

SİMETRİK HABERLEŞME KABLolarINDA BİRİNCİL PARAMETRELERİN FREKANSLA DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Güneş YILMAZ*

Özet: Bu çalışmada, Türk PTT'sinin "Ses Frekans Dağıtım Kabloları Teknik Şartnamesi"ne göre üretilip şehir içi 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. Şehir içi 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 birincil 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, birincil parametreler, hat zayıflaması, telefon şebekesi.

Experimental Analysis of Variation of Primary Parameters with Frequency in Symmetrical Telecommunication Cables

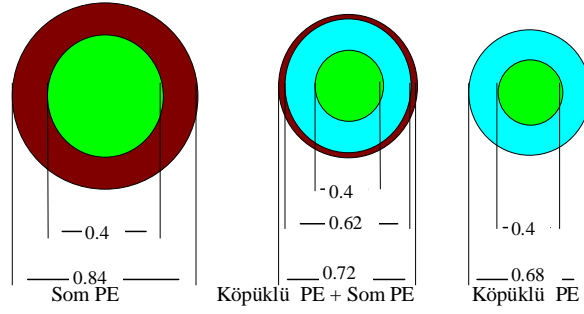
Abstract: In this study, appropriate empirical formulations have been developed for the high frequency behaviour of subscriber cables manufactured in accordance with Turkish PTT Specifications. Primary parameters found by theoretical calculations for 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm and 0.9-mm diameters PD-PDA and PDF type cables with copper conductors have been compared with experimental results and frequency bands where theoretical calculations deviate by less than 2-3% from experimental results have been determined. Finally 0-10 Mhz range has been divided into five frequency sub-bands and band boundaries for eight types of filled and unfilled local telephone cables have been obtained.

Key Words: Communication cables, primary parameters, line attenuation, telephony network.

1. GENEL BİLGİLER

Şehir içi telefon şebekelerinde ve çok küçük olmayan semtler arası telefon bağlantılarında kullanılan simetrik haberleşme kabloları, plastik yalıtkanla (PE, PVC, PP) kaplanmış çok sayıda bakır telin belli bir yöntemle biraraya getirilmesi, üzerine alüminyum ekran, koruyucu kılıf ve plastik bir gömlek geçirilmesi şeklinde üretilir. En çok kullanılan tel çapları 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm ve 0.9 mm'dir. İletken üzerine püskürtülen yalıtkan malzeme, bina içi kablolarla genelde yangını iletmeyen PVC, bina dışındaki abone kablolarında ise, PE malzemesidir. PE yanan ve yangını ileten bir malzemedir. Ancak dielektirik sabiti ve dielektrik kayıpları gibi önemli elektriksel parametrelerin geniş bir frekans bandında (10^1 - 10^{10} Hz) sabit ve çok küçük olması ($\epsilon_r=2.3$; $\text{tg}\delta \sim 0.0004$) yanında, üretim ve bakım açısından da ekonomik olması, PE'yi haberleşme kablolarında en çok kullanılan malzeme durumuna getirmiştir. Damar yalıtkanı olarak som veya köpüklü malzeme kullanılır. Köpüklü malzeme kullanıldığında damar ve kablo boyutları daha küçüktür. (Şekil 1)

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



Şekil 1.

Abone kablolarında kullanılan farklı tip damarlar (tel çapı = 0.4 mm)

Damarlar ikili veya yıldız dörtlü (quad) olarak bükülür. Dörtlü içindeki bir çiftin (1") iki iletkeni karşılıklı köşelerdedir.

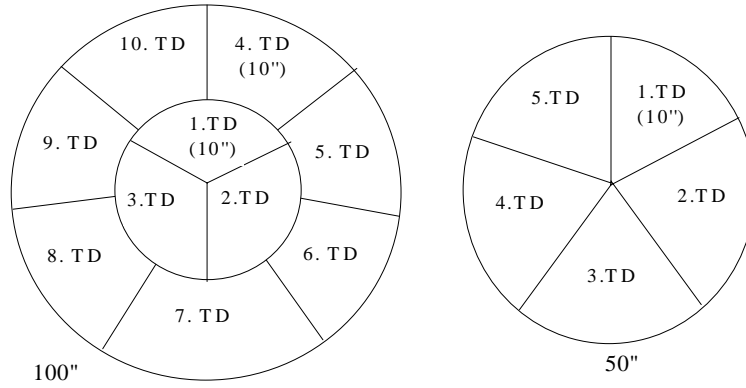


Şekil 2.

Dörtlü ve ikili bükme sistemine göre damarların yerleşimi

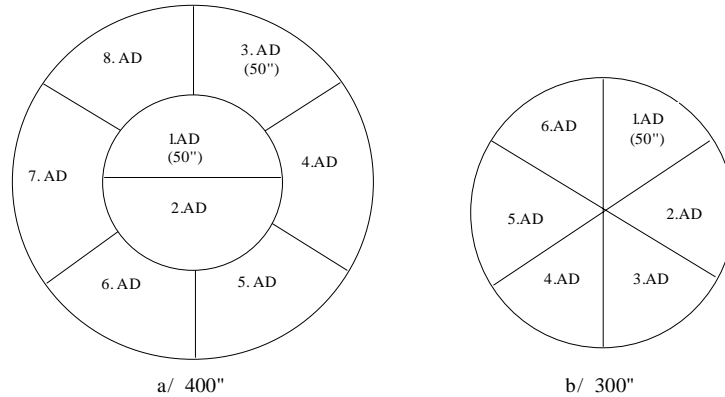
Beş dörtlünün (toplam 10") veya 25 ikilinin (25") bir grup haline getirilmesiyle oluşan demetçiklere "Temel Demet" (TD) denir.

Belirli sayıda TD'in birleşmesi ile oluşan demetçiklere "Ana demet" (AD) ve birkaç AD'in birleşmesi ile oluşan demetlere "Kablo Özü" adı verilir. (Şekil 3, 4)



Şekil 3.

50' ve 100' ana demetlerde, temel demetlerin yerleşimi



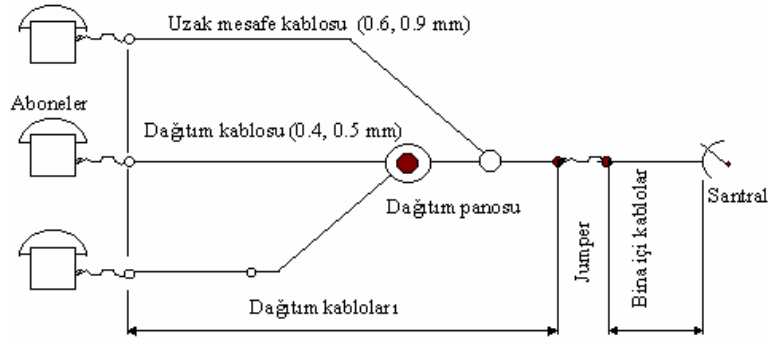
Şekil 4.

300' ve 400' dağıtım kablo özlerinin şematik olarak kesiti

Dışarıdan gelen elektromanyetik alanların etkisiyle, kablo damarlarında endüklenen bozucu gerilimi azaltmak amacıyla, kablo özünün üzerine alüminyum veya bakır kılıf geçirilir. Bu metal kılıf aynı zamanda, dış plastik kılıflardaki zedelenmeler sonucu, kılıf altına geçen suyun kablonun öz kısmına sızmasını önlemektedir. Mekanik darbelerden korunmak için ise çelik teller veya bantlardan koruma zırhı döşenir ve plastik dış kılıf püskürtülür.

İşletmeye alınmış haberleşme kablolarının özelliklerini bozan önemli bir etken sudur. Su kablo özü içersine nüfuz ettiğinde, işletme kapasitesi ve izolasyon direnci gibi elektriksel parametreler çok büyük oranda değişir ve kablo çalışamaz hale gelir. Suyun, öz içine girip damarlar arasında ilerlemesini önlemek amacıyla iki yöntem kullanılır.

