

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Simge, Gir. ve Gür. Ort. İlet.
Hat Kod, Hata Olas. İnc.

Yüksek Lisans Tezi

Hüdaver Atasoy

1986

Ref
EHM
227
1986

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

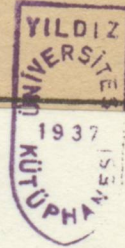
SİMGELERARASI GİRİŞİMLİ VE GÜRÜLTÜLÜ ORTAMDA İLETİLEN
HAT KODLARININ HATA OLASILIKLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MÜH. HÜDAVER ATASOY

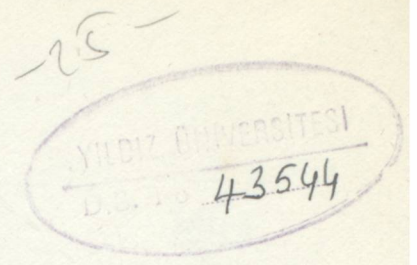
İSTANBUL 1986

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

Kot : R. 152
Alındığı Yer : Fen Bil. Ens. 69
Tarih : 9.12.1988
Fatura :
Fiatı : 5500 ₺
Ayniyat No : 1/21
Kayıt No : 45763
UDC : 001.64
Ek : 378.242



YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SİMGELERARASI GİRİŞİMLİ VE GÜRÜLTÜLÜ ORTAMDA İLETİLEN
HAT KODLARININ HATA OLASILIKLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MÜH. HÜDAVER ATASOY



İSTANBUL 1986



İÇİNDEKİLER

SAYFA

1. GİRİŞ	1
2. TEZİN KURULUŞU	5
2.1. Tez Kuruluşu	5
2.1.1. Tez Kuruluşu	5
2.1.2. Tez Kuruluşu	5
2.1.3. Tez Kuruluşu	5
2.1.4. Tez Kuruluşu	7
2.1.5. Tez Kuruluşu	7
2.1.6. Tez Kuruluşu ve Darbe Yönelimi	9
2.1.7. Tez Kuruluşu	9
2.1.8. Tez Kuruluşu	10
2.1.9. Tez Kuruluşu	10
2.1.10. Tez Kuruluşu	11
2.1.11. Tez Kuruluşu	11
2.1.12. Tez Kuruluşu	12
2.1.13. Tez Kuruluşu	12
2.1.14. Tez Kuruluşu	13
2.1.15. Tez Kuruluşu	13
2.1.16. Tez Kuruluşu	14
2.1.17. Tez Kuruluşu	14
2.1.18. Tez Kuruluşu	15
2.1.19. Tez Kuruluşu	15
2.1.20. Tez Kuruluşu	16

Tez danışmanım Doç.Metin YOCEL'e, tezin hazırlanmasında yardımlarını
esirgemeyen doktora öğrencileri Yük.Müh.Ümit AYGÜLÜ ve Yük.Müh.Soner
ÖZGONEL'e teşekkürleri borç bilirim.

3. TEZİN KURULUŞU	22
3.1. Tez Kuruluşu	22
3.2. Tez Kuruluşu	22
3.3. Tez Kuruluşu	22



İÇİNDEKİLER

SAYFA

SAYFA

ÖZET

SUMMARY

1. GİRİŞ	1
2. HAT KODLAMASI.....	5
2.1. Temel Kavramlar.....	5
2.1.1. Saydamlık.....	5
2.1.2. Verim.....	5
2.1.3. Hat Kodlarında Fazlalık.....	7
2.1.4. Enerji Spektrum Biçimi.....	7
2.1.5. Zamanlama Bileşeni ve Darbe Yoğunluğu.....	9
2.1.6. Çerçeveleme.....	9
2.1.7. Alfabe (Mod).....	10
2.1.8. Birikmiş Sayısal Toplam.....	10
2.1.9. Olurİu Durumlar.....	11
2.1.10. Terminal Durumlar.....	11
2.1.11. Sayısal Toplam Değişimi.....	12
2.1.12. Kodlama Kuralı.....	13
2.1.13. Hat Kodlayıcı Çalışma Prensipleri.....	14
2.1.14. Dengeli Kod	14
2.1.15. Durum-geçiş Çizgesi.....	14
2.1.16. Durum-geçiş Olasılığı.....	15
2.1.17. Terminal Durumu Durağan Olasılığı.....	16
2.1.18. Simge Olasılığı.....	16
2.1.19. Simge Bileşim Olasılığı.....	16
2.1.20. Koşullu Durum-geçiş Olasılığı.....	17
2.2. Hat Kodlarının Özellikleri.....	17
2.3. Hat Kodlarının Sınıflandırılması.....	22
2.3.1. Doğrusal Hat Kodları.....	22
2.3.2. Doğrusal Olmayan Hat Kodları.....	22

1-) Alfabetik Hat Kodları.....	22
a-) Hız Artıssız Alfabetik Hat Kodları.....	23
b-) Hız Artıslı Alfabetik Hat Kodları.....	23
2-) Alfabetik Olmayan Hat Kodları.....	24
2.4. Alfabetik Hat Kodları	27
2.4.1. Bipolar Hat Kodu.....	27
2.4.2. Hız Artıssız Alfabetik Hat Kodları.....	29
1-) PST Hat Kodu.....	29
2-) MPST Hat Kodu.....	31
2.4.3. Hız Artıslı Alfabetik Hat Kodları.....	33
a-) Üç-düzeyle Hat Kodları.....	33
1-) 4B-3T Hat Kodları.....	33
2-) MS43 Hat Kodları.....	36
(a) FOMOT	36
(b) MMS43.....	36
3-) 10B-7T Hat Kodları.....	42
(a) 10B-7T/2M.....	42
(b) 10B-7T/3M.....	42
b-) Çok-düzeyle Hat Kodları.....	45
1-) L742	45
2-) VL43.....	47
3-) 3B-2Q	48
4-) 6B-3QI.....	49
2.4.4. Çeşitli Hat Kodlarının Karşılaştırılması.....	50
3. SİMGELERARASI GİRİŞİMLİ VE TOPLAMSAL GAUSS GÜRÜLTÜLÜ	
ORTAMDA İLETİLEN HAT KODLARINDA HATA OLASILIĞI.....	51
3.1. Anaband Sistem Tanıtımı ve Darbe İletimi.....	51
3.2. Simgelerarası Girişim ve Toplamsal Gauss Gürültüsü....	53
3.2.1. Simgelerarası Girişim ("ISI").....	53

3.2.2. Toplamsal Gauss Gürültüsü.....	57
3.3. Hata Olasılığının Bulunmasında Kullanılmış Yöntemler..	61
3.3.1. 1970 Yılına Kadar Olan Yöntemler.....	61
a-) Kesik Darbe Dizisi Sınırı.....	61
b-) Kötü Durum Sınırı.....	61
c-) Chernoff Sınırı.....	61
3.3.2 Gram-Charlier Açılımı Yöntemi.....	62
3.3.3. Üst Sınır Yöntemi.....	62
3.3.4. Gauss Alan Hesabı Kuralları (GQR) Yöntemi.....	63
3.3.5. Üst ve Alt Sınır Yöntemi.....	63
3.3.6. Moment Yaklaşım Yöntemi.....	64
3.4. Birikmiş Sayısal Toplam Modeli.....	65
3.4.1. $P(e)$ 'nin Sayısal Değerlendirilmesi.....	66
3.4.2. $P(e)$ 'ye Yaklaşım Yöntemi.....	68
3.5. Hat Kodlarında Hata Olasılığı Eğrilerinin Bulunması..	70
3.5.1. Çeşitli Hat Kodlarının Hata Olasılıklarının İncelenmesi.....	74
1-) Bipolar.....	74
2-) PST.....	79
3-) 4B-3T.....	84
4-) MS43.....	90
5-) FOMOT.....	96
6-) MMS43.....	102
3.5.2. $P(e)$ Hesaplamaları Sonuçları.....	108
4. SİMGELERARASI GİRİŞİMLİ VE TOPLAMSAL GÜRÜLTÜLÜ ORTAMDA HAT KODLARININ BST MODELİYLE TASARIMI.....	109
4.1. Kod Tasarım Ölçütüleri.....	109
4.2. Kod Tasarım Algoritması.....	113
4.2.1. Yapılan Kod Tasarımı Programının Anlatılması..	115
4.2.2. Program Akış Diyagramı.....	120

4.3. Hata Olasılığı Eğrilerinin İncelenmesi ve Tasarlanan Hat Kodunun Diğerleriyle Karşılaştırılması.....	121
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	127
EKLER	
EK-1 Çeşitli Anaband Sayısal İletim Sistemleri İçin Hat Parametreleri.....	129
EK-2 Kod Tasarlama Programı.....	130
EK-3 Tasarlanan 4B-3TH Hat Kodu Bilgisayar Çıktısı.....	136
EK-4 Tasarlanan 5B-4TH Hat Kodu Bilgisayar Çıktısı.....	139
KAYNAKLAR.....	142

ÖZGEÇMİŞ

Bu tezde, hat kodlarına ilişkin temel özellikler ele alınmış ve genel bir sınıflandırılma yapılmıştır. Ayrıca, alfabelik hat kodlarından şimdiye kadar kullanılan ve yayınlananlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş, bunların birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

İletim sistemlerinde tüyüyle bulunması zor olan singelerarası girişim ve toplamsal gürültü problemleri tanıtılmış, singelerarası girişimi ve gürültü ortamında hatların hat kodlarının hata olasılığını bulmada kullanılan yöntemlerin yorumu yapılmıştır.

Aıcak-kızın frekansları kanalların neden olduğu singelerarası girişim için Chang, Jakubow ve Leon-Garcia tarafından 1982 yılında, önerilen "Birlikte Sayısal Toplam" modeli benimsenmiş ve işlenmesi yapılan tüm hat kodlarının hata olasılıklarının bulunmasında kullanılmıştır. Bu model, aynı zamanda minimum hata olasılığı hat kodları tasarlamaya da yönelik olup bilgisayar programı yardımıyla belirli hat kodları tasarlanmıştır. Tasarlanan kodların hata olasılıkları, bilinen kodlarınkiyle karşılaştırılmış ve optimum olduğu görülmüştür.

Ö Z E T

Sayısal iletim sistemlerinde, en kötü iletim şekli iletilecek dizinin kodlanmadan doğrudan iletilmesidir. Çünkü sayısal iletim sistemlerinin temel gereksinimleri olan "iletilen işaretin DC bileşene sahip olmaması", "yeterli zamanlama bileşenine sahip olması" ve "işletim anında hata gözleyebilme olanaklarının sağlanması" karşılanmamaktadır. Bu nedenle, hat kodlama tekniklerine gerek duyulur.

Bu tezde, hat kodlarına ilişkin temel özelliklere ele alınmış ve genel bir sınıflandırılma yapılmıştır. Ayrıca, alfabetik hat kodlarından şimdiye kadar kullanılan ve yayınlananlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiş, bunların birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

İletim sistemlerinde tümüyle önlenmesi zor olan simgelerarası girişim ve toplamsal gürültü problemleri tanıtılmış, simgelerarası girişimli ve gürültülü ortamda iletilen hat kodlarının hata olasılığını bulmada kullanılan yöntemlerin yorumu yapılmıştır.

Alçak-kesin frekanslı kanalların neden olduğu simgelerarası girişim için Chang, Jakubow ve Leon-Garcia tarafından 1982 yılında, önerilen "Birikmiş Sayısal Toplam" model benimsenmiş ve incelemesi yapılan tüm hat kodlarının hata olasılıklarının bulunmasında kullanılmıştır. Bu model, aynı zamanda minimum hata olasılıklı hat kodları tasarlamaya da yönelik olup bilgisayar programı yardımıyla çeşitli hat kodları tasarlanmıştır. Tasarlanan kodların hata olasılıkları, bilinen kodlarınkilerle karşılaştırılmış ve optimum oldukları görülmüştür.

S U M M A R Y

The worst transmission technique used in digital transmission systems is the direct transmission of the sequence to be transmitted without coding. Because three main requirements for a digital transmission system cannot be provided. These three requirements can be defined as follows:

"A line signal must not have DC component", "It must have enough timing content", and "it must provide facilities for in-service error monitoring".

But, line coding techniques satisfy these three requirements and so, they are needed in any digital transmission system.

In this study, main properties relevant to line coding are discussed and a general classification are carried out. Furthermore, the detailed information about the alphabetic line codes found in the relevant literature are given and their comparisons are made. Intersymbol interference and additive noise problems which cannot be prevented in transmission systems completely are described and the methods used in finding the error probability of line codes transmitted in the presence of intersymbol interference and additive noise are analyzed, too.

"The Running Digital Sum" Model presented by Chang, Jakubow and Leon-Carcia in 1982 for the intersymbol interference due to a low-frequency cutoff channel are preferred for this study and it is used in indicating the error probability of all line codes examined in this study. This model is also used to design line codes minimizing the error probability and various line codes are designed with the help of computer programs. The error probabilities of the designed line codes are compared with those of the codes examined in this study and they are found to be optimum.

SİMGE KISALTMALARI LİSTESİ

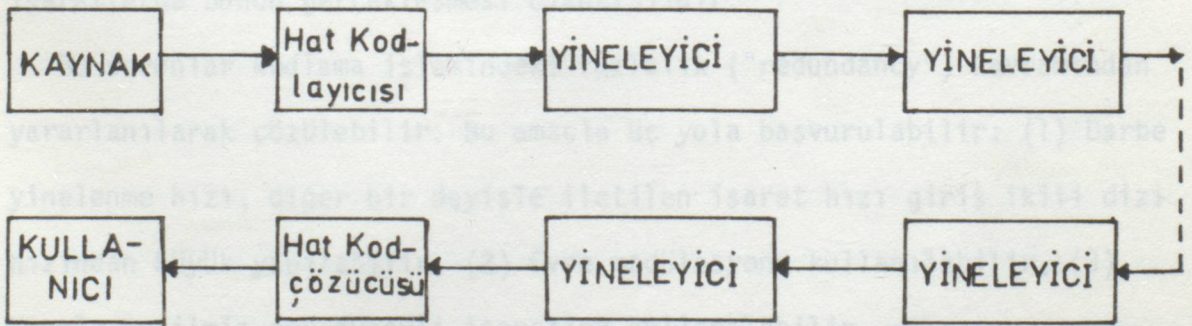
E	: Verim ("Efficiency").
r	: Fazlalık yüzdesi ("Redundancy").
P(f)	: Güç spektral yoğunluğu
KST	: Kelime sayısal toplamı ("Word Digital Sum").
S	: Durum.
C(s)	: S durumu alfabesi
BST	: Birikmiş sayısal toplam ("Running Digital Sum").
S	: Olurlu durumlar kümesi ("Allowable states").
ST	: Terminal durumları kümesi
STD	: Sayısal toplam değişimi ("Digital Sum Variation").
e(s)	: Kodlama kuralı.
π	: Durum-geçiş olasılık matrisi.
P_0	: Terminal durumu durağan olasılığı.
P	: Terminal durumları durağan olasılıkları vektörü.
TB	: "Twinned Binary" Kodu.
AMI	: "Alternate Mark Inversion", bipolar kodu
HOB	: "High-order Bipolar"Kodu.
MLB	: "Multi-Level Bipolar" Kodu.
MLFB	: "Multi-Level Feedback Balanced" Kodu.
PST	: "Paried Selected Ternary" Kodu.
MST	: "Modified PST" Kodu.

- NST : "N Selected Ternary" Kodu.
- MB-NT : M-uzunluklu ikili dizi, N-uzunluklu üçlü kodkelimelerine dönüştürülmüş alfabetik kod. (M-ikili, N-üçlü).
- 4B-3T : "4-Binary 3-Ternary", 4 ikili-3 üçlü kodu.
- MS43 : 4 ikili-3 üçlü alfabetik kod.
- MMS43 : "Modified" MS43 Kodu.
- FOMOT : "Four Mode Ternary" Kodu.
- L742 : 4 uzunluklu ikili-2 uzunluklu yedili bloklara dönüştürülmüş alfabetik kod.
- VL43 : "Variable Word Lengh" 4 ikili-3 üçlü kod.
- 3B-2Q : "3 Binary-2 Quaternary", 3 ikili-2 dördü kod.
- 6B-3QI : "6 Binary-3 Quinary", 6 ikili-3 beşli kod.
- B6ZS : "Bipolar With six zero substitution" Kodu.
- UB : "Unipolar Bipolar" Kodu.
- HDB : "High-density Bipolar" Kodu.
- DIB : "Transparent Interleaved Bipolar" Kodu.
- TPC : "Time Polarity Control" Kodu.
- DGM : Darbe genlik modülasyonu.
- DKM : Darbe kod modülasyonu.
- α : Minimum Nyquist bandından taşmanın Nyquist bandına oranı.
- ISI : "Intersymbol Interference", simgelerarası girişim.
- α_0 : Optimum eşik düzeyi.
- erf : Hata fonksiyonu.
- erfc : Tümlleyen hata fonksiyonu.
- IGO : İşaret gürültü oranı ("SNR").
- GQR : "Gaus quatration rules".
- P(e) : Hata olasılığı.
- Z : Simgelerarası girişim süreci rastlantı değişkeni.
- η : Toplamsal gürültü süreci rastlantı değişkeni.

I. GİRİŞ

İletişimin amacı, herhangi bir biçimdeki bilginin zaman ve uzay içinde kaynak olarak adlandırılan bir noktadan kullanıcı olarak adlandırılan başka bir noktaya aktarılmasıdır.

Bilgi işareti kanal üzerinden iletilmeden önce modülasyon teknikleri kullanılarak modüle edilir ve iletilir. Genel olarak, modülasyon taşıyıcı işaret sürekli (Sinüsoidal dalga) ise sürekli dalga modülasyonu, kesikli (periodik darbe) ise darbe modülasyonu olarak sınıflandırılır. Ayrıca bilgi işaretine göre de, eğer bilgi işareti sürekli ise analog modülasyon, 0,1'ler gibi ayırık ise sayısal modülasyon olarak sınıflandırılır. Eğer sürekli bilgi işareti varsa, bilgi işareti örnekleme ve kuantalama ile ayırık biçime dönüştürülür ve sonuçta tekrar analog biçime getirilir. Analog modülasyon yöntemleri kullanılarak analog bilgi iletilmesi için tasarlanan sistemlere "Analog İletim sistemleri", sayısal modülasyon teknikleri kullanılarak sayısal bilgi iletilmesi için tasarlanan sistemlere de "Sayısal iletişim sistemleri" denir. Bilindiği gibi, sayısal iletişim analog iletişimden avantajlıdır.



Şekil 1.1 Sayısal iletişim sistemi öbek çizimi.

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, bilgi kaynağı ve kullanıcı genellikle uzay ile ayrılır. Kanal, bu iki nokta arasında elektriksel bağlantıyı sağlar. (Mikrodalga radyo link, bir çift-tel veya optik fiber gibi). Her tür kanalda varolan simgelerarası girişim ve gürültü gibi bozucu etkenler bilgi işaretinin bozulmasına neden olur. Bu bozulmaları olabildiğince azaltmak için kanal boyunca yineleyicilerden yararlanılır. Yineleyiciler birbirlerine ne kadar yakınsa bilgi o kadar iyi iletilir.

Hat üzerinde sayısal iletim için kullanılabilecek en basit işaret ikili tekyönlü işarettir. (Bu işaretle "Birler"darbe "sıfırlar" boşlukla gösterilir.) Tekyönlü işaret üç ana nedenle iletimde yetersiz kalmaktadır:

(a) Zamanlama bilgisi yineleyicilerde çoğunlukla iletilen işaretin kendisinden türetilir. Uzun ardışıl "sıfırlardan" ve sıfıra dönüşsüz işaretlerde uzun ardışıl "birlerden" oluşan işaretler, zamanlama bilgisi açısından yeterli değildirler, seyirmeye neden olurlar.

(b) Tekyönlü işaret doğru bileşene ve fazla alçak spektral enerjisine sahiptir. İşaretle doğru bileşen varlığı yineleyicilerde bastırılması çok zor olan düzey kaymalarına neden olur.

(c) İşletim sırasında hatanın gözlenebilmesi istenirken tekyönlü işaretlerde bunun gerçekleşmesi olanaksızdır.

Bu sorunlar kodlama işlemindeki fazlalık ("redundancy") kavramından yararlanılarak çözülebilir. Bu amaçla üç yola başvurulabilir: (1) Darbe yinelenme hızı, diğer bir deyişle iletilen işaret hızı giriş ikili dizi hızından büyük yapılabilir, (2) Evre modülasyonu kullanılabılır, (3) Uyumlu seçilmiş çok-düzeyli işaretler kullanılabılır.

Üçüncü yol hat kodlama tekniği olarak adlandırılır. Çeşitli hat kodlarının hata başarımları açısından değerlendirilmesi ve optimum hata

başarımlı hat kodlarının tasarımı bu tezin konusunu oluşturmaktadır.

Hat kodlaması giriş sayısal veri dizisini anaband sayısal iletime uygun olarak başka bir kod dizisine dönüştürmektir. Hat kodları düzey kaymalarını engellediği gibi zamanlama, çerçeveleme ve işletim sırasında hata gözleyebilme olanağı sağlar. Hat kodları genel olarak doğrusal ve doğrusal olmayan hat kodları olmak üzere ikiye ayrılır. Bir hat koduna, kodlanmış dizi ikili giriş verisinden doğrusal ilişkiler kullanarak çıkartılmışsa doğrusal hat kodu, doğrusal ilişkilerle çıkartılamazsa doğrusal olmayan hat kodu denir. Doğrusal olmayan hat kodları da alfabetik ve alfabetik olmayan olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Alfabetik hat kodu, xK -düzeyli blokların yL -düzeyli bloklara dönüştürülmesidir. x giriş ikili veri uzunluğu, y çok-düzeyli bilgi uzunluğundan küçük veya eşitse hız artışı alfabetik hat kodu, büyükse hız artışı alfabetik hat kodu olarak adlandırılır. Alfabetik olmayan hat kodu belirli uzunlukta ardışıl sıfır dizileri yerine sıfır olmayan seçilmiş örnekleri kullanmaya dayanır.

Tezin ikinci bölümünde, hat kodlarına ilişkin başlıca temel kavramlar ve özellikler ele alınmıştır. Ayrıca genel bir sınıflandırılma yapılmış ve alfabetik hat kodlarından şimdiye kadar kullanılan ve yayınlananlar hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Bölüm III'de, anaband sayısal sistemde simgelerarası girişim ve toplamsal gürültü problemleri ortaya konmuştur. Daha sonra simgelerarası girişimli ve toplamsal gürültülü ortamda iletilen hat kodlarının hata olasılığının bulunmasında şimdiye kadar kullanılmış yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmının yetersiz (kesin olmaması), bir kısmının da gerekli olan bilgisayar zamanının çok fazla oluşu nedeniyle iyi olmadıkları görülmüştür. Bu nedenle, Chang, Jakubow ve Leon-Garcia tarafından 1982 yılında, alçak-kesim frekanslı kanalların neden olduğu simgelerarası girişim için "Birikmiş

Sayısal Toplam" model önerilmiştir. Bu modelde kanal "Yükseltilmiş kosinüs karakteristikli" olup birikmiş sayısal toplam fiziksel olarak simgelerarası girişimi yansıtır. Her simgenin neden olduğu simgelerarası girişim, o simgenin kendisine zıt yönde sonsuz süreli ve sabit genlikli kuyruğuyla gösterilir. Bu tezde, incelenen hat kodlarının hata olasılıkları, bu modele dayanılarak bulunmuştur. Hata olasılığını etkileyen büyüklükler simgelerarası girişimin genliği ve gürültü gücüdür. Gürültünün sıfır ortalımalı durağan Gaus sürecine uyduğu varsayılmıştır. Önceki yöntemlerde simgelerarası girişim doğrudan hata oranına bağlanamadığı için hat kodlarının hata olasılığı başarımlarını optimum yapmak olanaksızdı. Birikmiş sayısal toplam modeli bu olanağı sunmaktadır.

Beşinci bölümde, hata olasılığı başarımlarını optimum yapan hat kodu tasarım algoritması ele alınmış ve bilgisayar programı yardımıyla hat kodları tasarlanmıştır. Bunların hata olasılıkları açısından, bilinen kodlara göre, optimum oldukları görülmüştür.

Kullanılan hata olasılığı hesaplama ve optimum hat kodu tasarım programları tüm program çıktılarıyla ayrıca sayısal iletimde yaygınca kullanılan hat kodlarını gösteren ekler tezin sonunda sunulmuştur.

2. HAT KODLAMASI

Hat kodlamasını, kısaca giriş sayısal veri dizisini anaband sayısal ilettime uygun koşullar sağlamak için diğer bir kodlanmış dizi şekline dönüştürmek olarak tanımlayabiliriz. Hat kodlaması üç ana özelliğe sahip olmalıdır: Birincisi, düşük frekanslarda ihmal edilebilir enerji spektrumuna sahip olmalı ve DC bileşenine sahip olmamalıdır. İkincisi, yineleyicilerde yeniden zamanlama bilgisini elde edebilmek için yeterli zamanlama bileşenine sahip olmalıdır. Üçüncüsü ise, işletim anında hata gözleyebilme olanakları sağlamalıdır [1], [2],[3]. Önce hat kodlarıyla ilgili temel kavramlar anlatılacaktır. Bunların anlatılması tezin anlaşılmasını kolaylaştıracağı açısından önemlidir.

2.1. Temel Kavramlar

2.1.1. Saydamlık

İletilen mesaj içeriğinde herhangi bir kısıtlama olmaması ve işaretteki sıfır ve birlerin kodlama tekniğine uygun olmasıdır.

2.1.2. Verim

Bir iletim kodunun verimi, mesaj işareti ve onun kodlanmış şeklinin enformasyon sığaları (bazen entropisi) karşılaştırılarak gösterilir. Giriş ve çıkış verileri ikili sayı, tabanları aynı ise, verimi göstermek zor değildir. Fakat tabanları değişik ise örneğin giriş ikili, çıkış üçlü veya dördü gibi olduğu zaman verimi göstermek oldukça karmaşıktır. $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ ile enformasyon mesajları miktarı (n farklı simge) ve i 'nci simgenin olasılığı P_i ile gösterilirse, N mesaj iletimi için toplam enformasyon ölçüsü:

$$I = N \sum_{i=1}^n P_i \log_2 \frac{1}{P_i} \quad (2.1)$$

ve Entropisi:

$$H = N \sum_{i=1}^n P_i \log_2 1/P_i \text{ (Bit/Simge)} \quad (2.2)$$

olur.

Eğer mesaj işareti S_m simge hızına sahipse, enformasyon sığası:

$$C_m = S_m \cdot H = S_m \sum_{i=1}^n P_i \log_2 1/P_i \text{ (Bit/Sn.)} \quad (2.3)$$

şeklini alır.

Benzer olarak kodlanmış işaretin enformasyon sığası:

$$C_c = S_c \sum_{i=1}^n q_i \log_2 1/q_i \text{ (Bit/Sn.)} \quad (2.4)$$

şeklindedir.

S_c : Simge hızı [Simge/Sn]

i : i 'inci mesaj simge olasılığı

Sonuç olarak, verim E , aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$E = \frac{C_m}{C_c} \quad (2.5)$$

(2.3) ve (2.4), (2.5)'de yerine konursa:

$$E = \frac{S_m \sum_{i=1}^n P_i \log_2 (1/P_i)}{S_c \sum_{i=1}^n q_i \log_2 (1/q_i)} \quad (2.6)$$

Örneğin, giriş ikili işareti 1 MHz de, $P(1) = 0.25$ ve $P(0) = 0.75$

$C_m = 0.8115$ Mbit/Sn.

Çıkış üçlü simgeler 0.8 MHz de, ve üç simge de aynı olasılıklıdır.

$C_c = 1.268$ Mbit/Sn. ve $E = \% 64$ bulunur.

Genelde sistemler % 40 lık verimi kabul edebilirler. Yüksek verim ancak blok kodlamasıyla elde edilir [3], [4].

2.1.3. Hat Kodlarında Fazlalık

Anabanda iletim sisteminde, giriş verisi ikili şekilde ve hat üzerinden iletilecek işaret "L" düzeyli olduğu kabul edilir, burada L ikiden büyüktür. "R" kodlayıcıyı besleyecek ikili sayı verisinin hızı ve B_L hat üzerinden iletilecek çok-düzeyleli bilginin hızı ise,

Bilgi hızındaki fazlalık:

$B_L \log_2 L - R \log_2 2$ ve ikili giriş verisine göre fazlalık yüzdesi:

$$r = \left[\frac{B_L}{R} \log_2 L - 1 \right] \cdot 100 = C_c - C_m / C_m = 1/E - 1 \quad (2.7)$$

kısaca, fazlalık kullanılmamış sığa miktarıdır. Örneğin PST kod için

$r = \% 58.2$, MS43 ve 4B-3T için $r = \% 18.65$ dir [1], [3].

2.1.4. Enerji Spektrum Biçimi

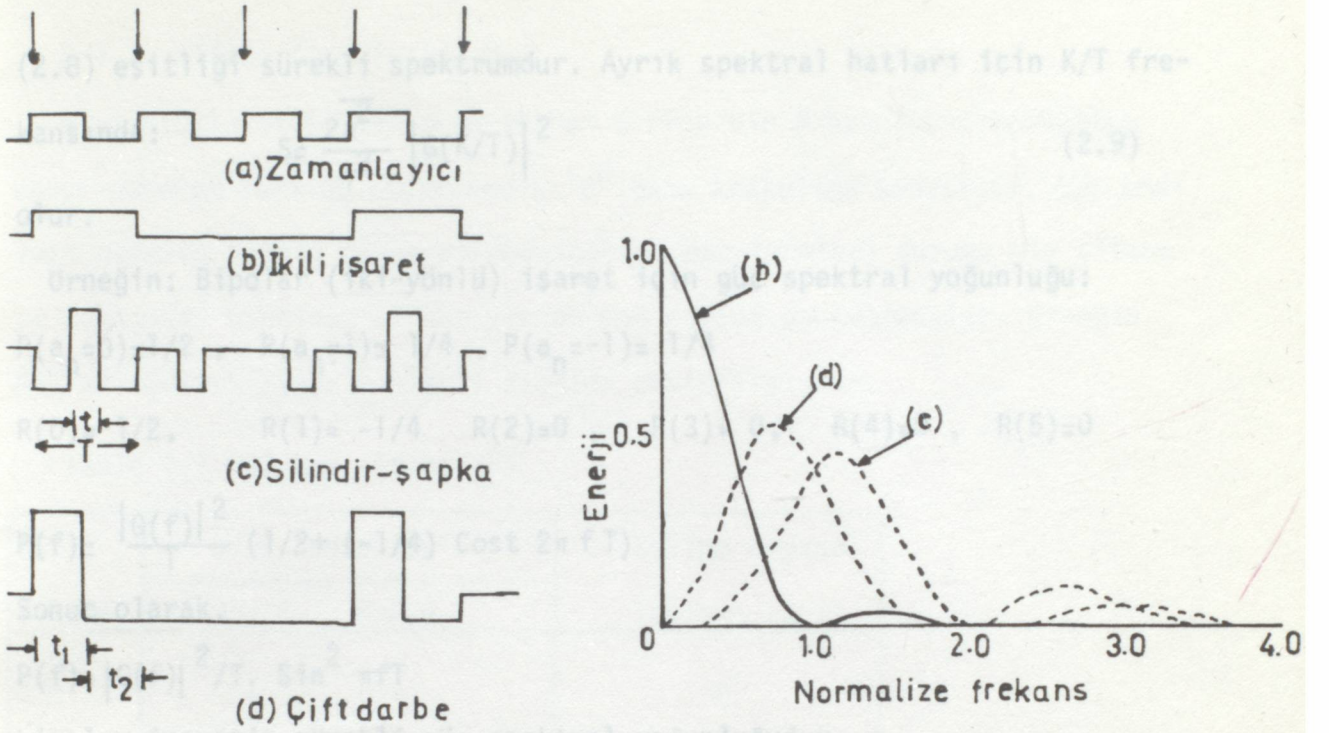
Enerji spektrumu biçimini incelerken aşağıdaki özellikler:

- 1) Alçak-frekanslarda büyük zayıflama,
- 2) Alçak-frekanslarda fiziksel olarak eleman boyutları nedeniyle, denkleştirme ("Equalization") zorluğu,
- 3) Yüksek-frekanslarda büyük zayıflama, (zayıflama iletim frekansının karekökü ile orantılıdır.)
- 4) Yüksek-frekanslarda birbirine komşu kablolarda hat karışımında ("Crosstalk") artma göz önünde bulundurulmalıdır.

Uygulamada, aşağıdaki değişkenlerin mantıklı seçilmesiyle ideal bir enerji spektrumu gerçekleştirilebilir. Bu değişkenler:

- 1) Darbe biçimi,
- 2) Darbe yinelenme hızı,
- 3) İletilecek düzey sayısıdır.

Spektrumun alçak-frekans kısmı uygun bir darbe biçimi seçilerek azaltılabilir. Şekil 2.1'de çeşitli darbe biçimleri gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1 İkili, silindir-şapka darbe ve çift-darbe darbe biçimleri

ve ilgili enerji spektralleri.

Spektrumun yüksek-frekans kısmı ise darbe yinelenme hızı azaltılarak çıkartılır. Bu da çok-düzeyle kodlama kullanılarak başarılır. Aksi halde simgelerarası girişime neden olur. Ortalama enerji spektrumu, özilişki ("Autocorrelation") teknikleri ile tahmin edilebilir, [5]'de rast gele tek-yönlü ve çift-yönlü işaretler için hesaplanmıştır. Darbe genlik modülasyonu $x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t-nT)$ işareti için güç spektral yoğunluğu:

$$P(f) = \frac{|G(f)|^2}{T} \left[(R(0) - \bar{a}^2) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} [R(k) - \bar{a}^2] \cos 2\pi k f T \right] \quad (2.8)$$

olarak bulunmuştur.

$G(f)$ = Darbe biçiminin Fourier dönüşümü

$$R(k) = \overline{a_n a_{n+k}}$$

$\bar{a} = \overline{a_n}$ n'in tüm değerleri için.

(2.8) eşitliği sürekli spektrumdur. Ayırık spektral hatları için K/T frekansında:

$$S = \frac{2a^2}{T^2} |G(K/T)|^2 \quad (2.9)$$

olur.

Örneğin: Bipolar (iki-yönlü) işaret için güç spektral yoğunluğu:

$$P(a_n=0)=1/2, \quad P(a_n=1)=1/4, \quad P(a_n=-1)=1/4$$

$$R(0)=1/2, \quad R(1)=-1/4, \quad R(2)=0, \quad R(3)=0, \quad R(4)=0, \quad R(5)=0$$

$$P(f) = \frac{|G(f)|^2}{T} (1/2 + (-1/4) \cos 2\pi f T)$$

Sonuç olarak,

$$P(f) = |G(f)|^2 / T \cdot \sin^2 \pi f T$$

bipolar işaretin sürekli güç spektral yoğunluğudur.

2.1.5. Zamanlama Bileşeni ve Darbe Yoğunluğu

Bu iki özellik kod dizisinin güç spektral yoğunluğundan çıkarılabilir. Yineleyicilerde zamanlama bilgisi normal olarak tamdalga doğrultmacı gibi doğrusal olmayan araçlarla elde edilir.

Diğer taraftan, kodlanmış dizinin ortalama gücünün ve darbe yoğunluğunu elde edebilmek, spektral yoğunluğun beklendik değerinin sürekli spektrumun tüm aralığı üzerinden değerlendirilmesiyle olur. Genelde, bu değer ne kadar büyükse, hat karışması gürültü düzeyi de o derece yüksektir.

2.1.6. Çerçeveleme ("Framing")

Alınan simge dizisi, kod çözülmesi yapılmadan önce N kodkelime uzunluklu bloklara doğru olarak bölüştürülmelidir. Alınan kodkelimelerinin kodda kullanılan kodkelimeleriyle uyuşup uyuşmadığı gözlenir veya izin verilen kelimelerin uygunsuz dizilmeleri olup olmadığına bakılır. Ayrıca alınan kodkelimelerinin bitişleri terminal durumlarıyla uyumlu olup olmadığı kontrol edilir. Çerçeveleme işlemlerinde yapılan hata, çerçeveleme hatası olarak adlandırılır.

2.1.7. Alfabe (C(s)) yada Mod

M uzunluklu ikili keimelerin her birine bir N uzunluklu kodkelime karşı düşecek şekilde düzenlenmiş 2^M tane kodkelime kümesidir. Hat kodları genelde birden fazla alfabe içerir. Her terminal durumu bir alfabe-ye sahiptir. Genelde, alfabe yerine mod deyimi de kullanılır. Örneğin, PST alfabeleri (veya modları) aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 2.1 PST kod alfabeleri

İkili Kelime	Üçlü kodkelime		Kelime sayısal Toplamı (KST)
	Mod A	Mod B	
0 0	- +	- +	0
0 1	0 +	0 -	+1
1 0	+ 0	- 0	-1
1 1	+ -	+ -	0

2.1.8. Birikmiş Sayısal Toplam (BST)

Herhangi bir anda kodlayıcının DC durumunu gösterir [2].

n anında BST :

$$S_n = \sum_{k=1}^n a_k + S_0 \quad (2.10)$$

denklemleri yardımıyla bulunur.

S_0 : Başlangıç terminal durumu

a_k : Kodkelime simgeleri

Örnek: $S_0 = 0.5$, $a_k = - + (a_1 = -, a_2 = +)$ ve $n = 2$ için BST:

$$S_2 = 0.5 - 1 + 1 = 0.5$$

2.1.9. Olurlu Durumlar, S

Olurlu durumlar, birikmiş sayısal toplamın alabileceği tüm durumlar kümesidir. Başka bir deyişle, simge bitişiğindeki BST değerleridir. Örneğin, PST hat kodu için olurlu durumlar kümesi:

Tablo 2.2 PST Olurlu durumlar tablosu (Normalize edilmiş)

İkili Kelime	Üçlü kodkelime			
	Mod A		Mod B	
0 0	-1.5	-0.5	-0.5	0.5
0 1	-0.5	0.5	0.5	-0.5
1 0	0.5	0.5	-0.5	-0.5
1 1	0.5	-0.5	1.5	0.5

Tablo'da görüldüğü gibi olurlu durumlar kümesi:

$$S = (-1.5, -0.5, 0.5, 1.5),$$

hat kodunun olurlu durumlar tablosu, EK-2 deki (530-620) satırları arasındaki alt programla bulunur.

2.1.10. Terminal Durumlar, ST

Terminal durumlar ST kümesi olurlu durumlar kümesi S'in alt kümesidir. Kısaca kodkelime bitişiğindeki BST değerleridir. Hat kodunun terminal durumu:

$$S^i = S_0 + \sum_{j=1}^N a_j \quad (2.11)$$

denkleminde bulunur.

Burada, N: kodkelime uzunluğu (simge sayısı)

S^i : ST terminal durumlar kümesinde bir terminal durumu.

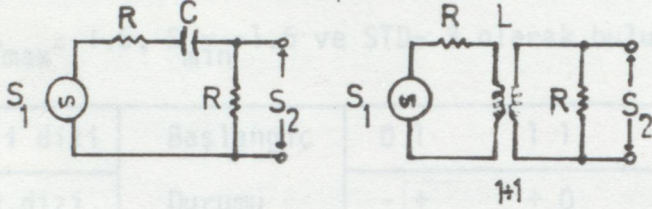
S_0 : Başlangıç durumu.

Örnek: PST hat kodunda terminal durumlar kümesi,

$$ST = (-0.5, 0.5) \text{ dir.}$$

2.1.11. Sayısal Toplam Değişimi (STD)

Şekil 2.2 de görüldüğü gibi basit AC bağlama devrelerini düşünelim. Çoğu iletim sistemlerinde doğru akımı iletmeyen devrelere gerek duyulur [6]. Kanal aşağıdaki devreler gibi düşünülür.



Şekil 2.2 AC bağlama devreleri.

Şekil 2.2 deki durumların herhangibirinde,

$$S_2(t) = \frac{1}{2} S_1(t) - \frac{1}{\tau} \int S_2(t) dt, \quad (2.12)$$

burada $\tau = 2 RC$ veya $\tau = 2L/R$

(2.12)'nin sağ tarafındaki ikinci terim, bağlama devresinin neden olduğu bozulmadır. Şayet bu bozulma küçükse (veya $S_1 \approx S_2$), uygulanan ilk işarete eşittir.

AC bağlama devresi bozulması, kodun sayısal toplamıyla orantılıdır. (2.10)'da tanımlandığı gibi sayısal toplam, BST değerlerini alır. BST değeri sonlu da, sonsuz da olabilir.

İşaretin ortalama değeri azaldığında, kodun spektrumu DC bileşenlere sahip olmaz. Bu özelliğe tüm hat kodları sahiptir. DC bileşensiz kodla çalıştığımız zaman, kodun maksimum sayısal toplam değişimi çok önemlidir.

Eğer hat kodlayıcının olurlu durumları sonlu, diğer bir deyişle BST sonlu ise, hat kodlayıcı sonlu sayısal toplam değişimli diziler üretir. Sayısal toplam değişimi, olurlu durumlar kümesindeki $S_{\max}$ ve $S_{\min}$ değerleri arasındaki farka eşittir.

$$STD = S_{\max} - S_{\min} \quad (2.13)$$

Başka bir deyişle sayısal toplam değişimi, ard arda gelebilen aynı kutuplu darbe sayısıdır [7], [8]. İletim kodu tasarımında bozulmayı minimum yapabilmek için STD'yi mümkün olduğu kadar küçük yapmayı denemeliyiz.

Örnek : PST hat kodunda STD bulunması:

$S_{\max} = 1.5$, $S_{\min} = -1.5$ ve $STD = 3$ olarak bulunur veya,

İkili dizi	Başlangıç	0 1	1 1	1 0
Üçlü dizi	Durumu	- +	+ 0	+ -
BST değeri	-0.5	-0.5	0.5	0.5

Çerçeve içinde görüldüğü gibi aynı kutuplu darbe sayısı, $STD = 3$ dür.

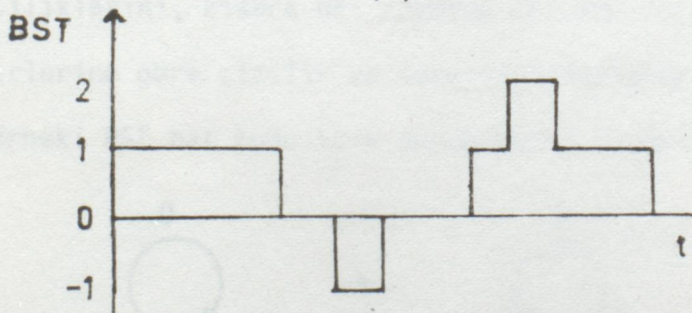
2.1.12 Kodlama Kuralı, $e(s)$

İletilecek ikili dizi, her hat kodunun kendi dönüşüm tablosuna göre üçlü dizi şekline dönüştürülmesi ve çerçevelenmesidir. Her terminal durumu 2^M üçlü kodkelime içeren alfabeyle sahiptir. Bu alfabelerin bir kısmı negatif sayısal toplama, bir kısmı da pozitif sayısal toplama sahiptir. Kod alfabelerini değiştirerek DC düzeyi ve ard arda gelen sıfırların zamanlama bilgisi çıkarılabilmesi için azaltılmasına çalışılmalıdır.

Örnek : İkili dizinin PST hat kodu ile kodlanması :

İkili	1 0	0 1	0 0	0 1	1 1	0 1
PST	+ 0	0 -	- +	0 +	+ -	0 -

(a)



(b)

Şekil 2 .3 PST hat kodu (a) kodlanması, (b) BST dalga şekli

2.1.13 Hat Kodlayıcı Çalışma Prensipleri

Hat kodlayıcı her kodkelime bitişinde terminal durumundadır, M ikili dizi bloğunu kabul eder ve onları alfabe ile kodlama kuralını kullanarak üçlü kodkelimeleri şeklinde kodlar. Kodlayıcı yeni kodkelime bitişinde yine terminal durumunda olacak ve kodlama işlemlerini yineleyecektir.

2.1.14. Dengeli Kod

Eğer bir "a" kodkelimesi alfabede "s" durumuna karşılık geliyorsa, "-a " kodkelimesinin durumu da $S_{\max} - (S - S_{\min})$ denkleminde bulunabiliyor ise, bu koda dengeli kod denir.

Örnek :

$a = +0-$ ise $-a = -0+$ olur.

$S_{\max} = 3$ ve $S_{\min} = -3$ ise $S_a = 0$ ve $S_{-a} = 3 - [0 - (-3)] = 0$.

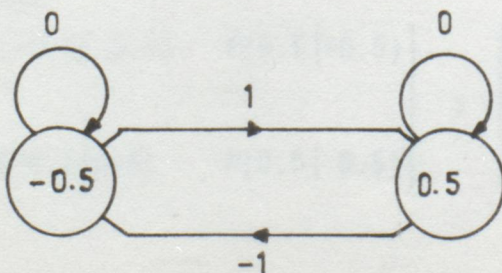
$S_a = S_{-a}$ olduğu için dengeli koddur.

Dengeli kodlar $1/T$ nin tam katlarında, DC de boşluk içeren güç spektrumuna sahiptir. Ayrıca dengelenme özelliği, kod ile ilgili işlemlerin kolay yapılmasını sağlar. Örneğin, kod alfabelerinin yarısı seçilir, diğer yarısı da simetrik olacağından kolayca bulunur. Ayrıca kodla ilgili olasılık hesapları da çok kolaylıkla yapılır.

2.1.15 Durum-geçiş Çizgesi

Terminal durumları kümesini ve bu terminal durumları arasındaki geçiş olasılıklarını, kısaca hat kodunun çalışma şeklini açıklamayı sağlar. BST değerlerine göre çizilir ve istenilen rakamlar kullanılabilir.

Örnek: PST hat kodu için durum-geçiş çizgesi:



2.1.16 Durum-geçiş Olasılığı

Giriş verisi eşit olasılıklı bağımsız ikili kelimelerden oluştuğu varsayılır ve n_{ij} , kodlayıcıyı i terminal durumundan j terminal durumuna geçirmeye neden olan giriş kelimeleri sayısı olarak tanımlanırsa, terminal durumundan bir adım geçiş matrisi:

$\pi = \|\pi_{ij}\|$ dir ve

$$\pi_{ij} = 2^{-M} \cdot n_{ij} \quad (2.14)$$

denklemi ile bulunur.

Geçiş matrisi:

$$\pi = 2^{-M} \cdot \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1j} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & n_{i2} & \dots & n_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

yada,

$$\pi = \begin{bmatrix} P(1|1) & P(2|1) & \dots & P(j|1) \\ P(1|2) & P(2|2) & \dots & P(j|2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P(1|i) & P(2|i) & \dots & P(j|i) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

biçiminde olabilir. Her satırın toplamı bire eşittir. Bu özellik Markov işlemlerinin uygulanabileceğini gösterir.

Örnek: PST hat kodu için geçiş matrisi:

$$\pi = 2^{-M} \cdot \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{bmatrix} = 2^{-2} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

yada

$$\pi = \begin{bmatrix} P(-0.5|-0.5) & P(0.5|-0.5) \\ P(-0.5|0.5) & P(0.5|0.5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

olur.

