

SİMETRİK HABERLEŞME KABLolarINDA İKİNCİL PARAMETRELERİN FREKANS VE SICAKLIKLA DEĞİŞİMİNİN DENEYSSEL İNCELENMESİ

Güneş YILMAZ*

Özet: Bu çalışmada, Türk PTT'sinin "Ses Frekans Dağıtım Kabloları Teknik Şartnamesi"ne göre üretilip şehiriçi telefon şebekesine döşenen kabloların yüksek frekans parametreleri incelenmiş, teorik hesaplamaların pratik ölçmeler ve deney sonuçlarıyla ne derece bağdaştığı araştırılmış ve gerektiğinde formüllere düzeltme faktörü eklenmiştir. Şehiriçi telefon şebekesinde kullanılan 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm çapında bakır telli PD-PDA ve PDF tipi kablolarla teorik hesaplamalarla bulunan kablo ikincil parametreleri, deney sonuçları ile kıyaslanmış, formüllerin %2 veya %3'den küçük bir hata ile geçerli olduğu frekans bandları tespit edilmiştir. 0-10 MHz frekans bölgesi 5 alt frekans bandına bölünmüş ve telefon şebekesine döşenen 8 tip dolgulu ve dolgunsuz kablo için band sınırları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Haberleşme Kabloları, İkincil Parametreler, Hat Zayıflaması, Karakteristik Empedans.

Experimental Analysis of Variation of Secondary Parameters with Frequency and Temperature in Symmetrical Telecommunication Cables

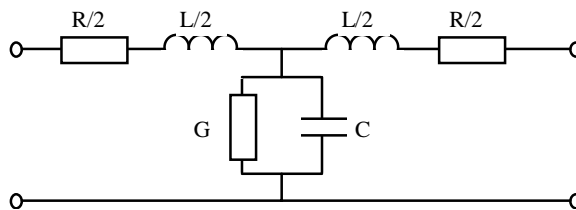
Abstract: In this study, appropriate empirical formulations have been developed for the high frequency behavior of subscriber cables manufactured in accordance with Turkish PTT Specifications. Secondary parameters for 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm and 0.9 mm diameters PD-PDA and PDF type cables with copper conductors have been compared with the theoretical calculations. In regions where theoretical calculations deviate by less than 2-3% from experimental result, frequency bands that are valid have been defined. In conclusion, within the 0-10 MHz range boundaries of 5 frequency bands have been determined for 8 types of filled and unfilled local telephone cables.

Key Words: Communication Cables, Secondary Parameters, Line Attenuation, Characteristic Impedance.

1. GENEL BİLGİLER

Simetrik transmisyon hatlarını oluşturan iletkenlerin her birim uzunluğunun bir direnci (R) ve bir endüktansı (L) vardır (Schmidt, 1982). Ayrıca birbirine paralel ve araları yalıtılmış olan hat iletkenleri arasında bir kapasite (C) mevcut olduğu gibi yalıtkan maddelerin mükemmel olmaması nedeniyle küçük de olsa bir kaçak iletkenlik (G-perditans) vardır. Bütün bu direnç, endüktans, kapasite ve kaçak iletkenlik bir yerde toplu olmayıp hat boyunca üniform olarak dağılmıştır.

Homogen bir hattın transmisyon özelliklerini tamamiyle tanımlayan elektriksel parametrelere birincil parametreler denir. Bu parametreler, hattın yapılmasında kullanılan malzemelerin iletkenliği, permeabilitesi, dielektrik sabiti gibi fiziksel özelliklerine, boyutlarına ve geometrik konumlarına göre değiştiği gibi, çevre koşullarının değişmesinden de etkilenmektedir. R, L, C ve G olarak belirtilen birincil parametreler nitelikleri bakımından ikiye ayrılırlar. Boyuna Parametreler: Direnç ve endüktans; Enine Parametreler: Kapasite ve perditans (Uzgören, 1982).



Şekil 1.

İki Telli Simetrik Transmisyon Hattının Eşdeğer Şeması

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle, Bursa.

Birincil parametreleri R, L, C ve G olan bir transmisyon hattının karakteristik empedansı Z_0 ve propagasyon sabiti γ , aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)} = Z_r + jZ_i; \gamma = \sqrt{(R + j\omega L).(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1)$$

Birer reel büyüklük olan R, L, C ve G 'ye birincil parametreler denildiği gibi, birer kompleks büyüklük olan Z ve γ 'ya ikincil parametreler adı verilir. Görülüyor ki, ikincil parametrelerin her ikisi de hattın birincil parametrelerinden başka, frekansa da bağlıdır. Yani, her bir hattın karakteristik empedansı ve propagasyon sabiti, belli bir frekans için sabit olmakla birlikte, hat üzerinden iletilen işaretin frekansı ile değişen büyüklüklerdir. Hat zayıflaması α ve faz sabiti β 'nın hesaplama formülleri (2) ve (3)'te verilmiştir.

$$\alpha = \sqrt{0.5 \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} - \omega^2 .L.C + R.G \right]} \quad \text{Np/km} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{0.5 \left[\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + \omega^2 .L.C - R.G \right]} \quad \text{rad/km} \quad (3)$$

Her frekansta sinüsoidal dalganın faz hızı V_p ve faz gecikmesi t_p arasında $V_p = (1/t_p) - (\omega/b)$ bağıntısı vardır.

2. İKİNCİL PARAMETRELERİN FREKANS ve SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ

Yukarıda adı geçen ikincil parametreler, her hattın transmisyon özelliklerinin bir göstergesidir. Bu parametrelerin frekansla değişimi ayrı frekans bantlarında oldukça büyük bir farklılık gösterdiğinden, bizi ilgilendiren 0-2 MHz frekans bölgesini en azından dört ayrı banda bölmekte yarar vardır.

- Çok alçak frekanslar ve doğru akım (DC)
- Ses frekansları bandı (300 Hz - 10 kHz)
- Orta frekanslar bandı (10 kHz - 150 kHz)
- Yüksek frekanslar bandı > 150 kHz

2.1. Çok Alçak Frekanslar Bandında Değişim

Bu frekanslarda $\omega = 0$, veya $\omega \rightarrow 0$ olduğundan $\omega.L \approx 0$ ve $\omega.C \approx 0$ 'dır. İkincil parametrelerinin değeri (4)'e göre hesaplanır.

$$Z_0 = \sqrt{R/G} \quad ; \quad \gamma = \sqrt{R.G} \quad ; \quad \beta = 0 \quad (4)$$

Z_0 sırf omik bir direnç, γ ise reel bir sayıdır. Sürekli rejime erişmiş doğru akım halinde, reaktif empedans sözkonusu olamayacağından bu sonuç fiziksel gerçeklere tam uymaktadır. Frekans yükseldikçe Z_0 ve γ 'yı veren (1) denkleminde gerçel bileşen yanında bir de sanal bileşen bulunur.