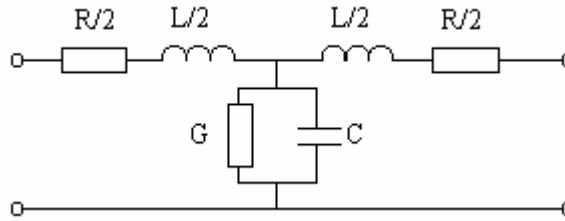
- Kablo özüne, damarlar arasına hiç boşluk kalmayacak şekilde Petrojell (kompaund) doldurulması
- Kablo özüne sürekli olarak kuru hava basılması. Bu durumda kablo boyunca havanın ilerlemesini sağlamak amacıyla ana demetler arasına belirli bir sayıda perfoleli boru da döşenmektedir.
- Şehir içi telefon şebekesinde kullanılan kablo bağlantılarının prensip şeması aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.
Şehir içi telefon şebekesinin yapısı

2. BİRİNCİL PARAMETRELERİN FREKANSLA DEĞİŞİMİ

Simetrik transmisyon hatlarını oluşturan iletkenlerin her birim uzunluğunun bir direnci (R) ve bir endüktansı (L) vardır (Uzgören, 1982).



Şekil 6.
İki Telli Simetrik Transmisyon Hattının Eşdeğer Şeması

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 kaçık iletkenlik (G -perditans) vardır. Bütün bu direnç, endüktans, kapasite ve kaçık iletkenlik bir yerde toplu olmayıp hat boyunca üniform olarak dağılmıştır.

Homojen bir hattın transmisyon özelliklerini tamamıyla tanımlayan elektriksel parametrelere birincil parametreler denir. Bu parametreler, hattın yapımında kullanılan malzemelerin iletkenliği, geçirgenliği, 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).

Transmisyona ait kavramların tanımları ve ölçmelerdeki öneminden dolayı, çeşitli frekans bölgelerinde gösterdikleri özellikleri de gözönüne alarak, birincil parametrelerin incelenmesi yararlı olacaktır.

2.1. Hattın Birim Uzunluğunun Çevrim Direnci (R)

Çapı d , uzunluğu L , öz direnci ρ olan silindirik tek telin doğru akım direnci

$$R_0 = 4\rho L / \pi d^2 = \rho L / \pi r_0^2 = L / \pi r_0^2 \sigma \quad (1)$$

formülü ile hesaplanır.

Burada $\sigma = 1/\rho$ olup

σ - Tel malzemesinin özgül iletkenliği r_0 - Tel yarıçapıdır.

ρ - Tel malzemesinin özgül direnci

Hattın birim uzunluğunun çevrim direnci (çiftin gidiş-dönüş iletkenlerinin toplam direnci) (2) formülüyle hesaplanır.

$$R = 2R_0 = 2 / (\pi r_0^2 \sigma) = 8 / (\pi d^2 \sigma) \quad (2)$$

2.1.1. Deri Olayının Çevrim Direncine Etkisi

Alternatif akımda, frekans yükseldikçe, akım yoğunluğu tel kesitinin merkezinde azalır, yüzeye doğru gidildikçe artar. Çok yüksek frekanslarda hemen hemen bütün akım telin yüzeyinde, duvar kalınlığı “ b ” olan silindirik bir borudan akar (Stadler, 1973, Megla, 1962). Deri olayı (skin effect) denilen bu olayın etkisiyle, telin kesiti adeta küçülmüş gibi olur ve sonuç olarak alternatif akımdaki efektif direnç R , doğru akım direnci R_0 'a göre artar.

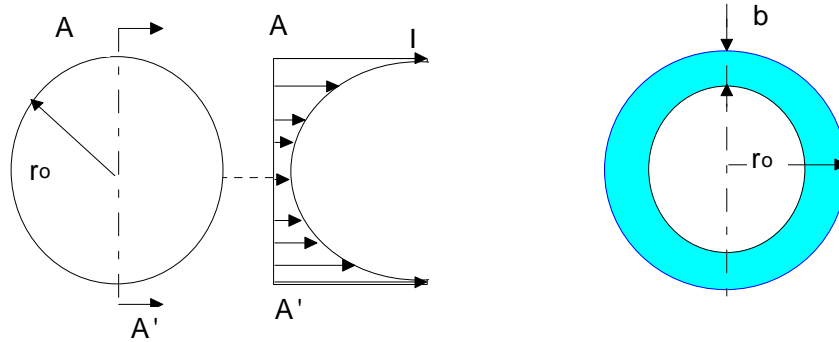
Tel merkezinden uzaklaştıkça, akım yoğunluğunun değişimi (3)'e göre hesaplanabilir.

$$|I_x| = |I_0| e^{-bx} \quad (3)$$

Burada: $b = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}$ olarak hesaplanır ve iletken malzemenin özellikleriyle belirlenen bir sabittir.

I_0 : DC akımda iletken kesitinden geçen akımın yoğunluğudur.

I_x : AC akımda iletken yüzeyinden x derinlikteki akımın yoğunluğudur.



Şekil 7.

a) İçi dolu silindirik bir telde yüksek frekans akım yoğunluğunun dağılımı b) İçi dolu silindirik bir telde yüksek frekans efektif kesiti

$x = 1/b$ olduğunda $I_x = |I_0| e^{-1} = |I_0| / e$ değerini alır.

Yani, iletken yüzeyinden $x = 1/b$ derinlikte akan DC akım “ f ” frekansındaki alternatif akımın “ e ” katıdır (Megla, 1962) ve

$$\delta = x = 1/b = 1 / \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma} \quad (4)$$

olarak hesaplanan büyüklüğe, eşdeğer deri kalınlığı adı verilir.

Burada: μ_0 - Boşluğun magnetik geçirgenliğini σ - Malzemenin özgül iletkenliğini

μ_r - Malzemenin bağıl geçirgenliğini f - Frekansı göstermektedir.

Yukarıdaki açıklamalar dikkate alınarak alternatif akım için bir iletkenin direnci

a) Yüksek frekanslarda ($5\delta > r_0 > \delta$)

$$R_i = R_0 \cdot r_0^2 / [\delta(2r_0 - \delta)] \quad (5)$$

b) Çok yüksek frekanslarda ($5\delta < r_0$)

$$R_i = R_0 \cdot [(r_0^2 / 2\delta) + (1/4)] \quad (6)$$

formülleri ile hesaplanır (Kaden, 1959).

Genel olarak iletkenlerin direnci sıcaklıkla orantılı olarak artar. Normal oda sıcaklığındaki (+20 °C) direnç R_0 ile gösterilirse, herhangi bir T °C'deki direnç

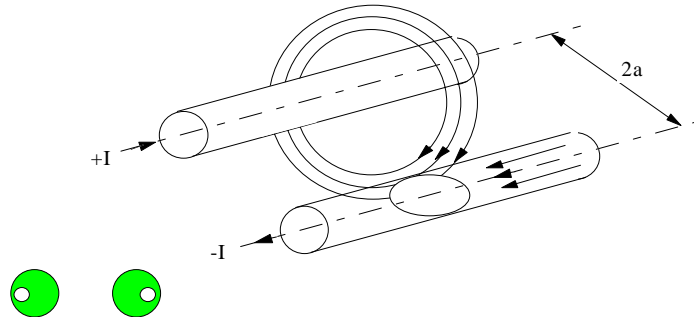
$$R_i = R_0 \cdot [1 + A_t (T - 20)] \quad (7)$$

formülü ile hesaplanır. Burada:

A_t = Sıcaklıkla direncin artma katsayısıdır (Bakır iletkenler için $A_t = 4 \times 10^{-3}$)

2.1.2. Yakınlığın Çevrim Direncine Etkisi (Proximity)

Simetrik haberleşme kablolarında aynı kablo içinde birbirine çok yakın birden fazla izole edilmiş tel olduğundan her telin direnci, komşu iletkenlerden geçen akımlardan da etkilenir ve yakın çevresi boş olan tek telin direncinden büyüktür. Ayrıca bu etkinin şiddeti frekansla değişir (Riley ve Acuna, 1990).



Şekil 8.

