.0066544	0.033521	0.027859	1.3719	91.368
15	0.095021	0.007639	0.038481	0.031981	1.5749	91.571
16	0.10811	0.0086914	0.043783	0.036388	1.7919	91.788
17	0.12205	0.0098118	0.049426	0.041078	2.0229	92.019
18	0.13683	0.011	0.055412	0.046053	2.2679	92.264
19	0.15246	0.012256	0.06174	0.051312	2.5269	92.523
20	0.16893	0.01358	0.06841	0.056856	2.7998	92.796
21	0.18624	0.014972	0.075422	0.062683	3.0868	93.083
22	0.2044	0.016432	0.082776	0.068795	3.3878	93.384
23	0.2234	0.01796	0.090473	0.075191	3.7028	93.699
24	0.24325	0.019556	0.098511	0.081872	4.0318	94.028
25	0.26395	0.021219	0.10689	0.088837	4.3747	94.371

Harmoniklerin sıcaklık artışları “(Devam)”

<b>%</b>	<b>Ih1</b>	<b>Ih3</b>	<b>Ih5</b>	<b>Ih7</b>	<b>Ih9</b>	<b>Ih11</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>
26	69.996	0.081612	2.8963	0.71121	0.039213	0.48326
27	69.996	0.08801	3.1234	0.76697	0.042287	0.52114
28	69.996	0.09465	3.359	0.82484	0.045477	0.56046
29	69.996	0.10153	3.6032	0.88481	0.048784	0.60121
30	69.996	0.10865	3.856	0.94688	0.052206	0.64339
31	69.996	0.11602	4.1174	1.0111	0.055744	0.687
32	69.996	0.12362	4.3873	1.0773	0.059399	0.73203
33	69.996	0.13147	4.6658	1.1457	0.063169	0.7785
34	69.996	0.13956	4.9528	1.2162	0.067056	0.8264
35	69.996	0.14789	5.2485	1.2888	0.071058	0.87572
36	69.996	0.15646	5.5527	1.3635	0.075177	0.92648
37	69.996	0.16528	5.8654	1.4403	0.079411	0.97867
38	69.996	0.17433	6.1868	1.5192	0.083762	1.0323
39	69.996	0.18363	6.5167	1.6002	0.088228	1.0873
40	69.996	0.19316	6.8551	1.6833	0.092811	1.1438
41	69.996	0.20294	7.2022	1.7686	0.097509	1.2017
42	69.996	0.21296	7.5578	1.8559	0.10232	1.261
43	69.996	0.22323	7.922	1.9453	0.10725	1.3218
44	69.996	0.23373	8.2947	2.0368	0.1123	1.384
45	69.996	0.24447	8.676	2.1305	0.11746	1.4476
46	69.996	0.25546	9.0659	2.2262	0.12274	1.5127
47	69.996	0.26669	9.4644	2.3241	0.12814	1.5792
48	69.996	0.27816	9.8714	2.424	0.13365	1.6471
49	69.996	0.28987	10.287	2.5261	0.13927	1.7164
50	69.996	0.30182	10.711	2.6302	0.14502	1.7872
<b>%</b>	<b>Ih13</b>	<b>Ih15</b>	<b>Ih17</b>	<b>Ih19</b>	<b>Top.Harm</b>	<b>Top.Sic</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C.</b>	<b>Sic.Art °C</b>
26	0.28548	0.022951	0.11561	0.096086	4.7317	94.728
27	0.30787	0.02475	0.12468	0.10362	5.1027	95.099
28	0.33109	0.026618	0.13408	0.11144	5.4877	95.484
29	0.35517	0.028553	0.14383	0.11954	5.8867	95.882
30	0.38008	0.030556	0.15392	0.12792	6.2996	96.295
31	0.40584	0.032627	0.16436	0.1366	6.7266	96.722
32	0.43245	0.034766	0.17513	0.14555	7.1676	97.163
33	0.4599	0.036973	0.18625	0.15479	7.6226	97.618
34	0.4882	0.039247	0.19771	0.16431	8.0915	98.087
35	0.51733	0.04159	0.20951	0.17412	8.5745	98.57
36	0.54732	0.044	0.22165	0.18421	9.0715	99.067
37	0.57815	0.046479	0.23413	0.19459	9.5824	99.578
38	0.60982	0.049025	0.24696	0.20525	10.107	100.1
39	0.64234	0.051639	0.26013	0.21619	10.646	100.64
40	0.6757	0.054321	0.27364	0.22742	11.199	101.2
41	0.70991	0.057071	0.28749	0.23894	11.766	101.76
42	0.74496	0.059889	0.30169	0.25073	12.347	102.34
43	0.78086	0.062775	0.31623	0.26281	12.942	102.94
44	0.8176	0.065729	0.33111	0.27518	13.551	103.55
45	0.85519	0.068751	0.34633	0.28783	14.174	104.17
46	0.89362	0.07184	0.36189	0.30077	14.811	104.81
47	0.93289	0.074998	0.3778	0.31398	15.462	105.46
48	0.97301	0.078223	0.39404	0.32749	16.127	106.12
49	1.014	0.081516	0.41063	0.34128	16.806	106.8
50	1.0558	0.084877	0.42756	0.35535	17.499	107.49