2.2. Ses Frekansları Bandında Değişim (300 Hz-10 kHz)

Ses frekans bandında $\omega L \ll R$ ve $\omega C \gg G$ olduğundan karakteristik empedans

$$Z_0 = \sqrt{R/(G + j\omega.C)} = \sqrt{R/(2.\omega.C)} + j\sqrt{R/(2.\omega.C)} = Z_r + jZ_i = Z_1 \quad (5)$$

$$|Z_0| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2}$$

olarak hesaplanır.

Propagasyon sabiti ise

$$\gamma = j\omega.C.R = \sqrt{\omega.C.R/2} + j\sqrt{\omega.C.R/2} = \alpha + j\beta \quad (6)$$

şeklini alır.

Hat zayıflaması ve faz sabitinin değerleri rakam olarak aynıdır.

$$\alpha_1 \approx \beta_1 \approx \sqrt{\omega.C.R/2} \quad (7)$$

Tek frekans için faz hızı

$$V_p = \omega/\beta = \sqrt{2\omega/(R.C)} \quad (8)$$

ve faz gecikmesi

$$t_p = 1/V_p = \sqrt{(R.C/2\omega)} \quad (9)$$

olarak hesaplanır.

Söz konusu, birçok frekansı içeren frekans bandı ise, grup faz hızı

$$V_g = d\omega/d\beta = 2.\sqrt{(2\omega/R.C)} \quad (10)$$

ve grup faz gecikmesi

$$t_g = 1/V_g = (1/2)\sqrt{(R.C/2\omega)} \quad (11)$$

formülleri ile bulunur.

Görüldüğü gibi bu frekans bandında, ikincil parametrelerin tamamı, frekansla \sqrt{f} , sıcaklıkla ise $\sim \% 2/^\circ C$ olarak değişir (Kohlrausch, 1968, Lenehan, 1977).

2.3. Orta Frekanslar Bandı (10 kHz-150 kHz)

Bu frekanslarda $\omega L \approx R$ ve $\omega C \gg G$ 'dir ve hat empedansı

$$Z = Z_r + jZ_i = \sqrt{(L/C)}D_1 - j\sqrt{(R/2\omega LC)} \cdot (1/D_1) = Z_2 \quad (12)$$

olarak hesaplanır.

$$\text{Burada} \quad D_1 = \sqrt{0.5 + 0.5\sqrt{1 + (R/\omega L)^2}} \text{ dir.}$$

$$\text{Hat zayıflaması,} \quad \alpha_2 = (R/2).\sqrt{(C/L)} D_1 \quad (13)$$

$$\text{Faz sabiti,} \quad \beta_2 = \omega \sqrt{L.C} \cdot D_1 \quad (14)$$

$$\text{Faz hızı,} \quad V_p = \left(1/\sqrt{L.C.D_1}\right) \quad (15)$$

$$\text{Faz gecikmesi,} \quad t_p = \sqrt{L.C.D_1} \quad (16)$$

olarak hesaplanır (Atalay, 1977).

Tüm formüllerde yer alan D_1 faktörü hesaplanmış ve incelenen frekans bandının alt kısmında (~ 10 kHz), kablo tiplerine göre farklı (0.4 mm ~ 1.9 ; 0.6 mm ~ 1.4 ; 0.9 mm ~ 1.13) değerler aldığı, frekans yükseldikçe, değerlerin düşerek 1.0'e yaklaştığı görülmüştür. Orta frekanslar bandının üst kısmında ise (~ 150 kHz), $D_1 \sim 1.0$ (0.4 mm ~ 1.02 , 0.6 mm ~ 1.006 , 0.9 mm ~ 1.002) bulunmuştur.

2.4. Yüksek Frekans Bandı ($f > 150$ kHz)

İncelenen frekans bandında $\omega L \gg R$ ve $\omega C \gg G$ olduğundan, birincil ve ikincil parametreleri arasındaki bağıntıyı veren formüller de sadeleşir.

$$\text{Hat empedansı} \quad Z_0 = \sqrt{L/C} = Z_r = Z_3 \quad (17)$$

gerçel büyüklük olup, omik bir dirençtir.

$$\text{Faz Sabiti} \quad \beta_3 = \omega \sqrt{L.C} \quad (18)$$

$$\text{Hat zayıflaması} \quad \alpha_3 = (R/2)\sqrt{C/L} + (G/2)\sqrt{L/C} = \alpha_a + \alpha_y \quad (19)$$

$$\text{veya} \quad \alpha_3 = (R/2Z_0) + (GZ_0/2) = \alpha_a + \alpha_y \approx \left(R/\left(2\sqrt{L/C}\right)\right) \quad (20)$$

olarak hesaplanır.

Burada; α_a - Çiftin etken direnci, endüktansı ve kapasitesinden kaynaklanan zayıflama
 α_y - Yalıtıkandaki dielektrik kayıplarından kaynaklanan zayıflama

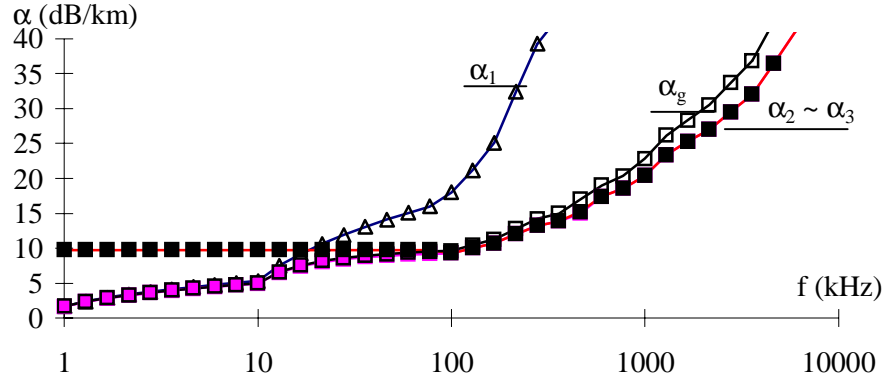
$$\text{Bu frekanslarda faz hızı hat hızına eşit olduğundan} \quad V_p = V_g = 1/\sqrt{L.C} \quad (21)$$

faz gecikmesi ile grup gecikmesi de eşittir ve (22) formülüyle hesaplanır.