Yakın mesafede olan tellerden akan akımların birbirini etkilemesi

Bu değişim:

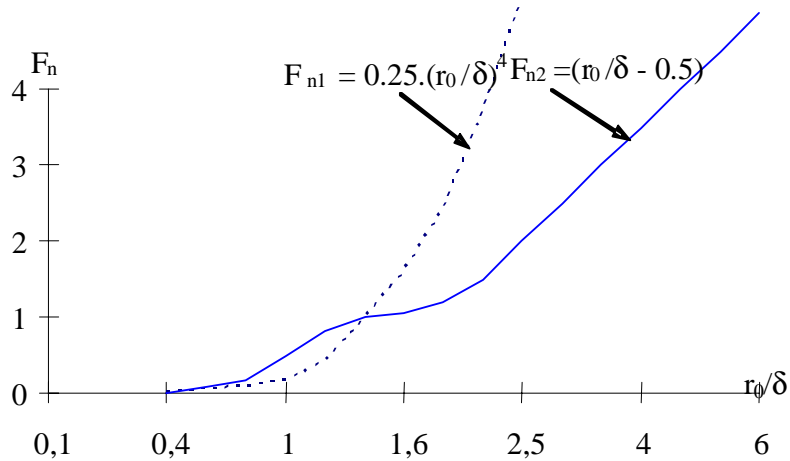
a) Alçak frekanslarda ($\delta > r_0$); $R_n \sim f(F_{n1})$

$$R_n = R_0 \cdot (r_0 / 2a)^2 \cdot F_{n1} = R_0 \cdot (r_0 / 2a)^2 \cdot (1/4) \cdot (r_0 / \delta)^4 \quad (8)$$

b) Yüksek frekanslarda ($\delta > r_0$); $R_n \sim f(F_{n2})$

$$R_n = R_0 \cdot (r_0 / 2a)^2 \cdot F_{n2} = R_0 \cdot (r_0 / 2a)^2 \cdot [(r_0 / \delta) - (1/2)] \quad (9)$$

şeklinde formüle edilmektedir (Kaden, 1959).



Şekil 9.

Yakınlığın etkisinden dolayı direncin değişimi

2.1.3. Işımanın (Radyasyon) Çevrim Direncini Etkisi

Çok çiftli kablolarla herhangi bir iletkenle akan akımın oluşturduğu manyetik alan komşu çiftlerde ve ekranda Foucault akımlarına neden olmaktadır. Söz konusu akımlar ilave enerji kaybına sebep olduğundan, kablo içindeki iletkenin direnci etrafında başka metaller bulunmayan iletkenin direncinden daha yüksektir. Çevrim direncini etkileyen ve yukarıda açıklanan faktörleri göz önünde bulundurarak, çok çiftli bir kabloda, her çiftin çevrim direnci koşullara bağlı olarak aşağıdaki formüllerden biri ile hesaplanır.

a) Alçak frekanslarda ($\delta > r_0$)

$$R = 2R_0 \left[1 + (r_0/2a)^2 \cdot (1/4) \cdot (r_0/\delta)^4 \right] \quad (10)$$

b) Yüksek frekanslarda ($5\delta > r_0 > \delta$)

$$R = 2R_0 \left[(r_0^2/\delta(2r_0 - \delta)) + (r_0/2a)^2 \cdot ((r_0/\delta) - (1/2)) \right] \quad (11)$$

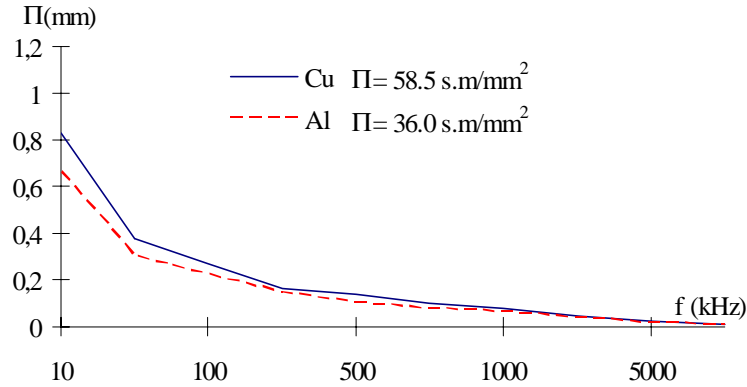
c) Çok yüksek frekanslarda ($5\delta < r_0$)

$$R = 2R_0 \left[((r_0/2\delta) + (1/4)) + (r_0/2a)^2 \cdot ((r_0/\delta) - (1/2)) \right] \quad (12)$$

(10), (11), ve (12) formüllerinde kablo ekranının yarı çapı r_e 'nin, iletken yarıçapı (r_0)'dan çok daha büyük olduğu kabul edilmiştir. Haberleşme kablolarında kullanılan elektrolitik bakırın bağıl magnetik geçirgenliği $\mu_r \sim 1$ ve öz iletkenliği $\sigma \sim 58.5$ [S.m / mm²] olduğundan, (4)'te deri olayını veren formül aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r} = 65.8025/\sqrt{1000 \cdot f \text{ (kHz)}} \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

Şekil 10'dan da görüldüğü gibi, öziletkenliği daha yüksek olan non-magnetik malzemelerde (kablo tekniğinde kullanılan bakır, alüminyum ve gümüş gibi) efektif deri kalınlığı daha küçük olacaktır. Şehir içi telefon şebekesinde kullanılan 0.4, 0.5, 0.6, ve 0.9 mm. bakır iletkenli, dolgulu ve dolgunsuz kablolarla bir çiftin çevrim direnci aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 10.

Bakır ve Alüminyum iletkenlerde efektif deri kalınlığının frekansla değişimi

Bakır iletkenli kablolarla çevrim dirençlerinin değerleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1.
0.4 ve 0.5 mm. Tel Çaplı Kablolarla Çevrim Direnci R'nin Frekansla Değişimi

Frekans f(kHz)	Skin Kalınlığı δ (mm)	0.4/0.70	0.4/0.84	0.5/0.86	0.5/1.04
		a = 0.49 mm	a = 0.59 mm	a = 0.61 mm	a = 0.74 mm
		R (Ω /km)	R (Ω /km)	R (Ω /km)	R (Ω /km)
1	2.0809	272.06	272.06	174.12	174.12
10	0.6580	272.06	272.06	174.12	174.12
50	0.2943	272.08	272.08	174.18	174.16
100	0.2081	272.16	272.13	184.28	182.64
300	0.1201	336.86	332.77	250.02	246.31
512	0.0886	414.46	408.28	315.62	310.18
1024	0.0650	528.78	519.73	409.19	401.36
2048	0.0460	712.15	698.61	552.97	541.40
5000	0.0294	1063.86	1041.72	841.59	822.85
10000	0.0208	1478.69	1446.66	1173.67	1146.68

Tablo 2.
0.6 ve 0.9 mm. Tel Çaplı Kablolarda Çevrim Direnci R'nin Frekansla Değişimi

		0.6/1.10 a = 0.78 mm	0.6/1.40 a = 0.99 mm	0.9/1.64 a = 1.16 mm	0.9/2.00 a = 1.41 mm
Frekans f(kHz)	Skin Kalınlığı δ (mm)	R (Ω/km)	R (Ω/km)	R (Ω/km)	R (Ω/km)
1	2.0809	120.92	120.92	53.74	53.74
10	0.6580	120.92	120.92	53.76	53.76
50	0.2943	123.28	122.40	63.13	62.46
100	0.2081	137.65	136.06	78.95	77.86
300	0.1201	197.70	194.31	122.71	120.59
512	0.0886	253.16	248.26	159.22	156.23
1024	0.0650	331.22	324.24	212.36	208.17
2048	0.0460	451.62	441.40	295.18	289.11
5000	0.0294	689.91	673.47	454.23	444.56
10000	0.0208	694.09	940.49	637.23	623.43

Tablo 1 ve 2'de "a" büyüklüğü çift iletkenlerin arasındaki mesafenin yarısıdır.

Şekil ve tablolardan görüldüğü gibi:

- Alçak frekanslarda, tel çapları eşit olan çiftlerin çevrim direnci de eşittir.
- Yüksek frekanslarda, dolgulu kablolardaki direnç artışı dolgusuzlara nazaran daha azdır.

2.2. Hattın Birim Boy Uzunluğunun Endüktansı (L)

Uzayda tek başına bulunan silindirik bir iletkenin iç endüktansı, alçak frekanslarda

$$L_i = \mu_0 / \pi = 0.05 \text{ mH/km} \quad (14)$$

olarak belirlenmiştir (Schmidt, 1982).