2.1.17. Terminal Durumu Durağan Olasılığı, $P_0(s)$

Geçiş matrisinin her satırının toplamı bire eşit olduğundan, terminal durumları Markov işlemleri biçimindedir. O halde terminal durumu durağan olasılık vektörü P , terminal durumları sayısında boyutta ve $P \cdot \pi = P$ koşulunu sağlayan satır vektördür. Böylece, $ST-1$ tane doğrusal bağımsız denklem vardır. $\sum P(ST)=1$ koşulunu da kullanarak terminal durumu durağan olasılıkları bulunur. $P = [P_0(1)P_0(2)...P_0(i)]$ şeklindedir.

Örnek: PST hat kodu için terminal durumu durağan olasılıkları:

$$[P_0(-0.5)P_0(0.5)] \cdot \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} = [P_0(-0.5)P_0(0.5)]$$

$$[P_0(-0.5)P_0(0.5)] = [1/2 \quad 1/2] \text{ dir.}$$

Çok büyük boyutlu terminal durumu durağan vektörü bilgisayar yardımıyla çözülebilir. Hat kodlarında terminal olasılıkları EK-2'deki (1260-1920) satırları arasındaki alt programla hesaplanır.

2.1.18. Simge Olasılığı

Alfabadeki kodkelimelerin belirtilen konumdaki aynı tip simgelerin toplam sayısının, alfabadeki toplam kodkelime sayısına bölünerek bulunur [9].

Örnek: PST kodda BST (-0.5) alfabetesinde:

$$P(+)= 2/4, P(0)= 1/4, P(-)= 1/4 \text{ dür.}$$

2.1.19. Simge Bileşim Olasılığı

Alfabadeki kodkelimelerin belirtilen konumdaki iki tip simgeden aynı kodkelimede ard arda gelenlerin toplam sayısı, alfabadeki toplam kodkelime sayısına bölünerek bulunur [9].

Örnek: PST kodda BST (-0.5) alfabetesinde:

$$P(++)= 0, P(+-)= 1/4, P(-+)= 1/4, P(--)= 0$$

2.1.20. Koşullu Durum-geçiş Olasılığı

Bir terminal durumundan diğer bir terminal durumuna geçmeye neden olan kodkelimelerinin ilk simgelerinin olasılığıdır[9] .

Örnek: PST kodda:

İlk durum:

Son durum:

$S = -0.5$

$S = -0.5$

$P(+) = 1/4$

$S = -0.5$

$S = -0.5$

$P(-) = 1/4$

$S = -0.5$

$S = 0.5$

$P(+) = 1/4$

$S = -0.5$

$S = 0.5$

$P(-) = 0$

2.2. Hat Kodlarının Özellikleri

Daha öncede anılan üç özellik, hat kodlarının temel özellikleridir. Ayrıca hat kodlarının birtakım özelliklere de sahip olması istenir. Genel olarak incelenirse, bunlar:

1. Kodlanmış işaretin güç spektrumu alçak-frekans aralığında olabildiğince küçük olmalıdır. Bu durum güç beslemesi sağlamak ve alçak-frekans gürültüsünü azaltmak için yeğlenen dönüştürücüden veya sığanın AC bağlaşmasından dolayı ortaya çıkar. Eğer DC ve alçak-frekans bileşenleri varsa, onlar bastırılması zor olan düzey kaymalarına neden olur. Düzey kaymaları izin verilebilir darbe örneklerini kısıtlayarak veya DC onarım-
lı kuantalanmış geri besleme [3,s.271] kullanılarak düzeltilebilir. Birinci yöntem, kodlanmış işaretin saydam olması istendiğinden çok kısıtlıdır. Örneğin, yeniden üreticili hat sistemlerinden uzun "sıfır" veya "bir" dizilerini içeren kısıtsız ikili bilgi iletilmelidir. İkinci yöntemde ise, bağlaşma devreleri tarafından işareten çıkartılan alçak-frekans bileşenleri yineleyicilerdeki yerel üreteçler ile yeniden yerine konmalıdır.

2. Kodlanmış işaret, yineleyicilerde zamanlama bilgisi çıkarılabilmesi için yeterli zamanlama bileşenine sahip olmalıdır. Bu yöntem genel olarak hat işaretine eklenen dış zamanlayıcıya veya bir zamanlama elemanına yeğlenir.

3. Kodlanmış işaret, işletim anında gözlenebilen hata yeteneğine sahip olmalıdır. Başka bir deyişle, sistem işleyişi boyunca hataları belirleyebilmeyi ve gözleyebilmeyi sağlayan özellikler eklenebilmelidir.

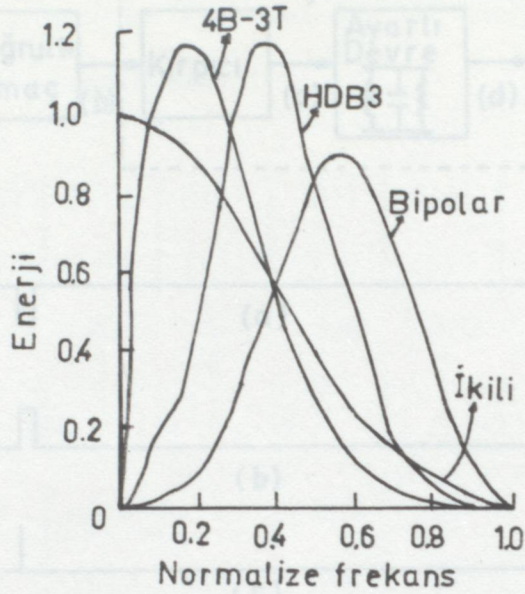
4. Eğer hat kodu tarafından üretilen kodlanmış işaret bir darbeden daha fazla bloklar içeriyorsa, doğru bilgi alınabilmesi için kelime eşzamanlaması sağlanmalıdır. Genelde, eşzamanlamanın kolay ve etkili olarak yürütülebilmesi için kısa kelimeli kodlar yeğlenir.

5. Çok-düzeyle işaretlerin ikili bilgi hızına göre hat veya simge hızını düşürücü olduğu düşünülür. Bu, kablo zayıflaması yaklaşık olarak hat frekansının kare köküne orantılı olduğundan istenebilir. Ayrıca, çift-simetrik kablolarda hatların karışması frekans ile artar. Böylece hat hızındaki azalma avantajdır.

6. Kodlanmış işaret herhangi bir ikili giriş verisi için sık sık tepe gerilim gezintilerine sahip olmalıdır. Bunlar sırasıyla yineleyicilerde otomatik kazanç kontrol ("AGC") devrelerini kontrol etmek için işaret düzey bilgisi sağlarlar.

7. Kod pratik tasarım için yeterli derecede basit olmalıdır.

Yukardaki özellikleri incelediğimiz zaman, görülüyor ki birinci özellik simgelerarası girişim ("ISI") ile ilgilidir. Seçilen hat kodu ideal olarak alçak-frekanslarda ihmal edilebilir enerjiye sahip olmalıdır. Yoksa, giderici devre için çok fazla elemana gerek duyulur. Şekil 2.4 de çeşitli kodların enerji spektrumları verilmiştir[3]. Görülüyor ki en kötü olanı ikili işaretin spektrumudur. İkinci özellik ise zamanlama bilgisi

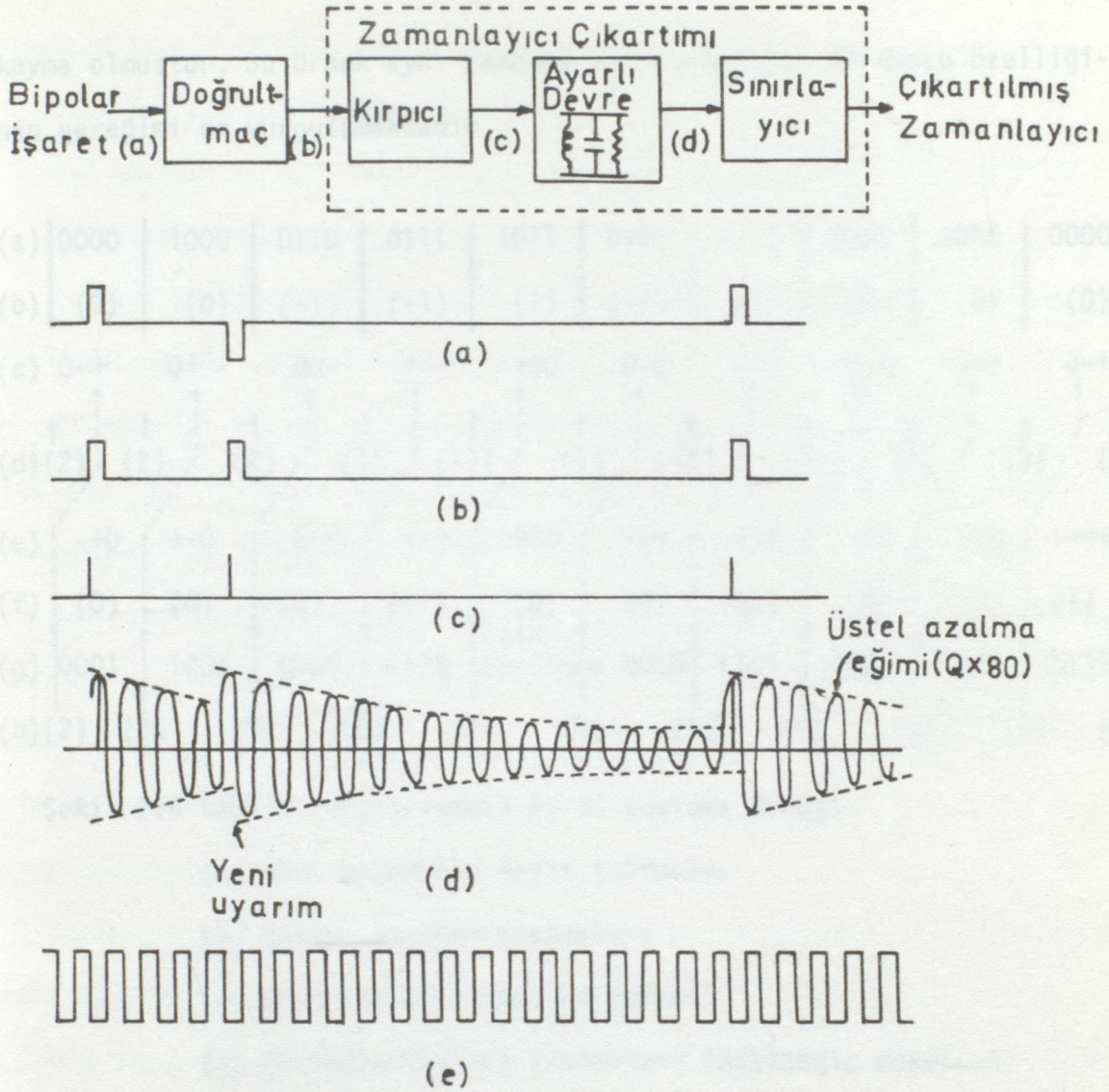


Şekil 2.4 Genel olarak kullanılan iletim kodlarının enerji spektrumları.

çıkartılması ile ilgilidir. Kodlanmış işaretin yeterli zamanlama bileşenine sahip olması istenir. Bunun nedenini anlamak için önce zamanlama bilgisi kavramını inceleyelim.

Kodlanmış hat işaretinin tepe enerjisine ayarlanmış bir rezonans tank devresi kullanılır. Hat işareti, ilk olarak tekyönlü işaretler üretilmesi için doğrultulmalıdır. Tekyönlü işaretler tank devresini uyarmak için düzenlenmiştir. Tank devresi, üstel olarak azalan genlikte, yeni bir uyarı işareti gelinceye kadar salınım yapar. Bu işlemin adımları Şekil 2.5 de örneklenmiştir [4]. Şekilden de anlaşıldığı gibi uyarım işaretleri arasındaki uzaklık çok uzun olmamalıdır.

Bu ölçüt, bipolar kod tarafından sağlanmamaktadır. Çünkü bipolar kodda sıfırın ard arda gelmesinde herhangi bir kısıtlama yoktur. Bu nedenle bipolar kod yeterli zamanlama bileşenine sahip değildir. Böylece alçak DC salınımlarına, yeterli zamanlama bileşenlerine sahip PST koda gereksinim

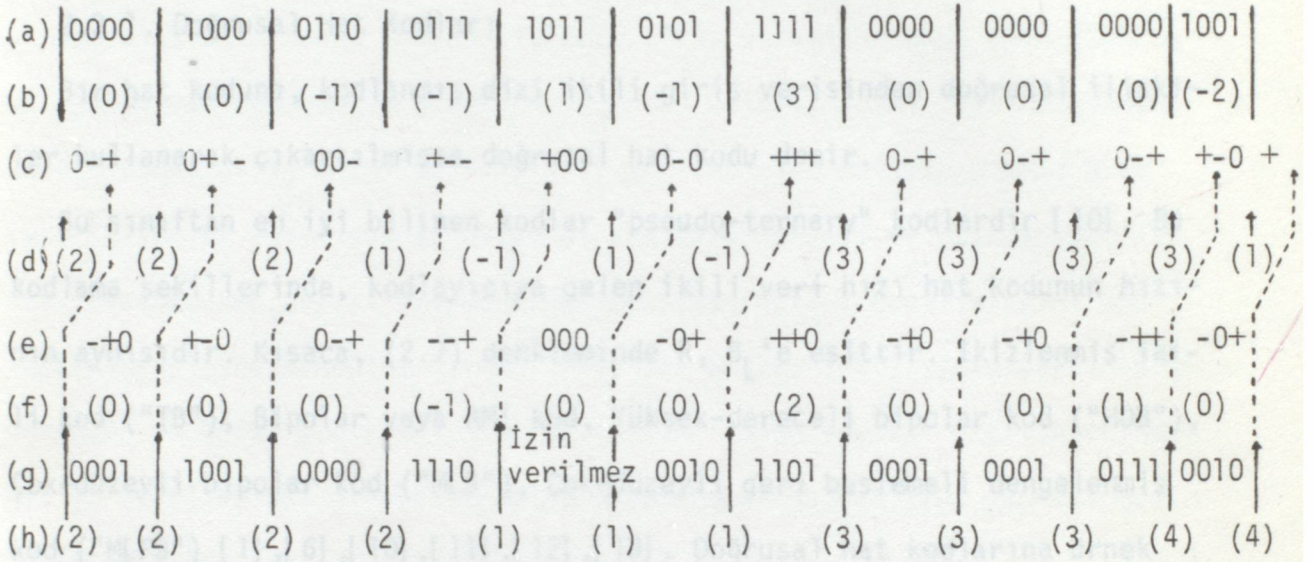


Şekil 2.5 zamanlama bilgisi çıkartılması ve devre çalışması.

duyulur. PST kodda ikiden fazla sıfır ard arda gelemez. Çünkü birden fazla mod vardır ve modlar gereksinimleri karşılayacak biçimde tasarlanmıştır.

Üçüncü özellik, işletim sırasında hatayı saptamayı amaçlar. Başka bir deyişle, kodlama kurallarındaki bozulmalar işletim sırasında gözlenebilir. Şekil 2.6 daki örnekte görüldüğü gibi 4B-3T kodlamasında "000" kod kelimesine izin verilmemiştir. Kod çözülürken "000" kod kelimesine rastlandığı için kodlamada hata olduğu anlaşılır. Gerçekte de çerçevede

kayma olmuştur. Bu örnek aynı zamanda hat kodlarının dördüncü özelliğinin gereğini de vurgulamaktadır.



Şekil 2.6 Yanlış çerçevelenmiş 4B-3T kodlama örneği.

(a) Dört uzunluklu ikili kelimeler

(b) Kelime sayısal toplamaları

(c) Üçlü kodlanmış kod kelimeleri

(d) Birikmiş sayısal toplamaları (Başlangıç koşulu=2)

(e) Yanlış çerçevelenmiş üçlü kod kelimeleri

(f) Yanlış çerçevelenmiş kelime sayısal toplamaları

(g) Yeniden çerçevelenmiş ikili kelimeler

(h) Yanlış çerçevelenmiş birikmiş sayısal toplamaları.

Diğer özellikler ise ilk üç özelliği destekleyici unsurlardır. Sayısal iletimde, ikili diziler iletilmeden önce hat koduyla kodlanmalı ve daha sonra iletilmelidir. Böylece hat kodlarının sağladığı kolaylıklardan yararlanılmış olur. Fakat ilk özellikte anlatılan simgelerarası girişim hiçbir zaman tümüyle önlenemez, ancak minimum yapılabilir. Böylece hat kodlarının tüm özelliklerinden olabildiğince yararlanılmış olacaktır. Bu

nokta dördüncü bölümde ele alınacaktır.

2.3. Hat Kodlarının Sınıflandırılması

Hat kodları genel olarak şekil 2.7 de görüldüğü gibi ikiye ayrılır.

2.3.1. Doğrusal Hat Kodları

Bir hat koduna, kodlanmış dizi ikili giriş verisinden doğrusal ilişkiler kullanarak çıkartılmışsa doğrusal hat kodu denir.

Bu sınıftan en iyi bilinen kodlar "pseudo-ternary" kodlardır [10]. Bu kodlama şekillerinde, kodlayıcıya gelen ikili veri hızı hat kodunun hızının aynısıdır. Kısaca, (2.7) denkleminde R , B_L 'e eşittir. İkizlenmiş ikili kod ("TB"), Bipolar veya AMI kod, Yüksek-dereceli bipolar kod ("HOB"), Çok-düzeyleli bipolar kod ("MLB"), Çok-düzeyleli geri beslemeli dengelenmiş kod ("MLFB") [1], [6], [10], [11], [12], [13]. Doğrusal hat kodlarına örnek olarak verilebilir.

2.3.2. Doğrusal Olmayan Hat Kodları

Kodlanmış dizi tamamen ikili giriş verisinden doğrusal ilişkilerle çıkartılamazsa bu koda, doğrusal olmayan hat kodu adı verilir.

Doğrusal olmayan hat kodları alfabetik ve alfabetik olmayan olmak üzere iki sınıfa ayrılır.

1-) Alfabetik Hat Kodları

Alfabetik hat kodu, xK -düzeyleli blokların yL -düzeyleli bloklara dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Bu gösterim biçimi her zaman uymamasına karşın bazı kodlar xK - yL kod olarak gösterilir. Dönüşüm için aşağıdaki ilişki sağlanmalıdır:

$$K^x \leq L^y \text{ veya}$$

$$x \leq y \log_K L \quad (2.17)$$

ve hat oranı veya simge hızının giriş hızına oranı:

$$\frac{B_L}{R} = \frac{y}{x} \quad (2.18)$$

olmalıdır.

Çoğu durumlarda, giriş verisi ikili sayıdır, örneğin $K=2$, ve (2.17) eşitliği :

$$x \leq y \log_2 L \quad (2.19)$$

Bir alfabetik kodun kodlama işlemi, giriş verisinin ayrı ayrı blok veya kelimelere dönüşümüne gerek duyduğundan dolayı, sanki iletim boyunca hata olmamış gibi, bilgi doğru olarak yeniden elde edilmeden önce blok veya kelimeler alıcı ucunda uygun olarak düzenlenmeli ve eşzamanlanmalıdır. Eşzamanlama normal olarak kodun çeşitli yapısal özelliklerini gözleyerek yapılır. Örneğin, birikmiş sayısal toplam (BST), izin verilebilir örnekler ve durum geçişleri gibi özellikler kodun yapısal özelliklerinden dir ve önerilen tüm alfabetik kodlarda eşzamanlama, bu gibi yapısal özelliklerden yararlanılarak yapılır.

Alfabetik hat kodları da, hız artışı alfabetik hat kodları ve hız artışı alfabetik hat kodları olmak üzere ikiye ayrılır.

a-) Hız Artışı Alfabetik Hat Kodları

Giriş ikili veri uzunluğunun hat üzerinden iletilecek çok-düzeyle bilgi uzunluğundan küçük veya eşit olması durumudur.

"Paired-Selected Ternary" (PST), "Modified" PST (MPST) hat kodları bu sınıf kodlardandır [14].

b-) Hız Artışlı Alfabetik Hat Kodları

Bu sınıf kodlarda ise, iletilecek çok-düzeyle bilgi uzunluğu yani kodlanmış kelime uzunluğu giriş ikili veri uzunluğundan küçüktür.

Bu sınıf kodların sayısını sınırlamak olanaksızdır. Hat işaretinde gerek duyulan düzey sayısı, L , için (2.19) eşitliğini sağlamak ve anaband iletim gereksinmelerini yerine getirmek için yeterli fazlalığa izin vermek koşuluyla yeni bir kod tasarlanabilir. Dördüncü bölümde, bu koşullara bağlı kalınarak çeşitli uzunluklarda alfabetik hat kodlarının tasarlanması

anlatılacaktır. Hız artışı alfabetik hat kodlarını da pratikte kullanılabilirliği bakımından üçlü (üç-düzeyle) ve çok-düzeyle hat kodları olmak üzere ikiye ayrılabilir. Şimdiye kadar önerilen alfabetik hat kodları:

(a) Üçlü Alfabetik Hat Kodları :

4B-3T [1], [4] ; MS43 [1], [2], [3], [9] ; FOMOT [1], MMS43 [4] .

(b) Çok-düzeyle Alfabetik Hat Kodları :

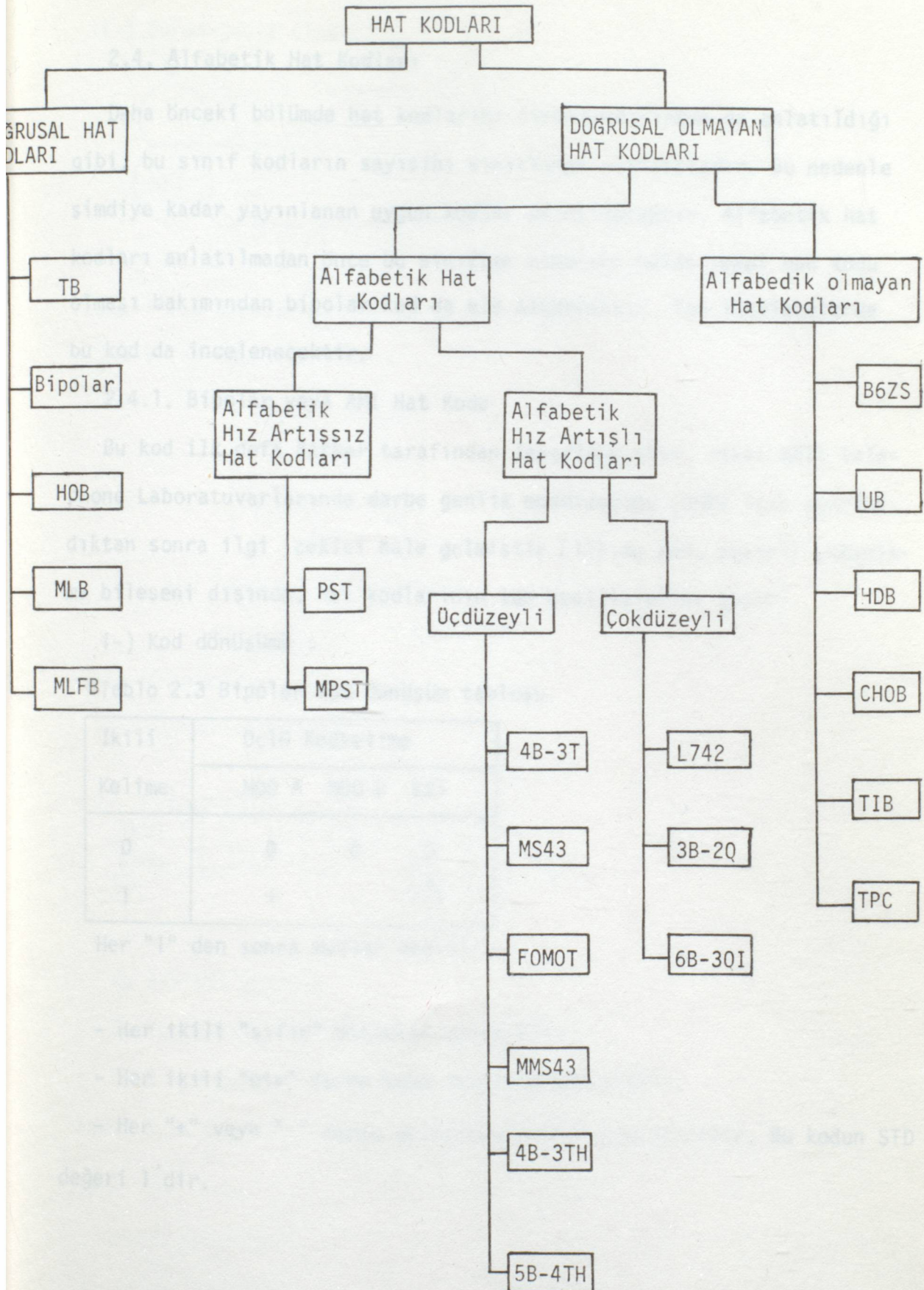
L742 [1], VL43 [2], 3B-2Q [1], 6B-3QI [1] .

Alfabetik hat kodları, bölüm sonunda daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2-) Alfabetik Olmayan Hat Kodları

Bu kodlar genel olarak temel bipolar (ikiyönlü) kodlama mantığından çıkarılır. Bipolar kodda sıfır ikili verisi değiştirilmeden iletilir. Bu, uzun ardışıl sıfırlardan yeniden üreticilerden zamanlama bilgisi çıkarılamadığı için istenmedik durumdur. Uygulamada, tasarlanan yeniden üreticilerin sadece onüç ardışıl sıfırları yanıtlayabileceğinden giriş bilgisine bazı kısıtlamalar konmalıdır. Fakat giriş verisi kısıtlanmamalıdır, bu nedenle uzun sıfırlar dizisinin çıkartılması gerekir. Daha öncede anlatıldığı gibi, bir yaklaşım PST veya MPST kod kullanılmasıydı. Diğer yöntem ise bazı sıfır olmayan seçilmiş örnekleri, belirli uzunluklu ardışıl sıfırlar dizisi yerine koymaya dayanır. Örneğin, boşluklar "0" ile gösterilir. Bipolar kuralına göre üretilmiş pozitif veya negatif darbeler "B" darbeleri olarak isimlendirilir. Orjinal dizilere sokulmuş veya tersine döndürülmüş darbeler yani bipolar kuralına aykırı darbeler "V" darbeleri olarak gösterilir. Başka bir deyişle, "V" darbesi kendisinden önceki darbe ile aynı yönlüdür. Darbeleri tanımayı kolaylaştırması açısından yukardaki harflerle gösterim avantajlıdır.

B6ZS kodu, Bir biçimli bipolar kodu ("UB"), Yüksek-yoğunluklu bipolar ve Karşılaştırılabilir yüksek-yoğunluklu bipolar kodları ("HDB", ve "CHDB"), Açıkça araya sokulmuş bipolar kodu ("TIB"), Zaman kutupsal kontrol kodu ("TPC") alfabetik olmayan hat kodlarına örnektir [1],[6],[11],[15],[16].



Şekil 2.7 Hat kodlarının sınıflandırılması.

2.4. Alfabetik Hat Kodları

Daha önceki bölümde hat kodlarını sınıflandırırken de anlatıldığı gibi, bu sınıf kodların sayısını sınırlamak olanaksızdır. Bu nedenle şimdiye kadar yayınlanan uygun kodlar anlatılacaktır. Alfabetik hat kodları anlatılmadan önce bu sınıftan olmadığı halde temel had kodu olması bakımından bipolar kod da ele alınacaktır. Tüm incelemelerde bu kod da incelenecektir.

2.4.1. Bipolar veya AMI Hat Kodu

Bu kod ilk defa Barker tarafından tasarlanmıştır, fakat Bell Telephone Laboratuvarlarında darbe genlik modülasyonu (DGM) için uyarlandıktan sonra ilgi çekici hale gelmiştir [11]. Bu kod, yeterli zamanlama bileşeni dışında, hat kodlarının tüm özelliklerini taşır.

i-) Kod dönüşümü :

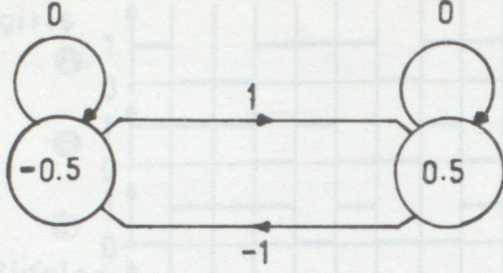
Tablo 2.3 Bipolar kod dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime		
	MOD A	MOD B	KST
0	0	0	0
1	+	-	± 1

Her "1" den sonra modlar değişir.

- Her ikili "sıfır" boşlukla gösterilir.
- Her ikili "bir" darbe veya işaretle gösterilir.
- Her "+" veya "-" darbe gelişinde modlar değiştirilir. Bu kodun STD değeri 1'dir.

ii-) Durum-geçiş çizgesi :



Şekil 2.8 Bipolar kod durum-geçiş çizgesi.

iii-) (a) Geçiş matrisi :

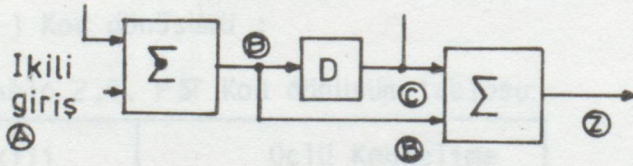
$$\pi = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

$$P(-0.5) = 1/2, P(0.5) = 1/2$$

olarak bulunmuştur.

iv-) Gerçekleştirilmesi :

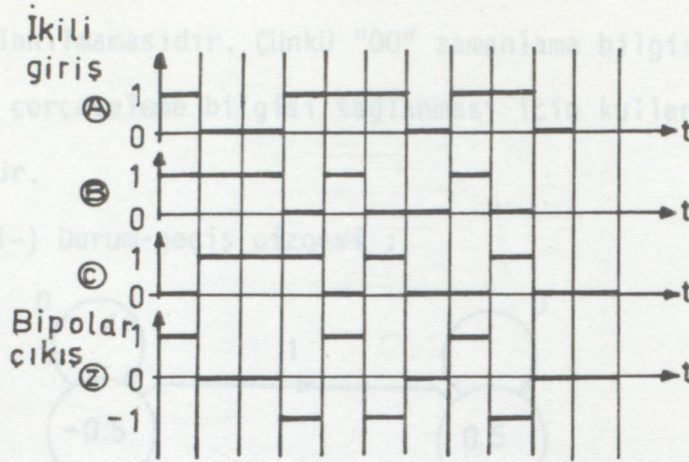


D= Bir bit gecikme

Σ= Toplayıcı

Σ= 2 Modülüne göre toplayıcı

Şekil 2.9. Bipolar kodlayıcı.



Şekil 2.10. Bipolar kodlayıcı ile ilgili dalga şekli.

2.4.2. Hız Artışsız Alfabetik Hat Kodları

1-) PST Hat Kodu

DC salınımı ve hata gözlenebilmesi problemleri bipolar hat kodu kullanılarak giderilmişti. Fakat zamanlama problemi aynı kalmıştır. Çünkü bipolar kodlamada, sıfır giriş verisi değiştirilmeden iletiliyordu. Bu amaçla PST kod verilmiştir.

i-) Kod dönüşümü :

Tablo 2.4. PST Kod dönüşüm tablosu

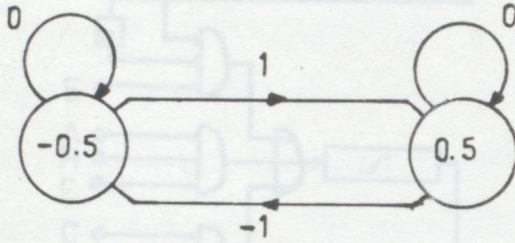
İkili Kelime	Üçlü Kodkelime		
	MOD A	MOD B	KST
0 0	- +	- +	0
0 1	0 +	0 -	+1
1 0	+ 0	- 0	-1
1 1	+ -	+ -	0

Her "01" veya "10" dan sonra modlar değişir.

Tabloda görüldüğü gibi PST kodda iki alfabe vardır. Eşit olasılıklı giriş ikili dizisinde, her "01" veya "10" saptanmasında alfabeler değiştirilir. Dikkat edilecek bir konu da, üçlü kodkelimelerinde "++,-,- ve 00"

kullanılmamasıdır. Çünkü "00" zamanlama bilgisi çıkarılabilmesi; "++ ve--" ise çerçeveleme bilgisi sağlanması için kullanılmamıştır. Bu kodun STD'si 3'dür.

ii-) Durum-geçiş çizgesi :



Şekil 2.11. PST hat kodu durum geçiş çizgesi..

iii-) (a) Geçiş matrisi :

$$\pi = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

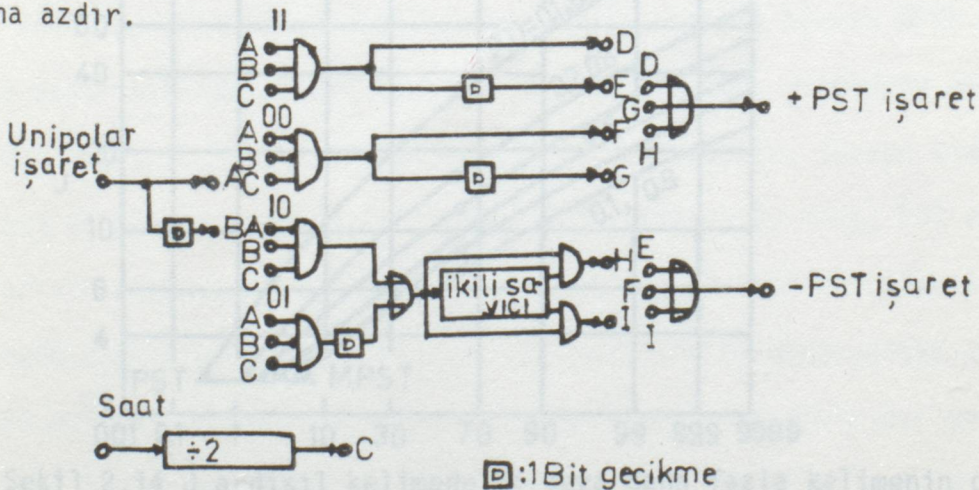
(b) Terminal olasılıkları :

$$P(-0.5) = 1/2, \quad P(0.5) = 1/2$$

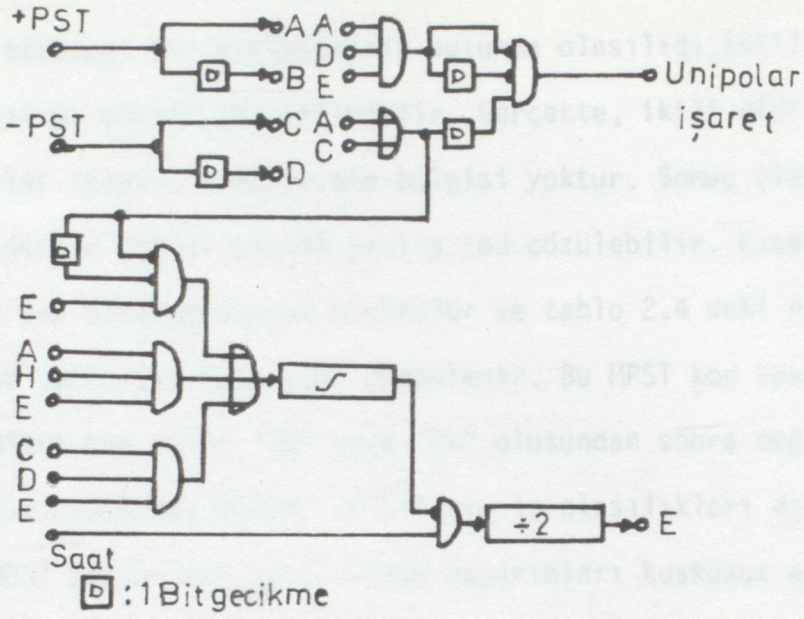
olarak bulunmuştur.

iv-) Gerçekleştirilmesi:

PST'yi gerçekleştirmek için gerek duyulan devreler 4B-3T ve MS43'den daha azdır.



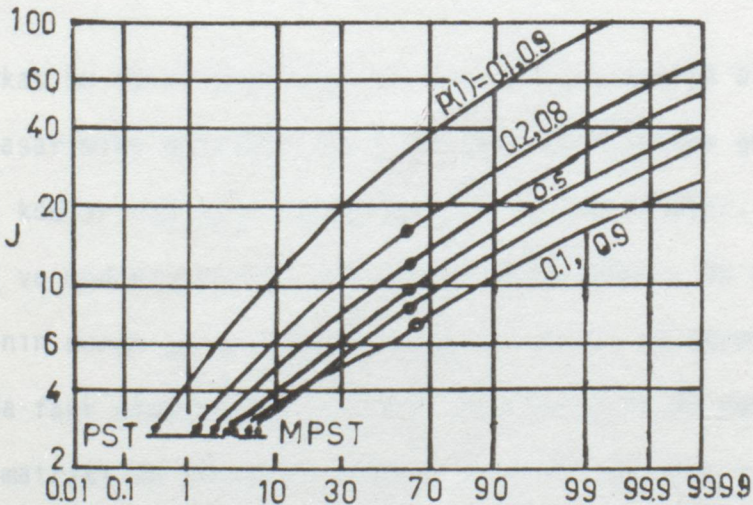
Şekil 2.12. PST Kodlayıcı.



Şekil 2.13. PST kodçözücü.

2-) MPST Hat Kodu

PST kodu incelerken giriş ikili verisindeki sıfır ve birlerin olasılıkları birbirlerine eşit olduğu varsayılmıştır ($P(0)=P(1)=1/2$). Fakat bu eşitlikten uzaklaşırsa, çerçeve dışındaki kelimeleri gösteren olasılık daha küçük olur. Bu olgu Şekil 2.14 de gösterilmiştir.



Şekil 2.14 J ardışıl kelimede üç veya daha fazla kelimenin çerçeve dışında bulunma olasılığı.

Burada J ardışıl kelimede üç veya daha fazla uygun olmayan kelimelerin herhangi bir birleşiminin bulunma olasılığı, ikili dizide birlerin olasılığı olarak gösterilmiştir. Gerçekte, ikili dizi sadece birler ve sıfırlar içerir, çerçeveleme bilgisi yoktur. Sonuç olarak birler dizisi, sıfırlar dizisi olarak yanlış kod çözülebilir. Kısaca çerçeveleme başarımı bir problem olarak düşünülür ve tablo 2.4 deki PST kod dönüşümü tekrar tablo 2.5 deki gibi düzenlenir. Bu MPST kod tasarımı, kodlama modları her ikili "00" veya "11" oluşundan sonra değiştirilir. İkili giriş dizisindeki birler ve sıfırların olasılıkları eşit olduğu zaman PST ve MPST kodlarının çerçeveleme başarımları kuşkusuz aynıdır.

Tablo 2.5 MPST kod dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime		
	MOD A	MOD B	KST
0 0	0 +	- 0	± 1
0 1	- +	- +	0
1 0	+ -	+ -	0
1 1	+ 0	0 -	± 1

Her "00" veya "11" den sonra modlar değişir.

Fakat bu eşitlikten uzaklaşılma, PST'ye karşıt olarak MPST çerçeveleme başarımını düzeltir. Kod dönüşüm tablolarında görüldüğü gibi, PST ve MPST kodlarında aynı kodkelimleri kullanılmıştır. Sadece kodkelime yerleri ve mod değiştiren ikili dizi değişmiştir. Bu olay, PST ve MPST kodlarının durum-geçiş çizgesi, geçiş matrisi ve terminal olasılıkları arasında fark oluşturmaz. Kısaca MPST kod için de durum-geçiş çizgesi, geçiş matrisi ve terminal olasılıkları PST kodunun aynısıdır denebilir. Bu sınıf kodlardan, N bit ikili kelimeler için N-uzunluklu üçlü kodkelimler seçilerek NST kodları üretilebilir.

2.4.3. Hız Artışlı Alfabetik Hat Kodları

a-) Üç-düzeyli Hat Kodları

1-) 4B-3T Hat Kodları

Bu kodda dört uzunluklu ikili giriş dizileri üç uzunluklu üçlü kodkelimelerine tablo 2.6 da görüldüğü gibi dönüştürülmüştür.

i-) Kod dönüşümü :

Tablo 2.6 4B-3T Hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime		
	MOD A	MOD B	KST
0000	+0-	+0-	0
0001	-+0	-+0	0
0010	0-+	0-+	0
0011	+ -0	+ -0	0
0100	++0	--0	± 2
0101	0++	0--	± 2
0110	+0+	-0-	± 2
0111	+++	---	± 3
1000	++-	--+	± 1
1001	-++	+--	± 1
1010	+ -+	-+-	± 1
1011	+00	-00	± 1
1100	0+0	0-0	± 1
1101	00+	00-	± 1
1110	0+-	0+-	0
1111	-0+	-0+	0

MOD A: BST = - 2.5, -1.5, -0.5

MOD B: BST = 2.5, 1.5, 0.5

Tablodan da görüldüğü gibi her modda altı ikili kelime sıfır kelime sayısal toplamalı kodkelimelerine dönüştürülmüş, geri kalan on kelime ise kelime sayısal toplamaları ± 1 , ± 2 ve ± 3 olacak şekilde kodkelimelerine

dağılmışlardır. Birikmiş sayısal toplam değerini küçük tutabilmek için iki mod kullanılmıştır. Mod A, BST'nin -2.5, -1.5, -0.5 değerlerinden birine eşit olduğunda, mod B ise BST'nin 2.5, 1.5, 0.5 değerlerinden birine eşit olduğunda kullanılır. Mod değiştirme, alınan dizide gözlemlenen hata ve eşzamanlama sağlayabilir. Tabloya bakıldığında ilgi çeken diğer bir durum üç simgesi de sıfır olan kodkelimelerinin kullanılmamış olmasıdır. Bunun nedeni daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi, zamanlama bilgisini çıkarılmasını sağlamak içindir.

Diğer bir 4B-3T kod da önerilmiş bulunmaktadır. Bu kod dönüşümü tablo 2.6'ya benzer, fakat mod değiştirilmesi önceki üçlü kelimenin sayısal toplamıyla sağlanır. Eğer sayısal toplam sıfır değilse, mod değiştirilir. Aksi halde değiştirilmez. Bu kod "Almaşık Mod 4B-3T kod" olarak bilinir.

Tablo 2.6'daki dönüşüm tablolı kod "Sıfır Ortalama Sayısal Toplamlı 4B-3T Kod" olarak da adlandırılır. EK-1'e baktığımız zaman, deneysel DG modülasyonlu sistemlerde pratik uygulamaları gösterebilmek için "4B-3T" şeklinde kısaltmak gerekmektedir. Almaşık mod 4B-3T kodun STD'si sonsuz ve sıfır ortalamalı sayısal toplamı 4B-3T kod yani 4B-3T kodun STD'si ise 7'dir. 4B-3T kod ikili dizi hızının 1/4'ü kadar fazla frekansda ve yeniden zamanlama bilgisi üretilmesi açısından çekicidir.

ii-) Durum-geçiş çizgesi :

4B-3T Hat kodunun durum-geçiş çizgesi şekil 2.15'de gösterilmiştir.

$$P_0(-2.5) = 3.33333E-02$$

$$P_0(-1.5) = 0.133333333$$

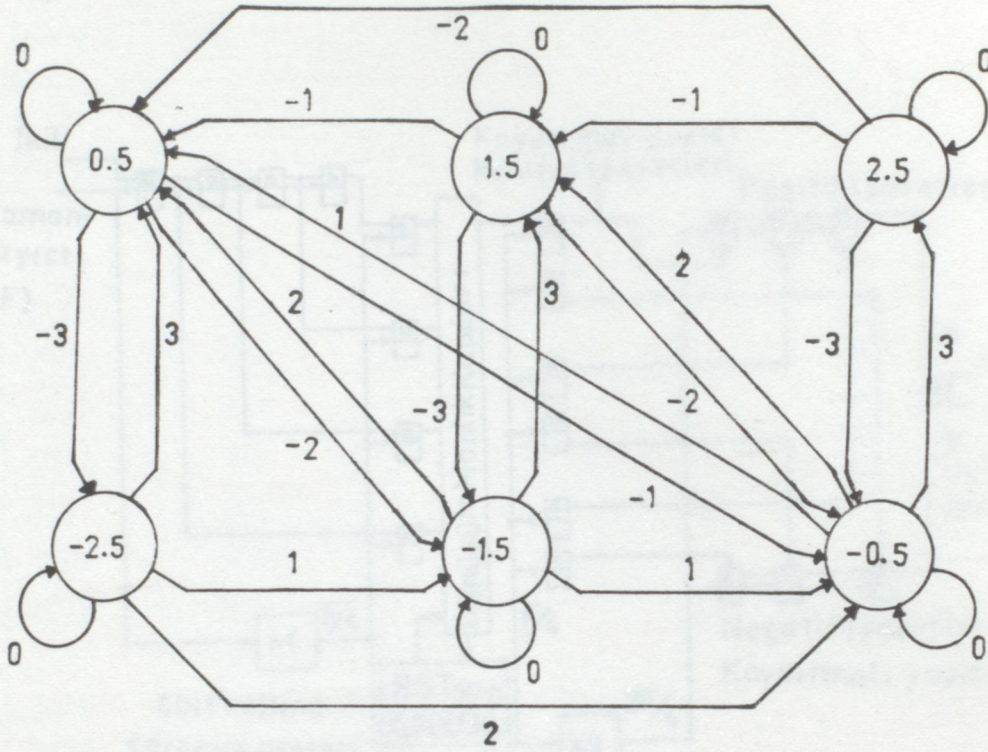
$$P_0(-0.5) = 0.333333333$$

$$P_0(0.5) = 0.333333333$$

$$P_0(1.5) = 0.133333333$$

$$P_0(2.5) = 3.33333E-02$$

olarak bulunmuştur.