$$t_p = t_g = 1/V_g \sim \sqrt{L.C} = t_0 \quad (22)$$

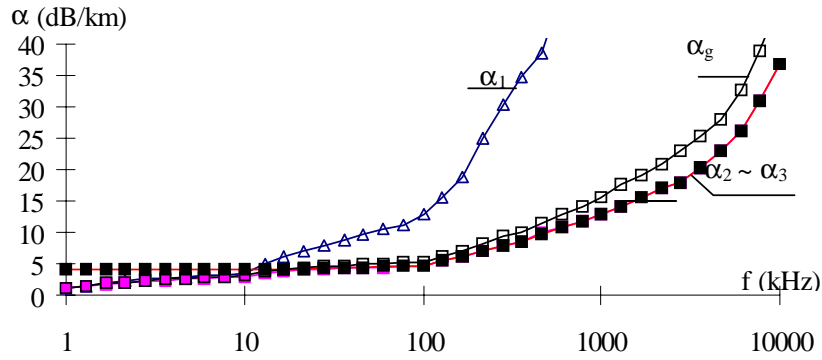
Görüldüğü gibi yüksek frekans bandında faz sabiti dışında ikincil parametrelerin frekansla değişim hızı, orta frekanslara göre azalmıştır. Efektif kapasite frekansla değişmediğinden, karakteristik empedans, faz hızı ve faz gecikmesi sadece endüktansın çok az oranda (~ % 5) değişmesinden etkilenir. Hat zayıflaması da direkt olarak frekansa bağlı değildir ve sadece direncin frekansla değişiminden etkilenir.

0.4/0.70 ve 0.6/1.10 tipi kablolarda (7), (13) ve (20)'e göre hesaplanan α_1 , α_2 , ve α_3 ve ölçülen gerçek hat zayıflaması α_g 'nin frekansla değişimi Şekil 2 ve Şekil 3'te; telefon şebekesine döşenen sekiz tip dolgulu ve dolgusuz dağıtım kablosunda gerçek hat zayıflaması değerlerinin frekansla değişimi Tablo 1'de; 0.4/0.70 tipi kablolarda (7), (14), (18)'e göre hesaplanan β_1 , β_2 , β_3 ve gerçek faz sabiti β_g değerlerinin frekansla değişimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 2.

0.4/0.70 tipi kablolarda hat zayıflamasının frekansla değişimi

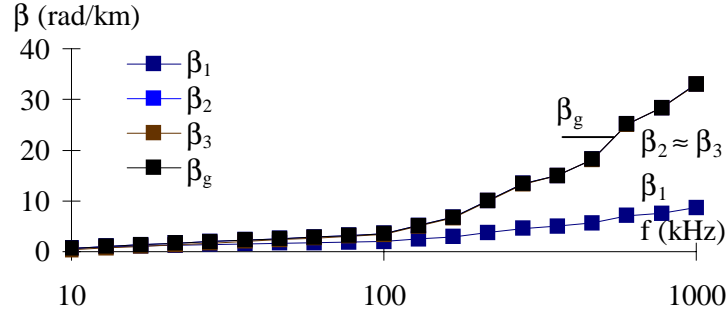


Şekil 3.

0.6/1.10 tipi kablolarda hat zayıflamasının frekansla değişimi

Tablo 1.
Sekiz tip dağıtım kablosunda gerçek hat zayıflamasının frekansla değişimi

	0.4/0.70	0.4/0.84	0.5/0.86	0.5/1.04	0.6/1.10	0.6/1.40	0.9/1.64	0.9/2.00
Frekans	α_g	α_g	α_g	α_g	α_g	α_g	α_g	α_g
f(kHz)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)	(dB/km)
1	1.68	1.68	1.35	1.36	1.14	1.12	0.78	0.76
10	5.00	4.93	3.89	3.87	3.15	3.02	1.85	1.76
50	8.63	8.27	6.10	5.88	4.58	4.21	2.69	2.51
100	9.63	9.12	6.94	6.61	5.42	4.94	3.52	3.29
300	12.80	11.98	10.05	9.50	8.30	7.61	5.81	5.49
512	15.71	14.73	12.71	11.96	10.57	9.76	7.45	7.08
1024	21.72	20.53	17.79	16.65	14.80	13.83	10.54	10.10
2048	30.53	29.30	24.99	23.28	20.76	19.71	14.93	14.46
5000	48.22	47.72	39.77	36.80	32.68	31.85	23.44	23.06
10000	70.06	71.72	57.41	52.82	46.64	46.59	33.35	33.25



Şekil 4.
0.4/0.70 tipi kablolarda β_1 , β_2 , β_3 ve β_g 'nin frekansla değişimi

Şekil 4'te 0.4/0.70 tipi kablolarda (5), (12), (17)'e göre hesaplanan Z_1 , Z_2 ve Z_3 değerleri ve Tablo 2'de de gerçek karakteristik empedans Z_g değerlerinin frekansla değişimi verilmiştir.

Tablo 2.
0.4/0.70 tipi kablolarda hesaplanan ve gerçek karakteristik empedansın frekansla değişimi

Z (Ω)	f (kHz)							
	1	10	50	100	400	1000	5000	10000
Z_1	992.00	272.00	140.00	99.00	57.00	43.00	27.00	23.00
Z_2	5753.00	505.00	166.00	133.00	121.00	116.00	112.00	111.00
Z_3	121.00	121.00	121.00	121.00	120.00	116.00	112.00	111.00
Z_g	995.00	272.00	167.00	134.00	121.00	117.00	113.00	112.00

Tablo 3'te de sekiz tip dağıtım kablosunda grup gecikmesinin frekansla değişimi görülmektedir.

Tablo 3.
Sekiz tip dağıtım kablosunda grup gecikmesi t_g 'nin frekansla değişimi

	0.4/0.70	0.4/0.84	0.5/0.86	0.5/1.04	0.6/1.10	0.6/1.40	0.9/1.64	0.9/2.00
Frekans	t_g	t_g	t_g	t_g	t_g	t_g	t_g	t_g
f(kHz)	(μ s)	(μ s)	(μ s)	(μ s)	(μ s)	(μ s)	(μ s)	(μ s)
1	20.76	21.12	17.66	18.04	15.73	16.17	12.28	12.65
10	10.20	10.57	9.22	9.60	8.69	9.14	7.59	7.95
50	7.50	7.87	7.06	7.44	6.91	7.35	6.45	6.82
100	6.86	7.23	6.57	6.95	6.52	6.97	6.17	6.55
300	6.29	6.65	6.10	6.49	6.07	6.53	5.78	6.17
512	6.06	6.44	5.87	6.27	5.88	6.35	5.64	6.03
1024	5.80	6.18	5.65	6.05	5.69	6.17	5.49	5.90
2048	5.59	5.98	5.47	5.88	5.54	6.02	5.38	5.79
5000	5.39	5.79	5.30	5.73	5.40	5.89	5.27	5.69
10000	5.28	5.69	5.21	5.63	5.31	5.81	5.21	5.62