İletkenden geçen akımın iletken içinde meydana getirdiği magnetik akımın değişimi ile oluşan bu iç endüktans frekansla değişir ve yüksek frekanslarda (15) formülü ile hesaplanır.

$$L_i = (1/(2r_0\omega))\sqrt{\mu f / (\pi\chi)} = \mu\delta / (4\pi r_0) = \mu_0\mu_r\delta / (4\pi r_0) \quad (15)$$

Kablo tekniğinde kullanılan iletkenler normalde bakır (Cu) veya alüminyumdan (Al) yapıldığından, $\mu_r \sim 1$ 'dir.

ve
$$L_i = (\mu_0/4\pi).\delta/r_0 = 0.1\delta/r_0 \text{ [mH/km]} \quad (16)$$

olarak hesaplanır.

Yüksek frekanslarda deri olayı nedeniyle akım iletkenin yüzeyine doğru itildiğinden iletken içindeki magnetik alanın şekli değişir (şiddeti düşer) ve frekans yükseldikçe iç endüktans küçülür. İletkenin dışındaki magnetik alana deri olayının bir etkisi yoktur. Zira bu alan toplam akıma tabidir. Bu nedenle, iletken dışındaki magnetik akı değişmelerinin doğurduğu "dış endüktans" frekanstan bağımsızdır ve (17) formülü ile hesaplanır.

$$L_i = (\mu/2\pi)Ln[(2a - r_0)/r_0] = (\mu_0/2\pi)Ln[(2a - r_0)/r_0] \quad (17)$$

İki iletkenli hattın toplam endüktansı, iç ve dış endüktansların toplamıdır:

$L_t = 2(L_i + L_1)$ ve çok alçak frekanslarda ($\omega \rightarrow 0$)

$$L_t = 2.[(\mu_0/8\pi) + (\mu_0/\pi)Ln[(2a - r_0)/r_0]] \quad (18)$$

$$L_t = 0.1 + 0.4Ln[(2a - r_0)/r_0] \quad \text{[mH / km]}$$

orta ve yüksek frekanslarda da

$$L_t = 2[(\mu_0/4\pi)(\delta/r_0) + (\mu_0/\pi)Ln[(2a - r_0)/r_0]] \quad \text{[H / km]}$$

$$L_t = (\mu_0/\pi)[(\delta/2r_0) + Ln[(2a - r_0)/r_0]] [H / km] \quad (19)$$

$$L_t = 0.4[(\delta/2r_0) + Ln[(2a - r_0)/r_0]] [mH / km]$$

formülleri geçerlidir.

Transmisyon hattını oluşturan iletkenler bir metal ekran içine alındığında, iletkenlerden geçen akımın oluşturduğu dış magnetik alan sadece ekranın içindeki alanda sınırlanmış olduğundan, dış endüktans azalır. Her bir iletken için dış endüktansın azalması aşağıdaki formülle hesaplanır (Schmidt, 1982).

$$L_e = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(Ln \frac{r_e^2 + a^2}{r_e^2 - a^2} - 2 \frac{\delta_e (a \cdot r_e)^2}{r_e (r_e^4 - a^4)} \right) \cdot A \quad (20)$$

Burada: r_e - Ekranın yarıçapı A - Frekansa göre değişen r_0 ve δ 'ya bağlı bir

δ_e - Ekranın efektif deri kalınlığı faktördür. (s.22)

Alçak frekanslarda $\delta_e > r_e$ olduğundan ve çok çiftli kablolarda ekranın yarıçapı (r_e) izole edilmiş iletkenler arası mesafe $2a$ 'dan çok daha büyük olduğundan, L_e çok küçüktür ve pratiğe yönelik hesaplamalarda $L_e = 0$ kabul edilebilir. (21)'de açıklanan yakınlık ve ışıma etkileri dış endüktansı azalması yönünde etkiler. Birim uzunluğunda tek bir iletkenin dış endüktansının azalması aşağıda verilmiştir.

$$L_e = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{r_0}{2a} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{(2a \cdot r_e)^2}{r_e^4 - a^4} \right) \cdot A \quad (21)$$

Alçak frekanslarda ($\delta > r_0$) $\Rightarrow A = (1/12)(r_0 / \delta)^4$

Yüksek frekanslarda ($\delta > r_0$) $\Rightarrow A = 1 - (\delta / r_0)$ olarak hesaplanır.

Çok çiftli kablolarda $r_e \gg a$ ve $L_e \sim 0$ olduğundan iki telli hattın toplam endüktansı

$$L_t = (\mu_0/\pi)[(\delta/2r_0) + Ln[(2a - r_0)/r_0] - (r_0/2a)^2] [H / km] \quad (22)$$

olarak hesaplanır.

Çok yüksek frekanslarda ($\delta \ll r_0$) ve ($\delta / 2 \cdot r_0 \sim 0$) olduğundan az bir hata ile

$$L_t = (\mu_0/\pi)[Ln[(2a - r_0)/r_0] - (r_0/2a)^2] [H / km] \quad (23)$$

formülü geçerlidir.

Yapılan açıklamalardan, Tablo 3 ve Tablo 4'ten de görüldüğü gibi, frekans yükseldikçe, iki telli simetrik bir transmisyon hattının efektif self endüktansı küçülür ve belli bir frekanstan sonra sadece tel yarıçapı ve teller arası mesafe ile belirlenen sabit değere düşer.

Tablo 3.
0.4/0.70 ve 0.4/0.84 Damarlı kablolarda endüktans bileşenlerinin frekansla değişimi

Frekans f(kHz)	2Y 0.4/0.70 $L_1 = 0.272$ mH/km		Ekran Çapı= 40 mm $L_{11} = 0.528$ mH/km		2Y 0.4/0.84 $L_1 = 0.318$ mH/km		Ekran Çapı= 40 mm $L_{11} = 0.624$ mH/km	
	L_i (mH/km)	L_e (mH/km)	L_y (mH/km)	L_t (mH/km)	L_i (mH/km)	L_e (mH/km)	L_y (mH/km)	L_t (mH/km)
1	0.050	-0.0002	0.0000	0.644	0.050	-0.0003	0.0000	0.735
10	0.050	-0.0002	0.0000	0.644	0.050	-0.0003	0.0000	0.735
50	0.050	-0.0002	-0.0001	0.644	0.050	-0.0003	-0.0001	0.735
100	0.050	-0.0002	-0.0006	0.643	0.050	-0.0003	-0.0004	0.734
300	0.050	-0.0002	-0.0033	0.637	0.050	-0.0003	-0.0023	0.730
512	0.043	-0.0002	-0.0046	0.620	0.043	-0.0003	-0.0032	0.714
1024	0.032	-0.0002	-0.0056	0.596	0.032	-0.0003	-0.0039	0.691
2048	0.023	-0.0002	-0.0064	0.577	0.023	-0.0003	-0.0044	0.672
5000	0.015	-0.0002	-0.0071	0.559	0.015	-0.0003	-0.0049	0.655
10000	0.010	-0.0002	-0.0074	0.550	0.010	-0.0003	-0.0051	0.646

Tablo 4.**0.5/0.86 ve 0.5/1.04 Damarlı kablolarda endüktans bileşenlerinin frekansla değişimi**

Frekans f(kHz)	2Y 0.5/0.86 L ₁ = 0.271 mH/km		Ekran Çapı = 40 mm L ₁ = 0.526 mH/km		2Y 0.5/1.04 L ₁ = 0.319 mH/km		Ekran Çapı= 40 mm L ₁ = 0.626 mH/km	
	L _i (mH/km)	L _h (mH/km)	L _{nh} (mH/km)	L _l (mH/km)	L _i (mH/km)	L _h (mH/km)	L _{nh} (mH/km)	L _l (mH/km)
1	0.050	-0.0003	0.0000	0.642	0.050	-0.0005	0.0000	0.736
10	0.050	-0.0004	0.0000	0.642	0.050	-0.0005	0.0000	0.736
50	0.050	-0.0004	-0.0004	0.641	0.050	-0.0005	-0.0002	0.736
100	0.050	-0.0004	-0.0014	0.639	0.050	-0.0005	-0.0009	0.734
300	0.046	-0.0004	-0.0043	0.625	0.046	-0.0005	-0.0029	0.722
512	0.035	-0.0004	-0.0054	0.600	0.035	-0.0005	-0.0036	0.698
1024	0.026	-0.0004	-0.0062	0.581	0.026	-0.0005	-0.0042	0.679
2048	0.018	-0.0004	-0.0068	0.565	0.018	-0.0005	-0.0046	0.664
5000	0.012	-0.0004	-0.0074	0.550	0.012	-0.0005	-0.0050	0.650
10000	0.008	-0.0004	-0.0076	0.543	0.008	-0.0005	-0.0052	0.643