Şekil 2.15 4B-3T Kod durum-geçiş çizgesi.

iii-) (a) Geçiş matrisi :

$$\pi = 2^{-4} \cdot \begin{pmatrix} 6 & 6 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 6 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 6 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 6 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 6 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

$$P_0(-2.5) = 3.33333E-02$$

$$P_0(-1.5) = 0.133333333$$

$$P_0(-0.5) = 0.333333333$$

$$P_0(0.5) = 0.333333333$$

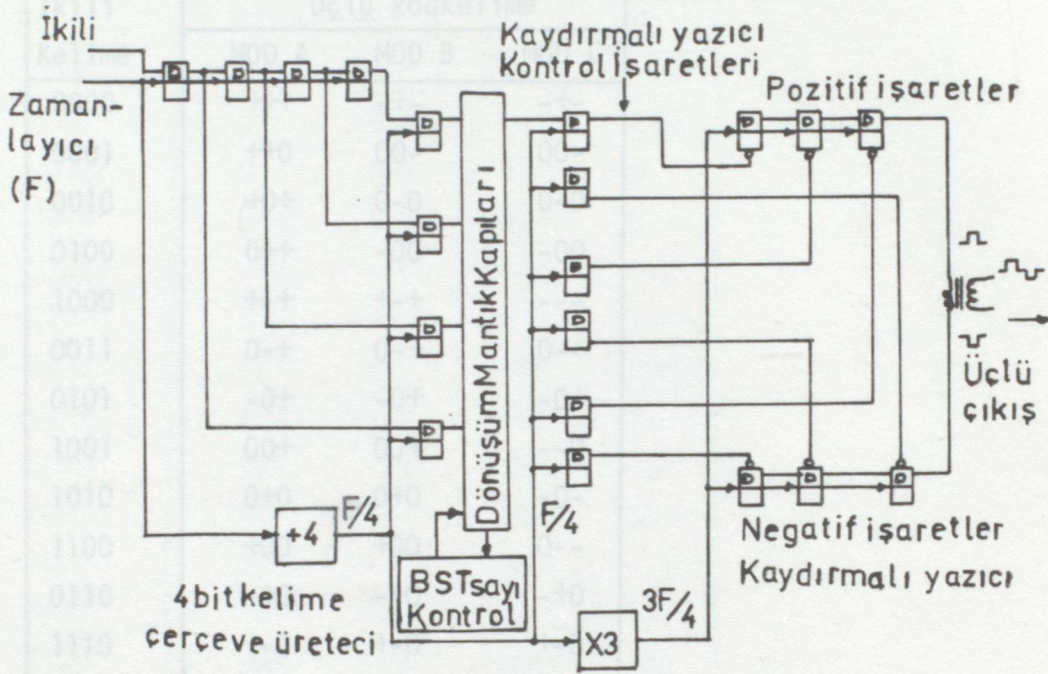
$$P_0(1.5) = 0.133333333$$

$$P_0(2.5) = 3.33333E-02$$

olarak bulunmuştur.

iv-) Gerçekleştirilmesi :

Tablo 2.7 MS43 Hat kodu dönüşüm tablosu.



Şekil 2.16 4B-3T Kodlayıcı gerçekleştirilmesi.

2-) MS43 Hat Kodları

MS43 kod Franazek [2] tarafından önerilmiştir. Bu kodda da 4B-3T kodda olduğu gibi dört uzunluklu ikili kelimeler, üç uzunluklu üçlü kod-kelimelerine dönüştürülmüştür. Yalnız MS43'de üç mod seçilmiştir. MS43 üçlü kelimeleri, $BST = -1.5$, $BST = -0.5$, 0.5 ve $BST = 1.5$ oluşuna göre üç alfabeye gruplanmıştır. 4B-3T kodda STD'nin 7 olmasına karşın MS43 kodda STD değeri 5'dir. Başka bir deyişle MS43 işaret bağlama bozulması 4B-3T den azdır.

İşaret kontrol ederek yürütülür. MS43 kodun modları fazılastırılarak daha iyi çerçevelene bilmesi sağlayan FOMOT ("Four Node Ternary") kod önerilmiştir. Bu kodda MS43'deki üç modun yerine dört mod vardır ve STD yine beşe eşittir. Tablo 2.8'de FOMOT kod dönüşüm tablosu sunulmuştur.

i-) Kod dönüşümü :

Tablo 2.7 MS43 Hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü kodkelime		
	MOD A	MOD B	MOD C
0000	+++	-+-	-+-
0001	++0	00-	00-
0010	+0+	0-0	0-0
0100	0++	-00	-00
1000	+--+	+--+	---
0011	0-+	0-+	0-+
0101	-0+	-0+	-0+
1001	00+	00+	--0
1010	0+0	0+0	-0-
1100	+00	+00	0--
0110	-+0	-+0	-+0
1110	+ -0	+ -0	+ -0
1101	+0-	+0-	+0-
1011	0+-	0+-	0+-
0111	-++	-++	--+
1111	++-	+-	+-

Mod A : $BST = -1.5$

Mod B : $BST = -0.5, 0.5$

Mod C : $BST = 1.5$

FOMOT kodu kodkelimleri iyi seçilmediği için hata olasılığı MS43 Alıcıda üçlü mesajların çerçeveleme ve hata gözlenmesi, dizi durumlarını izleyerek veya izin verilen kodkelimelerinde uygunsuz dizinin varlığını kontrol ederek yürütülür. MS43 kodun modları fazlalaştırılarak daha iyi çerçeveleme bilgisi sağlayan FOMOT ("Four Mode Ternary") kod önerilmiştir. Bu kodda MS43 deki üç modun yerine dört mod vardır ve STD yine beşe eşittir. Tablo 2.8'de FOMOT kod dönüşüm tablosu sunulmuştur.

A. $BST = -0.5$ ise mod B, $BST = 0.5$ ise mod C ve $BST = 1.5$ ise mod D kullanılır.

Tablo 2.8 FOMOT hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime			
	MOD A	MOD B	MOD C	MOD D
0000	+-+	+-+	+-+	---
0001	0+-	0+-	0+-	0+-
0010	0-+	0-+	0-+	0-+
0011	0++	0++	0--	0--
0100	-+0	-+0	-+0	-+0
0101	0+0	+--	0+0	+--
0110	-++	0-0	-++	0-0
0111	+ -0	+ -0	+ -0	+ -0
1000	-0+	-0+	-0+	-0+
1001	++-	00-	++-	00-
1010	00+	--+	00+	--+
1011	+0-	+0-	+0-	+0-
1100	+00	-00	+00	-00
1101	++0	++0	-0-	-0-
1110	+0+	+0+	--0	--0
1111	+++	-+-	-+-	-+-

Mod A : $BST = -1.5$ Mod B : $BST = -0.5$ Mod C : $BST = 0.5$ Mod D : $BST = 1.5$

FOMOT kodda kodkelimleri iyi seçilmediği için hata olasılığı MS43 den iyi değildir. Bu nedenle Albertazzi, Bequetti ve Bellato tarafından daha iyi kodkelimleri seçildiği için hata olasılığı az olan MMS43 (Genişletilmiş MS43) kod önerilmiştir. Bu kod birçok sayısal iletim sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu kodun dönüşüm tablosu tablo 2.9'da verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, MMS43 kodu da dört moda sahiptir ve bu modların kullanılışı aynı FOMOT koddaki gibidir. Yani $BST = -1.5$ ise mod A, $BST = -0.5$ ise mod B, $BST = 0.5$ ise mod C ve $BST = 1.5$ ise mod D kullanılır.

Bu da çerçeveleme bilgisi sağlar, eğer kodkelimleri zararsız seçilirse hata olasılığı MMS43'de olduğu gibi azaltılır.

Tablo 2.9 MMS43 Hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelimesi				
	MOD A	MOD B	MOD C	MOD D	KST
0011	0-+	0-+	0-+	0-+	0
0101	-0+	-0+	-0+	-0+	0
0110	-+0	-+0	-+0	-+0	0
1110	+ -0	+ -0	+ -0	+ -0	0
1101	+0-	+0-	+0-	+0-	0
1011	0+-	0+-	0+-	0+-	0
1000	+ -+	+ -+	+ -+	---	1,1,1,-3
1001	00+	00+	00+	--0	1,1,1,-2
1010	0+0	0+0	0+0	-0-	1,1,1,-2
1100	+00	+00	+00	0--	1,1,1,-2
0111	-++	-++	--+	--+	1,1,-1,-1
1111	++-	++-	+--	+--	1,1,-1,-1
0001	++0	00-	00-	00-	2,-1,-1,-1
0010	+0+	0-0	0-0	0-0	2,-1,-1,-1
0100	0++	-00	-00	-00	2,-1,-1,-1
0000	+++	-+-	-+-	-+-	3,-1,-1,-1

Mod A : $BST = -1.5$

Mod B : $BST = -0.5$

Mod C : $BST = 0.5$

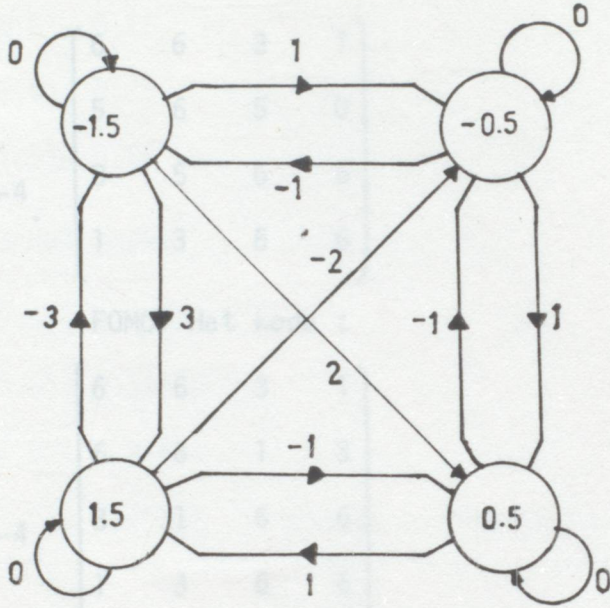
Mod D : $BST = 1.5$

ii-) Durum-geçiş çizgeleri :

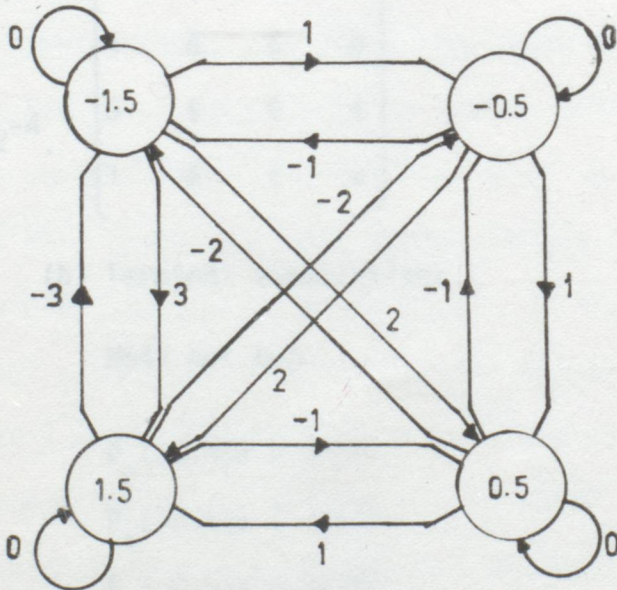
Aşağıda sırasıyla MS43, FOMOT ve MMS43 hat kodlarının durum-geçiş çizgeleri verilmiştir. MS43 ve MMS43 hat kodlarının durum-geçiş çizgeleri şekil olarak aynıdır. Diğer bir deyişle, işleyiş şekli aynıdır. Fakat durum-geçiş, terminal gibi olasılıkları değişiktir.

111-) (a) Geçiş matrisleri

MS43 Hat kodu



(a)



(b)

Şekil 2.17 (a) MS43 ve MMS43 Hat kodu,

(b) FOMOT Hat kodu durum-geçiş çizgeleri.

iii-) (a) Geçiş matrisleri :

$P_0(-1.5) =$ MS43 Hat kodu :

$$\pi = 2^{-4} \cdot \begin{pmatrix} 6 & 6 & 3 & 1 \\ 5 & 6 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 5 \\ 1 & 3 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

$P_0(-1.5) =$ FOMOT Hat kodu :

$$\pi = 2^{-4} \cdot \begin{pmatrix} 6 & 6 & 3 & 1 \\ 6 & 6 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 6 & 6 \\ 1 & 3 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

$P_0(-1.5) =$ MMS43 Hat kodu :

$$\pi = 2^{-4} \cdot \begin{pmatrix} 6 & 6 & 3 & 1 \\ 4 & 6 & 6 & 0 \\ 0 & 6 & 6 & 4 \\ 1 & 3 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

MS43 Hat kodu :

$$P_0(-1.5) = 0.17857$$

$$P_0(-0.5) = 0.32142$$

$$P_0(0.5) = 0.32142$$

$$P_0(1.5) = 0.17857$$

FOMOT Hat kodu :

$$P_0(-1.5) = 0.25$$

$$P_0(-0.5) = 0.25$$

$$P_0(0.5) = 0.25$$

$$P_0(1.5) = 0.25$$

MMS43 Hat kodu:

$$P_0(-1.5) = 0.15384$$

$$P_0(-0.5) = 0.34615$$

$$P_0(0.5) = 0.34615$$

$$P_0(1.5) = 0.15384 \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

3-) 10B-7T Hat Kodları

Daha önce de incelendiği gibi sayısal iletimde fazlalık, darbe hızı artırılarak veya darbe düzeyleri sayısı büyütülerek artırılır. Böylece hat bozulması azalır. Hat kodlarında düzey sayısı artırılması uygulanmıştır. Kod için sadece fazlalık kavramı yeterli değildir. Kodun aynı zamanda verimli olması da beklenir. 4B-3T ve MS43 kodların verimi % 84.12'dir. Bu nedenle daha yüksek verimli (% 90.13) olan 10B-7T hat kodları [17], [18], [19] önerilmiştir. Bu kodla ilgili birtakım özellikler bilgi olarak verilmiş ve inceleme yapılmayacaktır. 10B-7T kodu, 2 modlu ve 3 modlu olmak üzere iki ayrı tipte bulunur. 10B-7T kodları yeterli zamanlama bilgisine de sahiptir. 4B-3T (veya MS43) ile aynı simgelerarası girişime sahip ve daha iyi karakter sıralanması ("Alignment") başarımı [20] beklenir.

i-) Kod dönüşümü :

Tablo 2.10 (a) 10B-7T/2M

(b) 10B-7T/3M Hat kodu dönüşüm tabloları.

Kelime Sayısal Toplamı		3	2	1	0	-1	-2	-3
10B-7T/2M	M1	159	259	329	277	0	0	0
	M2	0	0	0	277	329	259	159

Mod M1 : $BST = 0, -1, -2$

Mod M2 : $BST = 1, 2, 3$

(a)

Kelime Sayısal Toplamı		3	2	1	0	-1	-2	-3
10B-7T/3M	M1	159	236	325	304	0	0	0
	M2	0	0	325	374	325	0	0
	M3	0	0	0	304	325	236	159

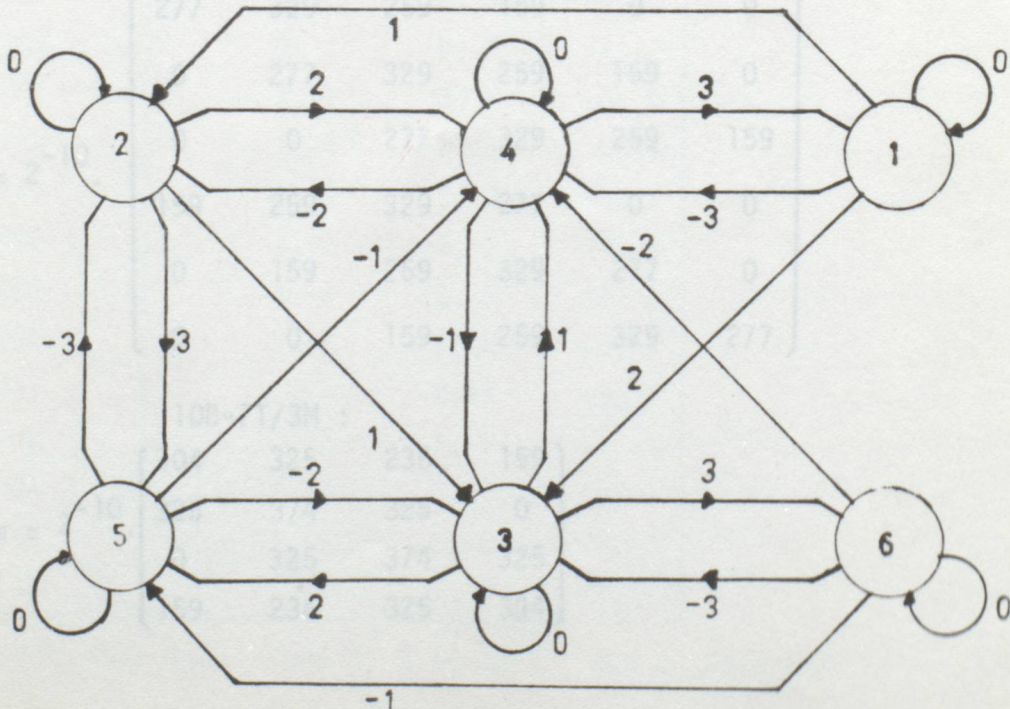
Mod M1 : $BST = -1$

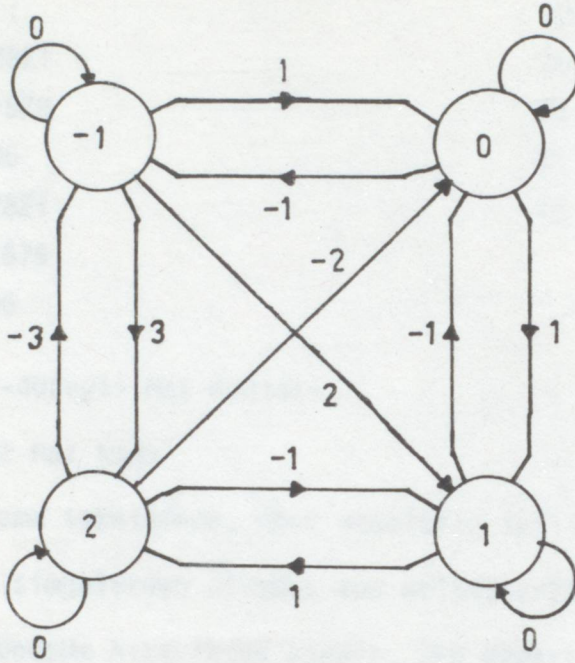
Mod M2 : $BST = 0, 1$

Mod M3 : $BST = 2$

(b)

ii-) Durum -geçiş çizgeleri :





(b)

Şekil 2.18 (a) 10B-7T/2M

(b) 10B-7T/3M Durum-geçiş çizgeleri.

iii-) (a) Geçiş matrisleri :

10B-7T/2M :

$$\pi = 2^{-10} \cdot \begin{bmatrix} 277 & 329 & 259 & 159 & 0 & 0 \\ 0 & 277 & 329 & 259 & 159 & 0 \\ 0 & 0 & 277 & 329 & 259 & 159 \\ 159 & 259 & 329 & 277 & 0 & 0 \\ 0 & 159 & 259 & 329 & 277 & 0 \\ 0 & 0 & 159 & 259 & 329 & 277 \end{bmatrix}$$

10B-7T/3M :

$$\pi = 2^{-10} \cdot \begin{bmatrix} 304 & 325 & 236 & 159 \\ 325 & 374 & 325 & 0 \\ 0 & 325 & 374 & 325 \\ 159 & 236 & 325 & 304 \end{bmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

10B-7T/2M :

$P(-2) = 0.2821$

$P(-1) = 0.1579$

$P(0) = 0.06$

$P(1) = 0.2821$

$P(2) = 0.1579$

$P(3) = 0.06$

10B-7T/3M :

$P(-1) = 0.1834$

$P(0) = 0.3166$

$P(1) = 0.3166$

$P(2) = 0.1834$

b-) Çok-düzeyli Hat Kodları

1-) L742 Hat Kodu

Bu kodlama tekniğinde, dört uzunluklu ikili bloklar iki uzunluklu yedi-düzeyli simgelerden oluşmuş kod kelimelerini içeren üç alfabeye dönüştürülür. Dönüşüm hızı ikiye birdir, STD değeri 6'dır.

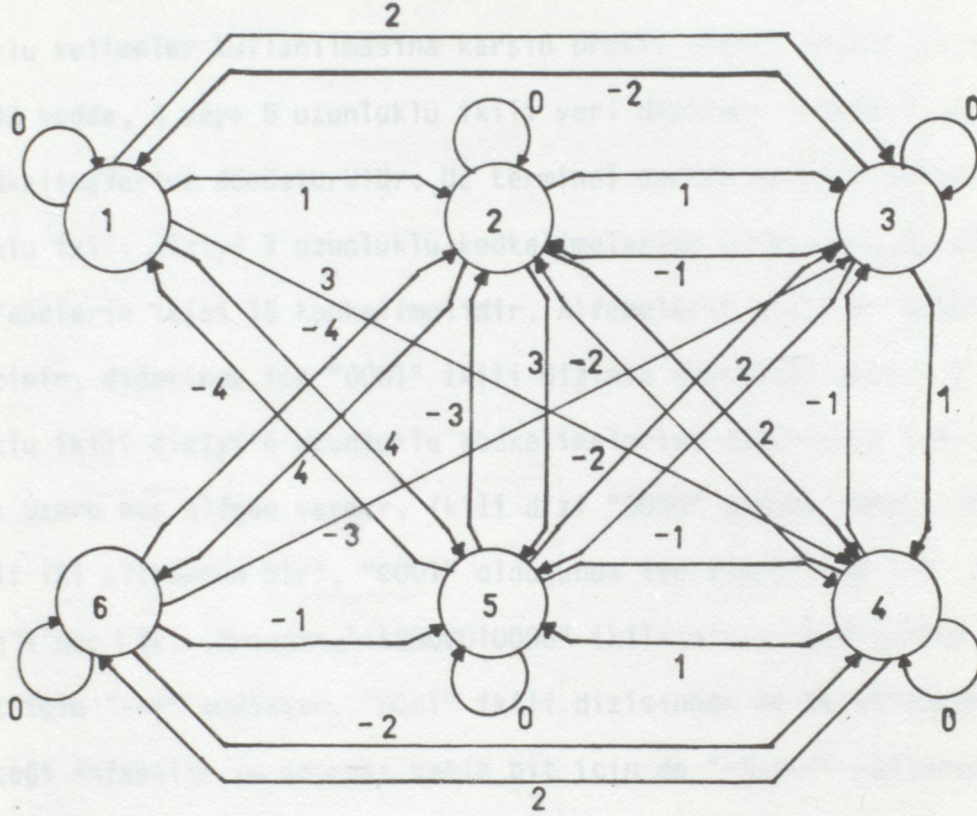
i-) Kod dönüşümü :

Tablo 2.11 L742 Hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Yedili Kodkelime		
	MOD A	MOD B	MOD C
0000	3,-3	-1, 1	-1, 1
0001	3, 0	-2, 1	-2, 1
0010	0, 1	0, 1	-1,-3
0011	2, 0	2, 0	-3,-1
0100	0, 2	0, 2	-2,-2
0101	3, 1	-2, 2	-2, 2
0110	1, 1	1, 1	0,-3
0111	1, 0	1, 0	-3, 2
1000	3,-2	-1, 0	-1, 0
1001	3,-1	-2, 0	-2, 0
1010	2,-2	2,-2	-3, 1
1011	2,-1	2,-1	-3, 0
1100	0, 3	-1,-1	-1,-1
1101	2, 2	0,-1	0,-1
1110	1, 3	0,-2	0,-2
1111	1,-1	1,-1	-3, 3

Mod A: BST= 1,2; Mod B: BST= 3,4; Mod C: BST= 5,6

ii-) Durum-geçiş çizgesi



Şekil 2.19 L742 Hat kodu durum-geçiş çizgesi.

iii-) (a) Geçiş matrisi :

$$\pi = 2^{-4} \cdot \begin{pmatrix} 3 & 4 & 4 & 2 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 4 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 3 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 4 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 4 & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 2 & 4 & 4 & 3 \end{pmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

$$P(1) = 0.09375$$

$$P(2) = 0.18198$$

$$P(3) = 0.22426$$

$$P(4) = 0.22426$$

$$P(5) = 0.18198$$

$$P(6) = 0.09375$$

2-) VL43 Hat Kodu

Bu koddaki kodkelimelerinin uzunlukları sabit değildir. Değişen uzunluklu kelimeler kullanılmasına karşın pratik olması nedeniyle yeğlenir. VL43 kodda, 4 veya 8 uzunluklu ikili veri dizileri 3 veya 6 uzunluklu kodkelimelerine dönüştürülür. Üç terminal durumu vardır. Ayrıca 4 uzunluklu ikili diziyi 3 uzunluklu kodkelimelerine dönüştüren üç alfabe (Bu alfabelerin ikisi 15 kodkelimelidir. Alfabelerin birinde "0000" ikili, dizinin, diğerinde ise "0001" ikili dizinin karşılığı yoktur.) ve 8 uzunluklu ikili diziyi 6 uzunluklu kodkelimelerine dönüştüren iki alfabe olmak üzere beş alfabe vardır. İkili dizi "0000" olduğu zaman, 15 kodkelimeli iki alfabeden biri, "0001" olduğunda ise diğeri seçilir. STD değeri ise 4'dür [2]. Örneğin, "110000010000" ikili dizisi kodlanırsa, ilk dört bit için "--+" kodlanır. "0001" ikili dizisinden de M4 alfabesinin seçileceği anlaşılır ve sonraki sekiz bit için de "-+-+-" kodlaması yapılır.

* Tablo 2.12 VL43 Hat kodu dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	M1	M2	M3	İkili Kelime	M4	İkili Kelime	M5
0000	+-	+-		00010000	-+-+-	00000000	---+-
0001		+-	+-	00010001	+++--	00000001	+-----
0010	0+0	0+0	-0-	00010010	-+-0+	00000010	+-+-0-
0100	+00	+-	+-	00010100	-+-+00	00000100	000+-
1000	00+	00+	--0	00011000	-+-00+	00001000	+-+--0
0011	0+	0+	0+	00010011	+++0-	00000011	---+0+
0101	+0-	+0-	+0-	00010101	+++--0	00000101	---++0
1001	++0	00-	00-	00011001	-+-++0	00001001	+-+00-
1010	+0+	0-0	0-0	00011010	-+-+0+	00001010	+-+0-0
1100	0++	--+	--+	00011100	-+-0++	00001100	+-+--+
0110	+ -0	+ -0	+ -0	00010110	000++	00000110	000+-0
1110	-+0	-+0	-+0	00011110	000-+0	00001110	000--+
1101	-0+	-0+	-0+	00011101	+++--+	00001101	---++-
1011	0-+	0-+	0-+	00011011	+++00	00001011	---+00
0111	++-	++-	0--	00010111	-+-++	00000111	+-+0--
1111	-++	-++	-00	00011111	000-++	00001111	+-+-00

3-) 3B-2Q Hat Kodu

Üç-uzunluklu ikili kelimeler iki uzunluklu dört-düzeyli kodkelimelerine dönüştürülmüştür. İlk iki bit sıfır yada bir olduğu zaman mod değiştirilir. Bu kodlama ile ikili giriş hızı % 50 artırılmış olur. STD oldukça büyük, 9'dur ve buna bağlı olarak bağlaşma bozulmasının da büyük olması beklenir.

i-) Kod dönüşümü :

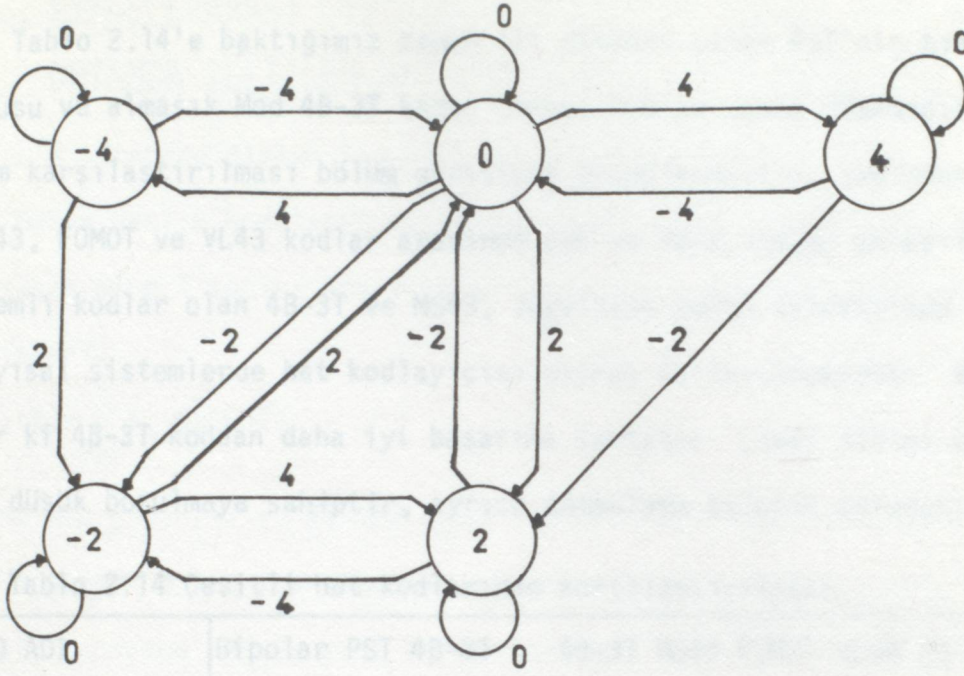
Tablo 2.13 3B-2Q Kod dönüşüm tablosu.

İkili Kelime	Dörtlü Kodkelime		
	MOD A	MOD B	KST
000	-3,-1	3, 1	± 4
001	-1,-3	1, 3	± 4
010	-1, 1	-1, 1	0
011	-3, 3	-3, 3	0
100	1,-1	1,-1	0
101	3,-3	3,-3	0
110	-3, 1	3,-1	± 2
111	1,-3	-1, 3	± 2

İlk iki giriş bitleri ikisi birden sıfır yada bir olduğu zaman modlar değişir.

ii-) Durum-geçiş çizgesi :

3B-2Q Hat kodunun durum-geçiş çizgesi şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 3B-2Q Hat kodu durum-geçiş çizgesi.

iii-) (a) Geçiş matrisi :

$$\pi = 2^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

(b) Terminal olasılıkları :

$$P(-4) = 0.083$$

$$P(-2) = 0.25$$

$$P(0) = 0.33$$

$$P(2) = 0.25$$

$$P(4) = 0.083$$

4-) 6B-3QI Hat Kodu

Altı ikili giriş dizisinin üç uzunluklu beş-düzeyli kodkelimelerine dönüştürülüp, iki alfabe şeklinde gruplandırılması ile elde edilir.

Mod değişimi BST tarafından kontrol edilir.

2.4.4. Çeşitli Hat Kodlarının Karşılaştırılması

Tablo 2.14'e baktığımız zaman ilk dikkati çeken PST'nin hız artışı oluşturma ve alması Mod 4B-3T kodun sonsuz STD'ye sahip olmasıdır. Güç spektrum karşılaştırılması bölüm girişinde örneklenmiştir. Tablodan 4B-3T, MS43, FOMOT ve VL43 kodlar arasında çok az fark olduğu anlaşılmıştır. En önemli kodlar olan 4B-3T ve MS43, İngiltere posta işletiminde 120 M bit/Sn. sayısal sistemlerde hat kodlayıcısı olarak kullanılmaktadır. MS43 görülüyor ki 4B-3T koddan daha iyi başarıma sahiptir. Çünkü STD'si düşüktür, daha düşük bozulmaya sahiptir, ayrıca zamanlama bilgisi bileşeni de fazladır.

Tablo 2.14 Çeşitli hat kodlarının karşılaştırılması.

KOD ADI PARAMETRE	Bipolar	PST	4B-3T (Almaşık)	4B-3T	MS43	FOMOT	VL43	3B-2Q	L742
Düzye sayısı	3	3	3	3	3	3	3	4	7
Bit/Kelime	1	2	4	4	4	4	4-8	3	4
Simge/Kodkelime	1	2	3	3	3	3	3-6	2	2
Giriş hızı/ hat hızı	1	1	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.5	2
Fazlalık (%)	58.5	58.5	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	33.3	40.5
STD	1	3	Sonsuz	7	5	5	4	9	6
Normalize zaman- lama bileşeni	1	1.25	0.80	0.76	0.84	0.84	-	-	9.94
Normalize orta- lama güç	1	1.5	1.31	1.36	1.26	1.34	-	-	1.20
Alfabe sayısı	2	2	2	2	3	4	5	2	3
Max.Ardışıl sıfır sayısı	Sonsuz	2	4	4	4	4	5	0	2
Max.Ardışıl aynı kutuplu darbe sayısı	1	2	5	6	5	5	-	2	2

3B-2Q ve L742 gibi yüksek hız artışı kodlar düşünüldüğü zaman, kodlama genel biçimini gerçekleştirmek için yeterli özelliğe sahip değildir. Bu nedenle kullanışlı değildir. Üçlü kodlar, gerçekleştirilmesi daha kolay olduğundan yeğlenir.

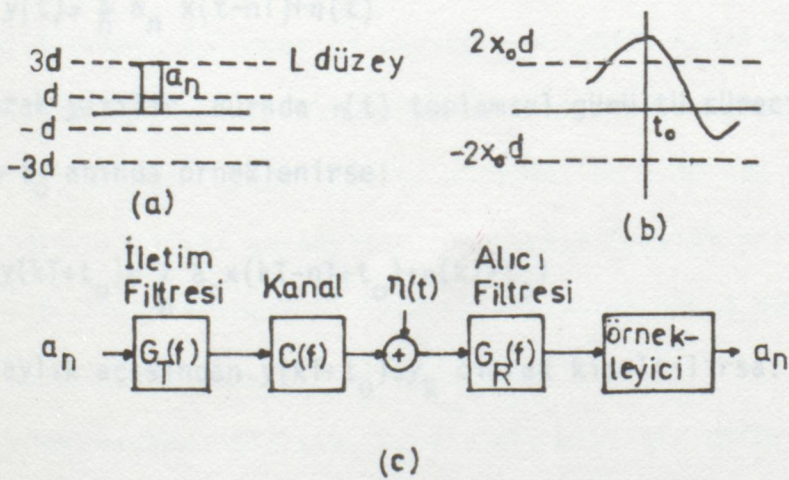
3. SİMGELERARASI GİRİŞİM VE TOPLAMSAL GAUSS GÜRÜLTÜLÜ ORTAMDA İLETİLEN HAT KODLARINDA HATA OLASILIĞI

3.1. Anaband Sistem Tanıtımı ve Darbe İletimi

Darbe genlik modülasyonunda bilgi bir $g(t)$ darbesinin genlik değerinde saklı olup T saniye aralıklarla iletilmektedir. Buna göre modülasyonlu işaret,

$$S(t) = \sum_{n=1}^N a_n g(t-nT) \quad (3.1)$$

biçiminde gösterilir. Burada a_n ler 0.1 gibi ayrık değerlerdir. Demodülatörün görevi gelen işarettten bu a_n değerlerini sınıflandırmak olacaktır. Kanalin anaband olduğu yani sıfır frekansda enerji ilettiği varsayılıyor. Şekil 3.1 de görüldüğü gibi, en basit Darbe genlik modülasyonlu (DGM'li) sistemde sabit iletim ve alıcı filtreler kullanılmaktadır. Ayrıca bir örnekleyiciyle bir eşik sezici gönderilen işaretin yeniden elde edilmesini sağlamaktadır [8], [21].



Şekil 3.1 (a) Olurlu iletim düzeyleri, (b) Karar eşikleri

(c) Eşik sezicili DGM anaband sistem.

Gösterim kolaylığı açısından, (a_n) giriş simgelerinin biçimi, $G_T(f)$ iletim filtresince belirlenen $g(t-nT)$ olan darbeler dizisi olduğu varsayılmaktadır. Genellikle düzey sayısı L , 2'nin kuvveti olup düzeylerinin arası eşittir. İletim düzeyleri $\pm d, \pm 3d, \dots, \pm(L-1)d$ olup birbirlerini izleyen iki düzey arası $2d$ dir.

Kanaldan geçerken $g(t)$ darbeleri saçılmadan ve toplamsal gürültüden etkilenirler. Alıcı filtresi $G_R(f)$ gürültülü işaretin darbe biçimine etkir. Bu filtreyi bir örnekleyici ve bir eşik sezicisi izler. Eşik sezicisi, $kT+t_0$ anlarında gelen dalga şekline bakarak olurlu L simgeden birine karar verir. (t_0 : kanal geçikmesine karşı gelen zamandır.) $G_R(f)$ alıcı filtresinin çıkışında, bir dizi genlik modülasyonlu üst üste binmiş darbe gözükür. Bu darbelerin biçimi $(X(t))$ kanal, iletim ve alıcı filtrelerince belirlenir,

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_T(f) C(f) G_R(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

gürültünün eklenmesiyle, çıkış dalga şekli $y(t)$:

$$y(t) = \sum_n a_n x(t-nT) + \eta(t) \quad (3.3)$$

olarak yazılır. Burada $\eta(t)$ toplamsal gürültü sürecidir.

$kT+t_0$ anında örneklenirse:

$$y(kT+t_0) = \sum_n a_n x(kT-nT+t_0) + \eta(kT+t_0) \quad (3.4)$$

Kolaylık açısından $y(kT+t_0) = y_k$ olarak kısaltılırsa:

$$y_k = \sum_n a_n X_{k-n} + \eta_k \quad (3.5)$$

istenene a_k genliğini ayırsak:

$$y_k = x_0 \left(a_k + \underbrace{\frac{1}{x_0} \sum_{n \neq k} a_n x_{k-n}}_{\text{istenene simgelerarası toplamsal gauss gürültüsü}} + \frac{\eta_k}{x_0} \right) \quad (3.6)$$

BOZUCU ETKENLER

x_0 çarpanı sistemden geçerken işaretin kazancını (veya zayıflamasını) göstermektedir. Bu basit değişim alıcıda değişken kazanç kontrolü yardımıyla denklenir. Eşik sezicisinin, a_k 'nin L olurlu değerlerden hangisinin alınan normalize örneğe en yakın olduğunu belirlemekte y_k/x_0 'ı $0, \pm 2d, \pm 4d, \dots, \pm (L-2)d$ düzelllerine dilimlediğini düşünmek uygun olur. Ya da, alıcı eşik düzeylerini $0, \pm 2x_0d, \pm 4x_0d, \dots, \pm (L-2)x_0d$ değerlerine ayarlar ve doğrudan y_k ile işlem yapar diye düşünülebilir.

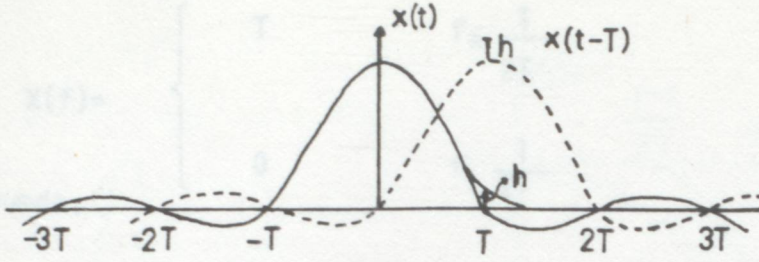
$$|y_k - x_0 a_k| > x_0 d \Rightarrow \left| \sum_{n \neq k} a_n x_{k-n} + \eta_k \right| > x_0 d \quad (3.7)$$

eşitsizliği sağlandığında bir hata olacaktır. DGM sistemin hata olasılığı-
nı minimum yapmak için toplamsal gürültü ve simgelerarası girişimin etkilerini minimum yapacak biçimde iletim ve alıcı filtrelerinin karakteristiklerinin bulunmasını gerektirmektedir. Kanalin iletim karakteristiklerinin bilinmemesi durumunda bu karmaşık bir problemdir. Örneğin telefon hatlarında. Genellikle bu durumda, kanalın söz konusu band boyunca mükemmel ilettiği varsayılır. Bu klasik Nyquist problemidir [21].

3.2. Simgelerarası Girişim ve Toplamsal Gauss Gürültüsü

3.2.1. Simgelerarası Girişim ("ISI")

Simgelerarası girişim, $a_k g(t-kT)$ gibi bir darbeye diğer darbenin saçaklarının ("tail") eklenmesinden kaynaklanır. Şekil 3.2. de bu olay örneklendirilmiştir.



Şekil 3.2 Nyquist darbeleri ve simgelerarası girişimin gösterimi.

Bu tip, bozulmalar genellikle DKM veya DGM sistemlerde olur. (3.6) ya bakıldığında zaman, simgelerarası girişimin ancak bütün $n \neq 0$ için $X_n = 0$ yapılarak yok edilebileceği görünür. Diğer bir deyişle, $X(t)$ nin saçakları T sn aralıklarla sıfırdan geçmelidir. Eğer kayma olursa, şekil 3.2 de görüldüğü gibi; kaymanın genliği h kadar diğer darbe üzerine binme olur. $X(t)$ darbe şeklinin sinc fonksiyonu alınışı [22,s.194]'de kanıtlanmıştır.

Simgelerarası girişim, iki yolla etkilenebilir:

- 1) Darbe biçimini değiştirerek,
- 2) Kod yapısını değiştirerek, diğer bir deyişle simge dizisinin istatistiğini değiştirerek.

1-) Darbe Biçiminin Değiştirilmesi (Yükseltilmiş-kosinüs karakteristiği)

Simgelerarası girişimi yok etme ölçütü, Nyquist bandıyla sınırlanmadıkça, $X(f)$ darbe spektrumunu tek olarak belirleyemez. Eğer band genişliği bu orandan $(\frac{1}{2T})$ küçükse simgelerarası girişim önlenemez. Daha büyük band genişliği oranının getireceği belirsizlik başka varsayımlarla çözümlenebilir. Böyle bir varsayım $X(t)$ darbesinin zamanla düşme hızına dayanır. Gerçek bir sistemde bozulmalar örnekleme anlamında sıfırdan farklı değerlere neden olurlar. Genel olarak, $X(t)$ zamanla ne kadar hızlı düşerse, bu istenmeyen bozulmaların etkisi de o kadar az olur.

Örneğin, $X(f)$ dikdörtgen olsun

$$X(f) = \begin{cases} T & f \leq \frac{1}{2T} \\ 0 & f > \frac{1}{2T} \end{cases} \quad (3.8)$$

bu durumda,

$$X(t) = \frac{\sin \pi t/T}{\pi t/T} \quad (3.9)$$

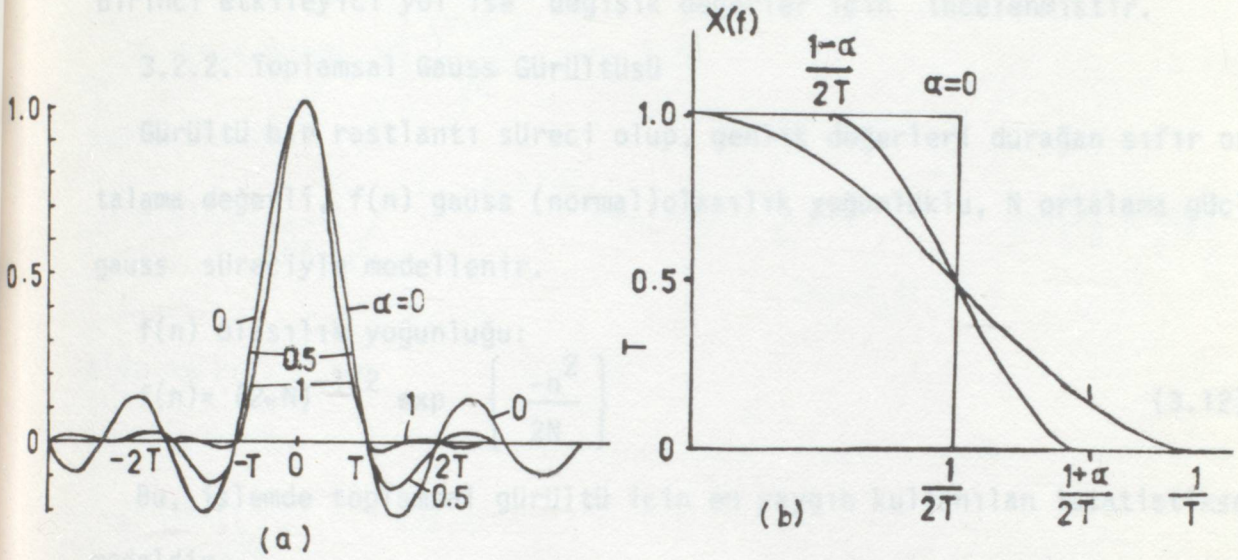
dir ve darbe yanıtı büyük t değerinde $1/t$ ile azalır. Darbenin yavaş düşmesi, $\frac{1}{2T}$ ve $-\frac{1}{2T}$ de $X(f)$ in süreksiz olmasından kaynaklanır. Diğer bir deyişle, $X(f)$ ne kadar yumuşak yapılabılırsa, $x(t)$ asimtotik düşmesi o kadar hızlı olacaktır.

Nyquist karakteristiklerinden en çok kullanılanlarından biri "YÜKSELTİLMİŞ-KOSİNÜS KARAKTERİSTİĞİ" dir. Bir yükseltilmiş-kosinüs karakteristiği düz bir genlik kısmı ile sinüsoidal biçimde bir eğilme ("roll-off") kısmından oluşur. $X(f)$ spektrumu bir α parametresine bağlı olarak belirlenir. α , minimum Nyquist bandından taşmanın Nyquist bandına orandır. α nın 1 olması yüzde yüz "eğilme" yani toplam band genişliğinin Nyquist band genişliğinin iki katı olması anlamındadır. $\alpha = 0$ ise minimum band genişliği kullanılmış demektir.

$$X(f) = \begin{cases} T & 0 \leq f \leq \frac{1-\alpha}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[1 - \sin \frac{1}{\alpha} \left[\pi f T - \frac{\pi}{2} \right] \right] & \frac{1-\alpha}{2T} \leq f \leq \frac{1+\alpha}{2T} \end{cases} \quad (3.10)$$

Bu karakteristikleri ilişkin impuls tepkeleride

$$x(t) = \frac{\sin \pi t/T}{\pi t/T} \cdot \frac{\cos \alpha \pi t/T}{1 - 4 \alpha^2 t^2 / T^2} \quad (3.11)$$



Şekil 3.3 Yükseltilmiş-kosünüs darbe biçimi (a) Zaman tepkesi, (b) Frekans tepkesi.

α 'nın büyük değerleri için darbeler hızlı olarak azalır ve eşzamanlama daha az önemli olur. Böylece zamanlama hataları simgelerarası girişimi artırıcı olmaz. Fakat toplamsal gürültü artar. $X(f)$ gerçel ve $\int X(f) df = 1$ dir [22].

2-) Kod Yapısının Değiştirilmesi (Hat Kodları)

En kötü iletim ikili dizinin doğrudan iletimidir, bu nedenle kodlanarak iletilmelidir. İkinci bölümde de anlatıldığı gibi hat kodlarının özelliklerinden biri de simgelerarası girişimi kontrol altına alabilmesi idi. Bilindiği gibi simgelerarası girişime neden olan düzey kaymaları sayısal toplam değişimiyle, diğer bir deyişle ard arda gelen aynı yönlü darbe sayısı ile orantılıdır. Hat kodlarında sayısal toplam değişimi sınırlanmıştır. Ayrıca, ikiden fazla düzey kullanıldığı için simge dizisinin istatistiği değişir. Böylece, simgelerarası girişim etkilenebilir.

Dördüncü bölümde simgelerarası girişim minimum yapılmaya çalışılacaktır. Simgelerarası girişimi etkileyen ikinci yol, bu tezde kullanılmış; birinci etkileyici yol ise değişik değerler için incelenmiştir.

3.2.2. Toplamsal Gauss Gürültüsü

Gürültü bir rastlantı süreci olup, genlik değerleri durağan sıfır ortalama değerli, $f(n)$ gauss (normal) olasılık yoğunluklu, N ortalama güçlü gauss süreciyle modellenir.

$f(n)$ olasılık yoğunluğu:

$$f(n) = (2\pi N)^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{n^2}{2N} \right\} \quad (3.12)$$

Bu, işlemde toplamsal gürültü için en yaygın kullanılan istatistiksel modeldir.