Harmoniklerin sıcaklık artışları “(Devam)”

<b>%</b>	<b>Ih1</b>	<b>Ih3</b>	<b>Ih5</b>	<b>Ih7</b>	<b>Ih9</b>	<b>Ih11</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>
<b>%</b>	<b>Ih1</b>	<b>Ih3</b>	<b>Ih5</b>	<b>Ih7</b>	<b>Ih9</b>	<b>Ih11</b>
51	69.996	0.31401	11.144	2.7365	0.15088	1.8594
52	69.996	0.32645	11.585	2.8449	0.15685	1.933
53	69.996	0.33912	12.035	2.9553	0.16294	2.0081
54	69.996	0.35204	12.493	3.0679	0.16915	2.0846
55	69.996	0.3652	12.96	3.1826	0.17547	2.1625
56	69.996	0.3786	13.436	3.2994	0.18191	2.2419
57	69.996	0.39224	13.92	3.4182	0.18846	2.3226
58	69.996	0.40613	14.413	3.5392	0.19513	2.4048
59	69.996	0.42025	14.914	3.6623	0.20192	2.4885
60	69.996	0.43462	15.424	3.7875	0.20882	2.5736
61	69.996	0.44923	15.942	3.9148	0.21584	2.6601
62	69.996	0.46408	16.469	4.0442	0.22298	2.748
63	69.996	0.47917	17.005	4.1757	0.23023	2.8373
64	69.996	0.4945	17.549	4.3094	0.2376	2.9281
65	69.996	0.51007	18.102	4.4451	0.24508	3.0204
66	69.996	0.52589	18.663	4.5829	0.25268	3.114
67	69.996	0.54195	19.233	4.7228	0.26039	3.2091
68	69.996	0.55824	19.811	4.8649	0.26822	3.3056
69	69.996	0.57478	20.398	5.009	0.27617	3.4035
70	69.996	0.59156	20.994	5.1552	0.28423	3.5029
71	69.996	0.60859	21.598	5.3036	0.29241	3.6037
72	69.996	0.62585	22.211	5.454	0.30071	3.7059
73	69.996	0.64336	22.832	5.6066	0.30912	3.8096
74	69.996	0.6611	23.462	5.7612	0.31764	3.9147
75	69.996	0.67909	24.1	5.918	0.32629	4.0212
<b>%</b>	<b>Ih13</b>	<b>Ih15</b>	<b>Ih17</b>	<b>Ih19</b>	<b>Top.Harm</b>	<b>Top.Sic</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C</b>	<b>Sic.Art. °C.</b>	<b>Sic.Art. °C</b>
51	1.0984	0.088306	0.44484	0.3697	18.206	108.2
52	1.1419	0.091803	0.46245	0.38434	18.927	108.92
53	1.1863	0.095368	0.48041	0.39927	19.662	109.66
54	1.2315	0.099001	0.49871	0.41448	20.411	110.41
55	1.2775	0.1027	0.51735	0.42997	21.174	111.17
56	1.3244	0.10647	0.53634	0.44575	21.951	111.95
57	1.3721	0.11031	0.55566	0.46181	22.742	112.74
58	1.4207	0.11421	0.57533	0.47816	23.547	113.54
59	1.4701	0.11818	0.59534	0.49479	24.366	114.36
60	1.5203	0.12222	0.61569	0.5117	25.199	115.19
61	1.5714	0.12633	0.63639	0.5289	26.045	116.04
62	1.6234	0.13051	0.65742	0.54638	26.906	116.9
63	1.6762	0.13475	0.6788	0.56415	27.781	117.78
64	1.7298	0.13906	0.70052	0.5822	28.67	118.67
65	1.7843	0.14344	0.72258	0.60054	29.573	119.57
66	1.8396	0.14789	0.74499	0.61916	30.49	120.49
67	1.8958	0.15241	0.76773	0.63806	31.421	121.42
68	1.9528	0.15699	0.79082	0.65725	32.366	122.36
69	2.0106	0.16164	0.81425	0.67672	33.325	123.32
70	2.0693	0.16636	0.83803	0.69648	34.298	124.29
71	2.1289	0.17115	0.86214	0.71652	35.285	125.28
72	2.1893	0.176	0.8866	0.73685	36.286	126.28
73	2.2505	0.18092	0.9114	0.75746	37.301	127.3
74	2.3126	0.18592	0.93654	0.77835	38.33	128.33
75	2.3755	0.19097	0.96202	0.79953	39.373	129.37