2.3. Birim Uzunluğunda Hat Parçasının İletkenleri Arasındaki Kısmi ve Efektif Kapasite (C')**2.3.1. Kısmi Kapasiteler**

Birbirinden yalıtılmış n adet iletkenin üzerinde sırasıyla toprağa göre Q₁.. Q_i.. Q_n elektrik yükleri toplanmış ve bunların etkisiyle iletkenlerin toprağa göre potansiyelleri V₁.. V₂.. V_i.. V_n değerlerine gelmiş ise (24) denklemi ile belirlenen C_{ik} büyüklüğü, i ve k iletkenleri arasındaki kısmi kapasitedir. C₁₀.. C₂₀.. C_{n0} ise sırasıyla 1, 2,..., (n - 1) ve n numaralı iletkenlerin toprağa göre kısmi kapasiteleridir.

$$\begin{aligned}
Q_1 &= C_{10} \cdot V_1 + C_{12} \cdot (V_1 - V_2) + \dots + C_{1n} (V_1 - V_n) \\
Q_2 &= C_{20} \cdot V_2 + C_{21} \cdot (V_2 - V_1) + \dots + C_{2n} (V_2 - V_n) \\
Q_n &= C_{n0} \cdot V_n + C_{n1} \cdot (V_n - V_1) + \dots + C_{n(n-1)} \cdot (V_n - V_{(n-1)})
\end{aligned} \tag{24}$$

2.3.2. Efektif Kapasite

İki iletkenin arasındaki efektif kapasite, bunlardan birinin taşıdığı elektrik yükünün iki iletkenin potansiyelleri arasındaki farka oranı olarak ifade edilir (Uzgören, 1982).

$$C_e = Q_i / (V_i - V_k) \tag{25}$$

Burada; V_i ve V_k - i ve k iletkenlerin toprağa göre potansiyeller

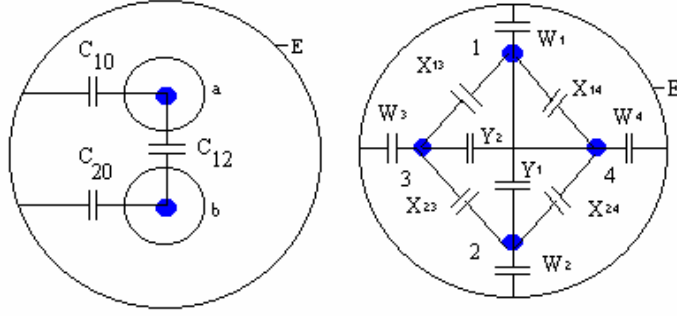
Q_i - i nolu iletkenin elektrik yükü C_e - Efektif kapasitedir.

Bir transmisyon hattının ikincil parametrelerini incelerken, hesaba katılması gereken kapasite efektif kapasitedir. Yakın ve uzak uç diyafoni zayıflamaları incelenirken ise, kapasitif kuplajlara neden olan, kısmi kapasitelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Kablo imalatında simetriye büyük önem verildiğinden, gerek iletkenler arasındaki kısmi kapasiteler, gerekse iletkenlerin toprağa göre kısmi kapasiteleri kendi aralarında birbirine hemen hemen eşittir. İletkenler arasındaki kapasite kablunun geometrik boyutlarına olduğu kadar kullanılan yalıtkan malzemelerin özelliğine ve imal tarzına da geniş ölçüde bağlıdır (Norman, 1982, Vieth, 1981).

Ekranlı bir çiftin kısmi kapasiteleri Şekil 11'de gösterilmiş olup

$$C_e = C_{12} + \frac{C_{10} \cdot C_{20}}{C_{10} + C_{20}} \tag{26}$$



şeklinde hesaplanır.

Şekil 11.

Ekranlı çiftin ve ekranlı dörtlünün kısmi kapasiteleri

Burada; C_{12} - İki damar arasındaki kapasite C_{10}, C_{20} - Damarlarla toprak arasındaki kapasite Yıldız dörtlü sistemine göre bükülmüş, ekranlı bir dörtlüde kısmi kapasiteleri gösteren şema Şekil 11'de verilmiştir (Gürkaynak, 1982).

Dörtlüyü oluşturan her çiftin efektif kapasitesi

$$C_{e(1-2)} = Y_1 + \frac{X_{13} \cdot X_{23}}{X_{13} + X_{23}} + \frac{X_{14} \cdot X_{24}}{X_{14} + X_{24}} + \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2} \quad (27)$$

$$C_{e(3-4)} = Y_2 + \frac{X_{13} \cdot X_{14}}{X_{13} + X_{14}} + \frac{X_{23} \cdot X_{24}}{X_{23} + X_{24}} + \frac{W_3 \cdot W_4}{W_3 + W_4}$$

olarak hesaplanır.

Burada; $X_{13}, X_{14}, X_{23}, X_{24}$ - Damarlararası kapasiteler

W_1, W_2, W_3, W_4 - Damar - ekran arası kısmi kapasitedir.

Kaliteli bir kabloda $X_{13} = X_{14} = X_{23} = X_{24} = X$

$$Y_1 = Y_2 = Y$$

$$W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = W$$

olduğundan, (27) formülü

$$C_e = X + Y + (W/2) \quad (28)$$

şeklini alır. Genelde $X: Y: W = 5: 1: 10$ oranları geçerlidir (Mitchell, 1988).

Her damarın kapasitesinin

$$C_d = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r / \ln(D/d) \quad [\text{pF/m}] \quad (29)$$

olarak hesaplandığını gözönünde bulundurursak, çiftin efektif kapasitesi, dolgunsuz kablolarda (Heinz, 1978, Belevitch, 1978);

$$C_e = (\pi\epsilon_0 r) / [\ln[(2a - r_0)/r_0] - (r_0/2a)] \quad [\text{pF/m}] \quad (30)$$

ve dolgulu kablolarda (Yılmaz, 1990);

$$C_e = (\pi\epsilon_0\epsilon_{pe}^{0.75}\epsilon_d^{0.25}) / [\ln[(2a - r_0)/r_0] - (r_0/2a)] \quad [\text{pF/m}] \quad (31)$$

şeklinde hesaplanır.

Burada; ϵ_0 - Boşluğun dielektrik geçirgenliği (8.854 pF / m) r_0 - Tel yarıçapı

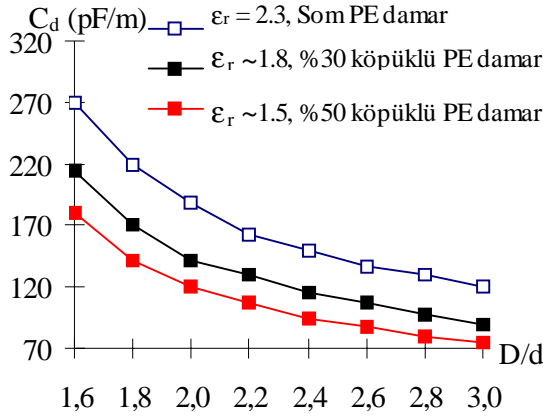
ϵ_r - Malzemenin dielektrik sabiti D - Damar çapı

$2a$ - Tel merkezleri arasındaki mesafe ($2a = D \cdot \sqrt{2}$)

Formüllerden de görüldüğü gibi, efektif kapasite değeri frekansa bağımlı olmayıp, sadece kullanılan malzemenin özelliklerine ve kablunun geometrik boyutlarına bağlıdır. Üretilen ve işletmeye alınan simetrik haberleşme kablolarının büyük çoğunluğunda, damar çapı / tel çapı oranı 1.6 ile 2.5 arasındadır. D/d 'nin 1.4'ten küçük olması üretilebilirlik ve işletme açısından problemlidir, 3.0'den büyük olması da eko-

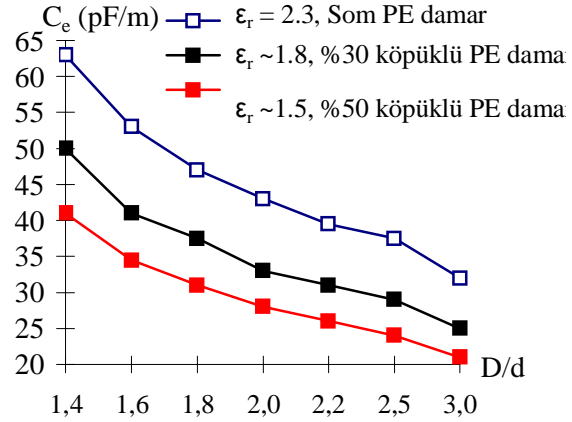
nomik açıdan uygun değildir. Şekil 12’de bir Som PE izolasyonlu damar ve köpük oranları farklı olan iki köpüklü PE izolasyonlu damarda, damar kapasitesinin D/d oranıyla değişimi verilmiştir (Mitchell, 1988).