N ortalama gücü :

$$N = E [n^2(t)] = \int S_n(f) df \quad (3.13)$$

Gürültünün varyansı gücüne denktir ve bilindiği varsayılır.

Alınan işaret $r(t)$, $t = iT$ anlarında örneklenirse:

$$f_i(r) = (2\pi N)^{-1/2} \exp \left[-\frac{(r - A_i)^2}{2N} \right] \quad i = 1, 0 \quad (3.14)$$

şeklini alır. Burada A işaret genliğidir.

Optimum eşik düzeyi:

$$\alpha_0 = \frac{[2N \ln(P_0/P_1) + (A_1^2 - A_0^2)]}{2(A_1 - A_0)} \quad (3.15)$$

ve eşit olasılıklı simgeler ($p_0 = p_1$) için hata olasılığı,

$$P(e) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi N}} \left[\int_{-\infty}^{\alpha_0} \exp \left[-\frac{(r - A_1)^2}{2N} \right] dr + \int_{\alpha_0}^{\infty} \exp \left[-\frac{(r - A_0)^2}{2N} \right] dr \right] \quad (3.16)$$

şeklindedir [23].

Kapalı formda (3.16) açıklamasının integrali alınamaz, bu nedenle çeşitli formlarda tablolamıştır. Tablolamak için yaygın kullanılan iki değişken dönüştürme kullanılır.

$$\text{Birinci durum, } y \triangleq \frac{(r-A_i)}{\sqrt{N}}, \quad i=1,0 \quad (3.17a)$$

kullanılarak,

$$P(e) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \left[\int_{-\infty}^{(\alpha_0-A_1)/\sqrt{N}} \exp\left[-\frac{1}{2} y^2\right] dy + \int_{(\alpha_0-A_0)/\sqrt{N}}^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} y^2\right] dy \right] \quad (3.17.b)$$

elde edilir.

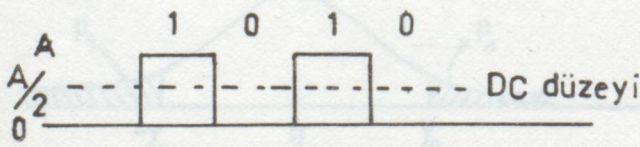
ikinci durum,

$$y \triangleq \frac{(r-A_i)}{\sqrt{2N}}, \quad i=1,0 \quad (3.18.a)$$

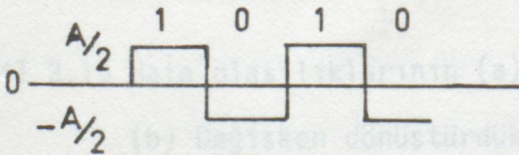
kullanılarak,

$$P(e) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left[\int_{-\infty}^{(\alpha_0-A_1)/\sqrt{2N}} \exp(-y^2) dy + \int_{(\alpha_0-A_0)/\sqrt{2N}}^{\infty} \exp(-y^2) dy \right] \quad (3.18.b)$$

elde edilir.



(a)



(b)

Şekil 3.4 Eşit tepe değerli (a) Tek yönlü, (b) Çift yönlü işaret.

Şekil 3.4 de örneklenen işaretlemeden önce tek yönlü durum ele alınırsa, bu işaretlede $A_1=A$, $A_0=0$ dır ve $\alpha_0 = A/2$ olur.

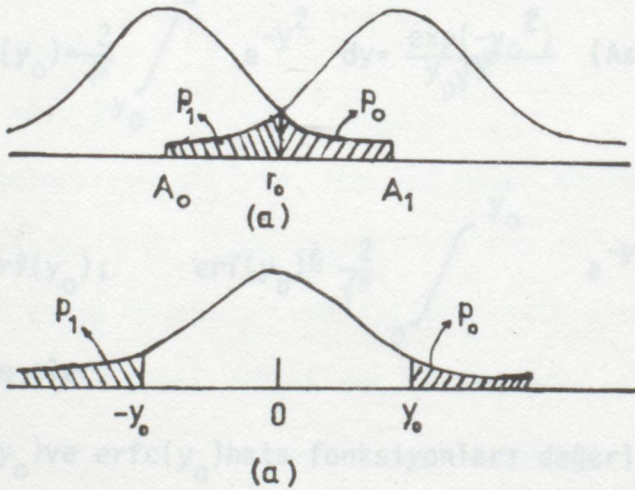
Hata olasılığı ise:

$$P(e) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left[\int_{-\infty}^{-A/2\sqrt{N}} e^{-(1/2)y^2} dy + \int_{A/2\sqrt{N}}^{\infty} e^{-(1/2)y^2} dy \right] \quad (3.19.a)$$

veya

$$P(e) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left[\int_{-\infty}^{-A/2\sqrt{2N}} e^{-y^2} dy + \int_{A/2\sqrt{2N}}^{\infty} e^{-y^2} dy \right] \quad (3.19.b)$$

(3.19)da integrallerin simetrik olmasından, buiki integral birbirlerine eşittir.



$y_0 = A/2\sqrt{N}$: ϕ veya F form
 $y_0 = A/2\sqrt{N}$: erf form

Şekil 3.15 Hata olasılıklarının (a) Değişken dönüştürmeden önceki

(b) Değişken dönüştürdükten sonraki grafik gösterimleri.

Değişken dönüştürülmeden önceki ve sonraki hata olasılıkları ilgili olasılık fonksiyonlarının kesişimi altındaki kalan alanla gösterilir (Şekil 3.5).

Hata olasılığını gösteren alanların eşit olmasıyla (3.19) aşağıdaki gibi kısalır. Birinci durumda:

$$P(e) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{A/2\sqrt{N}}^{\infty} e^{-(1/2)y^2} dy \triangleq 1 - F\left(\frac{A}{2\sqrt{N}}\right) = 0.5 - \Psi\left(\frac{A}{2\sqrt{N}}\right)$$

$$F(y_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_0} e^{-(1/2)y^2} dy = \frac{(1 + \operatorname{erf}(y_0/\sqrt{2}))}{2} \quad (3.20)$$

ikinci durumda:

$$P(e) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{A/2\sqrt{2N}}^{\infty} e^{-y^2} dy \triangleq \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{A}{2\sqrt{2N}}\right) = \frac{1}{2}(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{A}{2\sqrt{2N}}\right)) \quad (3.21)$$

$$\operatorname{erfc}(y_0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{y_0}^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{\exp(-y_0^2)}{y_0\sqrt{\pi}} \quad (\text{Asimtotik form } y_0 \rightarrow \infty)$$

$$= 1 - \operatorname{erf}(y_0); \quad \operatorname{erf}(y_0) \triangleq \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{y_0} e^{-y^2} dy$$

şeklinde olur.

$\operatorname{erf}(y_0)$ ve $\operatorname{erfc}(y_0)$ hata fonksiyonları değerleri tablolanmıştır. Tablo yardımıyla hata olasılığı bulunabilir.

Çift yönlü işaretlerde optimum eşik sıfırdır ($A_0 = -A/2$, $A_1 = A/2$), hata olasılığı ise tekyönlü işaretin aynısıdır. Fakat tekyönlü işaretin ortalama gücü, çift yönlü işaretin iki katı kadardır. Bunun nedeni tek yönlü bit akışındaki $A/2$ genlikli $A^2/4$ ortalama güçlü doğru bileşenin varlığıdır.

Genelde sistemin işaret gürültü oranı (İGO), işaretin gürültünün gücüne (varyansına) oranıdır.

Logaritmik gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$IGO = 10 \log \frac{E_s}{N} = 10 \log \frac{L^2/2}{\sigma^2} = 20 \log \frac{L}{\sqrt{2} \sigma} \quad (3.22)$$

Burada L işaretin genliği, σ ise gürültünün standart sapmasıdır.

3.3. Hata Olasılığının Bulunmasında Kullanılmış Yöntemler

3.3.1. 1970 Yılına Kadar Olan Yöntemler

a-) Kesik Darbe Dizisi Sınırı [24].

Teorik olarak sonsuz girişimli darbeler olmasına karşın, sonlu girişimli darbeler düşünerek hata olasılığı için bir alt sınır elde edilir. Eğer uzak darbelerin neden olduğu simgelerarası girişim büyükse, bu sınır bulunamaz.

b-) Kötü Durum Sınırı [24].

Simgelerarası girişim, tüm taş malar toplandığı zamanki en büyük değer olarak varsayılır. Simgelerarası girişim her zaman taşımların en büyük değerine sahip olduğu varsayılarak hata olasılığına bir üst sınır bulunur. Bu sınır genel olarak çok kötümserdir. Çünkü simgelerarası girişim çok küçük olasılıkla en büyük değere sahip olur. Bu göz açıklığı ("eye opening") ile ilgilidir. Göz açıklığında kötü durum düşünülerek elde edilir. Eğer göz açıklığı büyükse, simgelerarası girişimin küçük olduğu anlamına gelir. Fakat göz açıklığı azsa, bu simgelerarası girişimin çok büyük olduğu anlamına gelmez. Bu sadece simgelerarası girişimin en kötü değeri için büyüktür anlamına gelir.

c-) Chernoff Sınırı [24]

Bu sınır genelleştirilmiş Chebyshev eşitsizliğinin (simgelerarası girişim + Toplamsal gürültü > Eşik) kullanılmasından elde edilir. Bu yöntemle

elde edilen üst sınır kötü durum sınırı yönteminden çok daha iyi ve hesaplaması da kolaydır.

3.3.2 Gram-Charlier Açılımı Yöntemi [24].

Çelebiler ve Shimbo tarafından Gram-Charlier açılımını kullanarak simgelerarası girişim ve toplamsal Gauss gürültülü ortamda hata olasılığı hesaplanmıştır. Ho ve Yeh de Hermite polinom serileri açılımlarını kullanarak çok düzeyli sistemler için benzer yöntemi. Çelebiler ve Shimbo'dan bağımsız olarak geliştirmişlerdir. [25],[26].

Çelebiler ve Shimbo hata olasılığının tam değerlerini bulmak için sonlu girişim darbeleri üzerinde çalışmışlardır. Önce ana darbenin beş önünde ve beş sonunda olmak üzere on girişimli darbe için incelemişler, daha sonra ana darbenin 24 önünde, 24 sonunda olmak üzere 49 darbeye kadar yükseltmişler ve incelemede hata olasılığının değişmediğini görmüşlerdir.

3.3.3. Üst Sınır Yöntemi [27].

Glave, özilişkili sayısal işaretler için simgelerarası girişimin neden olduğu hata olasılığı için bir üst sınır çıkarmıştır. İlk defa Hilli tarafından birkaç çeşit ilişkili işaretler için hata olasılığını yaklaşık hesaplayan bir yaklaşım tekniği geliştirilmiştir. Fakat bu teknik bir kaç çeşit ilişkili işaretler için uygundur. Bu nedenle Glave'nin ileri sürdüğü üst sınır genel ilişkili işaretler için olması bakımından önemlidir. Glave de sınırlı girişimli darbelerle uğraşmıştır. Önceki incelemesinde bir önceki ve bir sonraki darbelerle, daha sonra ise altı önceki ve altı sonraki darbelerle ilgilenmiş, hata olasılığının değişmediğini görmüştür.

3.3.4. Gauss Alan Hesabı Kuralları("GQR") Yöntemi

Benedetto, De Vincentiis ve Luvison, simgelerarası girişimli ve toplamsal gürültülü ortamlarda DGM'lu çok düzeyli işaretler için ortalama hata olasılığını hesaplayabilmek için Gauss alan hesabı yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntem, gürültü istatistiklerinde sınırlama olmasından dolayı yetersizdir, böylece Gauss dağılımına uymayan gürültülere de uygulanabilir. GQR yöntemde hata olasılığı diğer modellerin tersine seri açılımla değil, alan hesabıyla bulunur.

Daha önceki yöntemlere bir göz attığımız zaman, 1970 yılına kadar kesik darbe dizisi, kötü durum ve Chernoff sınırları [24] kullanılarak hata olasılığı elde edilmeye çalışılmıştır. Bazı yazarlar hata olasılığını Gram-Charlier açılımını [24] veya Hermite polinomları açılımını[25], [26]kullanarak hesaplamaya çalışmışlardır. Tüm bu yöntemler: 1-) Öne sürülen sınırın sıklıkla yetersiz oluşu (kesin olmaması); 2-) Kanalda bozulma olduğu zaman elde edilen sonuçlar çok değişken (salınım yapması) veya gerekli olan bilgisayar zamanının çok fazla oluşu nedeniyle yetersizdir. Bu iki gerekçe nedeni ile GQR yöntemi bu ana kadar daha çekicidir.

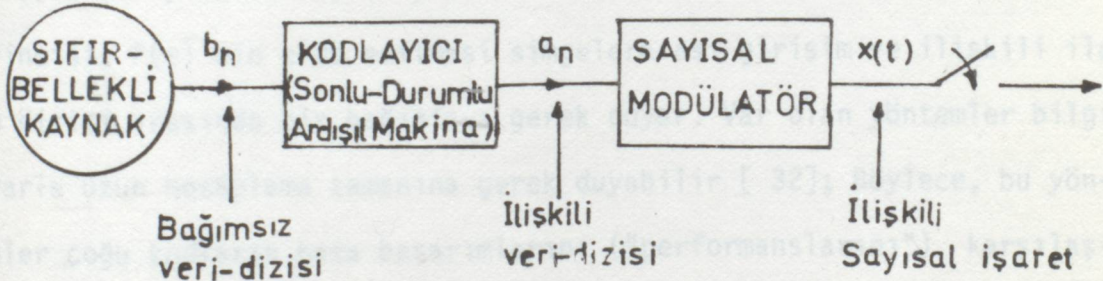
3.3.5. Üst ve Alt Sınır Yöntemi [29].

Prabhu, simgelerarası girişim ve toplamsal gürültülü ortamda ilişkili sayısal işaretler için hata olasılığında, Glave'nin çıkardığı üst sınırı [27] geliştirerek üst ve alt sınır çıkarmıştır. Bu yöntemde de sınırlar, sonlu simgelerarası girişimli darbeler için çıkarılmıştır. Ayrıca üst ve alt sınır arasındaki fark olduğunca küçük yapılarak hata olasılığı istenilen doğrulukta elde edilmeye çalışılmıştır.

Korn da bağımlı ve bağımsız simgeler için hata olasılığı üst ve alt sınırını daha iyi doğrulukta hesaplamıştır[30],[31].

3.3.6 Moment Yaklaşım Yöntemi [32] .

Cariolara ve Pupolin tarafından ilişkili sayısal işaretlerde simgelerarası girişim ve toplamsal gürültülü ortamda hata olasılığını istenilen doğrulukta elde etmek için moment yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, üstel hesaplama büyüklüğünden kaçınılmıştır. Simgelerarası girişim momentlerinin hızlı teknikle (bilgisayarla) hesaplanmasına dayanır. Bu hesaplar girişime neden olan darbelerin sayısı ile doğru orantılı olarak büyür. Bu yöntemde, ilişkili simgelerin bir sonlu-durumlu ardışıl makina tarafından üretildiği varsayılır. Bu yöntem Şekil 3.6 da gösterilmiştir [33] , [34]



Şekil 3.6 Moment yaklaşım yönteminde ilişkili işaret üretimi.

Bu yöntemde kaynak sıfır-bellekli ve kodlayıcı bir genel sonlu-durumlu ardışıl makina olarak varsayılır. Kodlayıcı çıkışındaki üretilen veri dizisi, ardışıl makina kuralları ve kaynak olasılıkları bağımlılığında ilişkili olarak dışarı atılır. Kaynağın, N-uzunluklu kodkelimelerine dönüştürülen M-uzunluklu kelimeler ürettiği ve M,N değerlerinin sabit olduğu varsayılır. Bu model sadece matematiksel açıdan değil sayısal iletim alanında kısıtlanmama açısından özellikle çekicidir. Fakat ardışıl makina giriş ve çıkış kümeleri sabit uzunluklu kelimeler içerdiğinden sakıncalıdır [13]. Bu yöntemle yeterli doğrulukta simgelerarası girişim

hesaplanabilir, fakat çok fazla bilgisayar zamanı gerektirir. Bu yönden sakıncalıdır.

3.4. Birikmiş Sayısal Toplam Modeli [7] , [8] .

Chang, Jakubow ve Leon-Garcia tarafından 1982 yılında, bir alçak kesim frekanslı kanalının neden olduğu simgelerarası girişim için basit bir model sunulmuştur. Model, bu kanal üzerinden iletilecek alfabetik olarak kodlanmış dizilerin hata olasılığını hesaplamak için kullanılan etkili ve doğru yöntemdir. Bu model aynı zamanda hata olasılığını minimum yapacak alfabetik hat kodlarını tasarlamakta da kullanılır.

Daha öncede anıldığı gibi anaband sayısal sistemde, simgelerarası girişimli ve toplamsal gürültülü ortamda hata olasılığını bulmak oldukça karmaşık bir problemdir. Bu problemin çözümü de iki zorluk gösterir. Birincisi, $P(e)$ 'nin elde edilmesi simgelerarası girişim ve ilişkili iletim dizisi arasında bir bağıntıya gerek duyar. Var olan yöntemler bilgisayarla uzun hesaplama zamanına gerek duyabilir [32]; Böylece, bu yöntemler çoğu kodların hata başarımlarını ("performanslarını") karşılaştırmaya elverişli değildir. İkincisi, daha önceki yöntemlere baktığımızda, hiçbir yöntem hat kodlarının $P(e)$ başarımlarını optimum yapmayı sağlayamaz. Çünkü simgelerarası girişim işlemini doğrudan doğruya hata oranına bağlamak mümkün olmamıştır.

İşte BST modeli, yukarıdaki iki problemin üstesinden gelir. Bu model alçak kesim frekanslı kanalların $P(e)$ başarımlarının elde edilmesini çok cabuk ve doğru olarak sağlayan, ayrıca $P(e)$ başarımlarını optimum yapmak için yeni kod tasarlama mantığına açık olan bir modeldir. Şimdiye kadar ki incelemelerden de anlaşıldığı gibi BST model, hat kodlarında minimum hata olasılıklı kod tasarlamaya yönelik tek modeldir. Bu modele dayalı olarak dördüncü bölümde minimum hata olasılıklı kod tasarlanacaktır. BST

modelle hata olasılığı çok çabuk hesaplanabildiği için üzerinde inceleme yapılacak tüm hat kodlarında bu model kullanılacaktır.

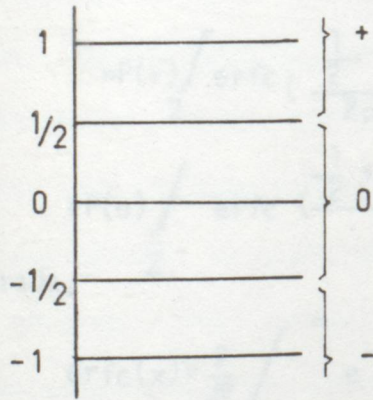
3.4.1. $P(e)$ 'nin Sayısal Değerlendirilmesi

Simge hata olasılığı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P(e) = P(Z + \eta < -\frac{1}{2} | +)P(+) + P(Z + \eta > \frac{1}{2} | -)P(-) + P(|Z + \eta| > \frac{1}{2} | 0)P(0) \quad (3.23)$$

Burada +, - ve sıfır iletilen simgelerdir. Raslantı değişkenleri Z simgelerarası girişim ve η toplamsal Gauss gürültüsünü gösterir. Şekil 3.7 de simge karar alanları gösterilmiştir. Önemli bir konu da (3.23)de simgelerin koşullu olasılıklı olmasıdır.

$Z + \eta$



Şekil 3.7 Simge karar alanları.

Örneğin, "+" simgesinin hata olasılığını incelerken "+" işaretinin varlığı gözönünde tutulmalıdır. Diğer bir deyişle, $Z + \eta$ bozucularının büyüklüğünün $-1/2$ den daha fazla negatif olması halinde, simge genliği ve bozucuların toplamı ($1 - 1/2 = 1/2$), $1/2$ eşik düzeyi altına inmiş, böylece "0" karar alanına girilmiş ve yanlış karar verilmiş olacaktır. Aynı şekilde diğer simgelerin irdelenmesi yapılabilir.

Toplamsal gürültü ile simgelerarası girişimin bağımsız olduğu varsayılacak ve bunların toplam koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu, her birinin ayrı ayrı yoğunluk fonksiyonlarının ($f_{\eta}(X|1)$ ve $f_Z(X|1)$, $1 \in (+,0,-)$) katlaması (konvolusyonu)dur. Gürültü örneğinin sıfır beklendiği değerli ve σ^2 varyanslı Gauss süreci olduğu varsayılacaktır.

Alfabetik kodların ilginç dengelilik özelliğinden,

$$P(+)=P(-) \text{ ve}$$

$$P(Z+\eta > \frac{1}{2}|-) = P(Z+\eta < -\frac{1}{2}|+)$$

$$P(Z+\eta > \frac{1}{2}|0) = P(Z+\eta < -\frac{1}{2}|0) \quad (3.24)$$

olarak alınabilir ve (3.23) aşağıdaki gibi kısalabilir:

$$P(e) = 2 \cdot P(Z+\eta < -\frac{1}{2}|+)P(+) + 2 \cdot P(Z+\eta < -\frac{1}{2}|0)P(0)$$

$$= P(+)\int_Z \operatorname{erfc}\left(\frac{\frac{1}{2}+\zeta}{2\sigma}\right) f_Z(\zeta|+)d\zeta \\ + P(0)\int_Z \operatorname{erfc}\left(\frac{\frac{1}{2}+\zeta}{2\sigma}\right) f_Z(\zeta|0)d\zeta \quad (3.25)$$

Burada,

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy \quad (3.26)$$

alınacaktır.

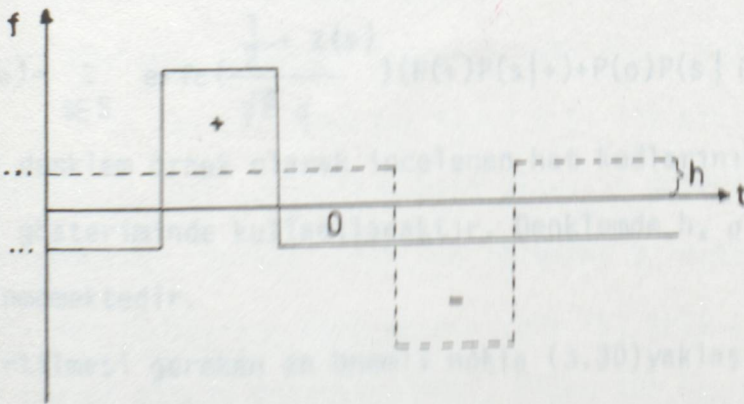
Ayrıca kullanılan kanalın baştan başa birbiri arkasına dizilmiş iki tek kutuplu dönüştürücülerdeki yükseltilmiş-kosinüs karakteristiği içerdiği varsayılır. Dönüştürücü devresinin geçiş fonksiyonu :

$$X(f) = \left(\frac{Jf}{Jf+f_c}\right)^2 \quad (3.27)$$

ve baştan başa kanal geçiş fonksiyonu $G'(f) = G(f) X(f)$, burada $G(f)$ yükseltilmiş-kosinüs karakteristiğidir. Darbe örnekleri $g'(KT)$ ayrık Fourier dönüşümü ("DFT") kullanılarak bulunabilir. Bu α' 'nın sıfır ve bir aralığındaki değerleri ve $F_c = f_c/f_0$ ($f_0 = 1/T$)nin yüzde 0.1 ile 1 arasındaki değerleri için yapılabilir. Tüm durumlarda darbe biçimleri benzer özelliklere sahiptir, bunlar : Ana örnekten önceki simgelerarası girişim örnekleri çok küçüktür, etkin girişim oluşu ana örnekten sonra ve çok yavaş azalan kuyruk biçimi alırlar.

3.4.2. $P(e)$ 'ye Yaklaşım Yöntemi

BST modele göre birikmiş sayısal toplam fiziksel olarak simgelerarası girişimi yansıtır, diğer bir deyişle aynasıdır denebilir. Alçak kesim frekans için önemli simgelerarası girişim, yükseltilmiş-kosinüs kanalın ana örneği izleyen uzun zamanda azalan biçimli kuyruğu olmasından kaynaklanır. Kuyruk uzunluğu artarken, BST doğru bozulma tahmini sağlamada kullanılabilir. Çünkü BST net kuyruk toplamını gösterir. Bu modelde bir simgenin neden olduğu simgelerarası girişim, o simgenin kendisine zıt yönde sonsuz-sürekli ve sabit-genlikli kuyrukiçeren bir simge olarak şekil 3.8 de görüldüğü gibi varsayılarak gösterilir. Eğer simge sıfır ise zıt yönü olmayacağından sıfır olarak gösterilir.



Şekil 3.8 BST modelde simgelerin gösterimi.

Kodun BST'si sonlu olduğuna göre, bu modelde simgelerarası girişim de sadece ayırık değerler üstlenebilir. Bundan başka, şu da bir gerçektir ki kodların dengeli olması, simgelerarası girişimin dağılımı sıfır etrafında simetrik olması demektir. Böylece, olurlu durumlar kümesi eğer, STD: çiftse $S=(0, \pm 1, \dots, \pm \text{STD}/2)$ veya

tekse $S=(\pm 1/2, \dots, \pm \text{STD}/2)$ olmalıdır.

Hat kodlarındaki tüm incelemelerde olurlu durumlar kümesi yukardaki şekilde normalize edilerek incelenecektir. Simgelerarası girişimin gerçek değeri s (olurlu durum kümesi elemanı) ile ilgilidir. Şekil 3.8'i göz önünde bulundurarak her olurlu durum için simgelerarası girişim,

$$Z(s) = -s \cdot h \quad (3.28)$$

şeklinde modellenenebilir. Burada h kuyruk ("Tail") genliğidir. Böylece, bir olurlu durum ve bir simgelerarası girişim arasında bire bir sonuç bulunmuştur. Bu sonuç ivedi ve etkili olarak iyi kodlar bulmakta kullanılabilir. Bu sonuç için önemlidir. Sonsuz-kuyruk (veya BST) model için simgelerarası girişim yoğunluk fonksiyonu bir impuls dizisidir.

$$f_z(\zeta | 1) = \sum_{s \in S} P(Z(s) | 1) \delta(\zeta - z(s)) \quad (3.29)$$

Burada $\delta(\zeta)$ delta fonksiyonudur, $P(Z(s) | 1) = P(s | 1)$, ve

$1 \in (0, +, -)$. (3.29) denklemini (3.25) de yerine koyarsak, sonuç:

$$P(e) = \sum_{s \in S} \text{erfc}\left(\frac{\frac{1}{2} + z(s)}{\sqrt{2} \sigma}\right) (P(+)P(s|+) + P(o)P(s|0)) \quad (3.30)$$

olur. Bu denklem örnek olarak incelenen hat kodlarının hata olasılığının sayısal gösteriminde kullanılacaktır. Denklemden h , σ ve olasılık değerleri bilinmemektedir.

Belirtilmesi gereken en önemli nokta (3.30) yaklaşımının geçerliliğidir. Bir uygulanabilir tasarım $F_c \leq 0.5$ için, bu model moment yaklaşımından $P(e) = 10^{-10}$ değerinde 0.2 dB sapar. Moment yaklaşımdan sapma eğrileri F_c

kesim frekansı ile artarlar. Çünkü F_c 'nin artması kuyruğun azalma hızını artırmaya neden olur. Buda BTS modeli az geçerli yapar. Genelde, BST model $F_c \leq 0.5$ olduğu zaman doğru yöntem ve $P(e)$ 'yi hesaplamak için kullanışlı bir araçtır.

3.5. Hat Kodlarında Hata Olasılığı Eğrilerinin Bulunması

Sayısal iletişim sistemlerinin başarımları, simge hata olasılığının terimleri olarak ölçülür. Uygulamada $P(e)$ 'nin 10^{-4} ile 10^{-7} aralığında olması iletişim sistemleri için uygundur. Hat kodlarının hata olasılığı eğrileri çizilirken y-ekseni $P(e)$ hata olasılığı değerini gösterir. x-ekseni ise işaret gürültü oranı (IGO), gürültünün standart sapması (σ), işaret genliği (L) veya kuyruk genliği (h) değeri gibi hata olasılığını etkileyen parametreler olabilir.

Örnek olarak incelenen hat kodları hata olasılıkları IGO, σ ve h'a göre incelenmiştir. Simge genliği bir olarak alınmıştır. İşaret gürültü oranı, 15 dB ile 30 dB arasında incelenmiştir. Çünkü bu aralık hat iletimi için yeterlidir. Gürültünün standart sapması ise 0.12 den 0.03 değerine kadar 0.01 lik adımlarla artırılmıştır. Daha önceki bölümde de anlatıldığı gibi, h sistemin alçak kesim frekansı ile yakından ilgilidir ve bu frekansa bağlı olarak değişir. Diğer bir deyişle, yükseltilmiş-kosinüs darbenin alfa değeri değiştirilerek darbenin azalma zamanı değiştirilir. Böylece, h değeri değiştirilmiş olur. Hat kodlarının incelenmesinde h, 0.04 den 0.1 değerine kadar 0.01 lik aralıklarla artırılarak incelenmiştir. Hat kodlarının hata olasılık değerleri (3.30) kullanılarak bulunmuştur. Gerekli olan tüm işlemler bilgisayar yardımıyla yapılmıştır. Hat kodlarının hata hesabı daha iyi anlaşılması için PST hat kodu örnek olarak alınıp anlatılacaktır. Diğer tüm hat kodlarında PST hat kodu örneğindeki sıra izlenecektir.

Hata Olasılığı Hesap Adımları:

i-) Olurlu durumlar tablosu çıkartılması: İkinci bölümde tablo 2.2 de BST kod için verilmiştir. Fakat bu tablo çeşitli olasılıkları hesaplamada sık sık kullanılacağından tekrar verilmekte yarar vardır. Bu tablo her mod için başlangıç BST değerine, her kodkelimelerin simgelerinin teker teker eklenmesiyle elde edilir.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime			
	MOD A	MOD B		
0 0	-1.5	-0.5	-0.5	0.5
0 1	-0.5	0.5	0.5	-0.5
1 0	0.5	0.5	-0.5	-0.5
1 1	0.5	-0.5	1.5	0.5

PST Hat kodu olurlu durumlar tablosudur.

ii-) Olasılıkların hesaplanması: Üç türlü olasılık hesaplanması yapılacaktır. Bu hesaplamalar çok fazla alfabeye (mod'a)sahip hat kodları için oldukça çok zaman alır, ayrıca hata yapma olasılığı da vardır. Bu nedenle her türlü olasılık hesabıyla ilgili altprogram verilecektir.

(a) Olurlu durumlar olasılıkları hesaplanması:

$$P(s) = \sum_{i=1}^K P(\text{Mod } i) \cdot P(s | \text{Mod } i) \quad (3.31)$$

Burada K Mod sayısıdır. Her S olurlu durumu için (3.31)kullanılarak olasılıkları bulunur. Örneğin, PST kodda STD=3 olduğuna göre olurlu durumlar kümesi : $S = (-1.5, -0.5, 0.5, 1.5)$ olur.

$$P(-1.5) = P(\text{Mod A}) \cdot P(-1.5 | \text{Mod A}) + P(\text{Mod B}) \cdot P(-1.5 | \text{Mod B}) = 1/16$$

Aynı biçimde diğer olurlu durumlar için olasılıklar:

$P(-0.5) = 7/16$, $P(0.5) = 7/16$, $P(1.5) = 1/16$ olarak bulunur. Olurlu durumların olasılıkları EK-2 deki (2260-2480)satırları arasındaki altprogramla hesaplanır.

(b) Koşullu olasılıklar $P(s|s)$ hesaplanması: Bir s olurlu durumu varken diğer olurlu durumların olma olasılıklarıdır. İkinci bölümde olurlu durumları tanımlarken kısaca her simge sonundaki durum tanımı kullanılmıştı. Bu tanıma göre, bir olurlu durum varken diğer olurlu durumlar aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$P(s|s) = P(s+1|s), 1 \in (-, 0, +) \quad (3.32)$$

Ortaya çıkan koşullu olasılıklar doğrudan olurlu durumlar tablosundan birer birer sayılarak bulunur.

Örneğin : PST kodda,

$s = -1.5$ olurlu durumu için :

$$P(-2.5|-1.5) = 0, P(-1.5|-1.5) = 0, P(-0.5|-1.5) = 1$$

Diğer olurlu durumlar için olasılıklar:

$$P(-1.5|-0.5) = 1/7, P(-0.5|-0.5) = 3/7, P(0.5|-0.5) = 3/7$$

$$P(-0.5|0.5) = 3/7, P(0.5|0.5) = 3/7, P(1.5|0.5) = 1/7$$

olarak bulunur. Bu olasılıklar bulunurken dikkat edilmesi gereken nokta, modların seçilmesini sağlayan BST değerinin de olurlu durum varsayılması gerektiğidir. Ayrıca her modun olasılığı göz önünde tutulmalı ve ağırlıklı olarak işlem yapılmalıdır. EK-2'deki (2490-2890) satırları arasındaki alt-programla koşullu olasılıklar hesaplanır.

(c) Olurlu durumların hata olasılıkları: (3.30) ile hata olasılık değerini bulabilmek için her olurlu durum ve onun koşullu olasılıklarının birleşiminden oluşan toplam olasılığı, diğer bir deyişle her olurlu durumun hata olasılığını bulmak gerekir. (3.30)'un durum olasılıklarıyla ilgili kısmı:

$Per(s) = P(+)P(s|+) + P(0)P(s|0)$ dır. Bir hat kodunda simge olasılıklarını bulmak çok zordur. Bu nedenle Bayes kuralı kullanılarak,

$Per(s) = P(s)P(+|s) + P(s)P(0|s)$ şekline dönüştürülür ve

$$\text{Per}(s)=P(s) [P(+|s)+P(0|s)] \quad (3.33)$$

biçiminde kısaltılır. PST kod için olurlu durumların hata olasılığı:

$$\text{Per}(-1.5)=P(-1.5) [P(-0.5|-1.5)+P(-1.5|-1.5)]= 1/16$$

Diğer olurlu durumlar için aynı şekilde,

$\text{Per}(-0.5)=6/16, \text{Per}(0.5)=3/16, \text{Per}(1.5)=0$ olarak bulunur. EK-2'deki (2830-2890) satırları arasındaki programla olurlu durumların hata olasılıkları bulunur.

iii-) Hata olasılık değerleri $P(e)$ 'nin bulunması ve hata olasılığı eğrilerinin çizilmesi: (3.30) Yardımıyla hat kodunun hata olasılığı değerleri bulunur. Budenklem $\text{erfc}(x)$ ve $\text{Per}(s)$ olmak üzere ikisinin çarpımından oluşur. $\text{Per}(s)$ olasılıklarla ilgili ve sabit bir sayıdır. $\text{erfc}(x)$ fonksiyonu ise σ ve h değişkenleri içermektedir. σ ve h 'ın değişik değerleri için hata olasılığı değerleri bulunur ve bu değerlere göre hata olasılığı eğrileri çizilir.

Örneğin PST kodda $h=0.06$ ve $\sigma=0.100$ için $P(e)$ değeri.

$$\begin{aligned} P(e) = & \text{erfc}\left(\frac{0.5+1.5 \times 0.06}{2 \times 0.1}\right) (P(-1.5) [P(-0.5|-1.5)+P(-1.5|-1.5)]) + \\ & \text{erfc}\left(\frac{0.5+0.5 \times 0.06}{2 \times 0.1}\right) (P(-0.5) [P(0.5|-0.5)+P(-0.5|-0.5)]) + \\ & \text{erfc}\left(\frac{0.5-0.5 \times 0.06}{2 \times 0.1}\right) (P(0.5) [P(1.5|0.5)+P(0.5|0.5)]) + \\ & \text{erfc}\left(\frac{0.5-1.5 \times 0.06}{2 \times 0.1}\right) (P(1.5) [P(2.5|1.5)+P(1.5|1.5)]) \end{aligned}$$

Bu işlemlerin sonucu olarak $P(e)=3.017E-4$ bulunur. Görülüyor ki dört olurlu durumlu kod için bile çok zaman harcanıyor. Daha fazla olurlu durumlu kodlarda işlemler için daha fazla zamana gerek duyulacağıda bir gerçektir. Bu nedenle tüm bu işlemler bilgisayarla yürütülmüştür. EK-2'deki (2900-3340) satırları arasındaki altprogramla hata olasılığı değerleri bulunur.

IGO, σ ve h' 'ye karşı gelen her $P(e)$ değeri bulunur. Bu değerler ortalama olarak çizilerek birleştirilir ve kodun hata olasılığı eğrileri elde edilmiş olur. Hat kodlarının hata incelenmesi yukardaki adımlar şeklinde yapılacaktır. Tüm işlemler bilgisayarla yapıldığı için hesaplanan değerler bilgisayar çıkışı biçimindedir.

3.5.1. Çeşitli Hat Kodlarının Hata Olasılıklarının İncelenmesi

1-) Bipolar Hat Kodu

i-) Olurlu durumlar tablosu:

Tablo 3.1. Bipolar hat kodu olurlu durumlar tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kodkelime	
	Mod A	Mod B
0	-0.5	0.5
1	0.5	-0.5

$$S = (-0.5, 0.5)$$

ii-) Olasılıkların hesaplanması:

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

$$PS(0.5) = 0.5$$

$$PS(-0.5) = 0.5$$

KOSULLU OLASILIKLAR:

$$P(-0.5 | 0.5) = 0.5$$

$$P(0.5 | 0.5) = 0.5$$

$$P(1.5 | 0.5) = 0$$

$$P(-1.5 | -0.5) = 0$$

$$P(-0.5 | -0.5) = 0.5$$

$$P(0.5 | -0.5) = 0.5$$

OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

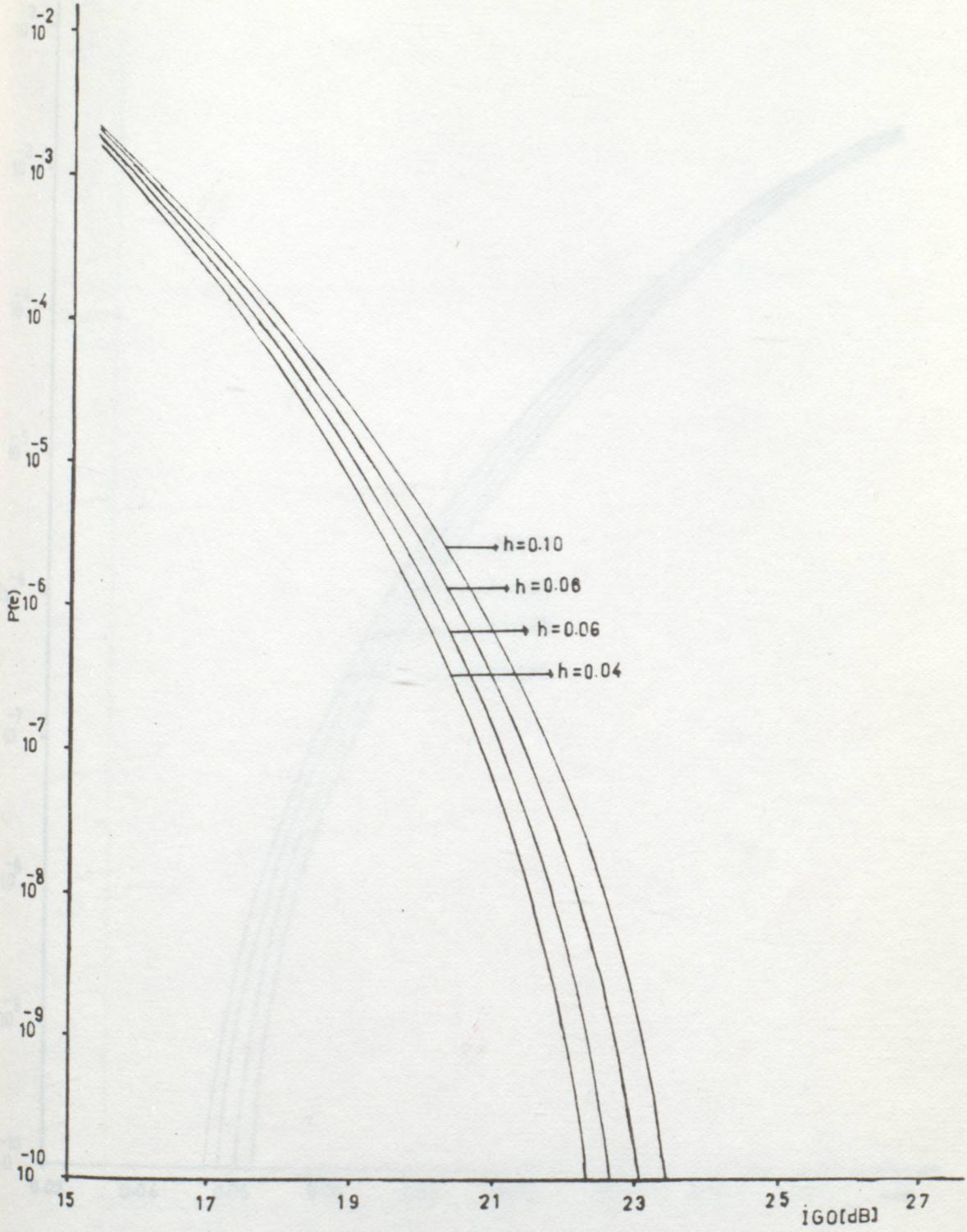
$$Per(0.5) = 0.25$$

$$Per(-0.5) = 0.25$$

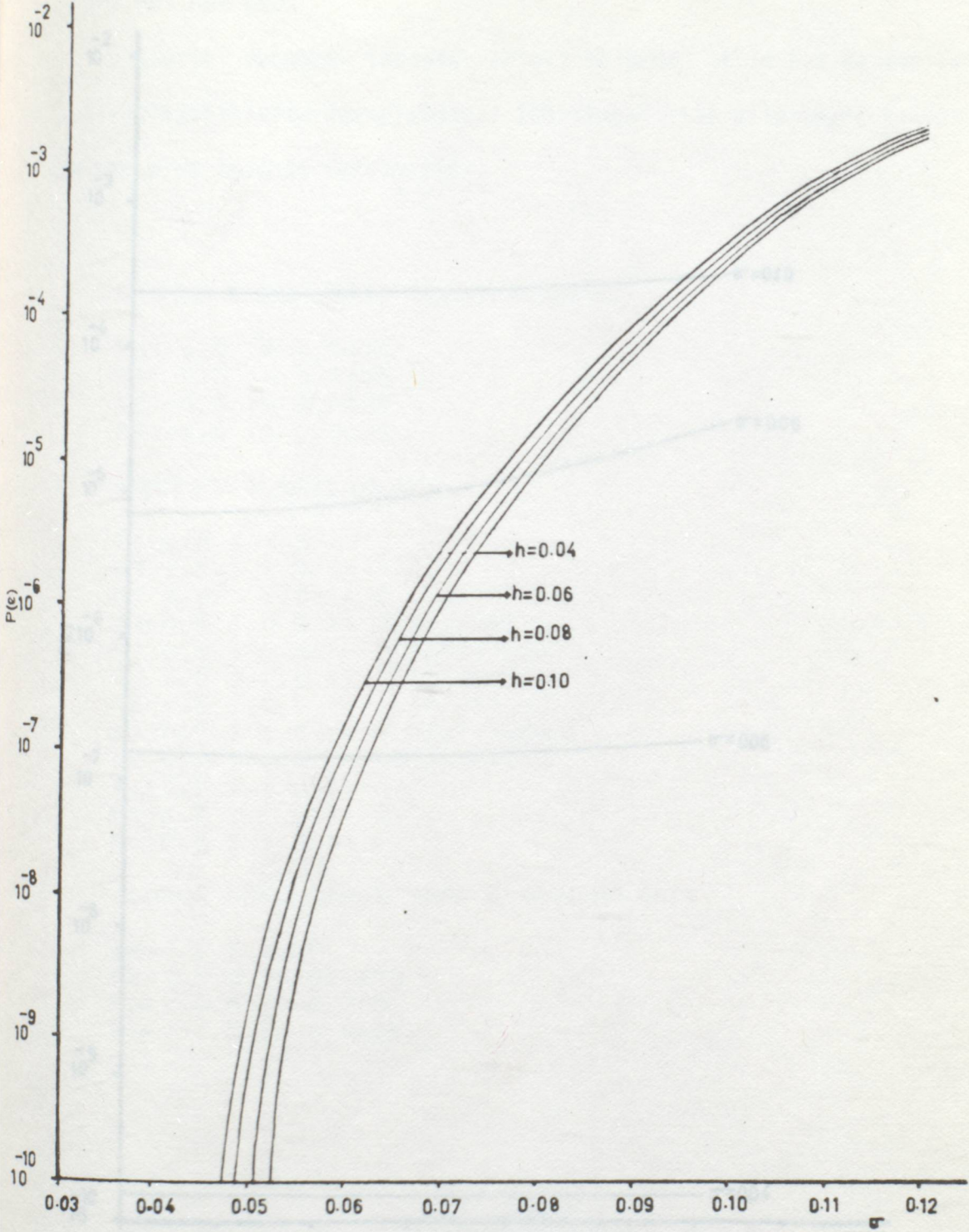
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

BİPOLAR HAT KODU HATA OLASILIK DEĞERLERİ:

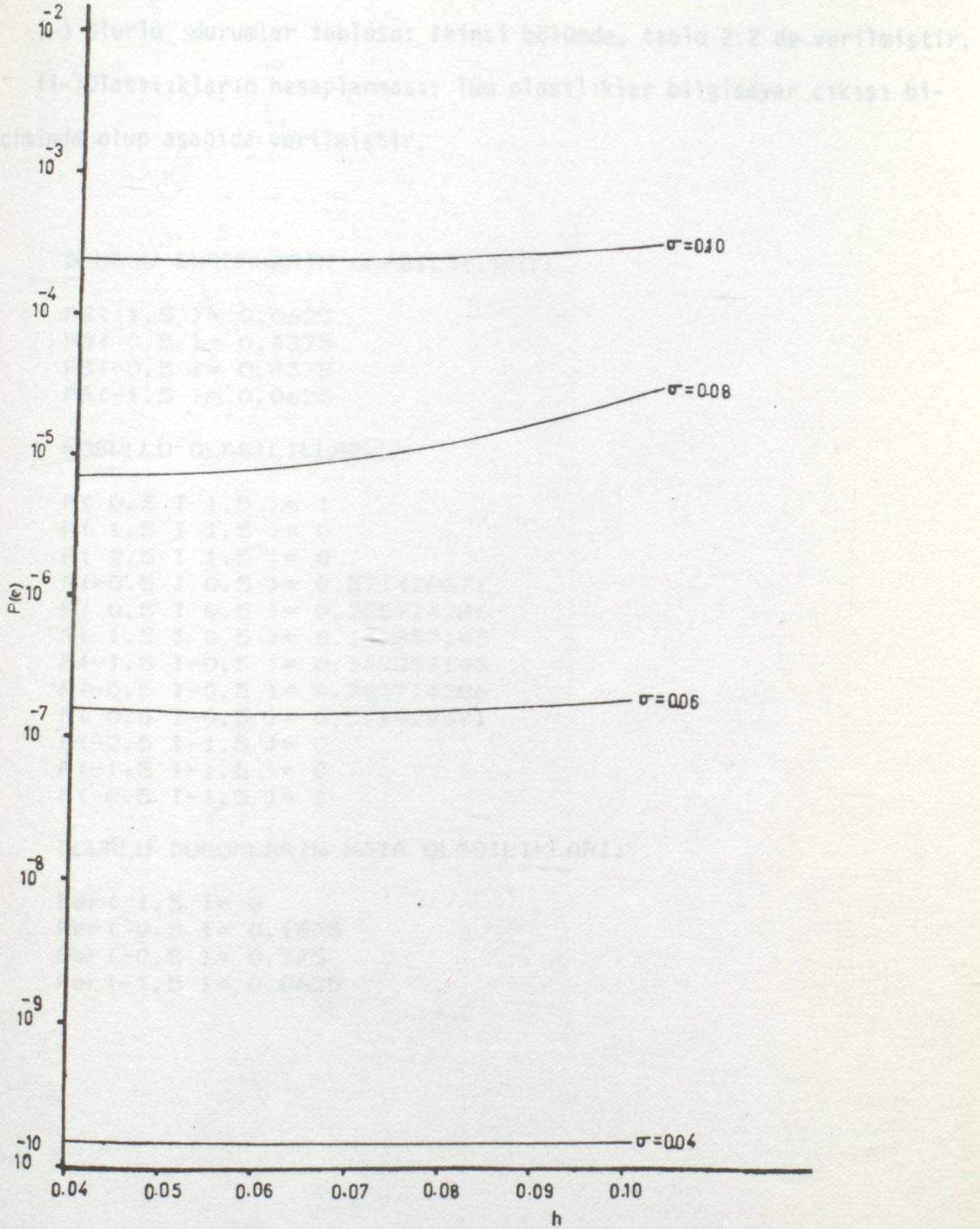
L= 1	h	N	IGO	F(e)
	0.0400	0.1200	15.4048	2.3378E-03
	0.0400	0.1100	16.1605	1.0046E-03
	0.0400	0.1000	16.9884	3.7784E-04
	0.0400	0.0900	17.9035	9.3288E-05
	0.0400	0.0800	18.9266	8.1511E-06
	0.0400	0.0700	20.0864	9.1095E-07
	0.0400	0.0600	21.4254	1.9243E-07
	0.0400	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0400	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0400	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.0500	0.1200	15.4048	2.3474E-03
	0.0500	0.1100	16.1605	1.0169E-03
	0.0500	0.1000	16.9884	3.8635E-04
	0.0500	0.0900	17.9035	9.6493E-05
	0.0500	0.0800	18.9266	8.9337E-06
	0.0500	0.0700	20.0864	9.8377E-07
	0.0500	0.0600	21.4254	1.9226E-07
	0.0500	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0500	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0500	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.0600	0.1200	15.4048	2.3756E-03
	0.0600	0.1100	16.1605	1.0399E-03
	0.0600	0.1000	16.9884	3.9974E-04
	0.0600	0.0900	17.9035	1.0130E-04
	0.0600	0.0800	18.9266	1.0036E-05
	0.0600	0.0700	20.0864	1.0854E-06
	0.0600	0.0600	21.4254	1.9273E-07
	0.0600	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0600	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0600	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.0700	0.1200	15.4048	2.4224E-03
	0.0700	0.1100	16.1605	1.0736E-03
	0.0700	0.1000	16.9884	4.1812E-04
	0.0700	0.0900	17.9035	1.0780E-04
	0.0700	0.0800	18.9266	1.1490E-05
	0.0700	0.0700	20.0864	1.2212E-06
	0.0700	0.0600	21.4254	1.9424E-07
	0.0700	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0700	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0700	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.0800	0.1200	15.4048	2.4879E-03
	0.0800	0.1100	16.1605	1.1182E-03
	0.0800	0.1000	16.9884	4.4166E-04
	0.0800	0.0900	17.9035	1.1610E-04
	0.0800	0.0800	18.9266	1.3340E-05
	0.0800	0.0700	20.0864	1.3984E-06
	0.0800	0.0600	21.4254	1.9680E-07
	0.0800	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0800	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0800	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.0900	0.1200	15.4048	2.5723E-03
	0.0900	0.1100	16.1605	1.1739E-03
	0.0900	0.1000	16.9884	4.7060E-04
	0.0900	0.0900	17.9035	1.2635E-04
	0.0900	0.0800	18.9266	1.5640E-05
	0.0900	0.0700	20.0864	1.6261E-06
	0.0900	0.0600	21.4254	2.0111E-07
	0.0900	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.0900	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.0900	0.0300	27.4460	1.7400E-10
	0.1000	0.1200	15.4048	2.6759E-03
	0.1000	0.1100	16.1605	1.2412E-03
	0.1000	0.1000	16.9884	5.0523E-04
	0.1000	0.0900	17.9035	1.3873E-04
	0.1000	0.0800	18.9266	5.0163E-05
	0.1000	0.0700	20.0864	1.9160E-06
	0.1000	0.0600	21.4254	2.0763E-07
	0.1000	0.0500	23.0090	1.7400E-10
	0.1000	0.0400	24.9472	1.7400E-10
	0.1000	0.0300	27.4460	1.7400E-10



Şekil 3.7. Bipolar hat kodunun çeşitli h değerleri için iG_0 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.8 Bipolar hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil. 3.9. Bipolar hat kodunun çeşitli σ değerleri için h 'a göre hata olasılığı eğrileri.