3. TRANSMİSYON HATLARINDA YANSIMA

Transmisyon hattın sonuna, kendi karakteristik empedansından farklı bir empedans bağlandığında (veya karakteristik empedansları farklı olan iki kablo birbirine bağlandığında), gelen enerjinin bir kısmı yansıyor tekrar kaynağa döner (Gillaber ve Buffat, 1992). Benzeri yansımaya sadece hat başında ve sonunda değil, hat boyunca empedans dalgalanmaları (değişikliği) olan her noktada olur (Uzgören, 1982, Küpfmüller, 1988). Uzunluğu sınırlı ve karakteristik empedansı Z_0 olan hattın sonu herhangi bir Z_r yük empedansı ile kapandığını, baş tarafına da iç empedansı Z_d olan bir E_d kaynağı uygulandığını farz edelim. Hattın kaynak ucundaki gerilim ve akım U_k ve I_k , yük ucundaki gerilim ve akım da U_r ve I_r ise, kaynaktan x uzaklıktaki bir noktanın U_x gerilimi ve I_x akımını hesapladığımızda;

$$k_{r1} = [(Z_d - Z_0)/(Z_d + Z_0)] \quad k_{r2} = [(Z_r - Z_0)/(Z_r + Z_0)] \quad (33)$$

k_{r1} , k_{r2} - hat başında ve hat sonunda yansıma katsayılarıdır.

Görüldüğü gibi işletme şartlarında bir transmisyon hattı boyunca empedans dalgalanmaları oluyorsa ve/veya hat tam karakteristik empedansı ile kapatılmıyorsa, işletme şartlarındaki gerçek hat zayıflaması (α_i) yansımasız hattın zayıflaması (α_g)'den daha büyüktür.

4. YÜKSEK FREKANSLARDA ETKEN FAKTÖRLERİN ve ÇIKACAK PROBLEMLERİN BELİRLENMESİ.

Ses frekans dağıtım kablolarında, aboneler arasında telefon görüşmesini sağlayan 300 Hz ile 3400 Hz arası frekans bandı yerine 1 MHz veya 2 MHz frekanslara kadar kullanım gündeme geldiğinde, transmisyonu bozan etkenlerin sayısı arttığı gibi, şiddeti de artar, dolayısıyla düzeltici önlem alınması da zorlaşır. Etken faktörler ve çıkan problemler aşağıda sıralanmıştır.

4.1. Hat Zayıflaması

Ses frekans dağıtım kablolarının hat zayıflamasının frekansla değişimi Şekil 2 ve Tablo 1'de verilmiştir. PTT'nin ses frekans dağıtım kabloları teknik şartnamesinde verilen ortalama ve maksimum çevrim direnci ve efektif kapasite değerlerini dikkate alarak hesaplanan, 1 kHz'deki hat zayıflaması değerleri ve PTT'de işletme kriterleri olarak kabul edilen hat zayıflaması değerleri aşağıdaki tabloda görülmektedir (PTT, 1992a, PTT, 1992b).

Tablo 4.
PTT'nin dağıtım kabloları şartnamesi ve PTT telefon şebekesi işletme kriterlerine göre maksimum hat zayıflaması

Kablo	PTT şartnamesi	PTT işletme kriterleri	Fark
Tipi	α_{1max} (dB/km)	α_{2max} (dB/km)	(%)
0.4	1.82	2.61	43.40
0.5	1.46	1.85	26.70
0.6	1.15	1.45	26.10
0.7	1.00	1.15	15.00
0.8	0.87	0.95	9.20
0.9	0.77	0.81	5.20

Tabloda Fark = $[(\alpha_2 - \alpha_1)/\alpha_2] \cdot 100$ (%) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4'ten görüldüğü gibi işletme kriterlerinde verilen değerler, şartnamede verilen değerlerden ~ % 5 ile % 43 arası daha yüksektir. Bu artışın başlıca nedeni kablo eklerinde (muflarda) ve dağıtım panolarındaki yansımalarıdır. Hat boyunca muf ve dağıtım pano sayısının fazla olması veya eklenen kabloların aynı tipten olmaması, yansımayı arttıran faktörlerdir.

Bu çalışmada tespit edilen dört farklı frekanstaki ortalama hat zayıflaması değerlerini Tablo 1'den alıp, döşenen maksimum uzunluklara göre hesaplandığında, Tablo 5'te gösterilen zayıflama değerleri bulunmuştur.

Tablo 5.
Döşenen maksimum uzunlukların farklı frekanslardaki hat zayıflaması

Kablo Tipi	1 kHz	100 kHz	512 kHz	1024 kHz
max. uzunluk	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
0.4/0.70 (3750 m)	6.30	36.10	58.90	81.45
0.4/0.84 (3750 m)	6.30	34.20	55.20	76.98
0.5/0.86 (5250 m)	7.08	36.40	66.72	93.4
0.5/1.04 (5250 m)	7.08	34.70	62.79	87.4
0.6/1.10 (6750 m)	7.70	36.59	71.30	99.9
0.6/1.40 (6750 m)	7.56	33.30	65.88	93.35
0.9/1.64 (12000 m)	9.12	42.24	89.4	126.5
0.9/2.00 (12000 m)	9.12	39.5	85	121.2

Görüldüğü gibi döşenmiş maksimum uzunluklarda, 512 kHz ve 1024 kHz'deki hat zayıflaması değerleri 50-60 dB'in üzerindedir. Sayısal haberleşme sistemlerinde iki tekrarlayıcı veya santral abone arası en büyük zayıflama sınırı 40 dB olarak kabul edildiğinden, kabloların bir kısmının kullanılmayacağı hemen görülmektedir.

4.2. Karakteristik Empedans

Karakteristik empedans, birincil parametrelerden belirlenen ve her frekansta kablo boyunca sabit kalan bir parametredir. Ancak birincil parametrelerdeki dalgalanmaların kaçınılmaz olması, imalat, nakliye ve döşeme problemlerinden dolayı kablo uzunluklarının 250 ile 2000 m arasında sınırlanmış olması, dolayısıyla çok sayıda muf kullanılma zorunluluğu, hat boyunca empedansın dalgalanmasına ve yer yer nominal değerinden çok sapmasına neden olmaktadır.