Harmoniklerin sıcaklık artışları “(Devam)”

<b>%</b>	<b>Ih1</b>	<b>Ih3</b>	<b>Ih5</b>	<b>Ih7</b>	<b>Ih9</b>	<b>Ih11</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>
76	69.996	0.69732	24.747	6.0769	0.33505	4.1291
77	69.996	0.71579	25.403	6.2378	0.34392	4.2385
78	69.996	0.73451	26.067	6.4009	0.35291	4.3493
79	69.996	0.75346	26.739	6.5661	0.36202	4.4615
80	69.996	0.77266	27.421	6.7334	0.37124	4.5752
81	69.996	0.79209	28.11	6.9028	0.38058	4.6903
82	69.996	0.81177	28.809	7.0743	0.39004	4.8068
83	69.996	0.83169	29.516	7.2479	0.39961	4.9248
84	69.996	0.85185	30.231	7.4236	0.4093	5.0442
85	69.996	0.87226	30.955	7.6014	0.4191	5.165
86	69.996	0.8929	31.688	7.7813	0.42902	5.2872
87	69.996	0.91379	32.429	7.9633	0.43905	5.4109
88	69.996	0.93491	33.179	8.1474	0.4492	5.536
89	69.996	0.95628	33.937	8.3336	0.45947	5.6625
90	69.996	0.97789	34.704	8.5219	0.46985	5.7905
91	69.996	0.99974	35.48	8.7124	0.48035	5.9199
92	69.996	1.0218	36.264	8.9049	0.49097	6.0507
93	69.996	1.0442	37.056	9.0995	0.5017	6.183
94	69.996	1.0667	37.857	9.2963	0.51255	6.3166
95	69.996	1.0896	38.667	9.4951	0.52351	6.4518
96	69.996	1.1126	39.486	9.6961	0.53459	6.5883
97	69.996	1.1359	40.312	9.8991	0.54579	6.7263
98	69.996	1.1595	41.148	10.104	0.5571	6.8657
99	69.996	1.1832	41.992	10.312	0.56852	7.0065
100	69.996	1.2073	42.845	10.521	0.58007	7.1488
<b>%</b>	<b>Ih1</b>	<b>Ih3</b>	<b>Ih5</b>	<b>Ih7</b>	<b>Ih9</b>	<b>Ih11</b>
<b>THB</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>	<b>Sic.Art °C</b>
76	2.4393	0.1961	0.98784	0.82099	40.43	130.43
77	2.5039	0.20129	1.014	0.84274	41.501	131.5
78	2.5694	0.20656	1.0405	0.86477	42.586	132.58
79	2.6357	0.21189	1.0674	0.88709	43.684	133.68
80	2.7028	0.21729	1.0946	0.90969	44.797	134.79
81	2.7708	0.22275	1.1221	0.93257	45.924	135.92
82	2.8396	0.22829	1.15	0.95574	47.065	137.06
83	2.9093	0.23389	1.1782	0.97919	48.22	138.22
84	2.9798	0.23956	1.2068	1.0029	49.389	139.38
85	3.0512	0.2453	1.2357	1.027	50.572	140.57
86	3.1234	0.2511	1.2649	1.0513	51.769	141.76
87	3.1965	0.25697	1.2945	1.0758	52.98	142.98
88	3.2704	0.26292	1.3244	1.1007	54.205	144.2
89	3.3451	0.26893	1.3547	1.1259	55.444	145.44
90	3.4207	0.275	1.3853	1.1513	56.697	146.69
91	3.4972	0.28115	1.4163	1.1771	57.964	147.96
92	3.5745	0.28736	1.4476	1.2031	59.245	149.24
93	3.6526	0.29364	1.4792	1.2294	60.539	150.54
94	3.7316	0.29999	1.5112	1.2559	61.848	151.84
95	3.8114	0.30641	1.5435	1.2828	63.171	153.17
96	3.892	0.31289	1.5762	1.31	64.508	154.5
97	3.9736	0.31944	1.6092	1.3374	65.859	155.85
98	4.0559	0.32606	1.6425	1.3651	67.224	157.22
99	4.1391	0.33275	1.6762	1.3931	68.603	158.6
100	4.2231	0.33951	1.7103	1.4214	69.996	159.99

## **ÖZGEÇMİŞ**

1980 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1999 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden 2003 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005 yılından bu güne Kocaeli Üniversitesi'nde 2547 sayılı Kanunun 50/d maddesi uyarınca Fen Bilimleri Enstitüsünden görevlendirmeyle Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.