(1-) Hata olasılık değerleri ve ağırlıkları

PST HAT KODU HATA OLASILIK DEĞERLERİ

2-) PST Hat Kodu

i-) Olurlu durumlar tablosu: İkinci bölümde, tablo 2.2 de verilmiştir.

ii-) Olasılıkların hesaplanması: Tüm olasılıklar bilgisayar çıkışı biçiminde olup aşağıda verilmiştir.

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

PS(1.5)= 0.0625
 PS(0.5)= 0.4375
 PS(-0.5)= 0.4375
 PS(-1.5)= 0.0625

KOSULLU OLASILIKLAR:

P(0.5 I 1.5)= 1
 P(1.5 I 1.5)= 0
 P(2.5 I 1.5)= 0
 P(-0.5 I 0.5)= 0.571428571
 P(0.5 I 0.5)= 0.285714286
 P(1.5 I 0.5)= 0.142857143
 P(-1.5 I -0.5)= 0.142857143
 P(-0.5 I -0.5)= 0.285714286
 P(0.5 I -0.5)= 0.571428571
 P(-2.5 I -1.5)= 0
 P(-1.5 I -1.5)= 0
 P(-0.5 I -1.5)= 1

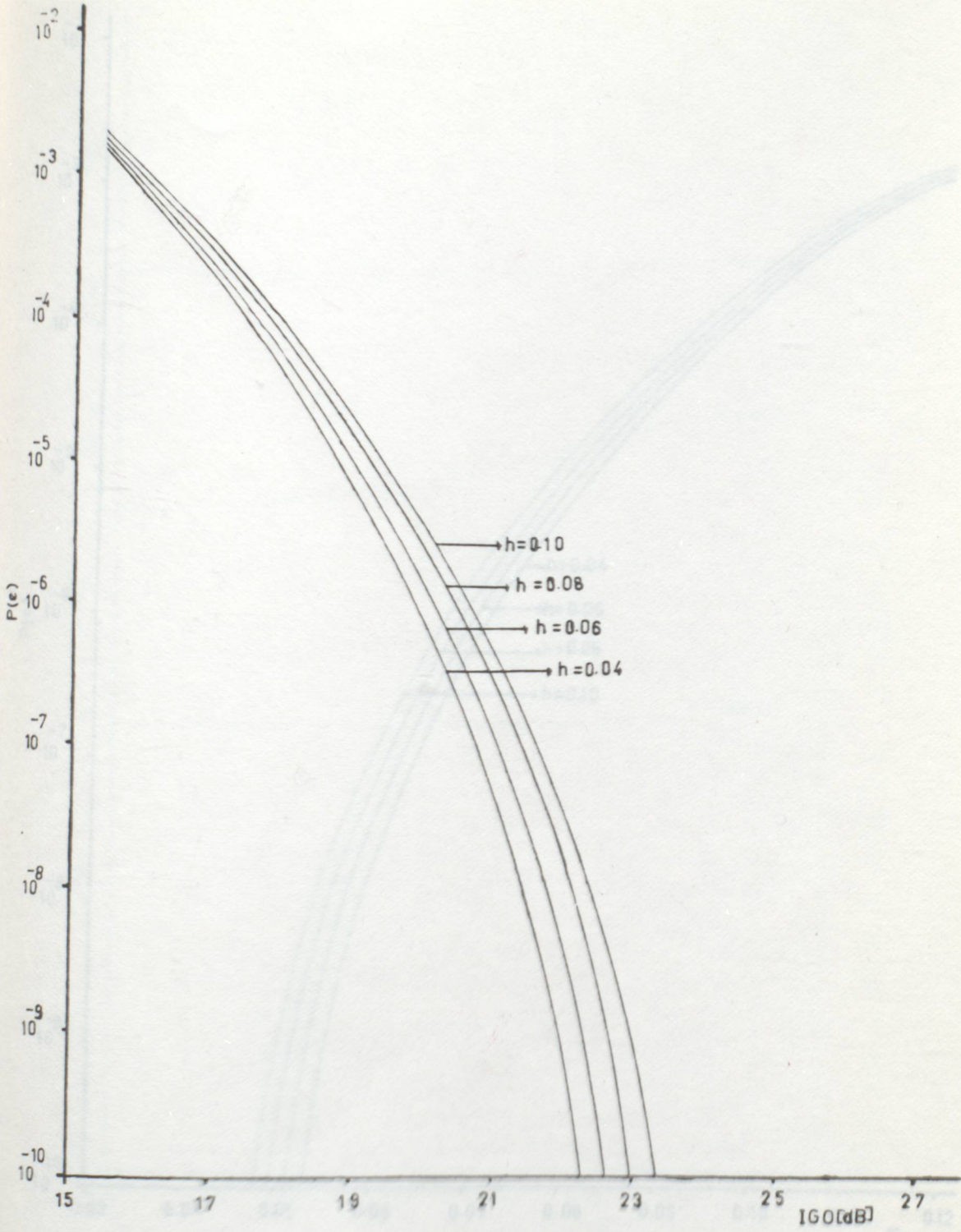
OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

Per(1.5)= 0
 Per(0.5)= 0.1875
 Per(-0.5)= 0.375
 Per(-1.5)= 0.0625

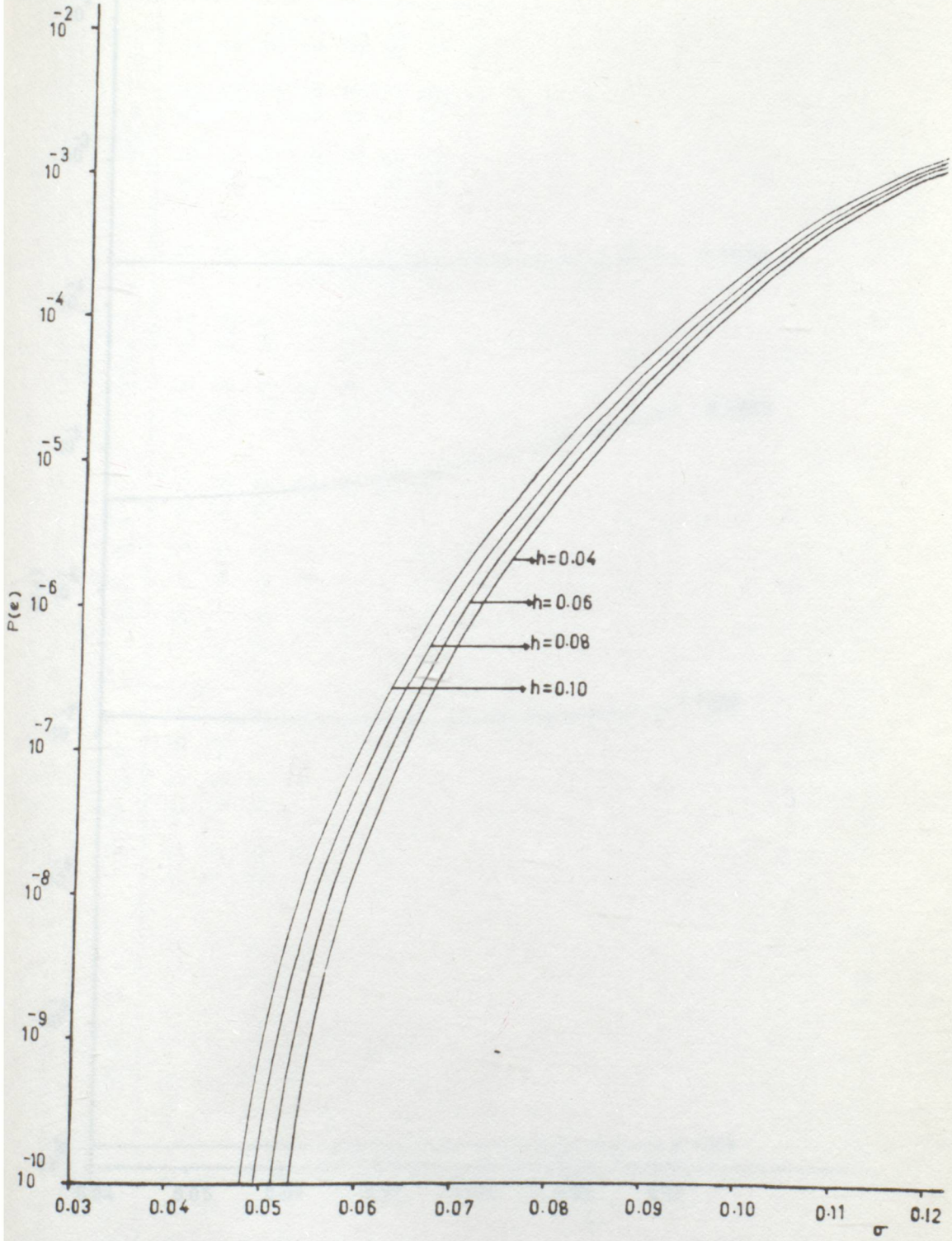
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

PST HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

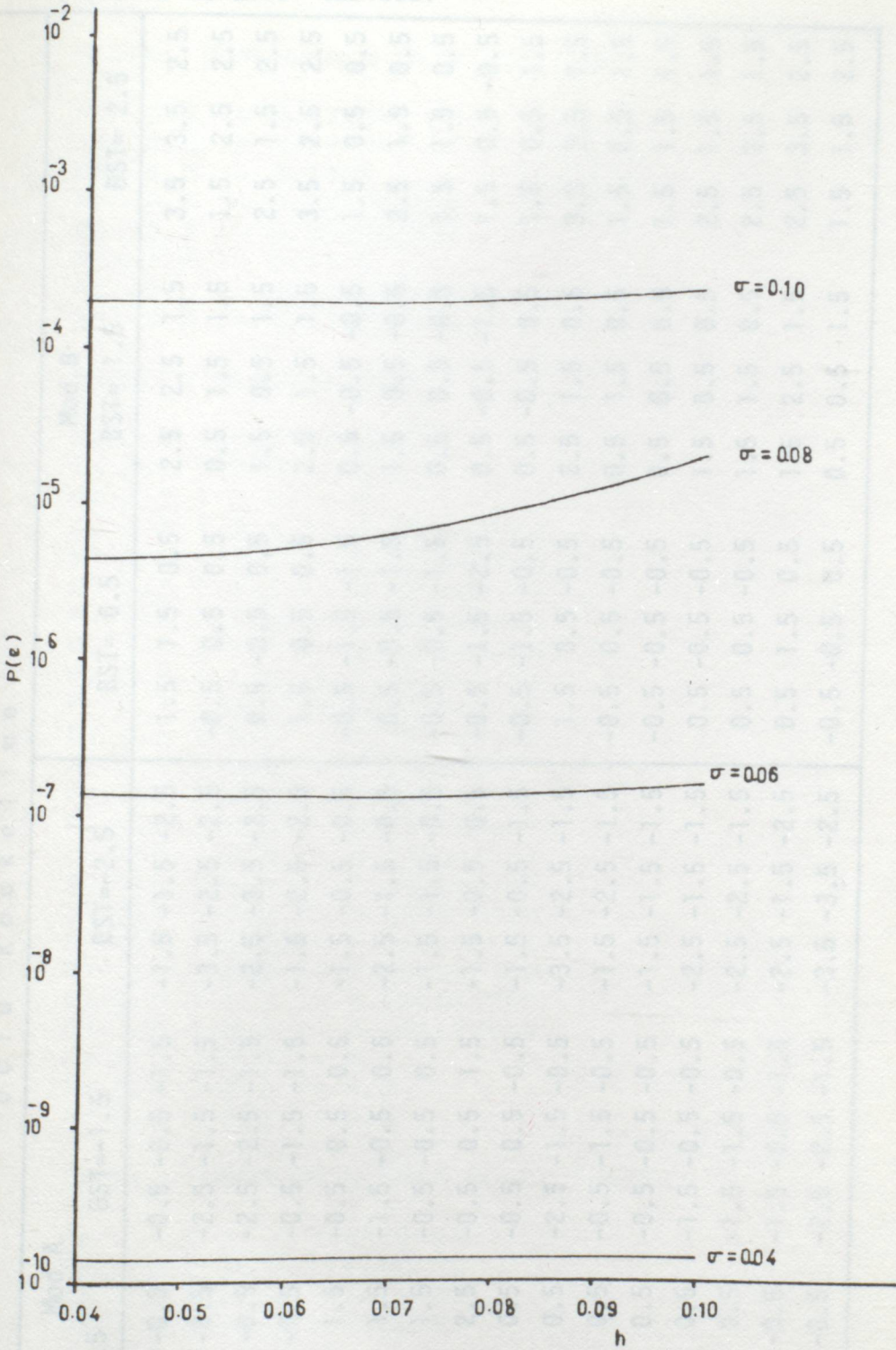
L= 1	h	N	IG0	P(e)
0.0400	0.1200	15.4048	1.8207E-03	
0.0400	0.1100	16.1605	7.8066E-04	
0.0400	0.1000	16.9884	2.9599E-04	
0.0400	0.0900	17.9035	7.0682E-05	
0.0400	0.0800	18.9266	6.2026E-06	
0.0400	0.0700	20.0864	7.3120E-07	
0.0400	0.0600	21.4254	1.4434E-07	
0.0400	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0400	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0400	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.0500	0.1200	15.4048	1.8115E-03	
0.0500	0.1100	16.1605	7.8384E-04	
0.0500	0.1000	16.9884	2.9279E-04	
0.0500	0.0900	17.9035	7.2801E-05	
0.0500	0.0800	18.9266	6.7671E-06	
0.0500	0.0700	20.0864	7.8637E-07	
0.0500	0.0600	21.4254	1.4421E-07	
0.0500	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0500	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0500	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.0600	0.1200	15.4048	1.8206E-03	
0.0600	0.1100	16.1605	7.9687E-04	
0.0600	0.1000	16.9884	3.0173E-04	
0.0600	0.0900	17.9035	7.6241E-05	
0.0600	0.0800	18.9266	7.5827E-06	
0.0600	0.0700	20.0864	8.6357E-07	
0.0600	0.0600	21.4254	1.4456E-07	
0.0600	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0600	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0600	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.0700	0.1200	15.4048	1.8468E-03	
0.0700	0.1100	16.1605	8.1928E-04	
0.0700	0.1000	16.9884	3.1480E-04	
0.0700	0.0900	17.9035	8.1017E-05	
0.0700	0.0800	18.9266	8.6685E-06	
0.0700	0.0700	20.0864	9.1597E-07	
0.0700	0.0600	21.4254	1.4569E-07	
0.0700	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0700	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0700	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.0800	0.1200	15.4048	1.8895E-03	
0.0800	0.1100	16.1605	8.5082E-04	
0.0800	0.1000	16.9884	3.3201E-04	
0.0800	0.0900	17.9035	8.7188E-05	
0.0800	0.0800	18.9266	1.0054E-05	
0.0800	0.0700	20.0864	1.0489E-06	
0.0800	0.0600	21.4254	1.4761E-07	
0.0800	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0800	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0800	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.0900	0.1200	15.4048	1.9482E-03	
0.0900	0.1100	16.1605	8.8328E-04	
0.0900	0.1000	16.9884	3.5343E-04	
0.0900	0.0900	17.9035	9.4846E-05	
0.0900	0.0800	18.9266	1.1778E-05	
0.0900	0.0700	20.0864	1.2196E-06	
0.0900	0.0600	21.4254	1.5084E-07	
0.0900	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.0900	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.0900	0.0300	27.4460	1.4500E-10	
0.1000	0.1200	15.4048	2.0226E-03	
0.1000	0.1100	16.1605	9.3277E-04	
0.1000	0.1000	16.9884	3.7923E-04	
0.1000	0.0900	17.9035	1.0411E-04	
0.1000	0.0800	18.9266	3.7671E-05	
0.1000	0.0700	20.0864	1.4370E-06	
0.1000	0.0600	21.4254	1.5573E-07	
0.1000	0.0500	23.0090	1.4500E-10	
0.1000	0.0400	24.9472	1.4500E-10	
0.1000	0.0300	27.4460	1.4500E-10	



Şekil 3.10 PST hat kodunun çeşitli h değerleri için $1G_0$ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.11 PST hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.12 PST hat kodunun çeşitli σ değerleri için h 'a göre hata olasılığı eğrileri.

3-) 4B-3T Hat Kodu

i-) Olurlu durumlar tablosu:

İkili Kelime	Üçlü Kod kelime					
	Mod A			Mod B		
	BST=-0.5	BST=-1.5	BST=-2.5	BST= 0.5	BST= 1.5	BST= 2.5
0 0 0 0	0.5 0.5 -0.5	-0.5 -0.5 -1.5	-1.5 -1.5 -2.5	1.5 1.5 0.5	2.5 2.5 1.5	3.5 3.5 2.5
0 0 0 1	-1.5 -0.5 -0.5	-2.5 -1.5 -1.5	-3.5 -2.5 -2.5	-0.5 0.5 0.5	0.5 1.5 1.5	1.5 2.5 2.5
0 0 1 0	-0.5 -1.5 -0.5	-2.5 -2.5 -1.5	-2.5 -3.5 -2.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 1.5	2.5 1.5 2.5
0 0 1 1	0.5 -0.5 -0.5	-0.5 -1.5 -1.5	-1.5 -2.5 -2.5	1.5 0.5 0.5	2.5 1.5 1.5	3.5 2.5 2.5
0 1 0 0	0.5 1.5 1.5	-0.5 0.5 0.5	-1.5 -0.5 -0.5	-0.5 -1.5 -1.5	0.5 -0.5 -0.5	1.5 0.5 0.5
0 1 0 1	-0.5 0.5 1.5	-1.5 -0.5 0.5	-2.5 -1.5 -0.5	0.5 -0.5 -1.5	1.5 0.5 -0.5	2.5 1.5 0.5
0 1 1 0	0.5 0.5 1.5	-0.5 -0.5 0.5	-1.5 -1.5 -0.5	-0.5 -0.5 -1.5	0.5 0.5 -0.5	1.5 1.5 0.5
0 1 1 1	0.5 1.5 2.5	-0.5 0.5 1.5	-1.5 -0.5 0.5	-0.5 -1.5 -2.5	0.5 -0.5 -1.5	1.5 0.5 -0.5
1 0 0 0	0.5 1.5 0.5	-0.5 0.5 -0.5	-1.5 -0.5 -1.5	-0.5 -1.5 -0.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 1.5
1 0 0 1	-1.5 -0.5 0.5	-2.5 -1.5 -0.5	-3.5 -2.5 -1.5	1.5 0.5 -0.5	2.5 1.5 0.5	3.5 2.5 1.5
1 0 1 0	0.5 -0.5 0.5	-0.5 -1.5 -0.5	-1.5 -2.5 -1.5	-0.5 0.5 -0.5	0.5 1.5 0.5	1.5 2.5 1.5
1 0 1 1	0.5 0.5 0.5	-0.5 -0.5 -0.5	-1.5 -1.5 -1.5	-0.5 -0.5 -0.5	0.5 0.5 0.5	1.5 1.5 1.5
1 1 0 0	-0.5 0.5 0.5	-1.5 -0.5 -0.5	-2.5 -1.5 -1.5	0.5 -0.5 -0.5	1.5 0.5 0.5	2.5 1.5 1.5
1 1 0 1	-0.5 -0.5 0.5	-1.5 -1.5 -0.5	-2.5 -2.5 -1.5	0.5 0.5 -0.5	1.5 1.5 0.5	2.5 2.5 1.5
1 1 1 0	-0.5 0.5 -0.5	-1.5 -0.5 -1.5	-2.5 -1.5 -2.5	0.5 1.5 0.5	1.5 2.5 1.5	2.5 3.5 2.5
1 1 1 1	-1.5 -1.5 -0.5	-2.5 -2.5 -1.5	-3.5 -3.5 -2.5	-0.5 -0.5 0.5	0.5 0.5 1.5	1.5 1.5 2.5

$$S = \{-3.5, -2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5\}$$

ii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

ii-) Olasılıkların hesaplanması :

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

$PS(3.5) = 3.47222E-03$
 $PS(2.5) = 3.19444E-02$
 $PS(1.5) = 0.1375$
 $PS(0.5) = 0.327083333$
 $PS(-0.5) = 0.327083333$
 $PS(-1.5) = 0.1375$
 $PS(-2.5) = 3.19444E-02$
 $PS(-3.5) = 3.47222E-03$

KOSULLU OLASILIKLAR:

$P(2.5 \text{ I } 3.5) = 0.8$
 $P(3.5 \text{ I } 3.5) = 0.2$
 $P(4.5 \text{ I } 3.5) = 0$
 $P(1.5 \text{ I } 2.5) = 0.652173914$
 $P(2.5 \text{ I } 2.5) = 0.260869565$
 $P(3.5 \text{ I } 2.5) = 8.69565E-02$
 $P(0.5 \text{ I } 1.5) = 0.560606061$
 $P(1.5 \text{ I } 1.5) = 0.287878788$
 $P(2.5 \text{ I } 1.5) = 0.151515151$
 $P(-0.5 \text{ I } 0.5) = 0.435244161$
 $P(0.5 \text{ I } 0.5) = 0.329087049$
 $P(1.5 \text{ I } 0.5) = 0.23566879$
 $P(-1.5 \text{ I } -0.5) = 0.23566879$
 $P(-0.5 \text{ I } -0.5) = 0.329087049$
 $P(0.5 \text{ I } -0.5) = 0.435244161$
 $P(-2.5 \text{ I } -1.5) = 0.151515152$
 $P(-1.5 \text{ I } -1.5) = 0.287878788$
 $P(-0.5 \text{ I } -1.5) = 0.560606061$
 $P(-3.5 \text{ I } -2.5) = 8.69565E-02$
 $P(-2.5 \text{ I } -2.5) = 0.260869565$
 $P(-1.5 \text{ I } -2.5) = 0.652173913$
 $P(-4.5 \text{ I } -3.5) = 0$
 $P(-3.5 \text{ I } -3.5) = 0.2$
 $P(-2.5 \text{ I } -3.5) = 0.8$

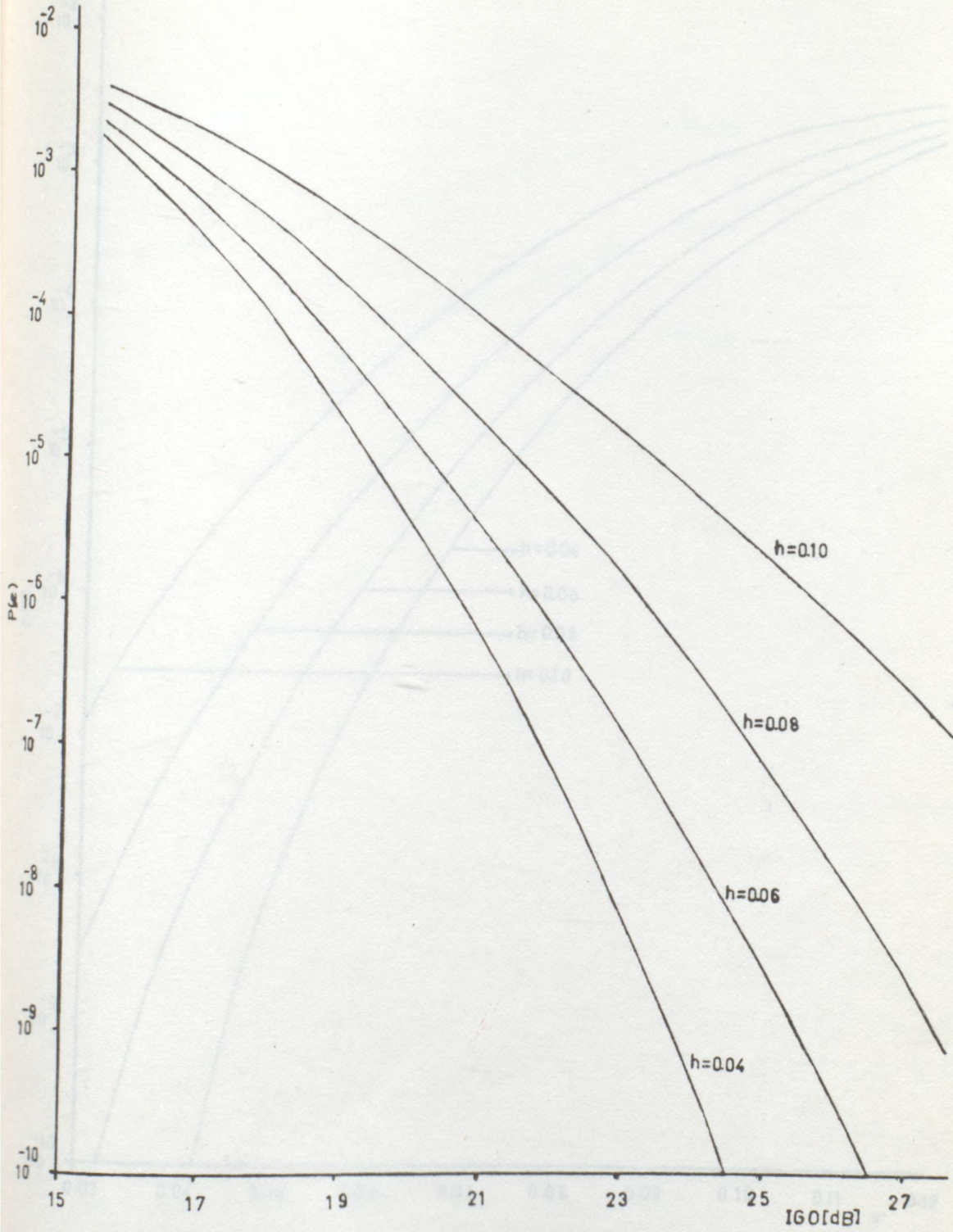
OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

$Per(3.5) = 6.94444E-04$
 $Per(2.5) = 1.11111E-02$
 $Per(1.5) = 6.04167E-02$
 $Per(0.5) = 0.184722222$
 $Per(-0.5) = 0.25$
 $Per(-1.5) = 0.116666667$
 $Per(-2.5) = 2.91667E-02$
 $Per(-3.5) = 3.47222E-03$

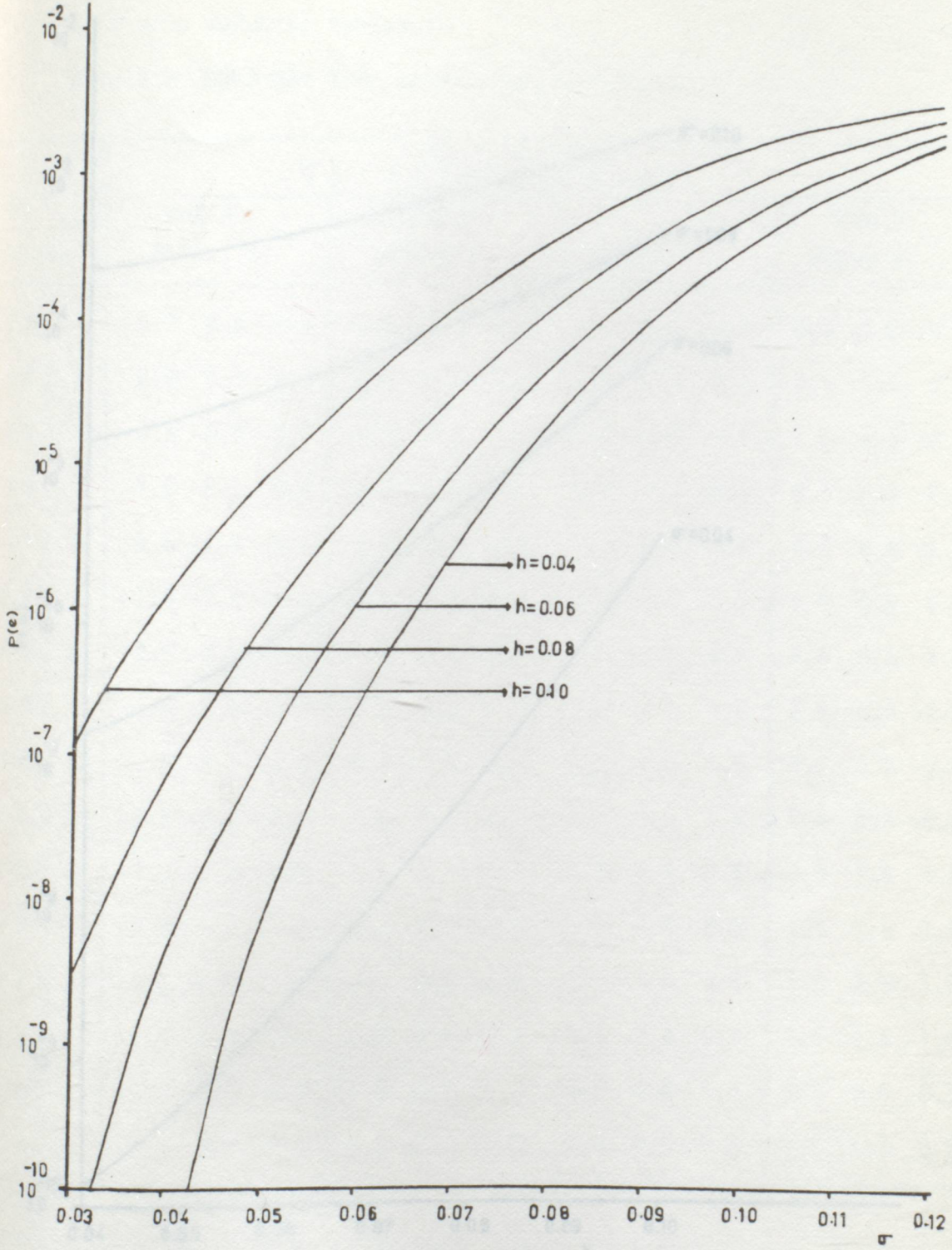
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

4B-3T HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

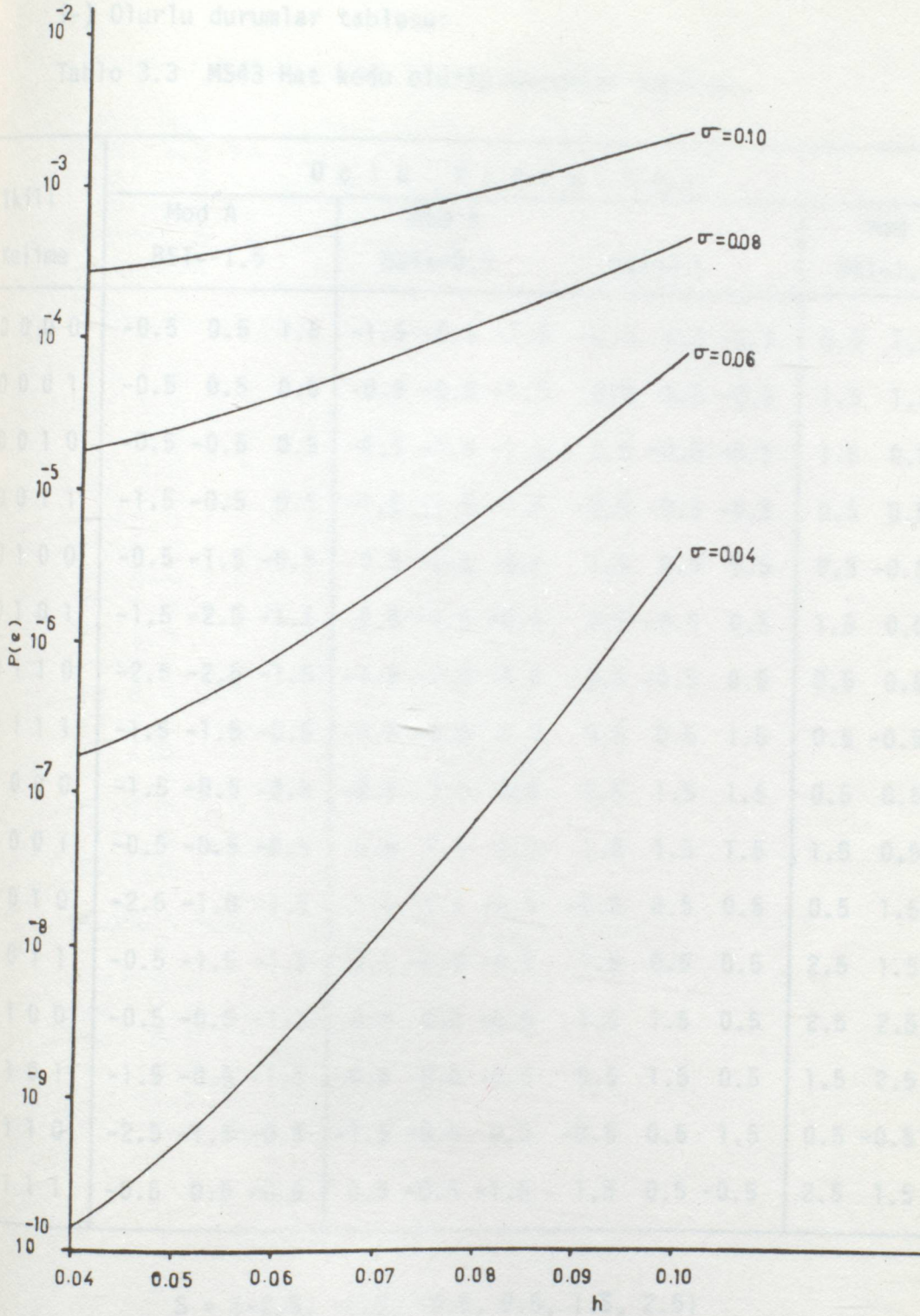
L= 1	h	N	IGO	P(e)
0.0400	0.1200	15.4048	2.4061E-03	
0.0400	0.1100	16.1605	1.1044E-03	
0.0400	0.1000	16.9884	4.4061E-04	
0.0400	0.0900	17.9035	1.2802E-04	
0.0400	0.0800	18.9266	2.6143E-05	
0.0400	0.0700	20.0864	2.1022E-06	
0.0400	0.0600	21.4254	2.4792E-07	
0.0400	0.0500	23.0090	9.4413E-09	
0.0400	0.0400	24.9472	1.5225E-10	
0.0400	0.0300	27.4460	1.5225E-10	
0.0500	0.1200	15.4048	2.6791E-03	
0.0500	0.1100	16.1605	1.2806E-03	
0.0500	0.1000	16.9884	5.2419E-04	
0.0500	0.0900	17.9035	1.6947E-04	
0.0500	0.0800	18.9266	3.8316E-05	
0.0500	0.0700	20.0864	5.6526E-06	
0.0500	0.0600	21.4254	5.0838E-07	
0.0500	0.0500	23.0090	1.2914E-08	
0.0500	0.0400	24.9472	6.8825E-10	
0.0500	0.0300	27.4460	1.5225E-10	
0.0600	0.1200	15.4048	3.0590E-03	
0.0600	0.1100	16.1605	1.5379E-03	
0.0600	0.1000	16.9884	6.7256E-04	
0.0600	0.0900	17.9035	2.3835E-04	
0.0600	0.0800	18.9266	6.2186E-05	
0.0600	0.0700	20.0864	1.1151E-05	
0.0600	0.0600	21.4254	1.2005E-06	
0.0600	0.0500	23.0090	9.1809E-08	
0.0600	0.0400	24.9472	8.4881E-10	
0.0600	0.0300	27.4460	1.5225E-10	
0.0700	0.1200	15.4048	3.5634E-03	
0.0700	0.1100	16.1605	1.8922E-03	
0.0700	0.1000	16.9884	8.8948E-04	
0.0700	0.0900	17.9035	3.4963E-04	
0.0700	0.0800	18.9266	1.0742E-04	
0.0700	0.0700	20.0864	3.2149E-05	
0.0700	0.0600	21.4254	5.0858E-06	
0.0700	0.0500	23.0090	3.9892E-07	
0.0700	0.0400	24.9472	1.3725E-08	
0.0700	0.0300	27.4460	1.5338E-10	
0.0800	0.1200	15.4048	4.2113E-03	
0.0800	0.1100	16.1605	2.3661E-03	
0.0800	0.1000	16.9884	1.1989E-03	
0.0800	0.0900	17.9035	5.2436E-04	
0.0800	0.0800	18.9266	1.8969E-04	
0.0800	0.0700	20.0864	6.2449E-05	
0.0800	0.0600	21.4254	1.3122E-05	
0.0800	0.0500	23.0090	1.6675E-06	
0.0800	0.0400	24.9472	1.6594E-07	
0.0800	0.0300	27.4460	7.9189E-10	
0.0900	0.1200	15.4048	5.0322E-03	
0.0900	0.1100	16.1605	2.9736E-03	
0.0900	0.1000	16.9884	1.6287E-03	
0.0900	0.0900	17.9035	7.9069E-04	
0.0900	0.0800	18.9266	3.3294E-04	
0.0900	0.0700	20.0864	1.2669E-04	
0.0900	0.0600	21.4254	3.6014E-05	
0.0900	0.0500	23.0090	8.7994E-06	
0.0900	0.0400	24.9472	8.4249E-07	
0.0900	0.0300	27.4460	9.5966E-09	
0.1000	0.1200	15.4048	6.0467E-03	
0.1000	0.1100	16.1605	3.7730E-03	
0.1000	0.1000	16.9884	2.2142E-03	
0.1000	0.0900	17.9035	1.1821E-03	
0.1000	0.0800	18.9266	5.9336E-04	
0.1000	0.0700	20.0864	2.5235E-04	
0.1000	0.0600	21.4254	9.2804E-05	
0.1000	0.0500	23.0090	2.9483E-05	
0.1000	0.0400	24.9472	5.7444E-06	
0.1000	0.0300	27.4460	3.7183E-07	



Şekil 3.13 4B-3T Hat kodunun çeşitli h değerleri için IG_0 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.14 4B-3T Hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.15 4B-3T Hat kodunun çeşitli σ değerleri için h 'a göre hata olasılığı eğrileri.