Tel çapları eşit olan dolgulu ve dolgunsuz kabloların karakteristik empedansları arasındaki fark 1 kHz'de ~0 iken, 512 kHz ve 1024 kHz'de % 7-10 arasındadır. Mufun etkisini hiç dikkate almadan, ideal şartlarda, dolgulu ve dolgunsuz kablo eklendiğinde, tek bir ekten kaynaklanan yansımanın zayıflaması ~26 ÷ 30 dB olacaktır. Hat boyunca 4-5 ek yeri olduğunu düşünürsek, yansıma zayıflaması ~18-22 dB'e düşmektedir. Gerçek bir muf ekinde, empedans değişikliği ~% 15 - 20 arasındadır. Böyle bir muftan gelen yansımanın zayıflaması ~18-22 dB'dir. Yine hat boyunca 4-5 muf olduğunu düşünürsek yansımanın zayıflaması ~13-15 dB'e kadar düşmektedir.

Tablo 6.
Dağıtım kablolarının dört farklı frekanstaki karakteristik empedansı

Kablo	Karakteristik Empedans Z_0 (ohm)			
	1 kHz	100 kHz	512 kHz	1024 kHz
0.4/0.70	994.50	133.90	119.80	117.00
0.4/0.84	994.50	139.90	128.25	125.50
0.5/0.86	795.60	126.70	117.45	115.22
0.5/1.04	795.60	134.15	126.48	124.51
0.6/1.10	664.50	126.50	119.17	117.40
0.6/1.40	664.50	136.00	130.00	128.50
0.9/1.64	444.90	122.50	116.40	115.24
0.9/2.00	444.90	131.00	125.50	124.50

Telefon şebekesine döşenen kabloların efektif kapasitesi PTT şartnamesinde üstten sınırlanıp 0.4 mm ve 0.5 mm tellilerde C_e ort. < 50 nF/km; 0.6 mm ve 0.9 mm tellilerde ise C_e ort. < 45 nF/km şeklinde belirlenmiş olup bir alt sınır yoktur. Efektif kapasitenin küçük olması, damar çapının daha büyük olması, dolayısıyla kablo maliyetinin artması demektir. Döşenen 0.4 ve 0.5 mm tel çaplı kabloların çoğunda efektif kapasitenin 45 - 47 nF/km olması ile birlikte, 40 nF/km ve 50 nF/km'ye yakın değerler de az değildir. Efektif kapasitesi 40, 44 ve 50 nF/km olan üç tip kablonun karakteristik empedansı Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7.
Efektif kapasitesi farklı olan kabloların karakteristik empedansın frekansla değişimi

Frekans (kHz)	0.4/0.70			0.4/0.84		
	C_e (nF/km)			C_e (nF/km)		
	40	44	50	40	44	50
1	1042.4	994.5	932.5	1042.4	994.5	932.5
100	140.4	134	125.6	146.8	139.9	131.3
512	125.6	119.8	112.4	134.5	128.25	120.3
1024	122.7	117	109.7	131.9	125.7	118

Tablo 7'den görüldüğü gibi aynı tipten (0.4/0.70 veya 0.4/0.84) ancak efektif kapasiteleri farklı olan iki kablo eklendiğinde ($C_e = 40$ nF/km ve $C_e = 50$ nF/km), hem alçak hem yüksek frekanslardaki karak-

teristik empedans $\sim\% 10 \div 12$ arasında farketmektedir. Tel çapları eşit, dolgulu (0.4 / 0.84 mm -40 nF/km) ve dolgusuz (0.4 / 0.7 mm - 50 nF / km) kablolar eklendiğinde, 512 kHz ve 1024 kHz’de empedans farkı $\sim\% 20$ ’lere çıkar.

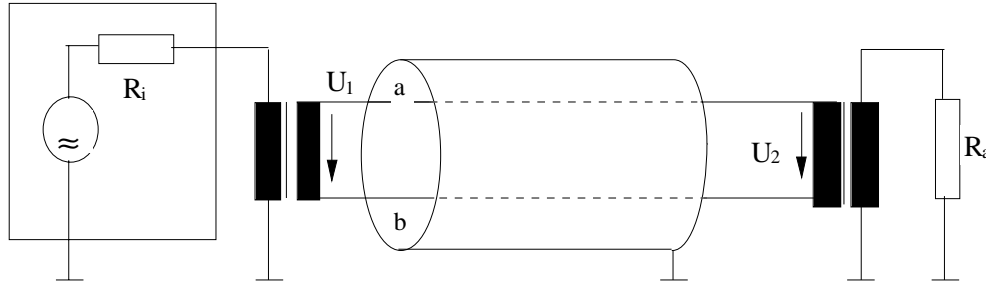
5. YAPILAN DENEYLER, İNCELEMELER ve SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Ölçmelerin Yapılması ile İlgili Bilgiler ve Kullanılan Donanımın Tanıtılması

Şehir içi telefon şebekesine döşenen ses frekans dağıtım kabloları ile ilgili teorik hesaplamaların, pratik ölçmeler ve deney sonuçlarıyla ne derecede bağdaştığının incelenmesi amacıyla aşağıda sıralanmış parametrelerin ölçümleri yapılmıştır.

- DC çevrim direnci	-	HP 3478 A, Resistomat Type 2302
- Yüksek frekans çevrim direnci - (100 kHz-2 MHz)	-	HP 4192 A,
- Çiftin efektif kapasitesi - (800 Hz)	-	HP 4192 A,
- Dielektrik kayıp fakt. - (1kHz -2MHz)	-	HP 4192 A, HP4194 A
- Hat zayıflaması - (1 kHz - 5MHz)	-	HP 4192 A, K 2355
- Karakteristik empedans - (1 kHz - 2 MHz)	-	HP 4192 A, K 2355
- Kapasitif kuplajların ölçülmesi	-	R 2020

Kablolardaki çiftlerin hat zayıflaması değerleri Şekil 6’da verilen şemaya göre ölçülmüştür.



Şekil 6.

Hat zayıflaması ve Faz Sabiti Ölçme Şeması

Bu ölçmelerde cihaz empedansı kablo giriş empedansından farklı olduğundan, ölçme esnasında kablunun her iki ucundaki yansımalarından dolayı ölçülen değer gerçek kablo zayıflamasından büyüktür.

$$\alpha_g = \alpha_0 - \alpha_y$$

Burada α_g = Gerçek hat zayıflaması

α_0 = Ölçülen değer

$\alpha_y = 2 \cdot 20 \lg. \left[\frac{(R+Z)}{(2 \sqrt{R \cdot Z})} \right]$ Yansımalarından kaynaklanan ilave zayıflama

R = Cihaz çıkış/giriş empedansı

Z = Kablo empedansıdır.