PD-APA ve PD-PAP tipi kablolarında farklı özellikte damarlar için çiftlerin efektif kapasitesinin D/d oranıyla değişimi Şekil 13’ verilmiştir.



Şekil 12.

Som ve köpüklü PE izolasyonlu damarlarda damar kapasitesinin D/d oranıyla değişimi



Şekil 13.

Dağıtım kablolarında kablo efektif kapasitesinin damarların D/d oranıyla değişimi

2.4. Birim Uzunluğunda Hat Parçasının İletkenleri Arasındaki Perditsans (G)

Transmisyon hatlarındaki enerji kaybının başlıca iki nedeni vardır: hat iletkenlerinde oluşan ısı kaybı ve iletkenler arası yalıtkan malzemedeki kayıplar. İletkenlerdeki ısı kaybı, bu iletkenlerin doğru akımda dahi belli bir omik direnci olmasından kaynaklanır. Yüksek frekanslarda direnç değeri frekansa bağlı olarak yükseldiğinden kayıplar da yükselmektedir. İletkenler arası yalıtkan malzemedeki kayıplar ise yalıtkan malzemenin direncinin sonsuz büyük ve AC dielektrik kayıplarının sonsuz küçük olmamasından kaynaklanır. Çok küçük de olsa, her yalıtkanın bir iletkenliği vardır ve kaynaktan çekilen gücün bir kısmı alıcıya ulaşmadan kısa yoldan geri döner (P_3) (Uzgören, 1982).

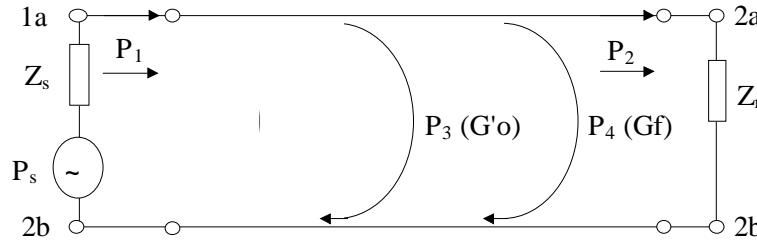
Şekil 14’ten görüldüğü gibi

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (32)$$

yazılabilir.

Burada; P_1 - Kaynaktan çekilen güç P_3 - Kaçak akımlardan kaynaklanan güç kaybı

P_2 - Alıcıya ulaşan güç P_4 - Dielektrik histerezisten kaynaklanan güç kaybı



Şekil 14.

İletkenler arası yalıtkan malzemedeki kayıplar

Hattın enine parametrelerinden biri olan perditsans (G'), belli bir frekanstaki $G + j.\omega.C$ admitansının gerçel kısmıdır ve iki bileşeni vardır: $G = G_0 + G_r$.

Bu bileşenlerden;

$G_0 = 1 / R_{iz}$ - Frekansa bağımlı olmayan, DC gerilimde ölçülen izolasyon direncinin (R_{iz}) tersidir.

G_f - Dielektrik kayıplarının neden olduğu, frekansla değişen kayıplardır.

Doğru akımda ve alçak frekanslarda G_0 'ın değeri ihmal edilebilecek kadar küçüktür ($G_0 < 10^{-10}$ mho / km). Yalıtkan bir madde, alternatif elektrik alanın etkisinde kalırsa, bu maddenin hacminde "Dielektrik Histerezis" denilen ve frekansla orantılı olarak artan enerji kaybı oluşur. P_4 ile gösterilen bu kayıp

$$P_4 = U^2 \cdot \omega \cdot C_e' \cdot \text{tg}\delta = U^2 \cdot G_f \quad (33)$$

şeklinde yazılabilir (Yılmaz, 1994).

Burada; U - Çift iletkenleri arasındaki gerilim C_e - Çiftin efektif kapasitesi

$\text{tg}\delta$ - Yalıtkan malzemenin dielektrik kayıp faktörü

Görüldüğü gibi efektif G 'yi hesaplamak için, kullanılan yalıtkan malzemenin dielektrik kayıp faktörünün de bilinmesi gerekir. G_0 çok küçük olduğundan, incelemeyi yaptığımız frekans bölgelerinde $G \sim G_f$ kabul edilebilir ve (34) formülüyle verilebilir.

$$G = \omega \cdot C_e \cdot \text{tg}\delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_e \cdot \text{tg}\delta = \frac{2\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \text{tg}\delta}{\text{Ln}(2a/r_0)} \cdot f \quad (34)$$

Dolgulu ve dolgunsuz kablolarda perditansın frekansla değişimi Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.
Dolgulu ve dolgunsuz kablolarda perditansın frekansla değişimi (Yılmaz, 1994)

Frekans f(kHz)	Dolgunsuz	$\text{tg}\delta = 0.0003$			Dolgulu	$\text{tg}\delta = 0.0010$	
	0.4 mm G (mho)xE-6	0.5 mm G (mho)xE-6	0.6 mm G (mho)xE-6	0.9 mm G (mho)xE-6	0.4 mm G (mho)xE-6	0.5 mm G (mho)xE-6	0.6 mm G (mho)xE-6
1	0.076	0.076	0.073	0.074	0.226	0.226	0.213
10	0.759	0.761	0.731	0.735	2.262	2.258	2.218
50	3.794	3.804	3.657	3.676	11.312	11.291	10.640
100	7.588	7.608	7.315	7.353	22.624	22.581	21.280
300	22.764	22.823	21.944	22.059	67.873	67.744	63.841
512	41.886	41.994	40.377	40.588	124.887	124.649	117.467
1024	77.702	77.902	74.901	75.293	231.674	231.233	217.910
2048	155.404	155.805	149.803	150.587	463.349	462.467	435.819
5000	379.404	380.383	365.729	367.643	1131.222	1129.070	1064.012
10000	758.809	760.766	731.458	735.287	2262.444	2258.139	2128.025

3. TEORİK HESAPLAMALARIN PRATİK ÖLÇME SONUÇLARINA UYGUNLUĞUNUN İNCELENMESİ

Birincil ve ikincil parametrelerin frekansla değişimini incelerken, 1-10 MHz frekans bölgesini en azından üç farklı frekans bandına bölmemiz gerekir. Bölüm 2'de kablo teorisini gözönünde bulundurarak yapılan açıklamalarda, parametrelerin çoğunun her frekans bandında farklı bir formülle hesaplandığı görülmüştür. 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 kablolarda 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 dolgunsuz ses frekansı 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. Bakır tellerin üzerine püskürtülen Som PE'den izolasyon, dolgulu ve dolgunsuz kablolarda farklı kalınlıkta olduğundan, damar çapları da farklıdır.