4-) MS43 Hat Kodu $\square$ hesaplanması

i-) Olurlu durumlar tablosu:

Tablo 3.3 MS43 Hat kodu olurlu durumlar tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kod kelime											
	Mod A BST=-1.5			Mod B BST=-0.5 BST=0.5						Mod C BST=1.5		
0 0 0 0	-0.5	0.5	1.5	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5
0 0 0 1	-0.5	0.5	0.5	-0.5	-0.5	-1.5	0.5	0.5	-0.5	1.5	1.5	0.5
0 0 1 0	-0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1.5	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	1.5	0.5	0.5
0 0 1 1	-1.5	-0.5	0.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5
0 1 0 0	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5
0 1 0 1	-1.5	-2.5	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5
0 1 1 0	-2.5	-2.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5
0 1 1 1	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	-0.5
1 0 0 0	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5	0.5	0.5	-0.5
1 0 0 1	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	-0.5
1 0 1 0	-2.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5
1 0 1 1	-0.5	-1.5	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	1.5	0.5	0.5	2.5	1.5	1.5
1 1 0 0	-0.5	-0.5	-1.5	0.5	0.5	-0.5	1.5	1.5	0.5	2.5	2.5	1.5
1 1 0 1	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5	2.5	1.5
1 1 1 0	-2.5	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	0.5
1 1 1 1	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1.5	1.5	0.5	-0.5	2.5	1.5	0.5

$$S = \{-2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5\}$$

ii-) Olasılıkların hesaplanması :

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

$PS(2.5) = 1.86012E-02$
 $PS(1.5) = 0.156994048$
 $PS(0.5) = 0.324404762$
 $PS(-0.5) = 0.324404762$
 $PS(-1.5) = 0.156994048$
 $PS(-2.5) = 1.86012E-02$

KOSULLU OLASILIKLAR:

$P(1.5 | 2.5) = 0.8$
 $P(2.5 | 2.5) = 0.2$
 $P(3.5 | 2.5) = 0$
 $P(0.5 | 1.5) = 0.545023697$
 $P(1.5 | 1.5) = 0.360189574$
 $P(2.5 | 1.5) = 9.47867E-02$
 $P(-0.5 | 0.5) = 0.378440367$
 $P(0.5 | 0.5) = 0.357798165$
 $P(1.5 | 0.5) = 0.263761468$
 $P(-1.5 | -0.5) = 0.263761468$
 $P(-0.5 | -0.5) = 0.357798165$
 $P(0.5 | -0.5) = 0.378440367$
 $P(-2.5 | -1.5) = 9.47867E-02$
 $P(-1.5 | -1.5) = 0.360189573$
 $P(-0.5 | -1.5) = 0.545023697$
 $P(-3.5 | -2.5) = 0$
 $P(-2.5 | -2.5) = 0.2$
 $P(-1.5 | -2.5) = 0.8$

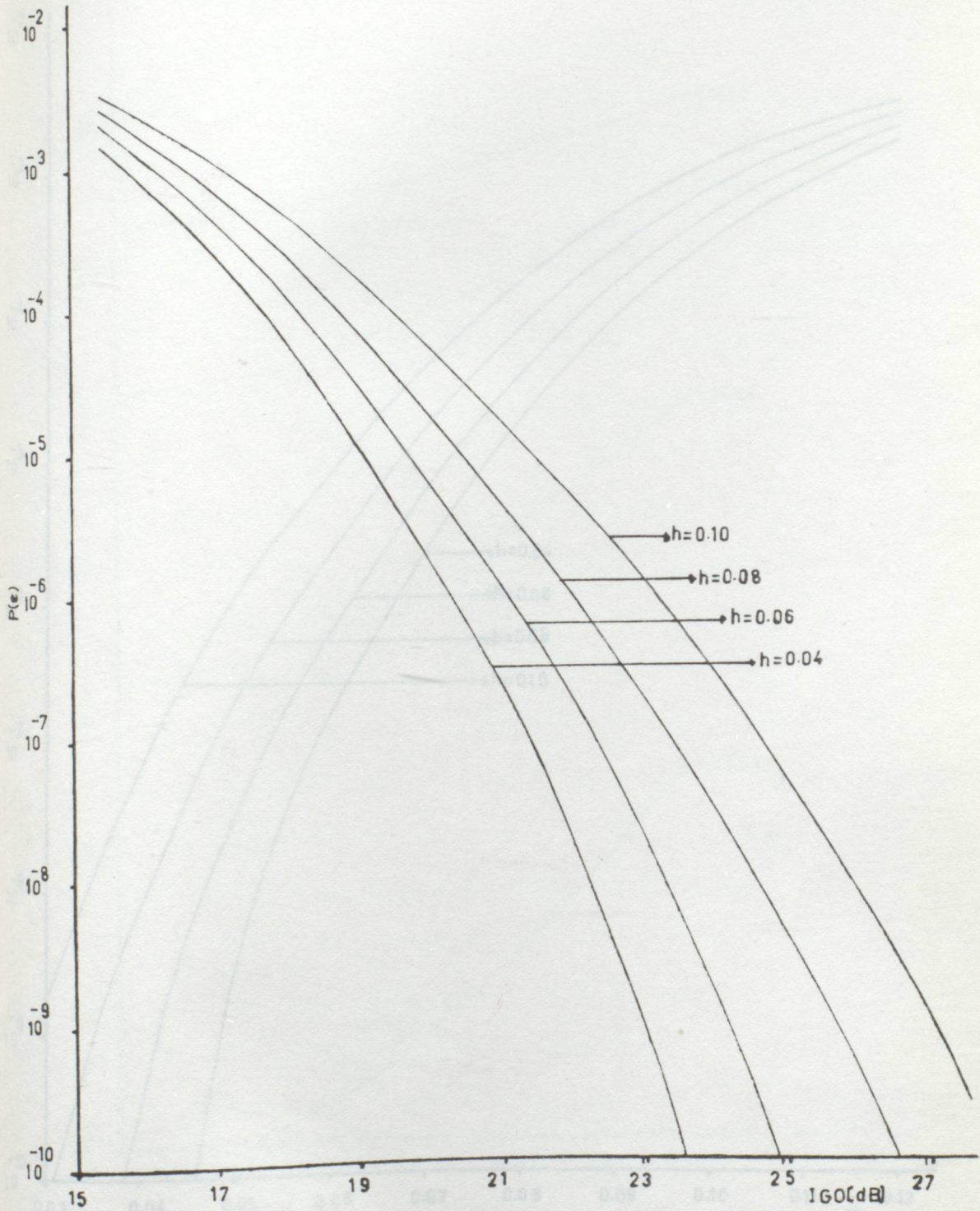
OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

$Per(2.5) = 3.72024E-03$
 $Per(1.5) = 7.14286E-02$
 $Per(0.5) = 0.201636905$
 $Per(-0.5) = 0.238839286$
 $Per(-1.5) = 0.142113095$
 $Per(-2.5) = 1.86012E-02$

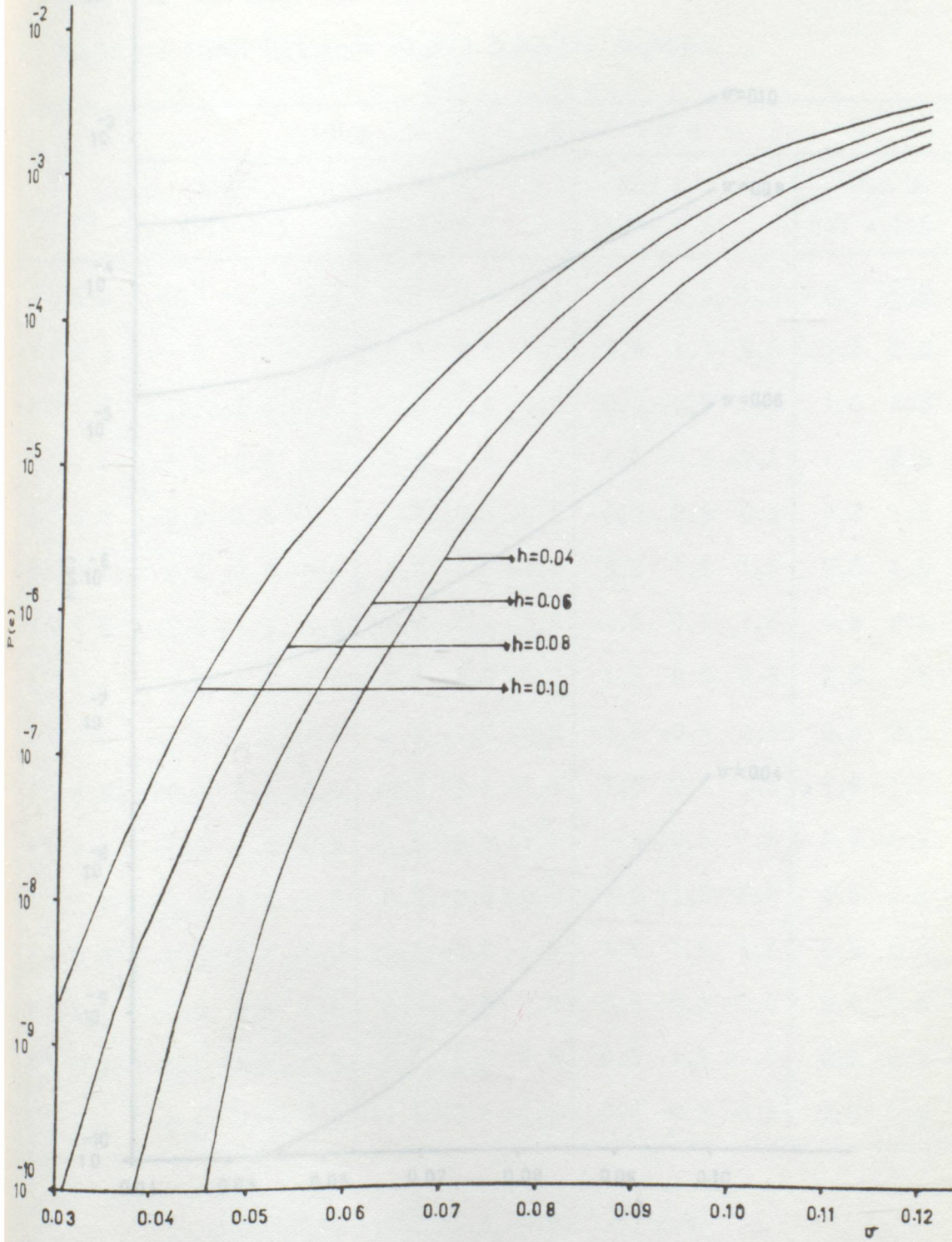
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

MS43 HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

L= 1	h	N	IGO	P(e)
	0.0400	0.1200	15.4048	2.4278E-03
	0.0400	0.1100	16.1605	1.1011E-03
	0.0400	0.1000	16.9884	4.3380E-04
	0.0400	0.0900	17.9035	1.2338E-04
	0.0400	0.0800	18.9266	2.4026E-05
	0.0400	0.0700	20.0864	1.5767E-06
	0.0400	0.0600	21.4254	2.3242E-07
	0.0400	0.0500	23.0090	3.0460E-09
	0.0400	0.0400	24.9472	1.5691E-10
	0.0400	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.0500	0.1200	15.4048	2.6571E-03
	0.0500	0.1100	16.1605	1.2456E-03
	0.0500	0.1000	16.9884	4.9224E-04
	0.0500	0.0900	17.9035	1.5295E-04
	0.0500	0.0800	18.9266	3.1487E-05
	0.0500	0.0700	20.0864	3.0882E-06
	0.0500	0.0600	21.4254	2.8267E-07
	0.0500	0.0500	23.0090	3.3605E-09
	0.0500	0.0400	24.9472	1.5691E-10
	0.0500	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.0600	0.1200	15.4048	2.9705E-03
	0.0600	0.1100	16.1605	1.4491E-03
	0.0600	0.1000	16.9884	6.0198E-04
	0.0600	0.0900	17.9035	1.9852E-04
	0.0600	0.0800	18.9266	4.4560E-05
	0.0600	0.0700	20.0864	5.3032E-06
	0.0600	0.0600	21.4254	4.4048E-07
	0.0600	0.0500	23.0090	6.0871E-08
	0.0600	0.0400	24.9472	1.5865E-10
	0.0600	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.0700	0.1200	15.4048	3.3781E-03
	0.0700	0.1100	16.1605	1.7205E-03
	0.0700	0.1000	16.9884	7.5489E-04
	0.0700	0.0900	17.9035	2.6711E-04
	0.0700	0.0800	18.9266	6.6948E-05
	0.0700	0.0700	20.0864	1.8921E-05
	0.0700	0.0600	21.4254	1.3700E-06
	0.0700	0.0500	23.0090	7.3435E-08
	0.0700	0.0400	24.9472	3.0283E-09
	0.0700	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.0800	0.1200	15.4048	3.8911E-03
	0.0800	0.1100	16.1605	2.0731E-03
	0.0800	0.1000	16.9884	9.6377E-04
	0.0800	0.0900	17.9035	3.6853E-04
	0.0800	0.0800	18.9266	1.0449E-04
	0.0800	0.0700	20.0864	2.8127E-05
	0.0800	0.0600	21.4254	2.6863E-06
	0.0800	0.0500	23.0090	1.4168E-07
	0.0800	0.0400	24.9472	3.2440E-09
	0.0800	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.0900	0.1200	15.4048	4.5291E-03
	0.0900	0.1100	16.1605	2.5058E-03
	0.0900	0.1000	16.9884	1.2442E-03
	0.0900	0.0900	17.9035	5.1598E-04
	0.0900	0.0800	18.9266	1.6611E-04
	0.0900	0.0700	20.0864	4.6637E-05
	0.0900	0.0600	21.4254	6.2542E-06
	0.0900	0.0500	23.0090	9.0663E-07
	0.0900	0.0400	24.9472	7.0306E-09
	0.0900	0.0300	27.4460	1.5691E-10
	0.1000	0.1200	15.4048	5.3065E-03
	0.1000	0.1100	16.1605	3.0737E-03
	0.1000	0.1000	16.9884	1.4161E-03
	0.1000	0.0900	17.9035	7.2620E-04
	0.1000	0.0800	18.9266	2.9023E-04
	0.1000	0.0700	20.0864	8.2079E-05
	0.1000	0.0600	21.4254	1.5201E-05
	0.1000	0.0500	23.0090	2.0466E-06
	0.1000	0.0400	24.9472	3.9363E-08
	0.1000	0.0300	27.4460	3.0760E-09



Şekil 3.16 MS43 Hat kodunun çeşitli h değerleri için I_{G0} 'ya göre hata olasılığı eğrileri.

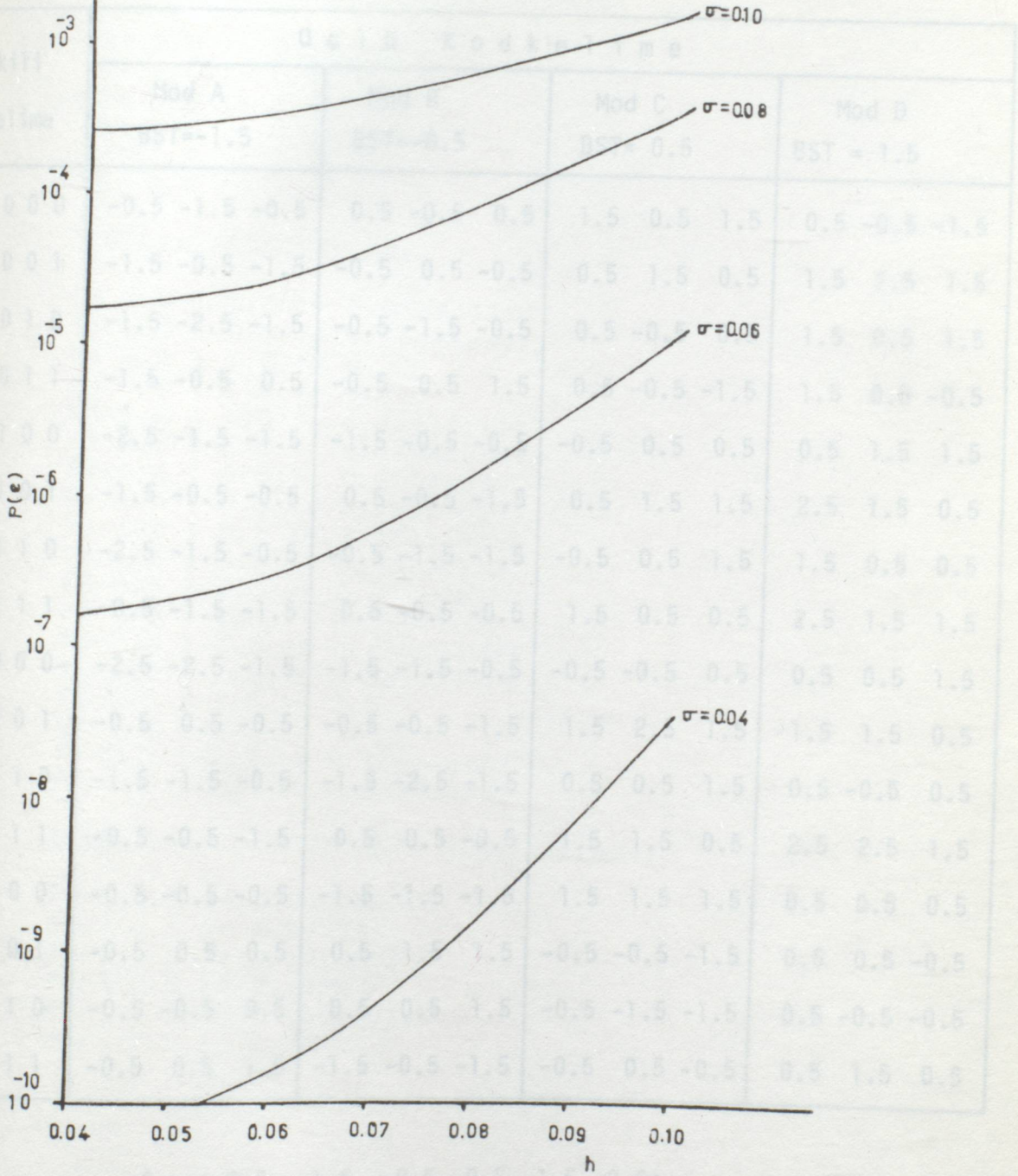


Şekil 3.17 MS43 Hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.

5- FOMOT Hat kodu

1- FOMOT durumlar tablosu:

Tablo 3.4 FOMOT Hat kodu durumlar tablosu.



Şekil 3.18 MS43 Hat kodunun çeşitli σ değerleri h 'a göre hata olasılığı eğrileri.

5-)FOMOT Hat kodu

i-)Olurlu durumlar tablosu:

Tablo 3.4 FOMOT Hat kodu olurlu durumlar tablosu.

İkili Kelime	Üç l ü K o d k e l i m e											
	Mod A BST=-1.5			Mod B BST=-0.5			Mod C BST= 0.5			Mod D BST = 1.5		
0 0 0 0	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5
0 0 0 1	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5	2.5	1.5
0 0 1 0	-1.5	-2.5	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	1.5
0 0 1 1	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	-1.5	1.5	0.5	-0.5
0 1 0 0	-2.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5
0 1 0 1	-1.5	-0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1.5	0.5	1.5	1.5	2.5	1.5	0.5
0 1 1 0	-2.5	-1.5	-0.5	-0.5	-1.5	-1.5	-0.5	0.5	1.5	1.5	0.5	0.5
0 1 1 1	-0.5	-1.5	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	1.5	0.5	0.5	2.5	1.5	1.5
1 0 0 0	-2.5	-2.5	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5
1 0 0 1	-0.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-1.5	1.5	2.5	1.5	1.5	1.5	0.5
1 0 1 0	-1.5	-1.5	-0.5	-1.5	-2.5	-1.5	0.5	0.5	1.5	0.5	-0.5	0.5
1 0 1 1	-0.5	-0.5	-1.5	0.5	0.5	-0.5	1.5	1.5	0.5	2.5	2.5	1.5
1 1 0 0	-0.5	-0.5	-0.5	-1.5	-1.5	-1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.5	0.5
1 1 0 1	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5	-0.5	-0.5	-1.5	0.5	0.5	-0.5
1 1 1 0	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	-0.5	-1.5	-1.5	0.5	-0.5	-0.5
1 1 1 1	-0.5	0.5	1.5	-1.5	-0.5	-1.5	-0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5

$$S = \{-2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5\}$$

iii-) Hata olasılık değerleri ve

ii-) Olasılıkların hesaplanması :

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

PS(2.5) = 0.03125
 PS(1.5) = 0.1875
 PS(0.5) = 0.28125
 PS(-0.5) = 0.28125
 PS(-1.5) = 0.1875
 PS(-2.5) = 0.03125

KOSULLU OLASILIKLAR:

P(1.5 I 2.5) = 0.833333333
 P(2.5 I 2.5) = 0.166666667
 P(3.5 I 2.5) = 0
 P(0.5 I 1.5) = 0.5
 P(1.5 I 1.5) = 0.361111111
 P(2.5 I 1.5) = 0.138888889
 P(-0.5 I 0.5) = 0.37037037
 P(0.5 I 0.5) = 0.296296296
 P(1.5 I 0.5) = 0.333333333
 P(-1.5 I -0.5) = 0.333333333
 P(-0.5 I -0.5) = 0.296296296
 P(0.5 I -0.5) = 0.37037037
 P(-2.5 I -1.5) = 0.138888889
 P(-1.5 I -1.5) = 0.361111111
 P(-0.5 I -1.5) = 0.5
 P(-3.5 I -2.5) = 0
 P(-2.5 I -2.5) = 0.166666667
 P(-1.5 I -2.5) = 0.833333333

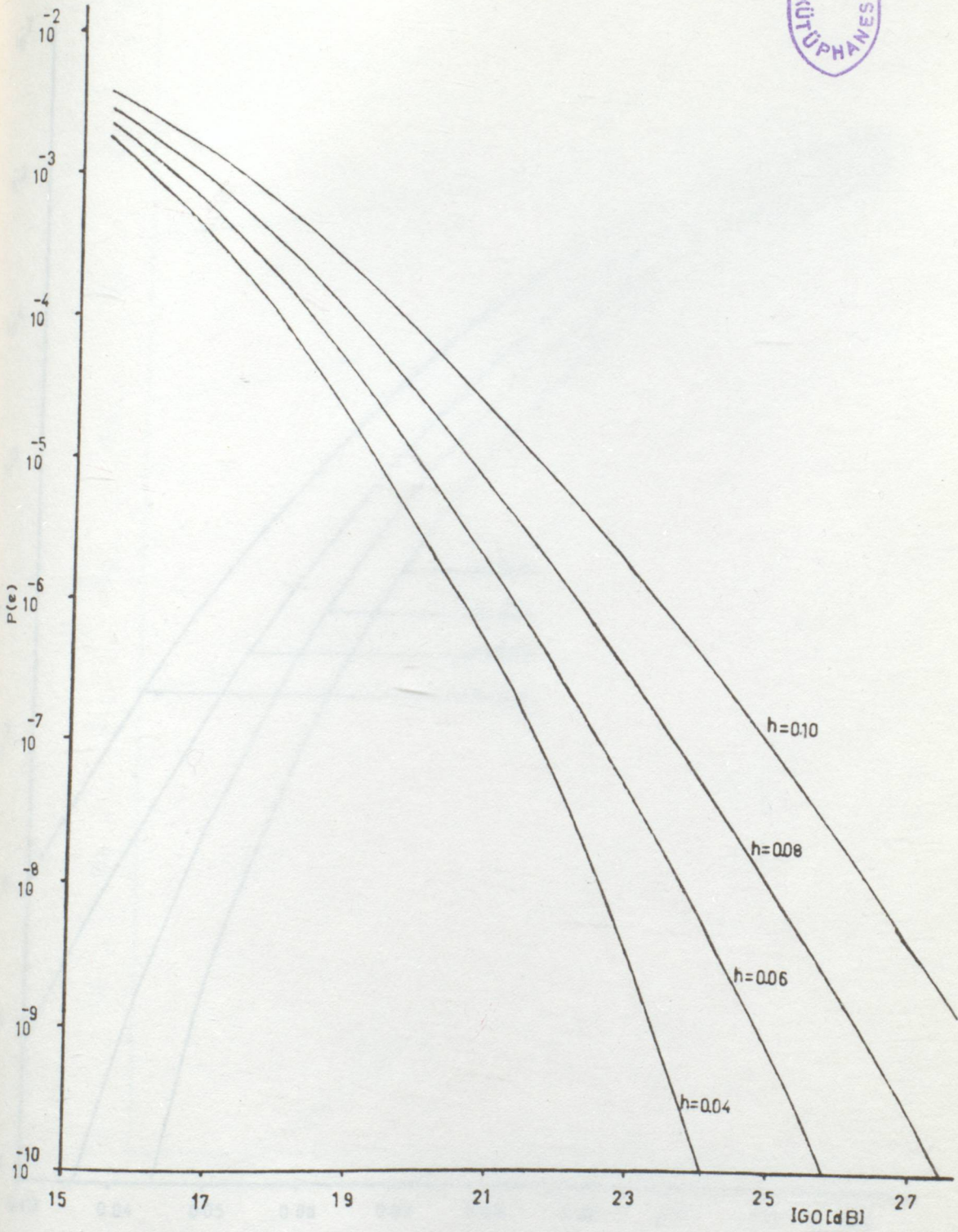
OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

Per(2.5) = 5.20833E-03
 Per(1.5) = 0.09375
 Per(0.5) = 0.177083333
 Per(-0.5) = 0.1875
 Per(-1.5) = 0.161458333
 Per(-2.5) = 0.03125

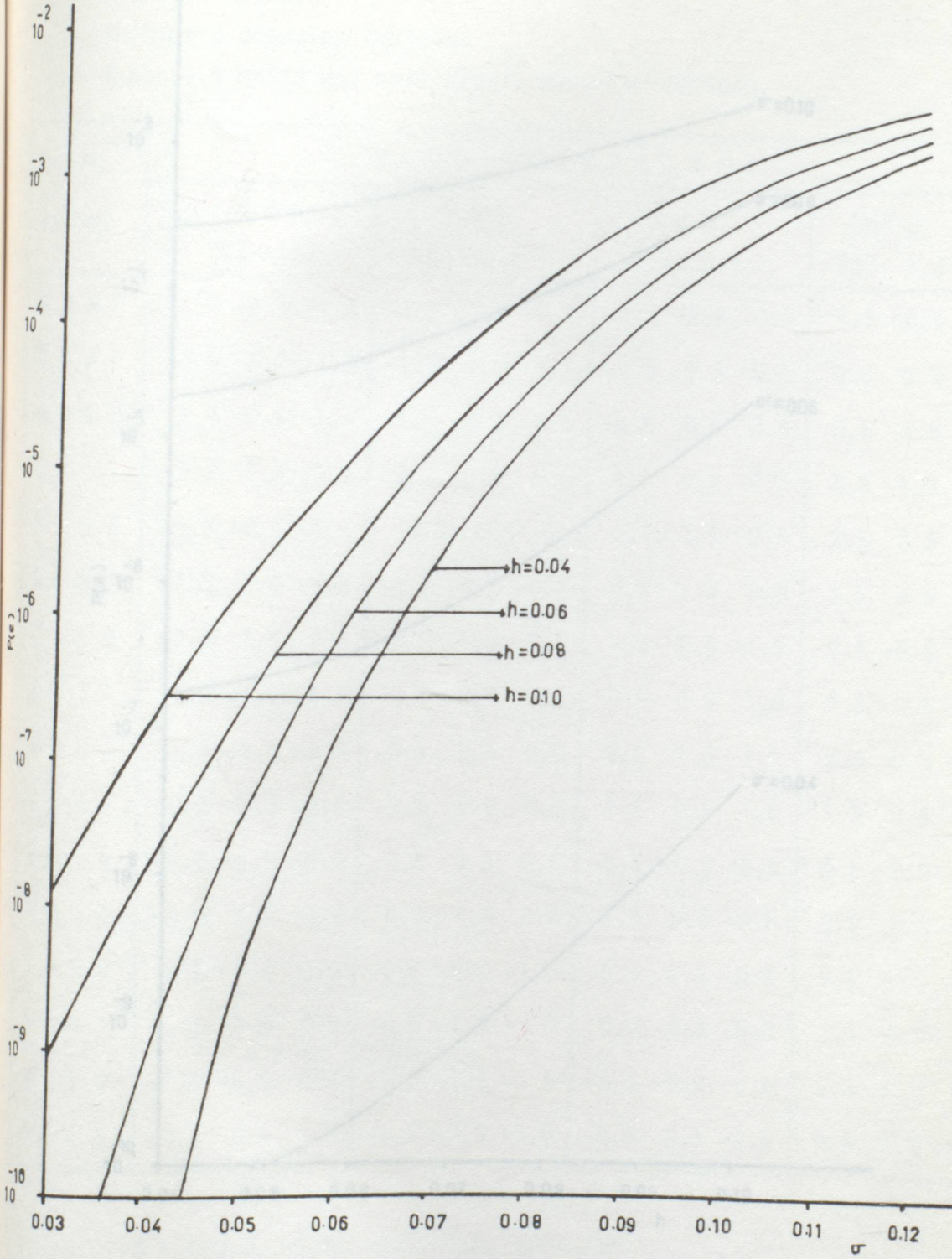
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri :

FOMOT HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

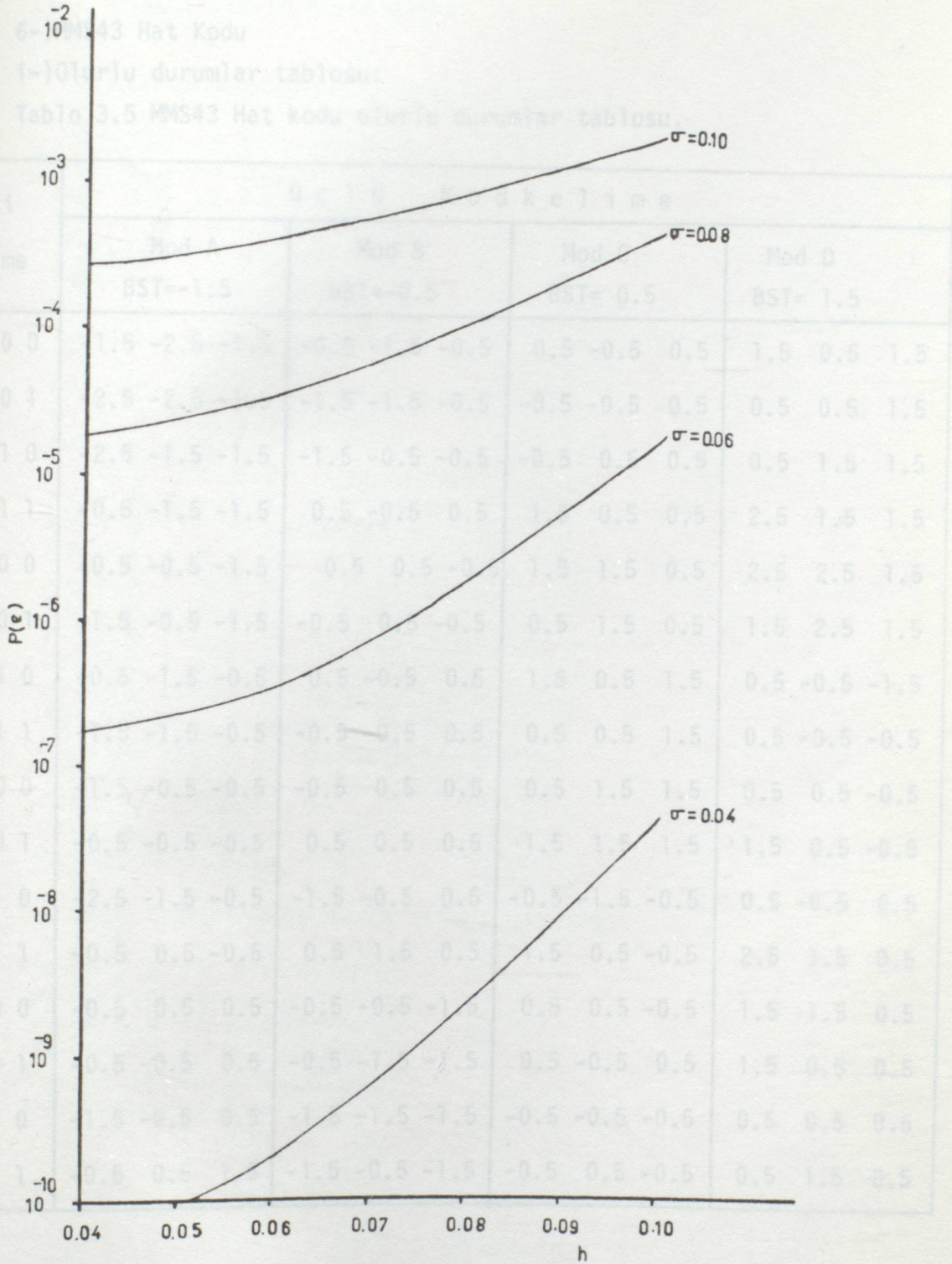
L= 1	h	N	IG0	P(e)
	0.0400	0.1200	15.4048	2.4626E-03
	0.0400	0.1100	16.1605	1.1336E-03
	0.0400	0.1000	16.9884	4.5114E-04
	0.0400	0.0900	17.9035	1.3176E-04
	0.0400	0.0800	18.9266	2.9063E-05
	0.0400	0.0700	20.0864	1.7910E-06
	0.0400	0.0600	21.4254	2.3869E-07
	0.0400	0.0500	23.0090	4.1941E-09
	0.0400	0.0400	24.9472	1.5225E-10
	0.0400	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.0500	0.1200	15.4048	2.7584E-03
	0.0500	0.1100	16.1605	1.3176E-03
	0.0500	0.1000	16.9884	5.2823E-04
	0.0500	0.0900	17.9035	1.6971E-04
	0.0500	0.0800	18.9266	3.8714E-05
	0.0500	0.0700	20.0864	3.8192E-06
	0.0500	0.0600	21.4254	3.0712E-07
	0.0500	0.0500	23.0090	4.6270E-09
	0.0500	0.0400	24.9472	1.5225E-10
	0.0500	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.0600	0.1200	15.4048	3.1588E-03
	0.0600	0.1100	16.1605	1.5770E-03
	0.0600	0.1000	16.9884	6.6843E-04
	0.0600	0.0900	17.9035	2.2851E-04
	0.0600	0.0800	18.9266	5.5801E-05
	0.0600	0.0700	20.0864	6.7703E-06
	0.0600	0.0600	21.4254	5.2291E-07
	0.0600	0.0500	23.0090	8.0304E-08
	0.0600	0.0400	24.9472	1.5468E-10
	0.0600	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.0700	0.1200	15.4048	3.6774E-03
	0.0700	0.1100	16.1605	1.9228E-03
	0.0700	0.1000	16.9884	8.6453E-04
	0.0700	0.0900	17.9035	3.1759E-04
	0.0700	0.0800	18.9266	8.5331E-05
	0.0700	0.0700	20.0864	2.4815E-05
	0.0700	0.0600	21.4254	1.8120E-06
	0.0700	0.0500	23.0090	9.7944E-08
	0.0700	0.0400	24.9472	4.1722E-09
	0.0700	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.0800	0.1200	15.4048	4.3287E-03
	0.0800	0.1100	16.1605	2.3730E-03
	0.0800	0.1000	16.9884	1.1337E-03
	0.0800	0.0900	17.9035	4.5013E-04
	0.0800	0.0800	18.9266	1.3521E-04
	0.0800	0.0700	20.0864	3.7294E-05
	0.0800	0.0600	21.4254	3.6270E-06
	0.0800	0.0500	23.0090	1.9329E-07
	0.0800	0.0400	24.9472	4.4742E-09
	0.0800	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.0900	0.1200	15.4048	5.1404E-03
	0.0900	0.1100	16.1605	2.9299E-03
	0.0900	0.1000	16.9884	1.4966E-03
	0.0900	0.0900	17.9035	6.4390E-04
	0.0900	0.0800	18.9266	2.1756E-04
	0.0900	0.0700	20.0864	6.2492E-05
	0.0900	0.0600	21.4254	8.5615E-06
	0.0900	0.0500	23.0090	1.2633E-06
	0.0900	0.0400	24.9472	9.7614E-09
	0.0900	0.0300	27.4460	1.5225E-10
	0.1000	0.1200	15.4048	6.1310E-03
	0.1000	0.1100	16.1605	3.6596E-03
	0.1000	0.1000	16.9884	1.9802E-03
	0.1000	0.0900	17.9035	9.2142E-04
	0.1000	0.0800	18.9266	3.7228E-04
	0.1000	0.0700	20.0864	1.1089E-04
	0.1000	0.0600	21.4254	2.0958E-05
	0.1000	0.0500	23.0090	2.8563E-06
	0.1000	0.0400	24.9472	5.5039E-08
	0.1000	0.0300	27.4460	4.2389E-09



Şekil 3.19 FOMOT Hat kodunun çeşitli h değerleri için IG_0 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3. 20 FOMOT Hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.21 FOMOT Hat kodunun çeşitli σ değerleri için h 'a göre hata olasılığı eğrileri.

6-)MMS43 Hat Kodu

i-)Olurlu durumlar tablosu:

Tablo 3.5 MMS43 Hat kodu olurlu durumlar tablosu.

İkili Kelime	Üçlü Kod kelime			
	Mod A BST=-1.5	Mod B BST=-0.5	Mod C BST= 0.5	Mod D BST= 1.5
0 0 0 0	-1.5 -2.5 -1.5	-0.5 -1.5 -0.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 1.5
0 0 0 1	-2.5 -2.5 -1.5	-1.5 -1.5 -0.5	-0.5 -0.5 0.5	0.5 0.5 1.5
0 0 1 0	-2.5 -1.5 -1.5	-1.5 -0.5 -0.5	-0.5 0.5 0.5	0.5 1.5 1.5
0 0 1 1	-0.5 -1.5 -1.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 0.5	2.5 1.5 1.5
0 1 0 0	-0.5 -0.5 -1.5	0.5 0.5 -0.5	1.5 1.5 0.5	2.5 2.5 1.5
0 1 0 1	-1.5 -0.5 -1.5	-0.5 0.5 -0.5	0.5 1.5 0.5	1.5 2.5 1.5
0 1 1 0	-0.5 -1.5 -0.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 1.5	0.5 -0.5 -1.5
0 1 1 1	-1.5 -1.5 -0.5	-0.5 -0.5 0.5	0.5 0.5 1.5	0.5 -0.5 -0.5
1 0 0 0	-1.5 -0.5 -0.5	-0.5 0.5 0.5	0.5 1.5 1.5	0.5 0.5 -0.5
1 0 0 1	-0.5 -0.5 -0.5	0.5 0.5 0.5	1.5 1.5 1.5	1.5 0.5 -0.5
1 0 1 0	-2.5 -1.5 -0.5	-1.5 -0.5 0.5	-0.5 -1.5 -0.5	0.5 -0.5 0.5
1 0 1 1	-0.5 0.5 -0.5	0.5 1.5 0.5	1.5 0.5 -0.5	2.5 1.5 0.5
1 1 0 0	-0.5 0.5 0.5	-0.5 -0.5 -1.5	0.5 0.5 -0.5	1.5 1.5 0.5
1 1 0 1	-0.5 -0.5 0.5	-0.5 -1.5 -1.5	0.5 -0.5 0.5	1.5 0.5 0.5
1 1 1 0	-1.5 -0.5 0.5	-1.5 -1.5 -1.5	-0.5 -0.5 -0.5	0.5 0.5 0.5
1 1 1 1	-0.5 0.5 1.5	-1.5 -0.5 -1.5	-0.5 0.5 -0.5	0.5 1.5 0.5

$$S = \{-2.5, -1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 2.5\}$$

ii-) Olasılıkların hesaplanması :

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

$PS(2.5) = 0.016025641$
 $PS(1.5) = 0.155448718$
 $PS(0.5) = 0.328525641$
 $PS(-0.5) = 0.328525641$
 $PS(-1.5) = 0.155448718$
 $PS(-2.5) = 0.016025641$

KOSULLU OLASILIKLAR:

$P(1.5 \text{ I } 2.5) = 0.8$
 $P(2.5 \text{ I } 2.5) = 0.2$
 $P(3.5 \text{ I } 2.5) = 0$
 $P(0.5 \text{ I } 1.5) = 0.567010309$
 $P(1.5 \text{ I } 1.5) = 0.350515464$
 $P(2.5 \text{ I } 1.5) = 8.24742E-02$
 $P(-0.5 \text{ I } 0.5) = 0.365853659$
 $P(0.5 \text{ I } 0.5) = 0.365853659$
 $P(1.5 \text{ I } 0.5) = 0.268292683$
 $P(-1.5 \text{ I } -0.5) = 0.268292683$
 $P(-0.5 \text{ I } -0.5) = 0.365853659$
 $P(0.5 \text{ I } -0.5) = 0.365853659$
 $P(-2.5 \text{ I } -1.5) = 8.24742E-02$
 $P(-1.5 \text{ I } -1.5) = 0.350515464$
 $P(-0.5 \text{ I } -1.5) = 0.567010309$
 $P(-3.5 \text{ I } -2.5) = 0$
 $P(-2.5 \text{ I } -2.5) = 0.2$
 $P(-1.5 \text{ I } -2.5) = 0.8$

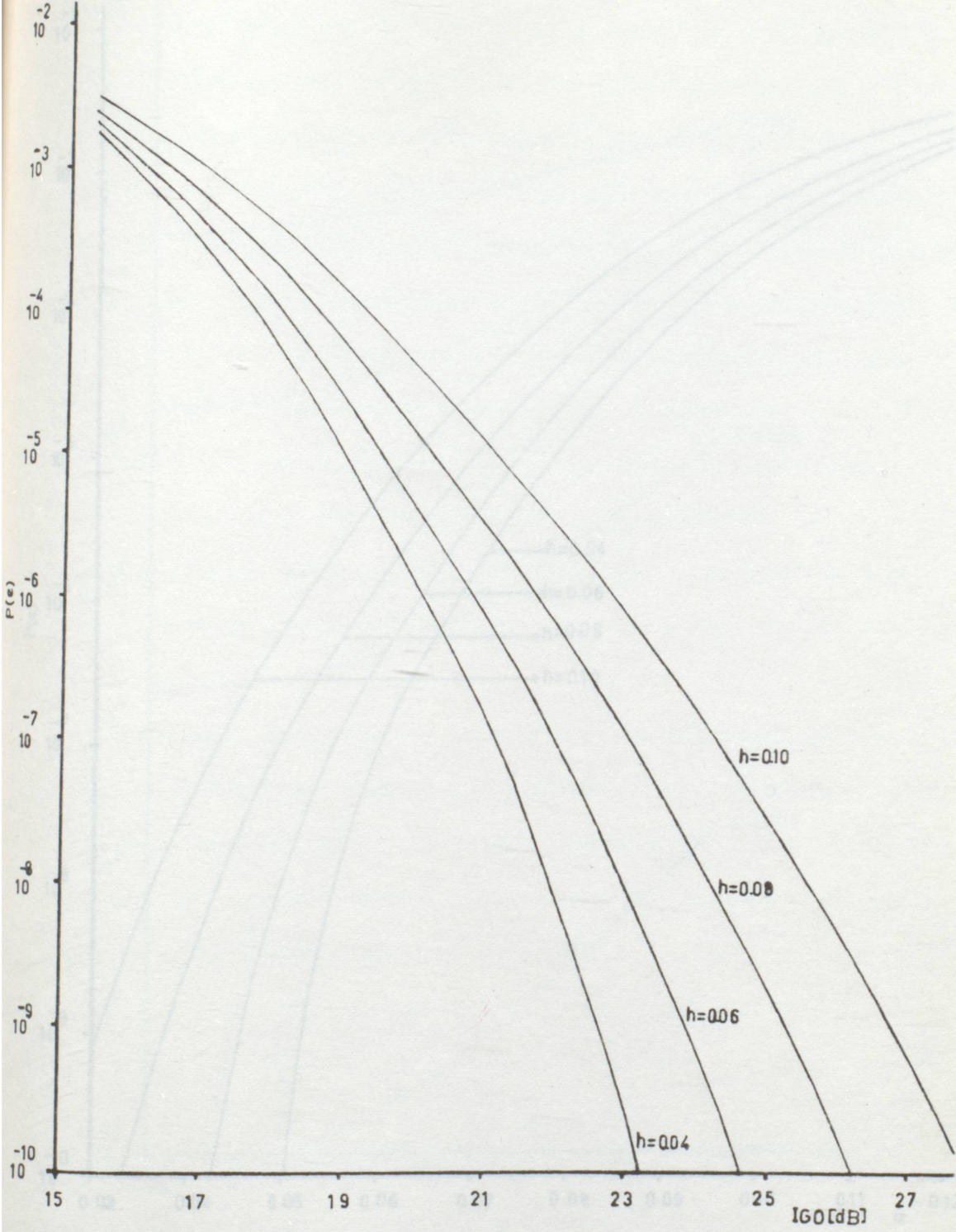
OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

$Per(2.5) = 3.20513E-03$
 $Per(1.5) = 6.73077E-02$
 $Per(0.5) = 0.208333334$
 $Per(-0.5) = 0.240384616$
 $Per(-1.5) = 0.142628205$
 $Per(-2.5) = 0.016025641$

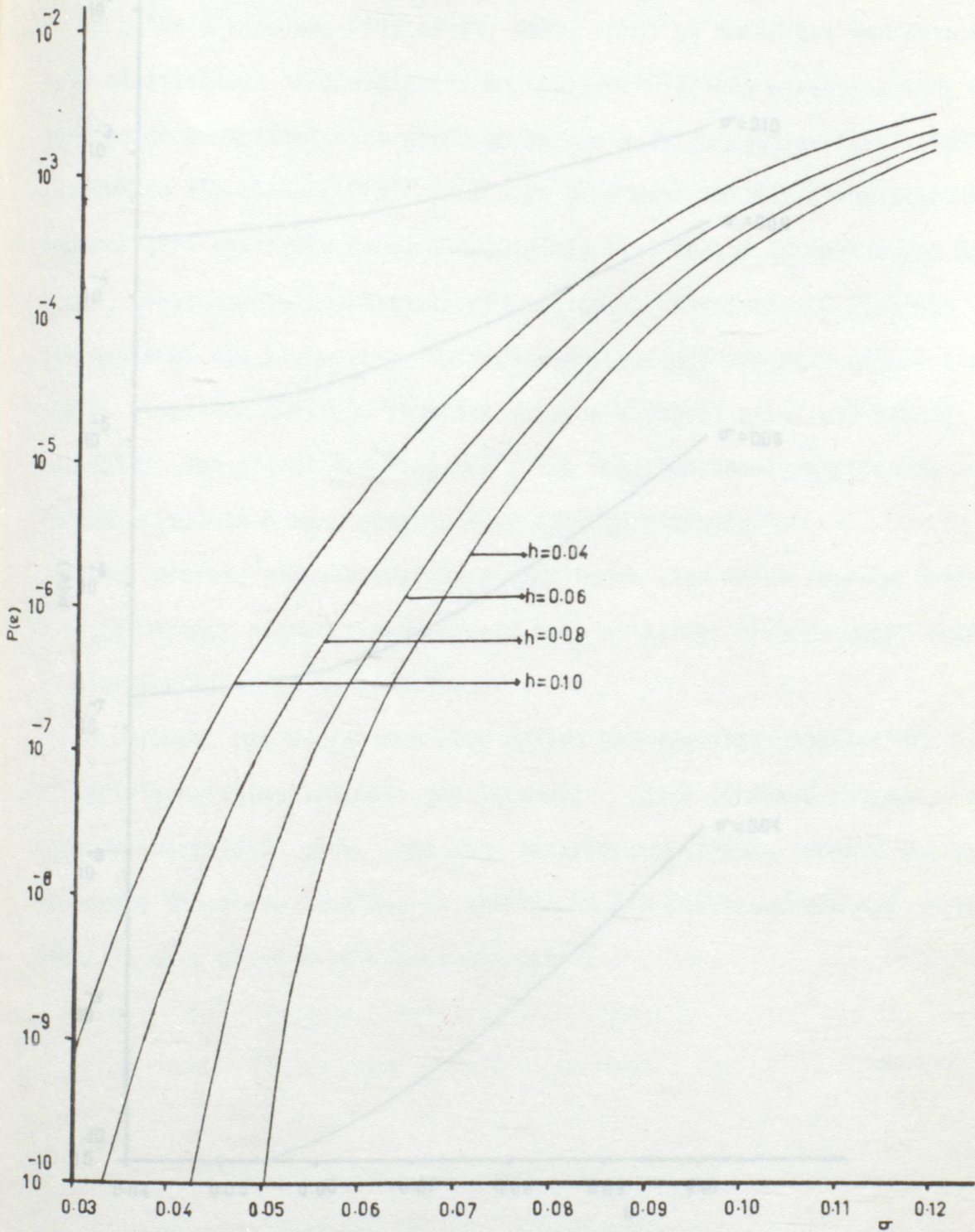
iii-) Hata olasılık değerleri ve eğrileri:

MMS43 HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

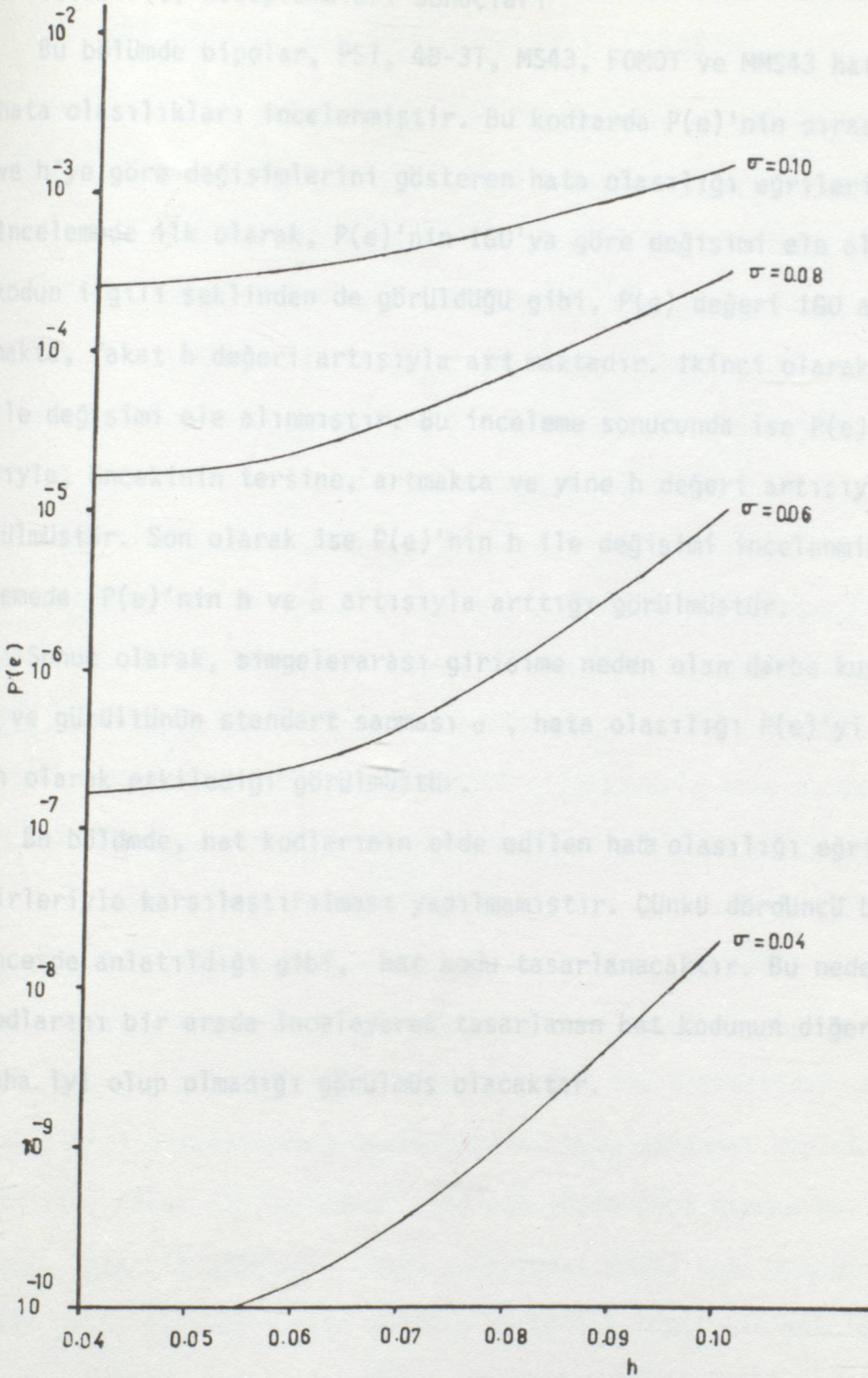
L= 1	h	N	IGO	P(e)
0.0400	0.1200	15.4048	2.4133E-03	
0.0400	0.1100	16.1605	1.0915E-03	
0.0400	0.1000	16.9884	4.2919E-04	
0.0400	0.0900	17.9035	1.2171E-04	
0.0400	0.0800	18.9266	2.2986E-05	
0.0400	0.0700	20.0864	1.5247E-06	
0.0400	0.0600	21.4254	2.3217E-07	
0.0400	0.0500	23.0090	2.6491E-09	
0.0400	0.0400	24.9472	1.5727E-10	
0.0400	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.0500	0.1200	15.4048	2.6299E-03	
0.0500	0.1100	16.1605	1.2282E-03	
0.0500	0.1000	16.9884	4.8319E-04	
0.0500	0.0900	17.9035	1.4945E-04	
0.0500	0.0800	18.9266	2.9936E-05	
0.0500	0.0700	20.0864	2.8889E-06	
0.0500	0.0600	21.4254	2.7728E-07	
0.0500	0.0500	23.0090	2.9267E-09	
0.0500	0.0400	24.9472	1.5727E-10	
0.0500	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.0600	0.1200	15.4048	2.9261E-03	
0.0600	0.1100	16.1605	1.4203E-03	
0.0600	0.1000	16.9884	5.8639E-04	
0.0600	0.0900	17.9035	1.9203E-04	
0.0600	0.0800	18.9266	4.2032E-05	
0.0600	0.0700	20.0864	4.9095E-06	
0.0600	0.0600	21.4254	4.1787E-07	
0.0600	0.0500	23.0090	5.6939E-08	
0.0600	0.0400	24.9472	1.5876E-10	
0.0600	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.0700	0.1200	15.4048	3.3112E-03	
0.0700	0.1100	16.1605	1.6760E-03	
0.0700	0.1000	16.9884	7.2975E-04	
0.0700	0.0900	17.9035	2.5582E-04	
0.0700	0.0800	18.9266	6.2618E-05	
0.0700	0.0700	20.0864	1.7561E-05	
0.0700	0.0600	21.4254	1.2297E-06	
0.0700	0.0500	23.0090	6.7718E-08	
0.0700	0.0400	24.9472	2.6311E-09	
0.0700	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.0800	0.1200	15.4048	3.7956E-03	
0.0800	0.1100	16.1605	2.0075E-03	
0.0800	0.1000	16.9884	9.2496E-04	
0.0800	0.0900	17.9035	3.4975E-04	
0.0800	0.0800	18.9266	9.6961E-05	
0.0800	0.0700	20.0864	2.5825E-05	
0.0800	0.0600	21.4254	2.3887E-06	
0.0800	0.0500	23.0090	1.2670E-07	
0.0800	0.0400	24.9472	2.8169E-09	
0.0800	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.0900	0.1200	15.4048	4.3969E-03	
0.0900	0.1100	16.1605	2.4123E-03	
0.0900	0.1000	16.9884	1.1863E-03	
0.0900	0.0900	17.9035	4.8582E-04	
0.0900	0.0800	18.9266	1.5308E-04	
0.0900	0.0700	20.0864	4.2376E-05	
0.0900	0.0600	21.4254	5.5175E-06	
0.0900	0.0500	23.0090	7.8659E-07	
0.0900	0.0400	24.9472	6.0706E-09	
0.0900	0.0300	27.4460	1.5727E-10	
0.1000	0.1200	15.4048	5.1287E-03	
0.1000	0.1100	16.1605	2.9440E-03	
0.1000	0.1000	16.9884	1.5320E-03	
0.1000	0.0900	17.9035	6.7927E-04	
0.1000	0.0800	18.9266	2.6895E-04	
0.1000	0.0700	20.0864	7.3968E-05	
0.1000	0.0600	21.4254	1.3342E-05	
0.1000	0.0500	23.0090	1.7715E-06	
0.1000	0.0400	24.9472	3.3938E-08	
0.1000	0.0300	27.4460	2.6721E-09	



Şekil 3.22 MMS43 Hat kodunun çeşitli h değerleri için IGO 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.23 MMS43 Hat kodunun çeşitli h değerleri için σ 'ya göre hata olasılığı eğrileri.