Kablo giriş empedansının ölçümü iki farklı yöntemle yapılmıştır.

a) Kısa devre - açık devre yöntemiyle - otomatik olarak

b) Yansımanın minimum olduğu empedansla kapatılarak – manuel

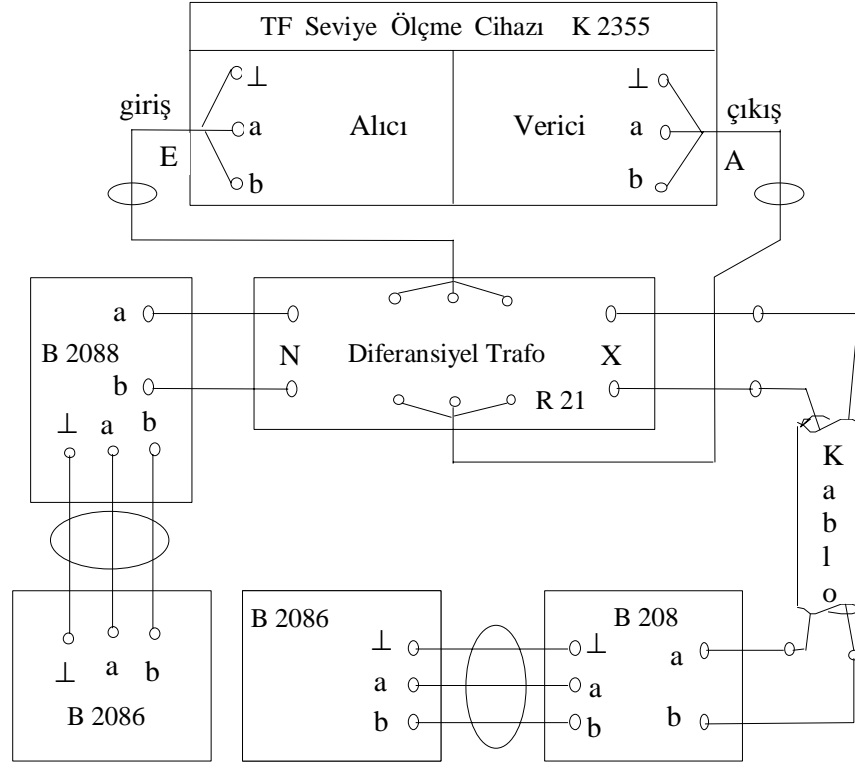
Otomatik ölçmelerde kullanılan cihazın çıkış empedansı 120 ohm sabit bir değer olduğundan alçak frekanslarda her iki yöntemle ölçülen değerlerin arasında olduğundan, alçak frekanslarda iki yöntemle ölçülen değerlerin arasında $\% 5 - 6$ arası fark olup, manuel ölçme sonuçlarının gerçek değerlere daha yakın olduğu görülmüştür. Frekans yükseldikçe aradaki fark küçülmekte ve yüksek frekanslarda (0.4 mm için 300 kHz, 0.9 mm için 50 kHz) $\% 0.8 - 1.5$ (1-2 ohm) değerine düşmektedir. Manuel ölçmeler Şekil 7’de verilen şemaya göre yapılmıştır.

Ölçme sonuçlarının histogramları düzenlenmiş ve histogramların görünüşünden dağılımın “normal dağılım” olacağı varsayımı yapılmıştır. Varsayıma dayanarak, n örnek için, ortalama değer (\bar{x}), standart sapma (s) ve güvenilirlik sınırları:

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i ; s = \sqrt{[1/(n-1)] \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (34)$$

ve % 98 güvenilirlik sınırları $x \pm (2.33.s/\sqrt{n})$ bağlantılarından hesaplanmıştır.

Değerlendirmeye alınan sonuçlarda, hat zayıflaması, çevrim direnci, ve efektif kapasite ölçmeleri için $n \geq 100$, $s = 0.3 - 0.8$; yakın uç ve uzak uç diyafoni zayıflaması için $n \geq 50$, $s = 3 - 6.0$; karakteristik empedans için; kapasitif kuplajlar için $n \geq 100$, $s = 5 - 12$ ve kare şeklinde darbelerin etkisini inceleyen ölçmelerde, $n \geq 20$, $s = 2.5 - 5$ olarak bulunmuştur.



Şekil 7.
Karakteristik Empedans Ölçme Şeması

5.2. Teorik Hesaplamaların Pratik Ölçme Sonuçlarına Uygunluğunun İncelenmesi

Birincil ve ikincil parametrelerin frekansla değişimini incelerken, 1-10 Mhz frekans bölgesini en azından üç farklı frekans bandına bölmemiz gerekir. Ancak, farklı tipte kablolar için öngörülen bu üç frekans bandının sınırları da değişmektedir. Dolayısıyla, hesaplanan değerlerin tam olarak veya çok küçük bir fark ile gerçek değerlere eşit olmasını sağlamak için farklı tip kablolar da geçerli frekans bandlarının belirlenmesi gerekir. Şehir içi telefon şebekesinde, en fazla kullanılan kablolar, 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm çapında bakır telli, dolgulu veya dolgusuz ses frekans kablolarıdır. Bunlardan tel çapları 0.4 mm ve 0.5 mm olan kablolar, şehir içi, santral - abone arası 4 - 5 km'yi aşmayan durumlarda, tel çapları 0.6 mm ve 0.9 mm olan kablolar da, uzak mesafe (7-12 km) dağıtım şebekesinde kullanılır. İncelenen kabloların tamamı, PTT'nin şehir içi ses frekans dağıtım kabloları ve uzak mesafe ses frekans dağıtım kabloları Teknik şartnamelerine uygundur.

5.2.1. İkincil Parametrelerin İncelenmesi

İncelenen ikincil parametrelerin tamamı (hat zayıflaması α , faz sabiti β , karakteristik empedans Z ve grup gecikmesi t_g) frekansla büyük bir değişim göstermektedir. Bunlardan Z ve t_g yüksek frekanslarda ağırlıklı olarak L ve C_c 'den belirlendikleri için frekansla çok az değişirler. Hat zayıflaması ve faz sabiti ise frekansla sürekli yükselen parametrelerdir.