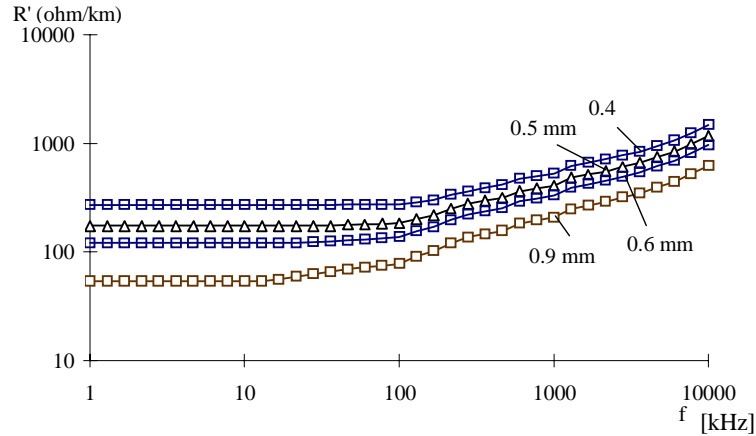
Çevrim direnci sıcaklıkla ve frekansla en fazla değişen parametredir. Alçak ve orta frekanslar bandında, ikincil parametrelerin hesaplama formüllerinin tamamında yer aldığı için, çevrim direncinin yüksek

doğrulukla hesaplanması önemlidir. Bölüm 2.1.3'te yapılan incelemeler sonucu çevrim direncinin hesaplanması için 3 farklı formül verilmiştir (10, 11, 12) Yapılan incelemelerde bu üç formül ile hesaplanan direnç değerlerinin genel olarak doğru olduğu (fark < % 1,5), sadece bir formülden diğerine geçiş frekanslarında hatanın ~ % 3'e kadar yükseldiği görülmüştür. Hatanın % 1.5'dan az olmasını sağlamak amacıyla, üç frekans bandı beşe çıkarılmış ve her tip kablo için frekans bandlarının sınırları tespit edilmiştir (Yılmaz, 1994).

Tablo 6'yı dikkate alarak hesaplanan çevrim direnci değerlerinin frekansla değişimi Şekil 15'te verilmiştir.

Tablo 6.
Çevrim direnci hesaplama formüllerinin geçerli olduğu frekans bandları

δ / r_0 Oranı	0.4 mm f (kHz)	0.5 mm f (kHz)	0.6 mm f (kHz)	0.9 mm f (kHz)	Geçerli Formül
1. $\delta > 1.1 r_0$	$f < 89.50$	$f < 57.25$	$f < 39.75$	$f < 17.670$	(10)
2. $1.1 r_0 > \delta$	$f < 89.50$	$f < 57.25$	$f < 39.75$	$f < 17.670$	$\frac{(10) + (11)}{2}$
3. $\delta > 0.9 r_0$	$f < 133.64$	$f < 85.53$	$f < 59.40$	$f < 26.400$	
4. $0.9 r_0 > \delta$	$f < 133.64$	$f < 85.53$	$f < 59.40$	$f < 26.400$	(11)
5. $\delta > 0.22 r_0$	$f < 2.236.55$	$f < 1.431.40$	$f < 994.00$	$f < 441.800$	$\frac{(11) + (12)}{2}$
6. $0.22 r_0 > \delta$	$f < 2.236.55$	$f < 1.431.40$	$f < 994.00$	$f < 441.800$	
7. $\delta > 0.18 r_0$	$f < 3.341.00$	$f < 2.138.25$	$f < 1.484.90$	$f < 660.000$	$\frac{(11) + (12)}{2}$
8. $\delta > 1.18 r_0$	$f < 3.341.00$	$f < 2.138.25$	$f < 1.484.90$	$f < 660.000$	(12)



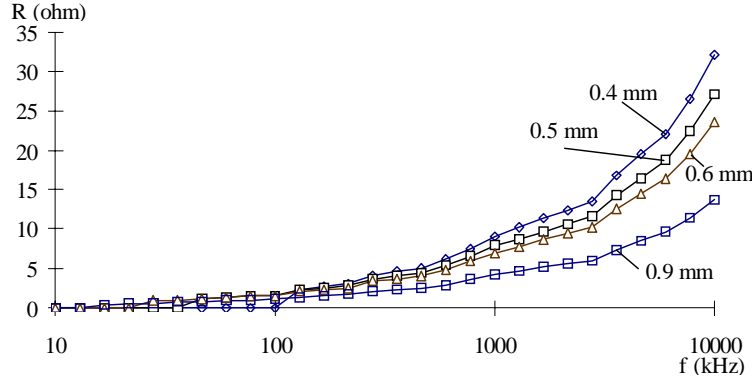
Şekil 15.

0.4, 0.5, 0.6 ve 0.9 mm Dolgulu ve Dolgusuz Kabloların Çevrim Direncinin Frekansla Değişimi

Görüldüğü gibi, çevrim direnci belirli bir frekansa kadar sabit kalır ve daha yüksek frekanslarda hızla artmaya başlar. Direncin artmaya başladığı frekans 0.9 mm telli kablolar için ~ 21kHz olup tel çapı düştükçe daha yüksek frekanslar bölgesine kayar ve 0.4 mm telli kablolar için 108 kHz'e kadar yükselir. Bu direnç artışının nedeni, Bölüm 2.1.1'de açıklanan "Deri olayı"dır. Tel çapları eşit, damar çapları farklı olan dolgulu ve dolgusuz kabloların çevrim dirençleri arasındaki fark, yüksek frekanslarda ($f > 1$ MHz) ~ % 2 - 2.5 seviyesindedir (Yılmaz, 1994).

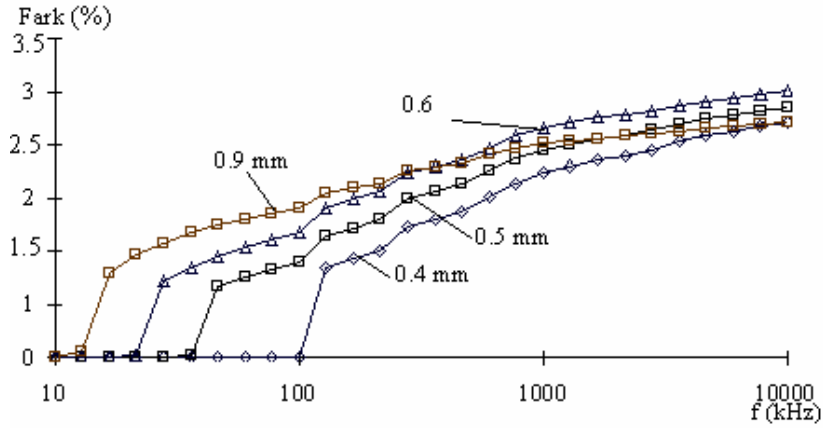
Dolgusuz kabloların kullanılan damarların çapları daha küçük olduğundan çift tellerinin merkezleri arasındaki mesafe $2a$ dan daha küçüktür. Dolayısıyla yakınlığın etkisi daha şiddetli olan dolgusuz kabloların çevrim direncinin de büyük olması beklenen bir sonuçtur. Şekil 16'da verilen fark (35) formülüyle hesaplanmıştır.

$$\text{Fark} = \left[\frac{R_{\text{dolgusuz}} - R_{\text{dolgulu}}}{R_{\text{dolgulu}}} \right] \cdot 100 = \left[\frac{\Delta R}{R_{\text{dolgulu}}} \right] \cdot 100 \quad [\%] \quad (35)$$



Şekil 16a.

Dolgulu ve Dolgusuz Kabloların Çevrim Dirençleri Arasındaki Fark (ohm/km olarak)

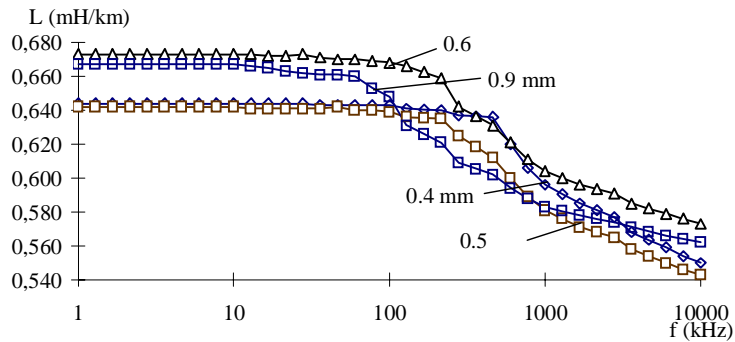


Şekil 16b.