Şekil 3.24 MMS43 Hat kodunun çeşitli σ değerleri için h'a göre hata olasılığı eğrileri.

3.5.2 P(e) Hesaplamaları Sonuçları

Bu bölümde bipolar, PST, 4B-3T, MS43, FOMOT ve MMS43 hat kodlarının hata olasılıkları incelenmiştir. Bu kodlarda $P(e)$ 'nin sırasıyla 1G0, σ ve h 'ye göre değişimlerini gösteren hata olasılığı eğrileri çizilmiştir. İncelemede ilk olarak, $P(e)$ 'nin 1G0'ya göre değişimi ele alınmıştır. Her kodun ilgili şeklinden de görüldüğü gibi, $P(e)$ değeri 1G0 artışıyla azalmakta, fakat h değeri artışıyla artmaktadır. İkinci olarak $P(e)$ 'nin σ ile değişimi ele alınmıştır. Bu inceleme sonucunda ise $P(e)$ değeri σ artışıyla, öncekinin tersine, artmakta ve yine h değeri artışıyla arttığı görülmüştür. Son olarak ise $P(e)$ 'nin h ile değişimi incelenmiştir. Bu incelemede $P(e)$ 'nin h ve σ artışıyla arttığı görülmüştür.

Sonuç olarak, simgelerarası girişime neden olan darbe kuyruğu genliği h ve gürültünün standart sapması σ , hata olasılığı $P(e)$ 'yi doğru orantılı olarak etkilediği görülmüştür.

Bu bölümde, hat kodlarının elde edilen hata olasılığı eğrilerinin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmamıştır. Çünkü dördüncü bölümde, daha önce de anlatıldığı gibi, hat kodu tasarlanacaktır. Bu nedenle tüm hat kodlarını bir arada inceleyerek tasarlanan hat kodunun diğer kodlardan daha iyi olup olmadığı görülmüş olacaktır.

4. SİMGELERARASI GİRİŞİMLİ VE TOPLAMSAL GÜRÜLTÜLÜ ORTAMDA HAT KODLARININ BST MODELİYLE TASARIMI

Daha önce de anlatıldığı gibi BST modelin en çekici yönlerinden biri de minimum hata olasılıklı hat kodu tasarlamaya açık oluşuydu. Şimdiye kadar öne sürülmüş kod tasarlamaya yönelik tek modeldir. Bu modele göre kod tasarlama ölçütü olarak iletilen dizinin güç spektral yoğunluğu alınacak ve aşağıda anlatılacaktır. Bu ölçüt anlatılmadan önce, bu ölçüte niçin gerek duyulduğunun kısa bir örnekle açıklanması uygun olur. Örneğin, MMS43 kodu bilindiği gibi dört alfabeye sahiptir, B ve C alfabeleri için 21 kodkelimesi önerilebilir. Başka bir deyişle, bu iki alfabe için 21 kodkelimesinden en iyi 16 kodkelimesi seçilmelidir. Doğrudan 21 kodkelimesinden 16'lık kodkelimesi kümelerinin tüm seçenekleri denenmek istenirse, yirmibinin üzerinde seçeneği denemek ve bunları birbirleriyle karşılaştırmak gerekir. Tüm bu işlemleri bilgisayarla bile yapmak olanaksız denebilir. İşte tüm bu zorluklar nedeni ile ölçüte gerek duyulmuştur.

4.1. Kod Tasarım Ölçütleri

STD, hat kodunun hata olasılığı başarımının en basit göstergesidir. Aynı kutuplu ard arda gelebilen darbelerin maksimum sayısı STD'ye eşittir, böylece maksimum düzey kaymaları STD ile orantılıdır. En basit olarak STD'yi olabildiğince küçük yaparak simgelerarası girişim kontrol edilebilir. Fakat STD her zaman $P(e)$ 'nin göstergesi olarak kullanılamaz, bazen tutarsız olabilir. Çünkü yukarıdaki MMS43 kodu örneğinde anlatıldığı gibi, alfabeler için değişik kodkelime kümeli seçenekler vardır. İşte bu nedenle, kullanılan diğer bir gösterge de iletilen dizinin güç spektral yoğunluğu ölçütüdür. Bu ölçütte, rms simgelerarası girişim analitik olarak güç spektral yoğunluğuyla ve bazen alçak frekanslardaki güç bileşenleriyle ilgilidir [21],[35]. Güç spektral yoğunluğunun hesaplanması,

iletilen dizinin özilişki fonksiyonunun hesaplanmasına bağlı olduğundan oldukça zordur. Fakat, eğer simgelerarası girişimin (3.30)'daki gibi olduğu varsayılırsa, hat kodlarının dengeli olma özelliğinden dolayı ortalama değer ($E[S_j]$) sıfır olacağından dolayı ortalama simgelerarası girişim gücü BST'nin varyansı ile orantılı olur ve kolayca hesaplanabilir.

$$E[Z^2] = h^2 \text{ var}(s) \quad (4.1)$$

burada h , simgelerarası girişim kuyruğunun genişliğidir. Eşit olasılıklı bağımsız ikili kaynağa ilişkin BST'nin varyansı aşağıdaki gibi bulunur:

$$\text{var}[S] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E[S_j^2] = E \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \right] \quad (4.2)$$

Başlangıç terminali S_0 ve her a_j kod kelimesi için,

$$\begin{aligned} \text{var}[s] &= \sum_{s \in S_T} P_0(S_0) E \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 \mid S_0 = S_0 \right] \\ &= \sum_{s \in S_T} P_0(S_0) \sum_{a \in C(s)} P(a \mid S_0) \cdot \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (S_0 + \sum_{i=1}^j a_i)^2 \right] \\ &= \sum_{s \in S_T} P_0(s) \sum_{a \in C(s)} 2^{-M} \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (s + \sum_{j=1}^t a_j)^2 \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

olarak bulunur. Burada $P_0(s)$ terminal durumu durağan olasılığı, $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ kodkelimesi, $C(s)$ alfabe ve N kodkelime uzunluğudur. (4.3)'teki köşeli parantez içindeki terim,

$$\lambda_v[a \mid s] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (s + \sum_{j=1}^t a_j)^2 \quad (4.4)$$

olarak gösterilir ve "a" kelimesinin zarar ("cost")'ını gösterir. Aynı şekilde büyük parantez içindeki terim,

Önceki örneklerde kullanılan PST hat kodu için $\text{var}(s)$:

$$\lambda_V[C(s)] = \sum_{a \in C(s)} 2^{-M} \lambda_V[a|s]. \quad (4.5)$$

olarak gösterilir ve $C(s)$ alfabeti zararını belirtir. Kısaca, görülüyor ki bir kodun $\text{var}(s)$ değeri, terminal olasılıkları $P_0(s)$ ve o terminalin ilgili alfabetinin zarar değerinden elde edilir. Böylece (4.3) denklemi,

$$\text{var}(s) = \sum_{s \in S_T} P_0(s) \lambda_V[C(s)] \quad (4.6)$$

olarak yazılabilir.

Diğer bir ölçüt olarak, "s" durumuna ilişkin simgelerarası girişimin, a_t simgesini bozucu olup olmadığı dikkate alınarak hesaplanan bozucu varyans, $\text{var}_D(s)$, kullanılır. Bu ölçüt için de $\text{var}(s)$ ölçütündeki kısaltmalar kullanılır.

Bozucu varyans:

$$\text{var}_D(s) = \sum_{s \in S_T} P_0(s) \lambda_D[C(s)] \quad (4.7)$$

ve her kod kelime zararı,

$$\lambda_D[a|s] = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N s_{t-1}^2 F(a_t, s_{t-1}) \quad (4.8)$$

burada s_{t-1} , $t-1$ anındaki BST değeridir.

$$s_{t-1} = s + \sum_{j=0}^{t-1} a_j \quad (4.9)$$

$a_0 = 0$ alınacaktır.

$$F(a_t, s_{t-1}) = \begin{cases} \delta_{a_{t,0} + \delta_{a_{t,+}}} & s_{t-1} \geq 0 \\ \delta_{a_{t,0} + \delta_{a_{t,-}}} & s_{t-1} < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

burada $\delta_{m,n}$ Kronecker delta fonksiyonudur.

Önceki örneklerde kullanılan PST hat kodu için $\text{var}(s)$:

$$\lambda_V[-+|-0.5] = 10/8, \quad \lambda_V[-+|0.5] = 2/8$$

$$\lambda_V[0+|-0.5] = 2/8, \quad \lambda_V[0-|0.5] = 2/8$$

$$\lambda_V[+0|-0.5] = 2/8, \quad \lambda_V[-0|0.5] = 2/8$$

$$\lambda_V[+-|-0.5] = 2/8, \quad \lambda_V[+-|0.5] = 10/8$$

$$\lambda_V[C(-0.5)] = \lambda_V[C(0.5)] = 16/32 \text{ ve}$$

$\text{var}(s) = 16/32$ olarak bulunur.

$\text{var}_D(s)$ ise,

$$\lambda_D[-+|-0.5] = 1/8, \quad \lambda_D[-+|0.5] = 0$$

$$\lambda_D[0+|-0.5] = 1/8, \quad \lambda_D[0-|0.5] = 1/8$$

$$\lambda_D[+0|-0.5] = 1/8, \quad \lambda_D[-0|0.5] = 1/8$$

$$\lambda_D[+-|-0.5] = 0, \quad \lambda_D[+-|0.5] = 1/8$$

$$\lambda_D[C(-0.5)] = \lambda_D[C(0.5)] = 3/32 \text{ ve}$$

$\text{var}_D(s) = 3/32$ olarak bulunur.

Örnekten de görüldüğü gibi $\text{var}_D(s)$ her zaman $\text{var}(s)$ değerinden küçüktür, çünkü $\text{var}_D(s)$ değeri koddaki simgelerarası girişime neden olan durumların varyansıdır. Kod tasarlamada $\text{var}(s)$ ölçütü kullanılacaktır. Çünkü $\text{var}_D(s)$ ölçütüne göre tasarlanan kodun hata olasılığının daha büyük olduğu görülmüştür. Bu tezde incelenen hat kodları için bulunan değerler aşağıda tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Hat kodlarının zarar değerleri

Zarar	Bipolar	PST	4B-3T	MS43	FOMOT	MMS43
var(s)	0.25	0.5	1.266	1.101	1.185	1.064
var _D (s)	0.125	0.09375	0.520	0.46875	0.475	0.447

var (s) ve var_D(s) değerleri EK-2 deki kod tasarlama programının (630-1250) satırları arasındaki altprogramlarla bulunur.

4.2. Kod Tasarım Algoritması

MBNT Alfabetik hat kodları sınıfından kod seçimi, kodun her terminal durumu için C(s) alfabelerinin belirlenmesine bağlıdır. En iyi kodu seçme problemi, "Verilen BST değerinden başlayan en iyi 2^M kodkelimleri nelerdir?" sorusuyla büyük ölçüde basitleştirilmiş olur. Alfabede kullanılmak için önerilen kodkelimelerini iyiliklerine göre, başka bir deyişle az zararlı oluşlarına göre sıralayan yöntem ise önceki bölümde anlatılan tasarım ölçütleridir. Bilindiği gibi, bu ölçütlerde her kodkelimesi için bir zarar ölçüsü ("cost[als]") ve aşağıdaki denklemden yararlanılarak da kodun zarar değeri bulunur.

$$\text{Zarar} = \sum_{s \in S_T} P_0(s) \lambda[C(s)] \quad (4.11)$$

burada,

$$\lambda[C(s)] = 2^{-M} \lambda[a|s] \quad (4.12)$$

olarak alınacaktır.

Hat kodu tasarımının amacı, her C(s) alfabesi için "zarar" ı minimum yapan kodkelimelerinin seçilmesidir. C(s) alfabesindeki kodkelimleri,

doğrudan alfabe zararlarını $\lambda[C(s)]$ dolaylı olarak durum-geçiş matrisi π' 'yi ve durağan terminal olasılıkları $P_0(s)$ 'i belirtir.

Kod tasarımı için önerilen algorithmada aşağıdaki adımlar izlenir:

- 1) Her terminal durumu "s" için kullanılmasına izin verilen kodkelimeleri kümesi, tablo 4.2'den yararlanılarak önerilir.
- 2) Her alfabe için en az zararlı 2^M kodkelimleri seçilir. Bu seçim daha önce belirtilen ölçütlere göre yapılır.
- 3) Terminal olasılıkları, $P_0(s)$, hesaplanır.
- 4) Artık, alfabe zararları azaltılamaz, fakat toplam ortalama zarar azaltılabilir. Bu, az zararlı alfabelerin $P_0(s)$ 'leri artırılıp, çok zararlı alfabelerin $P_0(s)$ 'lerinin azaltılmasıyla sağlanır.
- 5) Her terminal durumu "s" için izin verilebilir, fakat ilgili alfabesinde olmayan kodkelimleri incelenir. Eğer $\lambda(\text{kelime zararı})$ 'sı küçük olan varsa, λ 'sı büyük olanla değiştirilir.
- 6) Son kod ölçümü hesaplanır ve eğer ölçüm azalmışsa, yeni kod seçilir.
- 7) Bu işlemler tüm olası değişiklikler test edilinceye değin yapılır.

Bu algoritmanın ilginç yanı bilgisayarla işlemleri yapma zamanının oldukça kısa oluşudur. Bölüm girişinde değinildiği gibi, böyle bir algoritma kullanılmamış olsaydı çok fazla bilgisayar zamanına gereksinim duyulurdu.

4.2.1 Yapılan Kod Tasarımı Programının Anlatılması

EK-2'de sunulan program, minimum hata olasılığı MBNT alfabeti için kodları tasarlamada kullanılır. Programda $\text{var}(s)$ ölçütü kullanılarak tasarlanan hat kodunun hata olasılığı eğrileri diğer hat kodlarının hata olasılığı eğrileri ile karşılaştırılarak bu algoritmanın doğruluğu sorgulanmış olacaktır. Kod tasarımı programı ile 45-3TH ve 56-4TH hat kodları tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan hat kodu örnekleri artırılabilir, fakat sınırlılık gereksizdir. Çünkü bu programla istenilen özellikteki (STD, uzunluk

Tablo 4.2 M-uzunluklu ikili kelime için önerilen

N-uzunluklu üçlü kodkelimesi KST sayıları

İkili Kelime Uzunluğu (M)	Önerilebilen Üçlü Kodkelime		Kelime Sayısal Toplamı (KST)									
	Uzunluğu (N)	Toplam Sayısı	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7	±8	
1	1	3	1	1								
2	2	9	3	2	1							
4	3	27	7	6	3	1						
5	4	81	19	16	10	4	1					
7	5	243	51	45	30	15	5	1				
9	6	729	141	126	90	50	21	6	1			
11	7	2187	393	357	266	161	77	28	7	1		
12	8	6561	1107	1016	784	504	266	112	36	8	1	

Not : Tüm simgeleri sıfır olan kodkelimleri önerilemez. Ayrıca bu tablo daha uzunluklu kodkelime KST sayıları için, bir önceki uzunluklu kodkelimelerinin KST sayıları üçer üçer toplanıp ortadakinin altına yazılarak genişletilebilir.

4.2.1 Yapılan Kod Tasarımı Programının Anlatılması

EK-2 de sunulan program, minimum hata olasılıklı MBNT alfabetik hat kodları tasarlamada kullanılır. Programda var(s) ölçütü kullanılmış olup tasarlanan hat kodunun hata olasılığı eğrileri diğer hat kodlarının hata olasılığı eğrileri ile karşılaştırılarak bu algoritmanın doğruluğu vurgulanmış olacaktır. Kod tasarlamaprogramı ile 4B-3TH ve 5B-4TH hat kodları tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan hat kodu örnekleri artırılabilir, fakat şimdilik gereksizdir. Çünkü bu programla istenilen özellikteki (STD, uzunluk

vb.) hat kodu tasarlanabilir. Bu nedenle, gerek duyulan hat kodunu tasarlamak daha akılcı olur. Kod tasarlama programının yapılması aşağıda adımlar şeklinde anlatılacaktır. Bu adımların her biri en az bir veya daha fazla altprogram içerir.

Kod tasarlama programının adımları :

Birinci adım : Her terminal durumu için kodkelimleri önerilir. Bunun için tasarlanacak kodun STD ve uzunluklarının verilmiş olması gerekir. Örneğin, STD'si 5 olan 4B-3T hat kodu tasarlanmak istenirse, STD=5 olduğuna göre olurlu durumlar kümesi,

$S=(-2.5,-1.5,-0.5,0.5,1.5,2.5)$ olur. Terminal durumları kümesi ise kodkelime bitişindeki durumlar olup,

$ST=(-1.5,-0.5,0.5,1.5)$ dir.

Tablo 4.2'den yararlanarak her terminal durumu için kodkelimleri, aşağıdaki $ST = -1.5$ terminal durumu örneğindeki gibi önerilir. $ST = -1.5$ terminali sadece KST'leri 0,1,2,3 olan kodkelimelerini kullanabilir. Çünkü, KST'leri bu değerler olan kodkelimleri kullanılırsa kodlayıcı, kodkelime bitişinde yine terminal durumunda olur. Ters durumda, örneğin KST'si -1 olan kodkelimesi kullanılırsa kodlayıcı kodkelime bitişinde -2.5 durumunda olacaktır ki böyle bir terminal durumu da yoktur. Bu nedenle KST'si -1 olan kodkelimleri önerilemez. Her terminal durumu için önerilen kodkelimleri Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

İkinci Adım : Olurlu durumlar tablosu elde edilir. (Tablo 2.2 gibi) Çünkü, tüm işlemlerin yapılmasında bu tablodan yararlanılır. Bu işlem programda (530-620) satırları arasındaki altprogramla bulunur.

Üçüncü Adım : Bu adım, kod tasarlama algoritmasının çoğunu içerdiğinden önemlidir ve birkaç altprogramdan oluşmuştur. Bu nedenle aşağıdaki sırada anlatılacaktır:

Tablo 4.3 Her terminal durumu için önerilen kodkelimeleri

ST= -1.5 (KST=0,1,2,3)	ST= -0.5 (KST=0, ⁺ 1,2)	ST= 0.5 (KST=0, ⁺ 1,-2)	ST= 1.5 (KST=0,-1,-2,-3)
0+ -	0+ -	0+ -	0+ -
0 -+	0 -+	0 -+	0 -+
+ 0-	+ 0-	+ 0-	+ 0-
- 0+	- 0+	- 0+	- 0+
+ -0	+ -0	+ -0	+ -0
- +0	- +0	- +0	- +0
+ 00	- 00	- 00	- 00
0+ 0	0 -0	0 -0	0 -0
00 +	00 -	00 -	00 -
++ -	-- +	-- +	-- +
+ -+	-+-	-+-	-+-
- ++	+--	+--	+--
++0	+ 00	+ 00	--0
+0+	0+0	0+0	-0-
0++	00+	00+	0--
+++	++-	++-	---
	+ -+	+ -+	
	- ++	- ++	
	++0	--0	
	+0+	-0-	
	0++	0--	

1) Önerilen kodkelimelerinin her biri için zararları $\lambda[a]s$, (4.4)'den yararlanılarak hesaplanır.

2) Her alfabe için minimum zararlı 2^M kodkelimleri (1930-2110) satırları arasındaki altprogramla seçilir. Bu altprogramda seçim, kodkelimelerinin zarar değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanıp 2^M kodkelimelerinin alınmasıyla olur. Alfabelerin zarar değerleri $\lambda[C(s)]$ 'ler (4.5) den yararlanılarak hesaplanır.

3) Her alfabe için seçilen kodkelimelerine göre terminal olasılıkları (1260-1920) satırları arasındaki altprogramla hesaplanır. Bu altprogramda önce kodun geçiş matrisi π bulunur. Sonra Markov zinciri uygulanır ve $A \star X = B$ denklem takımına dönüştürülüp Gauss çıkarsama mantığıyla denklemler çözülür. Bulunan değerler terminal olasılıklarıdır.

4) Eğer eşit zarar değerli kodkelimleri varsa, (3350-3550) satırları arasındaki altprogramla daha iyi olan, başka bir deyişle toplam ortalama zarar değerini azaltan kodkelimleri seçilir. Bu, az zarar değerli alfabelerin terminal olasılıkları artırılıp, çok zarar değerli alfabelerin terminal olasılıkları azaltılarak sağlanır.

5) Kodun toplam var (s) değeri hesaplanır. (630-960) satırları arasındaki altprogramla, yukardaki ilk dört sıradaki altprogramların çağrılmasıyla hesaplama sağlanır.

Dördüncü Adım : Hat kodunun bozucu varyansı, $var_D(s)$, (970-1250) satırları arasındaki altprogramla hesaplanır. Bu değer, hat kodlarının hata olasılığını belirlemede kullanılır.

Beşinci Adım : Her alfabe için seçilen minimum zararlı 2^M kodkelimleri ve tasarlanan minimum hatalı hat kodu tablosu yazdırılmış olur. Bu işlem, (2120-2250) satırları arasındaki altprogramla gerçekleşir.

Altıncı Adım : Kod tasarlama programının bundan sonraki adımları, tasarlanan hat kodunun hata olasılığını karşılaştırmaya yöneliktir. Bu nedenle önce, (2260-2480) satırları arasındaki altprogramla kodun olurlu

durumlarının olasılıkları hesaplanır. Bu program, (3.31)'den yararlanılarak yapılır.

Yedinci Adım : Kodun hata olasılığını bulurken kullanılacak koşullu olasılıklar (2490-2890) satırları arasındaki altprogramla hesaplanır. Bu programda, olasılıklar doğrudan olurlu durumlar tablosundan sayılarak bulunur.

Sekizinci Adım : Kod tasarlama programında son adım olarak, hat kodunun hata olasılığı değerlerinin hesaplanması ve tablo şeklinde yazdırılması için (2900-3340) satırları arasındaki altprogram yazılmıştır. Bu altprogramda tümleyen hata fonksiyonu ("erfc") değerleri çok kullanılacağından altprogram olarak verilmiştir.

Terminal Çıktısı:
Altprogram:
1 = 1000

Yer(s) ve Yer:
Altprogramları

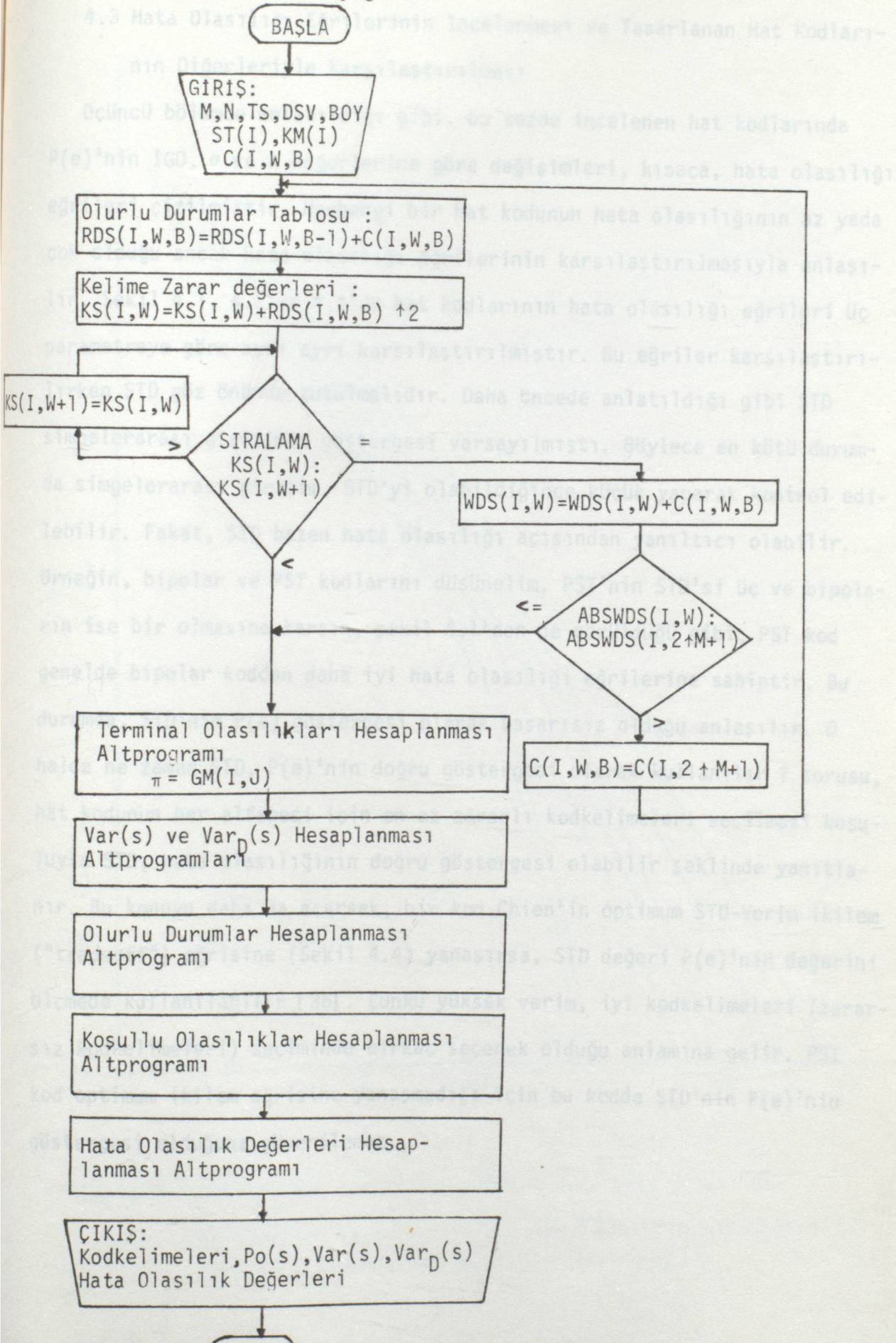
Olurlu Durumlar Hesaplanması:
Altprogramı

Koşullu Olasılıklar Hesaplanması:
Altprogram

Hata Olasılık Değerleri Hesaplanması:
Altprogramı

ÇIKIŞ:
Kodkoşullu Olasılıkları, Po(s), Yer(s),
Hata Olasılık Değerleri

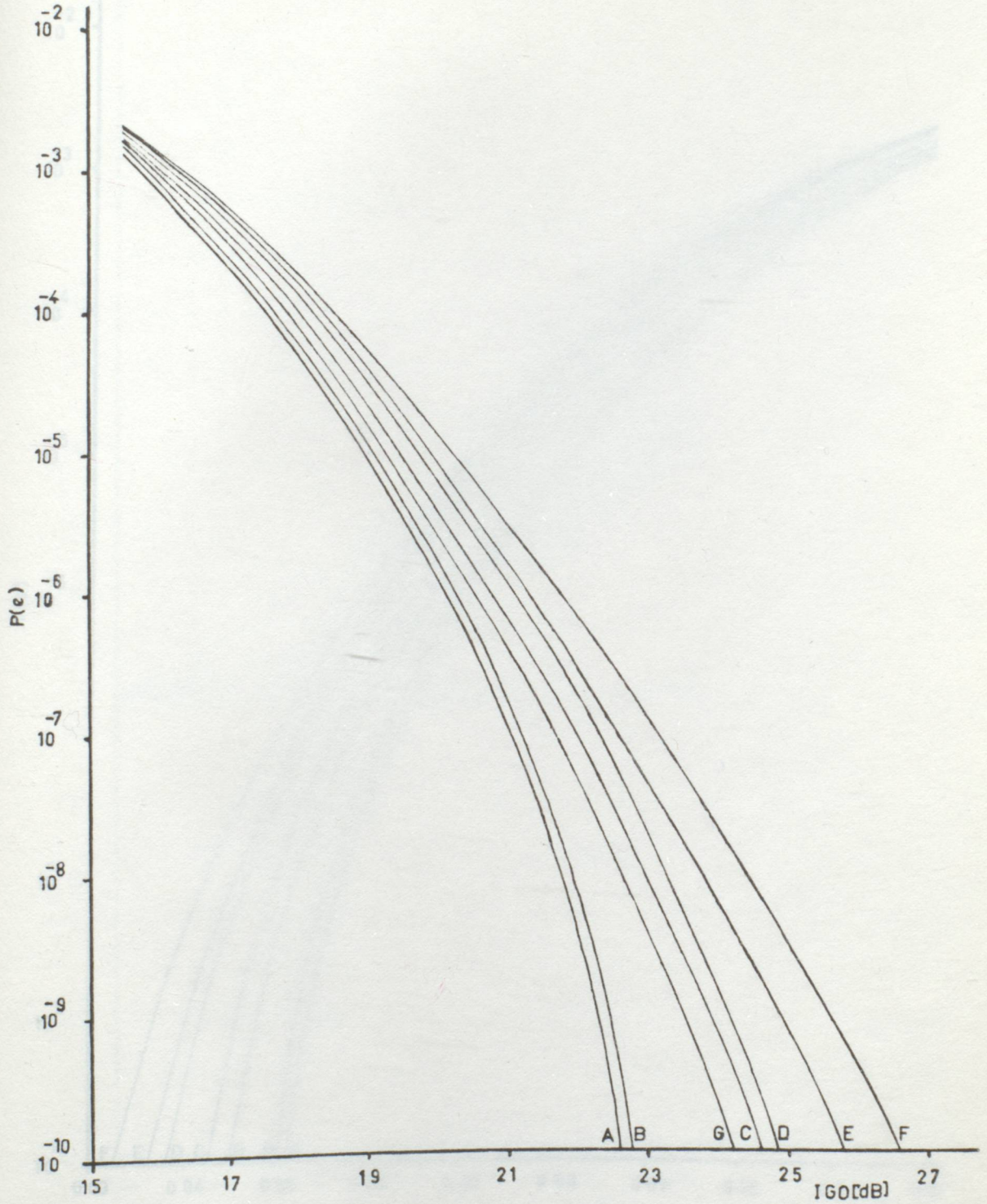
4.2.2. Program Akış Diyagramı



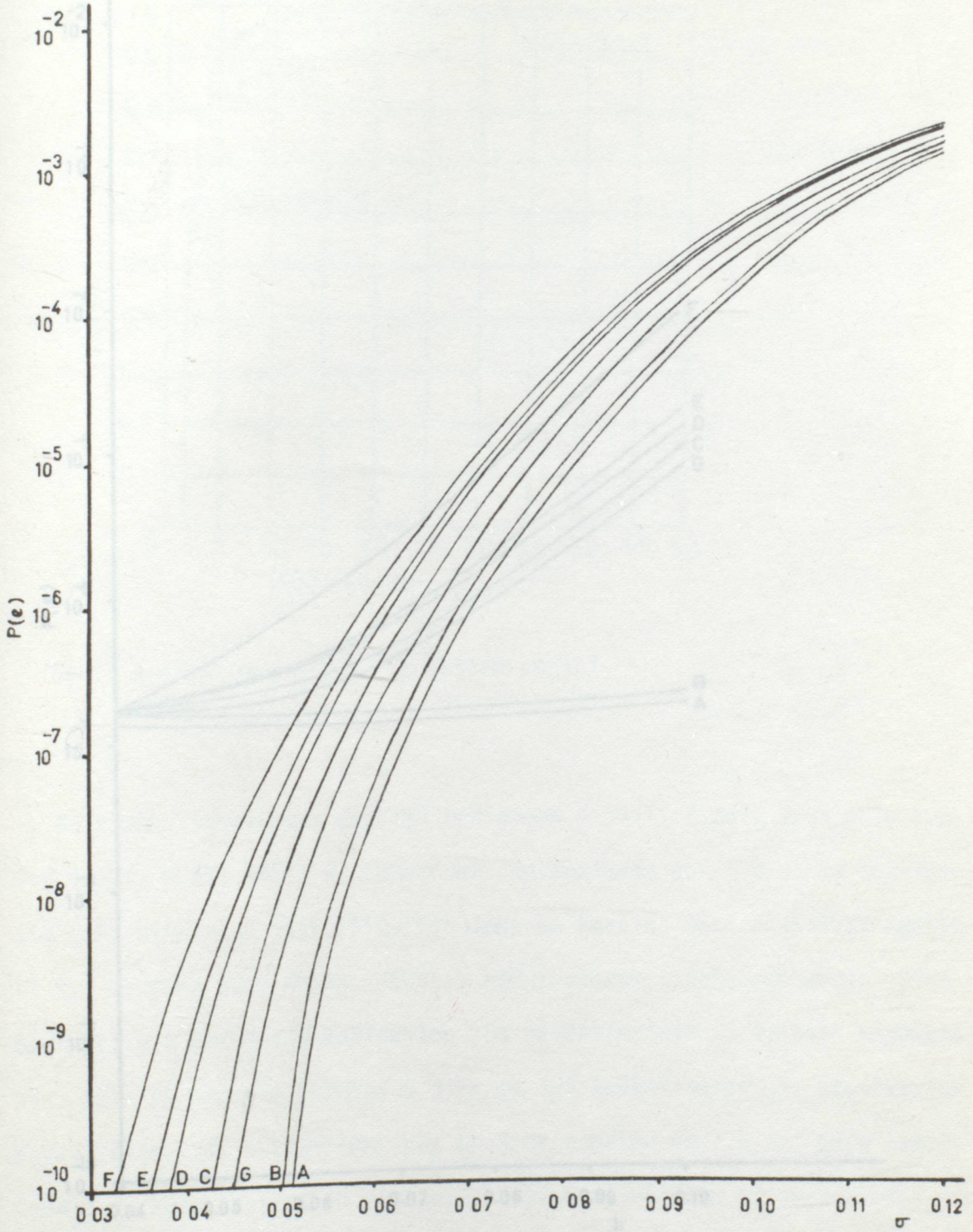
4.3 Hata Olasılığı Eğrilerinin İncelenmesi ve Tasarlanan Hat Kodlarının Diğerleriyle Karşılaştırılması

Üçüncü bölümde anlatıldığı gibi, bu tezde incelenen hat kodlarında $P(e)$ 'nin $IG0$, σ ve h değerlerine göre değişimleri, kısaca, hata olasılığı eğrileri çizilmiştir. Herhangi bir hat kodunun hata olasılığının az yada çok olduğu ancak hata olasılığı eğrilerinin karşılaştırılmasıyla anlaşılır. Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'de hat kodlarının hata olasılığı eğrileri üç parametreye göre ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu eğriler karşılaştırılırken STD göz önünde tutulmalıdır. Daha öncede anlatıldığı gibi STD simgelerarası girişimin göstergesi varsayılmıştır. Böylece en kötü durumda simgelerarası girişim, STD'yi olabildiğince küçük yaparak kontrol edilebilir. Fakat, STD bazen hata olasılığı açısından yanıltıcı olabilir. Örneğin, bipolar ve PST kodlarını düşünelim. PST'nin STD'si üç ve bipoların ise bir olmasına karşın, şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, PST kodu genelde bipolar koddan daha iyi hata olasılığı eğrilerine sahiptir. Bu durumda, STD'nin $P(e)$ göstergesi olarak başarısız olduğu anlaşılır. O halde ne zaman STD, $P(e)$ 'nin doğru göstergesi olarak kullanılır? sorusu, hat kodunun her alfabesi için en az zararlı kodkelimeleri seçilmesi koşuluyla STD, hata olasılığının doğru göstergesi olabilir şeklinde yanıtlanır. Bu konuyu daha da açarsak, bir kod Chien'in optimum STD-Verim ikilem ("tradeoff") eğrisine (Şekil 4.4) yanaşırsa, STD değeri $P(e)$ 'nin değerini ölçmede kullanılabilir [36]. Çünkü yüksek verim, iyi kodkelimeleri (zararlı kodkelimeleri) seçiminde birkaç seçenek olduğu anlamına gelir. PST kod optimum ikilem eğrisine yanaşmadığı için bu kodda STD'nin $P(e)$ 'nin göstergesi olduğuna güvenilemez.

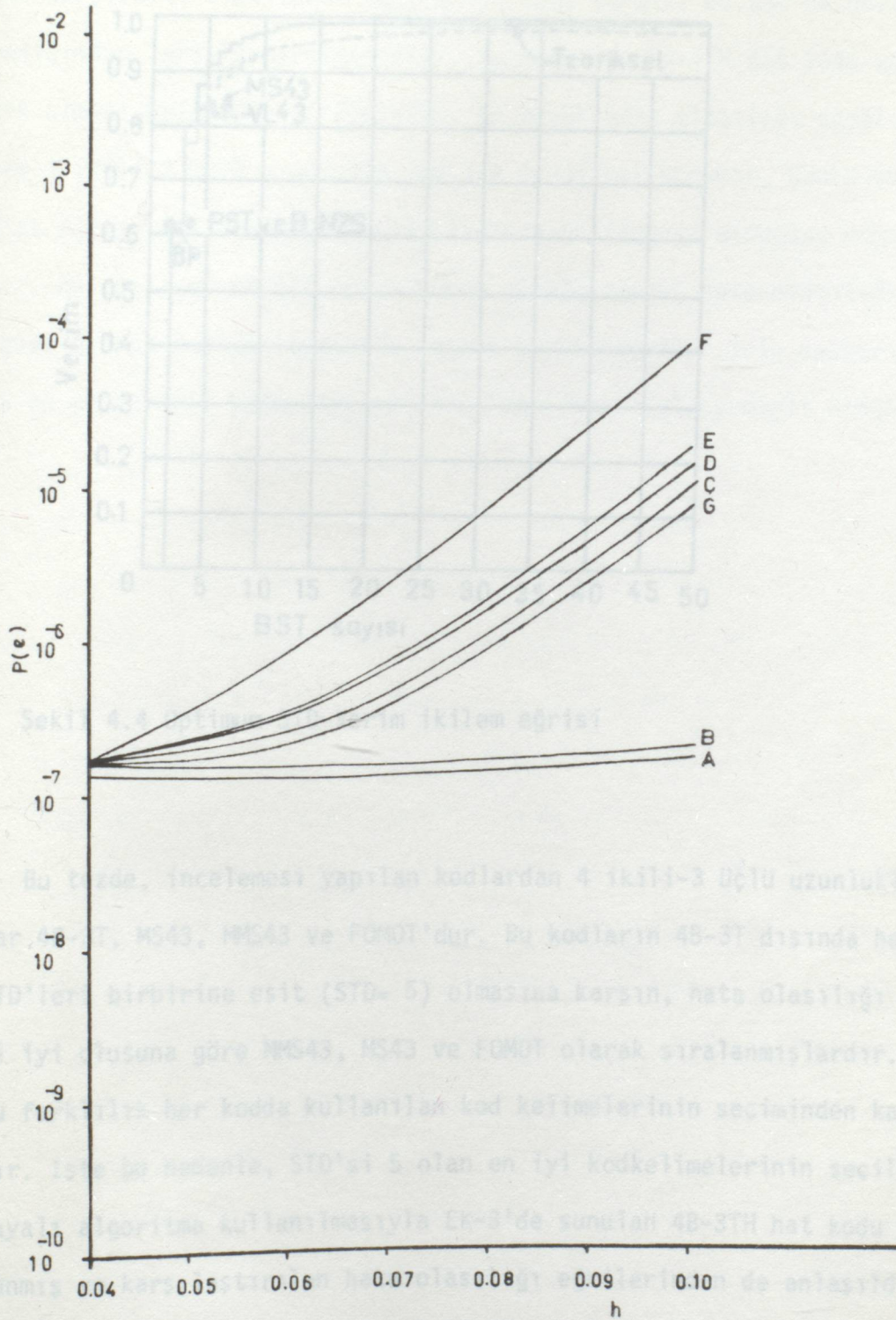
Şekil 4.1 Kesitli hat kodlarının $IG0$ 'ya göre hata olasılığı eğrilerinin karşılaştırılması. (A: PST, B: bipolar, C: MS43, D: MS43, E: FOMOT, F: AB-3T, G: AB-3TH, h=006)



Şekil 4.1 Çeşitli hat kodlarının $IG0$ 'ya göre hata olasılığı eğrilerinin karşılaştırılması. (A:PST, B:Bipolar, C:MMS43, D:MS43, E:FOMOT, F:4B-3T, G:4B-3TH, $h=0.06$)

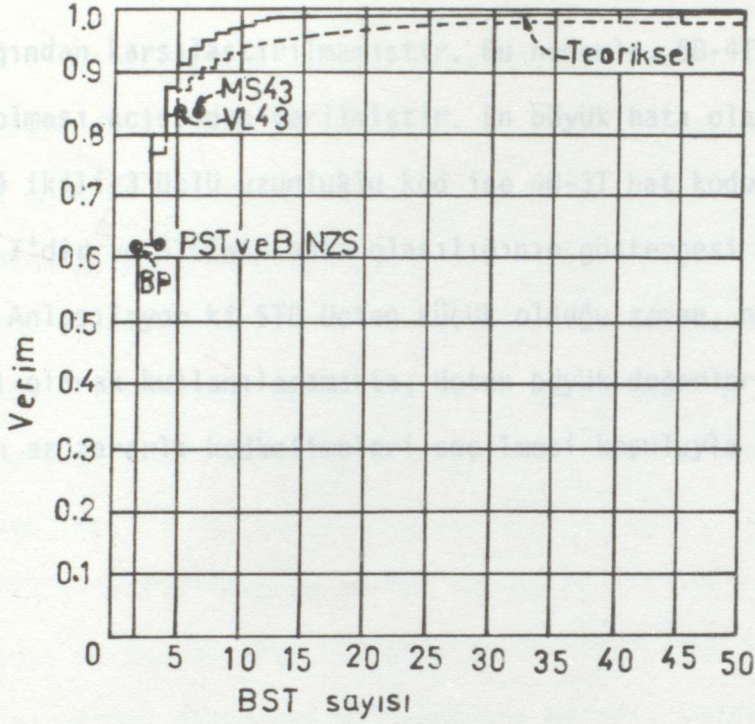


Şekil 4.2 Çeşitli hat kodlarının σ 'ya göre hata olasılığı eğrilerinin karşılaştırılması. ($h=0.06$)



Şekil 4.3 Çeşitli hat kodlarının h 'a göre hata olasılığı

eğrilerinin karşılaştırılması. ($\sigma=0.06$)



Şekil 4.4 Optimum STD-Verim ikilem eğrisi

Bu tezde, incelemesi yapılan kodlardan 4 ikili-3 üçlü uzunluklu kodlar 4B-3T, MS43, MMS43 ve FOMOT'dur. Bu kodların 4B-3T dışında hepsinin STD'leri birbirine eşit ($STD=5$) olmasına karşın, hata olasılığı eğrileri iyi oluşuna göre MMS43, MS43 ve FOMOT olarak sıralanmışlardır. Yine bu farklılık her kodda kullanılan kod kelimelerinin seçiminden kaynaklanır. İşte bu nedenle, STD'si 5 olan en iyi kodkelimelerinin seçilmesine dayalı algoritma kullanılmasıyla EK-3'de sunulan 4B-3TH hat kodu tasarlanmış ve karşılaştırılan hata olasılığı eğrilerinden de anlaşıldığı gibi diğer hat kodlarından daha iyi hata olasılığı eğrilerine sahip olduğu görülmüştür. Tasarlanan diğer bir hat kodu da 5B-4TH ve STD'si üçtür. Bu kod da EK-4'de sunulmuş ve hata olasılığı eğrileri karşılaştırılmamıştır.