Şekil 2’de gösterilen α_1 , α_2 , α_3 ’ün frekansla değişimi (8), (14), (21), formüllerine göre olmaktadır. Alçak frekanslarda $\alpha_1 \approx \alpha_2$ ve yüksek frekanslarda $\alpha_2 \approx \alpha_3$ olduğu görülmektedir. Yapılan incelemelerde de α_2 ’nin gerçek değerlere en yakın olduğu görülmüştür. Ancak, alçak frekanslarda α_2 değerlerinin gerçek hat zeyiflaması α_g değerlerinden sadece % 0.5-% 1 arası farklı olması ile birlikte frekans yükseldikçe bu fark artmakta ve 512 kHz’de ~% 8, 1024 kHz’de ~% 10 seviyelerine çıkmaktadır. Bu farkı azaltmak için α_2 değerlerine frekansla değişen düzeltme faktörü ilave edilmiştir. Düzeltme faktörü kablo tiplerine göre değişik olup aşağıda verilmiştir.

Dolgunsuz Kablolar

$$\begin{aligned}
 0.4/0.70; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.0. (f)^{0.8} & [\text{dB}] \\
 0.5/0.86; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.3. (f)^{0.7} & [\text{dB}] \\
 0.6/1.10; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.5. (f)^{0.6} & [\text{dB}] \\
 0.9/1.64; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.5. (f)^{0.55} & [\text{dB}]
 \end{aligned} \tag{35}$$

Dolgu Kablolar

$$\begin{aligned}
 0.4/0.84; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.5. (f)^{0.9} & [\text{dB}] \\
 0.5/1.04; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.6. (f)^{0.65} & [\text{dB}] \\
 0.6/1.40; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.8. (f)^{0.7} & [\text{dB}] \\
 0.9/2.00; \quad \alpha_g &= \alpha_2 + 2.8. (f)^{0.8} & [\text{dB}]
 \end{aligned} \tag{36}$$

Düzeltilme faktöründe frekans MHz olarak alınmıştır.

Farklı tip kablolarında α_g değerlerini ve aralarındaki farkı veren tablolar aşağıda verilmiştir.

Tablo 8.
0.4/0.70 ve 0.4/0.84 tipi kablolarında α_2 ve α_g değerleri ve aralarındaki farklar (dB/km ve % olarak)

Frekans f (kHz)	0.4/0.70				0.4/0.84			
	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%
1	1.67	1.68	0.01	0.48	1.67	1.68	0.00	0.30
10	4.95	5.00	0.05	1.02	4.90	4.93	0.04	0.81
50	8.45	8.63	0.18	2.16	8.10	8.27	0.17	2.08
100	9.31	9.63	0.32	3.40	8.80	9.12	0.31	3.58
300	12.04	12.80	0.76	6.34	11.14	11.98	0.85	7.60
512	14.54	15.71	1.17	8.05	13.36	14.73	1.37	10.24
1024	19.68	21.72	2.04	10.36	17.98	20.53	2.55	14.20
2048	26.99	30.53	3.55	13.15	24.54	29.30	4.77	19.42
5000	40.97	48.22	7.25	17.69	37.08	47.72	10.64	28.70
10000	57.44	70.06	12.62	21.97	51.86	71.72	19.86	38.29

Tablo 9.
0.5/0.86 ve 0.5/1.04 tipi kablolarında α_2 ve α_g değerleri ve aralarındaki farklar (dB/km ve % olarak)

Frekans f (kHz)	0.5/0.86				0.5/1.04			
	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%
1	1.33	1.35	0.02	1.37	1.33	1.36	0.03	2.19
10	3.80	3.89	0.09	2.41	3.74	3.87	0.13	3.49
50	5.82	6.10	0.28	4.86	5.51	5.88	0.37	6.73
100	6.48	6.94	0.46	7.08	6.03	6.61	0.58	9.66
300	9.06	10.05	0.99	10.93	8.32	9.50	1.19	14.30
512	11.27	12.71	1.44	12.77	10.28	11.96	1.68	16.37
1024	15.45	17.79	2.34	15.14	14.01	16.65	2.64	18.84
2048	21.19	24.99	3.80	17.93	19.14	23.28	4.14	21.65
5000	32.67	39.77	7.10	21.72	29.40	36.80	7.40	25.17
10000	45.88	57.41	11.53	25.12	41.21	52.82	11.61	28.18

Tablo 10.
0.6/1.10 ve 0.6/1.40 tipi kablolarda α_2 ve α_g değerleri ve aralarındaki farklar (dB/km ve % olarak)

Frekans f (kHz)	0.6/1.10				0.6/1.40			
	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%
1	1.10	1.14	0.04	3.59	1.10	1.12	0.02	2.02
10	2.99	3.15	0.16	5.27	2.91	3.02	0.11	3.83
50	4.17	4.58	0.41	9.94	3.86	4.21	0.34	8.90
100	4.79	5.42	0.63	13.11	4.38	4.94	0.56	12.74
300	7.09	8.30	1.21	17.13	6.41	7.61	1.21	18.81
512	8.90	10.57	1.67	18.80	8.00	9.76	1.75	21.90
1024	12.26	14.80	2.54	20.68	10.98	13.83	2.85	25.93
2048	16.92	20.76	3.84	22.72	15.09	19.71	4.62	30.66
5000	26.11	32.68	6.57	25.15	23.21	31.85	8.64	37.22
10000	36.68	46.64	9.95	27.13	32.55	46.59	14.03	43.11

Tablo 11.
0.9/1.64 ve 0.9/2.00 tipi kablolarda α_2 ve α_g değerleri ve aralarındaki farklar (dB/km ve % olarak)

Frekans f (kHz)	0.9/1.64				0.9/2.00			
	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%	α_2 (dB/km)	α_g (dB/km)	Fark	%
1	0.72	0.78	0.06	7.77	0.72	0.76	0.04	6.20
10	1.65	1.85	0.20	12.00	1.59	1.76	0.18	11.13
50	2.21	2.69	0.48	21.77	2.05	2.51	0.46	22.63
100	2.81	3.52	0.70	25.06	2.59	3.29	0.70	27.14
300	4.52	5.81	1.29	28.50	4.13	5.49	1.36	32.92
512	5.72	7.45	1.73	30.22	5.21	7.08	1.87	35.98
1024	8.01	10.54	2.53	31.63	7.26	10.10	2.84	39.09
2048	11.22	14.93	3.71	33.06	10.16	14.46	4.30	42.38
5000	17.38	23.44	6.06	34.85	15.71	23.06	7.35	46.81
10000	24.48	33.35	8.87	36.24	22.10	33.25	11.15	50.44

5.2.2. Karakteristik Empedans

Tablo 7’de gösterilen Z_1 , Z_2 , Z_3 ’ün frekansla değişimi (5), (12), (17) formüllerine göre. Yapılan incelemelerde, ölçülen karakteristik empedansın alçak frekanslarda Z_1 ’e, orta frekanslarda Z_2 ’ye yüksek frekanslarda da Z_2 ve Z_3 ’e yakın olduğu görülmüştür. Alçak frekanslarda hesaplanan Z_1 değerleri ile gerçek değerler arasında farkı azaltmak için Z_1 değerlerine frekansla değişen düzeltme faktörü eklenmiştir. Farklı tip kablolar için Z_1 , Z_2 ve Z_3 ’ün geçerli olduğu frekans bandları ve düzeltme faktörü aşağıda verilmiştir.