Dolgulu ve Dolgusuz Kabloların Çevrim Dirençleri Arasındaki Fark (% olarak)

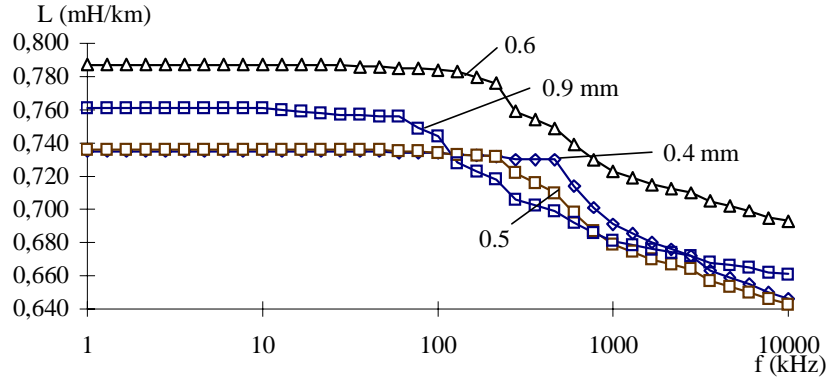
Bir çiftin self endüktansı, frekans yükseldikçe düşer ve çok yüksek frekanslarda, damar ve kablo boyutlarıyla belirlenen sabit bir değere ulaşır. Dolgulu kablolar da 2a daha büyük olduğundan, self endüktans da ~%15 daha büyüktür. PTT Şartnamesi gereği her iki tip kablonun efektif kapasiteleri eşit olduğundan, endüktanslarının farklı olması yüksek frekanslarda dolgulu kabloların karakteristik empedansının ~ % 7-8 arası daha büyük olmasına neden olur. PE izolasyonlu kablunun efektif kapasitesi frekansla değişmez. Sıcaklıkla ise çok az da olsa (20° - 70° C arası ~%5) düşer.

Hattın birim uzunluğunda self endüktansı, kapasitansı ve perditansı veren formüller (22, 30, 31, 34), % 2'den az hata ile tüm frekans bandlarında geçerlidir. Perditansın hesaplama formülünde (34) yer alan, yalıtkan malzemenin dielektrik kayıp faktörünün ($\text{tg}\delta$) doğru olarak tayin edilmesi önemlidir. Dolgusuz kablolar da $\text{tg}\delta$, damar izolasyonu olarak kullanılan PE malzemesinin dielektrik kayıp faktörüdür. Bu faktör kaliteli bir PE malzemesi için 0.00005-0.0001 arasında olsa da, üretilen damarlarda ~0.0003-0.0004 seviyesine yükselir ve hesaplamalarda bu değer geçerlidir.



Şekil 17.

Dolgusuz kabloların Self Endüktansı L'nin Frekansla değişimi



Şekil 18.

Dolgu kablolarında Self Endüktansı L'nin Frekansla değişimi

Dolgu kablolarında $tg\delta$, dolgu malzemesinin dielektrik kayıp faktöründen de etkilendiğinden, dolgu malzemesinin kalitesine göre $tg\delta$ 'sı da çok geniş sınırlar arasında değişmektedir. Ancak kaliteli petrojel dolgularında $tg\delta$, 0.0005-0.0020 arasındadır.

Perditans hesaplamalarında da $tg\delta$ değerlerinin yaklaşık bu sınırlarda alınması gerekir. Bu çalışma kapsamında yapılan incelemelerde kablodaki efektif dielektrik kayıp faktörü $tg\delta \sim 0.001$ olarak ölçülmüştür. Kapasitans ve perditans değerlerini doğru orantıyla etkileyen yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti ϵ_r , polietilenin tipi ve kalitesine göre 2.28 ile 2.35 arasında değişir. İncelenen kablolarında dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2.3$ olarak ölçülmüş ve yer aldığı tüm hesaplamalarda bu değer kullanılmıştır.

Tablo 7.

PD-AP-A 30x2x0.4/0.70 tipi kablolarında efektif kapasitenin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık	[°C]	0	10	20	30	40	50	60	70
Kapasite	[nF]	48.1	47.9	47.5	47.0	46.6	46.2	45.6	45.0
Fark	[%]	1.3	1.0	0.0	-1.2	-2.0	-2.7	-4.0	-5.2

Tablo 8.

Dolgu ve dolgunsuz kablolarında perditansın frekansla değişimi

Frekans	[kHz]		1	10	100	1000	3000	10000
Perditans	[mhoxE-06]	Dolgu	0.074	0.735	7.353	75.293	249	735.287
		Dolgunsuz	0.219	2.188	21.881	224.063	694	2188.118

4. SONUÇ

Yapılan incelemelerden aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır:

Çok çiftli kablolarında, her çiftin çevrim direnci, eşit uzunlukta tek telin direncinden büyük olup alçak frekanslarda (0.4 mm için $f < 108$ kHz; 0.9 mm için $f < 21$ kHz) frekanstan bağımsız, yüksek frekanslarda ise $\sim \sqrt{f}$ olarak değişmektedir. Teorik hesaplamalarla bulunan sonuçların %2'den az fark ile ölçme sonuçlarına eşit olması için 0-10 MHz frekans bölgesi 5 alt frekans bandına bölünmüş ve şehir içi dağıtım şebekesine döşenen 8 tip (0.4, 0.5, 0.6 ve 0.9 mm) dolgu ve dolgunsuz kabloda band sınırları ve geçerli formüller belirlenmiştir (Tablo 6). Tel çapı eşit olan kablolarında, çiftlerin DC çevrim direnci eşit olup yüksek frekanslarda (~ 1 MHz) dolgunsuz kabloların çevrim direnci ~ 2 -2.5 daha büyük olmaktadır.

Dolgu ve dolgunsuz kabloların çift efektif kapasiteleri eşittir, self endüktansları arasında ise ~ 12 -15 fark vardır. Bu farktan dolayı, dolgu kabloların yüksek frekans karakteristik empedansı ~ 6 -7 daha büyüktür. PE izolasyonlu kablolarında sıcaklık yükseldiğinde, kablonun efektif kapasitesi düşer (20°C ile 70°C arası bu düşüş ~ 4 -5 civarındadır).

Yalıtkan malzemesindeki kayıpların bir göstergesi olan perditans, dolgu kablolarında dolgunsuz kablolarına göre ~ 3 -4 kat daha yüksektir.

5. KAYNAKLAR

1. Belevitch, V. (1978) Capacitance of Circuits in a Tight Screened Pair or Quad, *Philips Journal of Research*, 33 (3/4), 139-148.
2. Gürkaynak, E. (1982) Notiz über Rechenformel für die Betriebskapazität, Siemens - KLN, NKEKB 12, Berlin.
3. Heinz, W. (1978) Unterlagen für WKM Vien über Betriebskapazitätsberechnungen Siemens - KLN, NKE 121, Berlin.
4. Kaden, H. (1959) *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*, Springer - Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
5. Megla, G. (1962) *Dezimeterwellentechnik*, Berliner Union, Stuttgart.
6. Mitchell, D.M. (1988) The Effect of Filling Compound on the Capacitance of Foam - Skin Insulation, Laboratory Simulation vs. Cable Performance, *37th International Wire & Cable Symp.*, 627 – 636.
7. Normann, H. (1982) Rechenformel für Betriebskapazitäten, KLN – Siemens, Berlin.
8. Riley, E. ve Acuna, V. (1990) Transmission Systems, *ABC of the Telephone*, vol. 8, 11-19.
9. Schmidt, H. (1982) *Theorie und Technik der Nachrichten Kabel*, Dr. Alfred Hüthing, Verlag, Heidelberg.
10. Stadler, E. (1973) *Hochfrequenztechnik*, Vogel – Verlag.
11. Uzgören, F. (1982) *İki İletkenli Transmisyon Hatları*, İ.T.Ü.
12. Vieth, B. (1981) Berechnungsunterlage für PE - isolierte Kabel, Siemens, NKEKB 11, Berlin.
13. Yılmaz, G. (1990) Haberleşme Kablolarında Kullanılan Petrojel Dolgu Malzemelerinin Elektriksel Parametrelerinin Ölçümü ve Değerlendirilmesi, Türk Siemens (TSS Araştırma Sonuçları)
14. Yılmaz, G. (1994) Şehir içi Haberleşme Kablolarının YF Parametrelerinin İncelenmesi ve 2 Mbit/s'de Kullanılabilirliğinin Araştırılması, İTÜ Doktora Tezi.