Tablo 12.
Karakteristik empedans hesaplama formüllerinin geçerli olduğu frekans bandları

Kablo Tipi	Frekans Aralığı (kHz)	Empedans (ohm)	Hata Oranı (%)
0.4/0.70	$1 < f < 30$	$Z_g = Z_1 + 2.5 \cdot (f)^{0.3}$	~ 2
	$30 < f < 250$	$Z_g - Z_2$	~ 3
0.4/0.84	$f > 250$	$Z_g - Z_3$	~ 2
	0.5/0.86	$1 < f < 30$	$Z_g = Z_1 + 2.0 \cdot (f)^{0.3}$
$20 < f < 200$		$Z_g - Z_2$	~ 3
0.5/1.04	$f > 200$	$Z_g - Z_3$	~ 2
	0.6/1.10	$1 < f < 10$	$Z_g = Z_1 + 3.1 \cdot (f)^{0.4}$
$10 < f < 100$		$Z_g - Z_2$	~ 3
0.6/1.40	$f > 100$	$Z_g - Z_3$	~ 2
	0.9/1.64	$1 < f < 5$	$Z_g = Z_1 + 4.0 \cdot (f)^{0.6}$
$5 < f < 10$		$Z_g = Z_1 + 4.5 \cdot (f)^{0.3}$	~ 3
0.9/2.00	$10 < f < 60$	$Z_g - Z_2$	~ 2
	$f > 60$	$Z_g - Z_3$	~ 3

Tablo 12’de Z_1 değerleri formül (5)’e göre, Z_2 değerleri formül (12)’ye göre ve Z_3 değerleri formül (17)’ye göre olup frekans kHz olarak alınmıştır.

Farklı tip kablolarda düzeltme faktörü ile hesaplanan Z_h ve Z_g değerlerini veren tablolar aşağıda görülmektedir.

Tablo 13.
Tel çapı 0.4 ve 0.5 mm olan dolgulu ve dolgunsuz kablolarda hesaplanan Z_h ve Z_g ’nin frekansla değişimi

Frekans f (kHz)	0.4/0.70 (C = 44 nF/km)		0.4/0.84 (C = 44 nF/km)		0.5/0.86 (C = 44 nF/km)		0.5/1.04 (C = 44 nF/km)	
	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)
1	992.01	995	992.01	996	793.61	796	793.61	796
10	313.70	319	313.70	319	250.96	254	250.96	255
50	166.95	167	168.22	169	141.48	143	146.52	148
100	133.88	134	139.96	139	126.68	128	134.15	135
300	122.69	123	130.71	131	120.51	120	129.17	129
512	119.80	120	128.25	128	117.45	118	126.48	127
1024	116.98	117	125.75	126	115.22	115	124.51	124
2048	114.75	115	123.76	124	113.44	113	122.93	123
5000	112.83	113	122.05	122	111.91	112	121.57	122
10000	111.84	112	121.16	121	111.12	110	120.86	121

Faz sabiti β ve grup gecikmesi t_g için bölüm 2’de verilen formüller, % 2’den az bir hata ile gerçek değerleri vermektedir.

Tablo 14.
Tel çapı 0.6 ve 0.9 mm olan dolgulu ve dolgunsuz kablolarda hesaplanan Z_h ve Z_g ’nin frekansla değişimi

Frekans f (kHz)	0.6/1.10 (C = 44 nF/km)		0.6/1.40 (C = 44 nF/km)		0.9/1.64 (C = 44 nF/km)		0.9/2.00 (C = 44 nF/km)	
	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)	Z_h (ohm)	Z_g (ohm)
1	661.34	666	661.34	662	440.89	446	440.89	448
10	209.14	220	209.14	222	139.45	148	139.44	150
50	133.74	135	141.70	144	125.46	128	133.43	135
100	126.51	128	136.04	138	122.49	124	130.95	130
300	121.57	122	131.98	133	117.99	119	126.94	126
512	119.17	120	129.89	130	116.40	116	125.53	124
1024	117.41	119	128.35	128	115.24	115	124.48	123
2048	115.99	117	127.11	127	114.30	114	123.64	122
5000	114.78	115	126.04	126	113.48	113	122.91	121
10000	114.15	114	125.48	124	113.06	112	122.53	121

6. SONUÇ

Her kablo tipi için hat zayıflaması ve karakteristik empedansı hesaplama formüllerinin geçerli olduğu frekans bandları belirlenmiş ve frekansla değişen bir düzeltme faktörü ilave edilmiştir. Düzeltme faktörü dikkate alınmayan durumlarda, hesaplanan α_2 ile gerçek α_g değerleri arasındaki fark, alçak frekanslarda (1-10 kHz) ~%0.5-1 iken, 512 kHz ve 1024 kHz’de %8-10’a kadar yükselmektedir.

7. KAYNAKLAR

1. Atalay, H. (1977) *Transmisyon Tekniđi*, K.T.Ü.
2. Gillaber, A. ve Buffat, D. (1992) Bestimmung der Elektrischen Eigenschaften des Ortsnetzes als Grundlage für seine Digitalisierung, *Technische-Mitteilungen PTT*, 344-357.
3. Kohlrausch, F. (1968) *Praktische Physik, Band 2*, B.G Teubner Verlag, Stuttgart.
4. Küpfmüller, K. (1988) *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*, Springer - Verlag, Berlin.
5. Lenehan, T.A. (1977) Experimental Test of Propagation Parameter Calculations for Shielded Balanced Pair Cables, *The Bell System Technical Journal*, 56 (4), 627-636.
6. PTT (1992) Şehiriçi Ses Frekans Dağıtım Kabloları Teknik Şartnamesi İş no:331 A/1.
7. PTT (1992) Uzak Mesafe Ses Frekans Dağıtım Kabloları Teknik Şartnamesi, İş no:331 B/1.
8. Schmidt, H. (1982) *Theorie und Technik der Nachrichtenkabel*, Dr. Alfred Hüthing, Verlag, Heidelberg.
9. Uzgören, F. (1982) *İki İletkenli Transmisyon Hatları*, İ.T.Ü.
10. Welhausen, H. (1989) Eigenschaften Symmetrischer Kabel der Ortsnetze und Generelle Übertragungsmöglichkeiten, *Der Fernmelde Ingenieur, Z.* Heft 10/11.