Çünkü karşılaştırılabilecek sadece PST kodu vardır. Bu kod da güvenilir olmadığından karşılaştırılmamıştır. Bu nedenle, 5B-4TH hat kodu sadece örnek olması açısından verilmiştir. En büyük hata olasılığı eğrilerine sahip 4 ikili-3 üçlü uzunluklu kod ise 4B-3T hat kodudur. Çünkü bu kodun STD'si 7'dir ve STD'nin hata olasılığının göstergesi olduğunu doğrulamaktadır. Anlaşıyor ki STD üçten küçük olduğu zaman, hata olasılığı göstergesi olarak kullanılamamakta, üçten büyük değerler için de her kod için en az zararlı kodkelimleri seçilmesi koşuluyla geçerli olmaktadır.

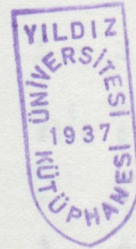
5. TARTIŞMA VE SONUÇ

İkili işaret uzun mesafeler arasında doğrudan iletilemez. Çünkü, sabit DC düzeyi, düzgün enerji spektrumu ve yeterli zamanlama bileşeni parametreleri güvence altına alınmalıdır. Bu nedenle ikili işaret iletilmeden önce kodlanmalıdır. En basit hat kodu bipolar koddur ve yeterli zamanlama bileşenine sahip değildir. Tüm parametreleri sağlayan en basit hat kodu PST kodudur. Bu kodda zamanla yeterli görülmemiş ve yeni gereksinmelere uygun olarak yeni hat kodları tasarlanmıştır. Bu tezde, şimdiye kadar yayınlanan çeşitli hat kodlarının özellikleri anlatılmış, bunlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve en iyi kodlar belirtilmeye çalışılmıştır. Şu önemlidir ki bu kodların kodlanma işlemleri (ister hız artışı, ister hız artışıssız olsun) durum-bağımlı olmasına karşın, kodçözme işlemleri durumdan bağımsızdır. Diğer bir deyişle, alınmış diziden önceki diziler dikkate alınmadan çözülebilir. Alınmış veri dizisindeki çoğu hatalar "araya sokulmuş" kod fazlalığı kullanılarak belirlenebilir. Bu fazlalık ne kadar büyükse, o kadar çabuk olarak hata saptanır. Anlatılan hat kodlarının çoğu uygulamadaki sayısal sistemlerde yaygınca kullanılır. (EK-1). Fakat pratikte kullanılan hat kodlarında düzey sayısı sınırlanmıştır. Çünkü bugünkü gerçekleştirebilme olanakları yetersizdir. Çok-düzeyle kodlar kullanılmadığından üzerinde hata incelemeleri yapılmamıştır.

Bipolar, PST, 4B-3T, MS43, FOMOT ve MMS43 hat kodlarının BST modelden yararlanılarak hata olasılığı hesaplamaları yapılmıştır. $P(e)$ hesaplamaları sonucunda, simgelerarası girişime neden olan darbe kuyruk genliği h ve gürültünün standart sapması σ , hata olasılığı $P(e)$ 'yi doğru orantılı olarak etkilediği görülmüştür. Ayrıca $P(e)$ 'nin $1G0$, σ ve h değerlerine göre değişimlerini gösteren hat kodlarının hata olasılığı eğrileri çizilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, ilk ölçüt olarak sayısal

toplam değişimin optimum STD-Verim ikilem eğrisine yanaşan kodlar için iyi bir hata olasılığı başarımı göstergesi olduğu bulunmuştur. Örneğin, PST kodun STD'si üç, bipolar kodun bir olmasına karşın, PST kod genelde bipolar koddan daha iyi hata olasılığı başarımına sahiptir. Bu durumda, STD'nin $P(e)$ göstergesi olarak başarısız olduğu anlaşılr. Bunun nedeni, yukarıda anlatılan optimum STD-Verim ikilem eğrisine yanaşma koşulunun sağlanmamasıdır.

İkinci ölçüt olarak, iletilen dizinin güç spektral yoğunluğu, hat kodlarının hata olasılığı başarımı göstergesi olduğu bulunmuş olup minimum hata olasılıklı hat kodu tasarlamakta kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu ölçüte dayalı algoritmaya göre kod tasarlama programı yapılmış ve 4B-3TH ve 5B-4TH hat kodları tasarlanmıştır. Tasarlanan kodlar, diğer kodlarla karşılaştırılmış ve daha iyi hata olasılığına sahip oldukları görülmüştür. Önemli bir nokta da, ekte verilen kod tasarlama programının, yalnız minimum hata olasılıklı hat kodu tasarlamakta değil herhangi bir hat kodu alfabeleri veri olarak girilirse bu kodun hata olasılığını bulmada da kullanılabilmesidir. Sonuç olarak, en kötü durumda, hata olasılığı STD'yi olabildiğince küçük yaparak kontrol edilebilir. Daha az hata olasılığı isteniyorsa, her alfabe için en iyi kod kelimeleri seçilerek sağlanır. En iyi kod kelimeleri de iletilen dizinin güç spektral yoğunluğu hesaplanarak bulunur.



EK-1

Typical Line Parameters of Various Baseband Digital Transmission Systems

(a) Regenerative Repeater Systems

Parameter	Nominal Bit Rate (Mbit/s)	Symbol Rate (Mbaud)	Code Format	Nominal Repeater Spacing (km)	Error Rate Per Repeater	Transmission Medium	Transmission Capacity (Channels)	Peak Output Voltage	Power Consumption Per One-Way Repeater (W)	Status
System										
BTLL T-1	1.5	1.544	Bipolar	1.8	10^{-6}	Pair Cable	24	3V into 75 Ω	0.6	Commercial since 1965
NEC PCM-24CH	1.5	1.544	Bipolar	1.8	10^{-7}	Pair Cable	24	3V into 110 Ω	0.6	Commercial since 1965
NEC PCM-30/32CH	2	2.048	Bipolar	1.8	10^{-7}	Pair Cable	30	3V into 120 Ω	0.6	Commercial 1973
BTLL T-2	6.3	6.312	BuZS	3.6	10^{-6}	Pair Cable	96	4.2V into 110 Ω	0.6	Commercial 1972
BTLL T-2	6.3	6.312	BuZS	4.5	10^{-7}	10KAP Pair Cable	96	7.5V into 110 Ω	0.6	Commercial 1972
NEC PCM-120CH	7.8	7.876	Bipolar	1.5	10^{-7}	Pair Cable	120	3V into 110 Ω	0.6	Commercial 1968
FRENCH PTT 8.4 Mbit/s	8.4	8.448	HDB3	4.0	10^{-6}	Pair Cable	120	4V into 100 Ω	0.8	Experimental 1972
ITALIAN PTT 8.4 Mbit/s	8.4	8.448	Bipolar	4.0	10^{-6}	Pair Cable	120	4V into 100 Ω	1.0	Experimental 1972
NEC PCM-16M	16	16.016	Bipolar	1.9	10^{-6}	Pair Cable	240	4V into 120 Ω	0.6	Experimental 1969
ITALIAN PTT 34 Mbit/s	34	25.728	4B-3T or MS43	2.0	10^{-10}	6.6S 2-Pair Coaxial Cable	480	3V into 75 Ω	1.0	Experimental 1972
FRENCH PTT 51 Mbit/s	51	51.747	HDB3	2.0	10^{-10}	1.2 1.1 cm Coaxial Cable	720	1.5V into 75 Ω	3.8	Experimental 1972
NEC 100 Mbit/s	100	97.76	BuZS	3.0	10^{-9}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	1440	2V into 75 Ω	3.7	Experimental 1973
NTT PCM-100M	100	97.728	Bipolar and Scrambler	3.0	10^{-10}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	1440	2V into 75 Ω	3.0	Commercial 1972
STC 120 Mbit/s	120	90.6	4B-3T	2.1	10^{-10}	1.2 4.4mm Coaxial Cable	1680	6V into 75 Ω	1.6	Experimental 1972
GLC/PLESNEY 120 Mbit/s	120	90.6	MS43	2.1	10^{-10}	1.2 4.4mm Coaxial Cable	1680	4.5V into 75 Ω	1.7	Experimental 1972
PIHI IPS 140 Mbit/s	140	104.448	4B-3T	2.0	10^{-9}	1.2 4.4mm Coaxial Cable	1920	6V into 75 Ω	1.5	Experimental 1972
PIHI IPS 140 Mbit/s	140	104.448	4B-3T	4.5	10^{-9}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	1920	6V into 75 Ω	1.5	Experimental 1972

(b) Regenerative Repeater Systems (Cont'd)

Parameter	Nominal Bit Rate (Mbit/s)	Symbol Rate (Mbaud)	Code Format	Nominal Repeater Spacing (km)	Error Rate Per Repeater	Transmission Medium	Transmission Capacity (Channels)	Peak Output Voltage	Power Consumption Per One-Way Repeater (W)	Status
System										
AUST PTT 140 Mbit/s	140	104.448	4B-3T	4.5	10^{-9}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	1920	6V into 75 Ω	2.0	Experimental 1975
BTLL 224 Mbit/s	224	223.880	PsT	2.2	10^{-10}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	3456	1.5V into 75 Ω	7.5	Experimental and Design continued 1966
NEC LD-4	274	274.176	BuZS	1.8	10^{-10}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	4032	3.7V into 75 Ω	13	Commercial 1975
BTLL T-4M	274	274.176	Scrambled, Unstructured NRZ Binary	—	—	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	4032	—	—	Commercial 1975
NTT PCM-400M	400	400.352	Bipolar and Scrambler	1.5	10^{-10}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	5760	1.0V into 75 Ω	6.6	Experimental 1972
NTT PCM-800M	800	403.04	6B-3Q	1.5	10^{-11}	Standard 2.6 9.5mm Coaxial Cable	11520	1.0V into 75 Ω	—	Study started 1973

NOTES: Only a few existing primary (1.544, 2.048 Mbit/s) PCM systems are tabulated. Others have very similar parameters.

NEC: Nippon Telegraph & Telephone Corp.

NTT: Nippon Telegraph & Telephone Administration

PIHI: Pohl Telegraph & Telephone Administration

STC: Standard Telephones & Cables Ltd.

(b) Analog Hybrid System

---Italian PTT 140 Mbit/s

Nominal Bit Rate	: 140 Mbit/s
Symbol Rate	: 69.632 Mbaud
Line Code	: 7-level Class 4 Partial Response
Transmission Medium	: L2/4 4 mm Coaxial Cable
Transmission Capacity	: 1920 Voice Channels
Status	: Experimental (1975)

--- Analog Repeater

Nominal Spacing	: 2.0 km
Signal Mean Output Power	: +13dBm
Equivalent RMS Sine Wave Overload Capacity	: +23dBm
Power Consumption per One-Way Repeater	: 1.6W

--- Regenerative Repeater

Nominal Spacing	: 60 km
Error Rate per Repeater	: 10^{-9}
Equivalent RMS Sine Wave of Peak Signal Power	: +18.5dBm

KOD TASARLAMA PROGRAMI

```

10 REM M:Ikili(Binary) kelime uzunlugu
20 REM N:Uclu(Ternary) kodkelime uzunlugu
30 REM TS:Terminal(mod) sayisi
40 REM DSV:Sayisal Toplam Degisim
50 REM BOY:Onerilen kodkelime sayisi
60 DEFINT M,N,L,W,U,I,D,T,B,C
70 READ M,N,TS,DSV,BOY
80 DIM C(TS,BOY,N):DIM RDS(TS,BOY,N+1)
90 DIM HBS(TS,BOY,N)
100 DIM KS(TS,BOY):DIM HAS(TS,BOY)
110 DIM HBD(TS,BOY,N):DIM KM(TS)
120 DIM KD(TS,BOY):DIM HAD(TS,BOY)
130 DIM PO(TS):DIM ST(TS)
140 DIM GM1(TS,TS+1)
150 FOR I=1 TO TS
160 READ ST(I),KM(I)
170 FOR W=1 TO KM(I)
180 FOR B=1 TO N
190 REM C(I,W,B):Onerilen kodkelimleri
200 READ C(I,W,B)
210 NEXT B
220 NEXT W
230 NEXT I
240 REM ONERILEN KODKELEME VERILERI
250 DATA 4,3,4,5,21
260 DATA -1.5,16
270 DATA 0,1,-1, 0,-1,1, 1,0,-1, -1,0,1, 1,-1,0, -1,1,0
280 DATA 1,0,0, 0,1,0, 0,0,1, 1,1,-1, 1,-1,1, -1,1,1
290 DATA 1,1,0, 1,0,1, 0,1,1, 1,1,1
300 DATA -1.5,21
310 DATA -1,0,0, 0,-1,0, 0,0,-1, -1,-1,1, -1,1,-1, 1,-1,-1
320 DATA 0,1,-1, 0,-1,1, 1,0,-1, -1,0,1, 1,-1,0, -1,1,0
330 DATA 1,0,0, 0,1,0, 0,0,1, 1,1,-1, 1,-1,1, -1,1,1
340 DATA 1,1,0, 1,0,1, 0,1,1
350 DATA -1.5,21
360 DATA -1,0,0, 0,-1,0, 0,0,-1, -1,-1,1, -1,1,-1, 1,-1,-1
370 DATA 0,1,-1, 0,-1,1, 1,0,-1, -1,0,1, 1,-1,0, -1,1,0
380 DATA 1,0,0, 0,1,0, 0,0,1, 1,1,-1, 1,-1,1, -1,1,1
390 DATA -1,-1,0, -1,0,-1, 0,-1,-1
400 DATA 1.5,16
410 DATA -1,0,0, 0,-1,0, 0,0,-1, -1,-1,1, -1,1,-1, 1,-1,-1
420 DATA 0,1,-1, 0,-1,1, 1,0,-1, -1,0,1, 1,-1,0, -1,1,0
430 DATA -1,-1,0, -1,0,-1, 0,-1,-1, -1,-1,-1
440 L1=KM(TS/2):DIM WDS(TS,L1)
450 GOSUB 530
460 GOSUB 630
470 GOSUB 970
480 GOSUB 2120
490 GOSUB 2260
500 GOSUB 2490
510 GOSUB 2900
520 END
530 REM*** OLURLU DURUMLAR TABLOSU ALTPROGRAMI***
540 FOR I=1 TO TS
550 FOR W=1 TO KM(I)
560 RDS(I,W,0)=ST(I):C(I,W,0)=0
570 FOR B=1 TO N
580 RDS(I,W,B)=RDS(I,W,B-1)+C(I,W,B)
590 NEXT B
600 NEXT W
610 NEXT I
620 RETURN

```



```

630 REM ***Var(s) HESABI ALTPROGRAMI***
640 REM HAT KODUN VARYANSINI HESAPLAR
650 FOR I=1 TO TS
660 FOR W=1 TO KM(I)
670 KS(I,W)=0:Var(I)=0
680 FOR B=1 TO N
690 HBS(I,W,B)=RDS(I,W,B)^2
700 KS(I,W)=KS(I,W)+HBS(I,W,B)
710 NEXT B
720 NEXT W
730 NEXT I
740 GOSUB 1930
750 GOSUB 530
760 GOSUB 1260
770 FOR I=1 TO TS
780 FOR W=1 TO 2^M
790 KS(I,W)=1/N*KS(I,W)
800 HAS(I,W)=(1/2^M)*KS(I,W)
810 NEXT W
820 FOR W=1 TO 2^M
830 Var(I)=Var(I)+HAS(I,W)
840 NEXT W
850 Var(I)=Var(I)*PO(I)
860 NEXT I
870 GOSUB 3560
880 GOSUB 530
890 VS=0
900 FOR I=1 TO TS
910 VS=VS+Var(I)
920 NEXT I
930 PRINT"HAT KODUN VARYANSI:"
940 PRINT"Var(s)=";VS
950 PRINT
960 RETURN
970 REM***VarD(s) HESABI ALTPROGRAMI***
980 REM HAT KODUN BOZUCU VARYANSINI HESAPLAR
990 FOR I=1 TO TS
1000 FOR W=1 TO 2^M
1010 KD(I,W)=0:VaD(I)=0
1020 FOR B=1 TO N
1030 IF RDS(I,W,B-1)>=0 THEN 1060
1040 IF C(I,W,B)<=0 THEN F=1 ELSE F=0
1050 GOTO 1070
1060 IF C(I,W,B)>=0 THEN F=1 ELSE F=0
1070 HBD(I,W,B)=RDS(I,W,B-1)^2*F
1080 KD(I,W)=KD(I,W)+HBD(I,W,B)
1090 NEXT B
1100 KD(I,W)=1/N*KD(I,W)
1110 HAD(I,W)=(1/2^M)*KD(I,W)
1120 NEXT W
1130 FOR W=1 TO 2^M
1140 VaD(I)=VaD(I)+HAD(I,W)
1150 NEXT W
1160 VaD(I)=VaD(I)*PO(I)
1170 NEXT I
1180 VD=0
1190 FOR I=1 TO TS
1200 VD=VD+VaD(I)
1210 NEXT I
1220 PRINT"HAT KODUN BOZUCU VARYANSI:"
1230 PRINT "VarD(s)=";VD
1240 PRINT
1250 RETURN
1260 PRINT"PO(KI,ST(I))=";PO(I)
1270 NEXT I

```



```

1260 REM ***TERMINAL OLASILIKLARI,PO, HESABI ALTPROGRAMI***
1270 REM ***GECIS MATRISI BULUNMASI***
1280 FOR I=1 TO TS
1290 FOR J=1 TO TS
1300 FOR W=1 TO 2^M
1310 IF ST(J)=RDS(I,W,N) THEN GM(I,J)=GM(I,J)+1
1320 NEXT W
1330 NEXT J
1340 NEXT I
1350 GOSUB 1380
1360 GOSUB 1540
1370 RETURN
1380 REM *** MARKOV ZINCIRI UYGULANMASI ***
1390 FOR I=1 TO TS
1400 FOR J=1 TO TS
1410 GM1(J,I)=GM(I,J)
1420 NEXT J
1430 NEXT I
1440 FOR I=1 TO TS
1450 GM1(I,I)=GM1(I,I)-2^M
1460 NEXT I
1470 FOR I=1 TO TS+1
1480 GM1(TS,I)=1
1490 NEXT I
1500 FOR I=1 TO TS-1
1510 GM1(I,TS+1)=0
1520 NEXT I
1530 RETURN
1540 REM *** A*X=B DENKLEM COZUMU ***
1550 FOR I=1 TO TS-1
1560 N2=I
1570 X=ABS (GM1(I,I))
1580 FOR J=I+1 TO TS
1590 IF ABS (GM1(J,I))<=X THEN 1620
1600 N2=J
1610 X=ABS (GM1(J,I))
1620 NEXT J
1630 IF N2=I THEN 1690
1640 FOR J=I TO TS+1
1650 S=GM1(I,J)
1660 GM1(I,J)=GM1(N2,J)
1670 GM1(N2,J)=S
1680 NEXT J
1690 P=GM1(I,I)
1700 FOR J=I+1 TO TS
1710 P1=GM1(J,I)/P
1720 FOR K=I+1 TO TS+1
1730 GM1(J,K)=GM1(J,K)-GM1(I,K)*P1
1740 NEXT K
1750 NEXT J
1760 NEXT I
1770 PO(TS)=GM1(TS,TS+1)/GM1(TS,TS)
1780 FOR I=TS-1 TO 1 STEP -1
1790 FOR J=I+1 TO TS
1800 Y=GM1(I,J)*PO(J)
1810 GM1(I,TS+1)=GM1(I,TS+1)-Y
1820 NEXT J
1830 PO(I)=GM1(I,TS+1)/GM1(I,I)
1840 NEXT I
1850 PRINT " TASARLANAN MINIMUM HATA OLASILIKLI 4B-3T HAT KODU"
1860 PRINT
1870 PRINT"TERMINAL OLASILIKLARI:"
1880 FOR I=1 TO TS
1890 PRINT"PO(";ST(I);")=";PO(I)
1900 NEXT I

```



```

1910 PRINT
1920 RETURN
1930 REM *** MINIMUM ZARARLI KODKELIMELERINI SECME ALTPROGRAMI ***
1940 FOR I=1 TO TS
1950 IF KM(I) <= 2^M THEN 2100
1960 FOR W=1 TO KM(I)-1
1970 FOR L=W+1 TO KM(I)
1980 IF KS(I,W) <= KS(I,L) THEN 2070
1990 HT=KS(I,L)
2000 KS(I,L)=KS(I,W)
2010 KS(I,W)=HT
2020 FOR B=1 TO N
2030 H=C(I,L,B)
2040 C(I,L,B)=C(I,W,B)
2050 C(I,W,B)=H
2060 NEXT B
2070 NEXT L
2080 NEXT W
2090 GOSUB 3350
2100 NEXT I
2110 RETURN
2120 REM *** KODKELIMELERI YAZDIRILMASI ALTPROGRAMI ***
2130 FOR I=1 TO TS
2140 PRINT "ST="; ST(I); "MODU "
2150 PRINT "-----"
2160 FOR W=1 TO 2^M
2170 PRINT "W("; W; ")=";
2180 FOR B=1 TO N
2190 PRINT C(I,W,B);
2200 NEXT B
2210 PRINT
2220 NEXT W
2230 NEXT I
2240 PRINT
2250 RETURN
2260 REM *** OLURLU DURUMLAR OLASILIKLARI, P(S), HESAPLAMA ALTPROGRAMI ****
2270 PS(J)=0:HTP(I)=0
2280 FOR I=1 TO DSV+1
2290 S(I)=(0.5*DSV)+1-I
2300 NEXT I
2310 PRINT "OLURLU DURUMLAR OLASILIKLARI:"
2320 FOR J=1 TO DSV+1
2330 FOR I=1 TO TS
2340 FOR W=1 TO 2^M
2350 FOR B=1 TO N
2360 IF S(J)=RDS(I,W,B) THEN NSAY=NSAY+1
2370 NEXT B
2380 NEXT W
2390 HTP(I)=(NSAY/((2^M)*N))*PO(I)
2400 NSAY=0
2410 NEXT I
2420 FOR I=1 TO TS
2430 PS(J)=PS(J)+HTP(I)
2440 NEXT I
2450 PRINT "PS("; S(J); ")="; PS(J)
2460 NEXT J
2470 PRINT
2480 RETURN
2490 REM *** KOSULLU OLASILIKLAR, P(SIS), HESAPLANMASI ALTPROGRAMI ***
2500 DIM NSAY(TS,DSV+1,3*(DSV+1))
2510 FOR J=1 TO DSV+1
2520 FOR I=1 TO TS
2530 FOR W=1 TO 2^M

```



```

2540 FOR B=0 TO N-1
2550 IF S(J)<>RDS(I,W,B) THEN 2590
2560 FOR U=-1 TO 1
2570 IF RDS(I,W,B+1)=S(J)+U THEN NSAY(I,J,J+U)=NSAY(I,J,J+U)+1
2580 NEXT U
2590 NEXT B
2600 NEXT W
2610 NEXT I
2620 NEXT J
2630 FOR J=1 TO DSV+1
2640 FOR I=1 TO TS
2650 FOR U=-1 TO 1
2660 PK(J,J+U)=(PO(I))*(NSAY(I,J,J+U)/2^M)+PK(J,J+U)
2670 NEXT U
2680 NEXT I
2690 NEXT J
2700 FOR J=1 TO DSV+1
2710 FOR U=-1 TO 1
2720 PKT(J)=PK(J,J+U)+PKT(J)
2730 NEXT U
2740 NEXT J
2750 PRINT "KOSULLU OLASILIKLAR:"
2760 FOR J=1 TO DSV+1
2770 FOR U=-1 TO 1
2780 PSS(J+U,J)=PK(J,J+U)/PKT(J)
2790 PRINT "P(";S(J)+U;"I";S(J);")=";PSS(J+U,J)
2800 NEXT U
2810 NEXT J
2820 PRINT
2830 PRINT "OLURLU DURUMLAR HATA OLASILIK KATSAYILARI:"
2840 FOR J=1 TO DSV+1
2850 PER(J)=PS(J)*(PSS(J+1,J)+PSS(J,J))
2860 PRINT "Per(";S(J);")=";PER(J)
2870 NEXT J
2880 PRINT
2890 RETURN
2900 REM*** HAT KODU HATA OLASILIGI HESAPLANMASI ALTPROGRAMI ***
2910 DIM HS(DSV+1)
2920 DIM Z(DSV+1):DIM V(DSV+1)
2930 DIM X(200):DIM Y(200)
2940 REM OLURLU DURUMLAR VE OLASILIKLARI S(I),PER(I)
2950 REM Simge Genligi,L
2960 L=1
2970 REM Simge kuyruğu(Tail) Genligi,h
2980 PRINT "HAT KODUN HATA OLASILIK DEGERLERI:"
2990 PRINT "L=";L
3000 FOR H=0.04 TO 0.11 STEP 0.01
3010 FOR G=0.12 TO 0.02 STEP -0.01
3020 HIGO=20*LOG10((0.707*L)/G)
3030 HATA=0
3040 FOR J=1 TO DSV+1
3050 Z(J)=-S(J)*h
3060 HS(J)=L*(0.5+Z(J))/(G*1.414)
3070 HB=HS(J)
3080 GOSUB 3180
3090 V(J)=K*PER(J)
3100 NEXT J
3110 FOR J=1 TO DSV+1
3120 HATA=HATA+V(J)
3130 NEXT J
3140 PRINT "h=";H,"N=";G,"IGO=";HIGO,"P(e)=";HATA
3150 NEXT G
3160 NEXT H
3170 RETURN

```



```

3180 REM *** Erfc(HB) DEGERI BULUNMASI ***
3190 DEF FNA(X)=1/SQR(2*PI)*EXP(-X*X/2)
3200 IF HB<2 THEN HA=0:E1=0 :GOTO 3250
3210 IF HB<4 THEN HA=2: E1=0.4772 :GOTO 3250
3220 IF HB<6 THEN HA=4:E1=0.499968 :GOTO 3250
3230 IF HB>6.35 THEN K=2.32E-10:GOTO 3340
3240 HA=6:E1=0.499999999
3250 N=100
3260 HD=(HB-HA)/N
3270 FOR I=1 TO N :X(I)=HA+HD*I :Y(I)=FNA(X(I)) :NEXT I
3280 S=Y(1)+Y(N)
3290 FOR I=1 TO N-1
3300 IF I/2=INT(I/2) THEN S=S+2*Y(I) ELSE S=S+4*Y(I)
3310 NEXT I
3320 E=HD/3*S+E1
3330 IF HB<0 THEN K=0.5-E ELSE K=1-2*E
3340 RETURN
3350 REM *** ESIT ZARARLI KODKELIMELERDEN IYISINI SECMEK ALTPROGRAMI ****
3360 FOR L=(2^M)+1 TO KM(I)
3370 FOR W=1 TO 2^M
3380 IF KS(I,L)<>KS(I,W) THEN 3530
3390 WDS(I,W)=0:WDS(I,L)=0
3400 FOR B=1 TO N
3410 WDS(I,W)=WDS(I,W)+C(I,W,B)
3420 WDS(I,L)=WDS(I,L)+C(I,L,B)
3430 NEXT B
3440 IF ABS(WDS(I,W))<=ABS(WDS(I,L)) THEN 3530
3450 HT2=KS(I,W)
3460 KS(I,W)=KS(I,L)
3470 KS(I,L)=HT2
3480 FOR B=1 TO N
3490 H2=C(I,W,B)
3500 C(I,W,B)=C(I,L,B)
3510 C(I,L,B)=H2
3520 NEXT B
3530 NEXT W
3540 NEXT L
3550 RETURN
3560 REM *** KUCUK VARYANSLI MODU SECME ***
3570 FOR I=1 TO TS/2
3580 L=(TS+1)-I
3590 FOR W=1 TO 2^M
3600 FOR B=1 TO N
3610 IF VAR(I)<=VAR(L) THEN C(L,W,B)=-C(I,W,B) ELSE C(I,W,B)=-C(L,W,B)
3620 NEXT B
3630 NEXT W
3640 NEXT I
3650 RETURN

```


EK-3

TASARLANAN MINIMUM HATA OLASILIKLI 4B-3TH HAT KODU

TERMINAL OLASILIKLARI:

$P_0(-1.5) = 0.153846154$
 $P_0(-0.5) = 0.346153846$
 $P_0(0.5) = 0.346153846$
 $P_0(1.5) = 0.153846154$

HAT KODUNUN VARYANSI:

Var(s) = 0.948717948

HAT KODUNUN BOZUCU VARYANSI:

VarD(s) = 0.349759615

ALFABELER:

ST=-1.5 MODU

```

-----
0 1 -1
0 -1 1
1 0 -1
-1 0 1
1 -1 0
-1 1 0
1 0 0
0 1 0
0 0 1
1 1 -1
1 -1 1
-1 1 1
1 1 0
1 0 1
0 1 1
1 1 1

```

ST=-0.5 MODU

```

-----
0 1 -1
1 0 -1
1 -1 0
1 0 0
0 1 0
0 0 1
1 -1 1
0 -1 1
1 -1 -1
0 0 -1
1 1 -1
-1 1 0
-1 1 1
1 0 1
0 1 1
-1 0 1

```

ST= 0.5 MODU

```

-----
0 -1 1
-1 0 1
-1 1 0
-1 0 0
0 -1 0
0 0 -1
-1 1 -1
0 1 -1
-1 1 1
0 0 1
-1 -1 1
1 -1 0
1 -1 -1
-1 0 -1
0 -1 -1
1 0 -1

```


ST= 1.5 MODU	N	180	Part
0 -1 1	9.1200	15.4048	2.5547E-02
0 1 -1	9.1100	16.1608	1.0435E-02
-1 0 1	9.1000	16.9288	2.7527E-03
1 0 -1	9.0900	17.6988	1.4821E-03
-1 1 0	9.0800	18.4706	1.0240E-03
1 1 0	9.0700	19.2444	1.1798E-04
-1 0 0	9.0600	20.0200	2.4357E-05
0 -1 0	9.0500	20.7976	4.5297E-06
0 0 -1	9.0400	21.5768	7.5797E-07
-1 -1 1	9.0300	22.3584	1.1682E-07
1 -1 -1	9.0200	23.1424	1.7822E-08
-1 -1 0	9.0100	23.9288	2.6047E-09
1 0 -1	9.0000	24.7176	3.7427E-10
-1 0 1	8.9900	25.5088	5.3027E-11
0 -1 -1	8.9800	26.3024	7.3927E-12
0 1 -1	8.9700	27.0984	1.0030E-12
-1 -1 -1	8.9600	27.8968	1.3300E-13
0 -1 0	8.9500	28.6976	1.7270E-14
0 0 0	8.9400	29.5008	2.2000E-15
0 0 1	8.9300	30.3064	2.7540E-16
0 1 0	8.9200	31.1144	3.4940E-17
0 1 1	8.9100	31.9248	4.4260E-18
1 0 0	8.9000	32.7376	5.5560E-19
1 0 1	8.8900	33.5528	6.8800E-20
1 1 0	8.8800	34.3704	8.4040E-21
1 1 1	8.8700	35.1904	1.0136E-21
2 0 0	8.8600	36.0128	1.2080E-22
2 0 1	8.8500	36.8376	1.4240E-23
2 1 0	8.8400	37.6648	1.6600E-24
2 1 1	8.8300	38.4944	1.9160E-25
3 0 0	8.8200	39.3264	2.1920E-26
3 0 1	8.8100	40.1608	2.4880E-27
3 1 0	8.8000	40.9976	2.8040E-28
3 1 1	8.7900	41.8368	3.1400E-29
4 0 0	8.7800	42.6784	3.4960E-30
4 0 1	8.7700	43.5224	3.8720E-31
4 1 0	8.7600	44.3688	4.2680E-32
4 1 1	8.7500	45.2176	4.6840E-33
5 0 0	8.7400	46.0688	5.1160E-34
5 0 1	8.7300	46.9224	5.5640E-35
5 1 0	8.7200	47.7784	6.0280E-36
5 1 1	8.7100	48.6368	6.5080E-37
6 0 0	8.7000	49.4976	6.9960E-38
6 0 1	8.6900	50.3608	7.5000E-39
6 1 0	8.6800	51.2264	8.0160E-40
6 1 1	8.6700	52.0944	8.5440E-41
7 0 0	8.6600	52.9648	9.0840E-42
7 0 1	8.6500	53.8376	9.6360E-43
7 1 0	8.6400	54.7128	1.0196E-43
7 1 1	8.6300	55.5904	1.0768E-44
8 0 0	8.6200	56.4704	1.1348E-45
8 0 1	8.6100	57.3528	1.1936E-46
8 1 0	8.6000	58.2376	1.2532E-47
8 1 1	8.5900	59.1248	1.3136E-48
9 0 0	8.5800	60.0144	1.3748E-49
9 0 1	8.5700	60.9064	1.4368E-50
9 1 0	8.5600	61.8008	1.4996E-51
9 1 1	8.5500	62.6976	1.5632E-52
10 0 0	8.5400	63.5968	1.6276E-53
10 0 1	8.5300	64.4984	1.6928E-54
10 1 0	8.5200	65.4024	1.7588E-55
10 1 1	8.5100	66.3088	1.8256E-56
11 0 0	8.5000	67.2176	1.8932E-57
11 0 1	8.4900	68.1288	1.9616E-58
11 1 0	8.4800	69.0424	2.0308E-59
11 1 1	8.4700	69.9584	2.1008E-60
12 0 0	8.4600	70.8768	2.1716E-61
12 0 1	8.4500	71.7976	2.2432E-62
12 1 0	8.4400	72.7184	2.3148E-63
12 1 1	8.4300	73.6392	2.3864E-64
13 0 0	8.4200	74.5600	2.4580E-65
13 0 1	8.4100	75.4808	2.5296E-66
13 1 0	8.4000	76.4016	2.6012E-67
13 1 1	8.3900	77.3224	2.6728E-68
14 0 0	8.3800	78.2432	2.7444E-69
14 0 1	8.3700	79.1640	2.8160E-70
14 1 0	8.3600	80.0848	2.8876E-71
14 1 1	8.3500	81.0056	2.9592E-72
15 0 0	8.3400	81.9264	3.0308E-73
15 0 1	8.3300	82.8472	3.1024E-74
15 1 0	8.3200	83.7680	3.1740E-75
15 1 1	8.3100	84.6888	3.2456E-76
16 0 0	8.3000	85.6096	3.3172E-77
16 0 1	8.2900	86.5304	3.3888E-78
16 1 0	8.2800	87.4512	3.4604E-79
16 1 1	8.2700	88.3720	3.5320E-80
17 0 0	8.2600	89.2928	3.6036E-81
17 0 1	8.2500	90.2136	3.6752E-82
17 1 0	8.2400	91.1344	3.7468E-83
17 1 1	8.2300	92.0552	3.8184E-84
18 0 0	8.2200	92.9760	3.8896E-85
18 0 1	8.2100	93.8968	3.9612E-86
18 1 0	8.2000	94.8176	4.0328E-87
18 1 1	8.1900	95.7384	4.1044E-88
19 0 0	8.1800	96.6592	4.1760E-89
19 0 1	8.1700	97.5800	4.2476E-90
19 1 0	8.1600	98.5008	4.3192E-91
19 1 1	8.1500	99.4216	4.3908E-92
20 0 0	8.1400	100.3424	4.4624E-93
20 0 1	8.1300	101.2632	4.5340E-94
20 1 0	8.1200	102.1840	4.6056E-95
20 1 1	8.1100	103.1048	4.6772E-96
21 0 0	8.1000	104.0256	4.7488E-97
21 0 1	8.0900	104.9464	4.8204E-98
21 1 0	8.0800	105.8672	4.8920E-99
21 1 1	8.0700	106.7880	4.9636E-100
22 0 0	8.0600	107.7088	5.0352E-101
22 0 1	8.0500	108.6296	5.1068E-102
22 1 0	8.0400	109.5504	5.1784E-103
22 1 1	8.0300	110.4712	5.2500E-104
23 0 0	8.0200	111.3920	5.3216E-105
23 0 1	8.0100	112.3128	5.3932E-106
23 1 0	8.0000	113.2336	5.4648E-107
23 1 1	7.9900	114.1544	5.5364E-108
24 0 0	7.9800	115.0752	5.6080E-109
24 0 1	7.9700	115.9960	5.6796E-110
24 1 0	7.9600	116.9168	5.7512E-111
24 1 1	7.9500	117.8376	5.8228E-112
25 0 0	7.9400	118.7584	5.8944E-113
25 0 1	7.9300	119.6792	5.9660E-114
25 1 0	7.9200	120.6000	6.0376E-115
25 1 1	7.9100	121.5208	6.1092E-116
26 0 0	7.9000	122.4416	6.1808E-117
26 0 1	7.8900	123.3624	6.2524E-118
26 1 0	7.8800	124.2832	6.3240E-119
26 1 1	7.8700	125.2040	6.3956E-120
27 0 0	7.8600	126.1248	6.4672E-121
27 0 1	7.8500	127.0456	6.5388E-122
27 1 0	7.8400	127.9664	6.6104E-123
27 1 1	7.8300	128.8872	6.6820E-124
28 0 0	7.8200	129.8080	6.7536E-125
28 0 1	7.8100	130.7288	6.8252E-126
28 1 0	7.8000	131.6496	6.8968E-127
28 1 1	7.7900	132.5704	6.9684E-128
29 0 0	7.7800	133.4912	7.0396E-129
29 0 1	7.7700	134.4120	7.1112E-130
29 1 0	7.7600	135.3328	7.1828E-131
29 1 1	7.7500	136.2536	7.2544E-132
30 0 0	7.7400	137.1744	7.3260E-133
30 0 1	7.7300	138.0952	7.3976E-134
30 1 0	7.7200	139.0160	7.4692E-135
30 1 1	7.7100	139.9368	7.5408E-136
31 0 0	7.7000	140.8576	7.6124E-137
31 0 1	7.6900	141.7784	7.6840E-138
31 1 0	7.6800	142.6992	7.7556E-139
31 1 1	7.6700	143.6200	7.8272E-140
32 0 0	7.6600	144.5408	7.8988E-141
32 0 1	7.6500	145.4616	7.9704E-142
32 1 0	7.6400	146.3824	8.0420E-143
32 1 1	7.6300	147.3032	8.1136E-144
33 0 0	7.6200	148.2240	8.1852E-145
33 0 1	7.6100	149.1448	8.2568E-146
33 1 0	7.6000	150.0656	8.3284E-147
33 1 1	7.5900	150.9864	8.3996E-148
34 0 0	7.5800	151.9072	8.4712E-149
34 0 1	7.5700	152.8280	8.5428E-150
34 1 0	7.5600	153.7488	8.6144E-151
34 1 1	7.5500	154.6696	8.6860E-152
35 0 0	7.5400	155.5904	8.7576E-153
35 0 1	7.5300	156.5112	8.8292E-154
35 1 0	7.5200	157.4320	8.9008E-155
35 1 1	7.5100	158.3528	8.9724E-156
36 0 0	7.5000	159.2736	9.0440E-157
36 0 1	7.4900	160.1944	9.1156E-158
36 1 0	7.4800	161.1152	9.1872E-159
36 1 1	7.4700	162.0360	9.2588E-160
37 0 0	7.4600	162.9568	9.3304E-161
37 0 1	7.4500	163.8776	9.4020E-162
37 1 0	7.4400	164.7984	9.4736E-163
37 1 1	7.4300	165.7192	9.5452E-164
38 0 0	7.4200	166.6400	9.6168E-165
38 0 1	7.4100	167.5608	9.6884E-166
38 1 0	7.4000	168.4816	9.7600E-167
38 1 1	7.3900	169.4024	9.8316E-168
39 0 0	7.3800	170.3232	9.9032E-169
39 0 1	7.3700	171.2440	9.9748E-170
39 1 0	7.3600	172.1648	1.0046E-171
39 1 1	7.3500	173.0856	1.0114E-172
40 0 0	7.3400	174.0064	1.0182E-173
40 0 1	7.3300	174.9272	1.0250E-174
40 1 0	7.3200	175.8480	1.0318E-175
40 1 1	7.3100	176.7688	1.0386E-176
41 0 0	7.3000	177.6896	1.0454E-177
41 0 1	7.2900	178.6104	1.0522E-178
41 1 0	7.2800	179.5312	1.0590E-179
41 1 1	7.2700	180.4520	1.0658E-180
42 0 0	7.2600	181.3728	1.0726E-181
42 0 1	7.2500	182.2936	1.0794E-182
42 1 0	7.2400	183.2144	1.0862E-183
42 1 1	7.2300	184.1352	1.0930E-184
43 0 0	7.2200	185.0560	1.0998E-185
43 0 1	7.2100	185.9768	1.1066E-186
43 1 0	7.2000	186.8976	1.1134E-187
43 1 1	7.1900	187.8184	1.1202E-188
44 0 0	7.1800	188.7392	1.1270E-189
44 0 1	7.1700	189.6600	1.1338E-190
44 1 0	7.1600	190.5808	1.1406E-191
44 1 1	7.1500	191.5016	1.1474E-192
45 0 0	7.1400	192.4224	1.1542E-193
45 0 1	7.1300	193.3432	1.1610E-194
45 1 0	7.1200	194.2640	1.1678E-195
45 1 1	7.1100	195.1848	1.1746E-196
46 0 0	7.1000	196.1056	1.1814E-197
46 0 1	7.0900	197.0264	1.1882E-198
46 1 0	7.0800	197.9472	1.1950E-199
46 1 1	7.0700	198.8680	1.2018E-200
47 0 0	7.0600	199.7888	1.2086E-201
47 0 1	7.0500	200.7096	1.2154E-202
47 1 0	7.0400	201.6304	1.2222E-203
47 1 1	7.0300	202.5512	1.2290E-204
48 0 0	7.0200	203.4720	1.2358E-205
48 0 1	7.0100	204.3928	1.2426E-206
48 1 0	7.0000	205.3136	1.2494E-207
48 1 1	6.9900	206.2344	1.2562E-208
49 0 0	6.9800	207.1552	1.2630E-209
49 0 1	6.9700	208.0760	1.2698E-210
49 1 0	6.9600	208.9968	1.2766E-211
49 1 1	6.9500	209.9176	1.2834E-212
50 0 0	6.9400	210.8384	1.2902E-213
50 0 1	6.9300	211.7592	1.2970E-214
50 1 0	6.9200	212.6800	1.3038E-215
50 1 1	6.9100	213.6008	1.3106E-216
51 0 0	6.9000	214.5216	1.3174E-217
51 0 1	6.8900	215.4424	1.3242E-218
51 1 0	6.8800	216.3632	1.3310E-219
51 1 1	6.8700	217.2840	1.3378E-220
52 0 0	6.8600	218.2048	1.3446E-221
52 0 1	6.8500	219.1256	1.3514E-222
52 1 0	6.8400	220.0464	1.3582E-223
52 1 1			

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

PS(2.5) = 0.016025641
PS(1.5) = 0.126602564
PS(0.5) = 0.357371795
PS(-0.5) = 0.357371795
PS(-1.5) = 0.126602564
PS(-2.5) = 0.016025641

KOSULLU OLASILIKLAR:

```
P( 1.5 I 2.5 ) = 0.8
P( 2.5 I 2.5 ) = 0.2
P( 3.5 I 2.5 ) = 0
P( 0.5 I 1.5 ) = 0.639240506
P( 1.5 I 1.5 ) = 0.259493671
P( 2.5 I 1.5 ) = 0.101265823
P(-0.5 I 0.5 ) = 0.417040359
P( 0.5 I 0.5 ) = 0.356502242
P( 1.5 I 0.5 ) = 0.226457399
P(-1.5 I -0.5 ) = 0.226457399
P(-0.5 I -0.5 ) = 0.356502242
P( 0.5 I -0.5 ) = 0.417040359
P(-2.5 I -1.5 ) = 0.101265823
P(-1.5 I -1.5 ) = 0.259493671
P(-0.5 I -1.5 ) = 0.639240506
P(-3.5 I -2.5 ) = 0
P(-2.5 I -2.5 ) = 0.2
P(-1.5 I -2.5 ) = 0.8
```

OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

```
Per ( 2.5 ) = 3.20513E-03
Per ( 1.5 ) = 4.56731E-02
Per ( 0.5 ) = 0.208333333
Per (-0.5 ) = 0.276442308
Per (-1.5 ) = 0.113782051
Per (-2.5 ) = 0.016025641
```


4B-3TH HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

L= 1	h	N	IGO	F (e)
	-----	-----		-----
	0.0400	0.1200	15.4048	2.2567E-03
	0.0400	0.1100	16.1605	1.0095E-03
	0.0400	0.1000	16.9884	3.9359E-04
	0.0400	0.0900	17.9035	1.0871E-04
	0.0400	0.0800	18.9266	1.8246E-05
	0.0400	0.0700	20.0864	1.3294E-06
	0.0400	0.0600	21.4254	2.1226E-07
	0.0400	0.0500	23.0090	2.6356E-09
	0.0400	0.0400	24.9472	1.5392E-10
	0.0400	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.0500	0.1200	15.4048	2.4141E-03
	0.0500	0.1100	16.1605	1.1108E-03
	0.0500	0.1000	16.9884	4.3389E-04
	0.0500	0.0900	17.9035	1.3003E-04
	0.0500	0.0800	18.9266	2.3703E-05
	0.0500	0.0700	20.0864	2.5022E-06
	0.0500	0.0600	21.4254	2.5049E-07
	0.0500	0.0500	23.0090	2.8880E-09
	0.0500	0.0400	24.9472	1.5392E-10
	0.0500	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.0600	0.1200	15.4048	2.6351E-03
	0.0600	0.1100	16.1605	1.2565E-03
	0.0600	0.1000	16.9884	5.1318E-04
	0.0600	0.0900	17.9035	1.6310E-04
	0.0600	0.0800	18.9266	3.3303E-05
	0.0600	0.0700	20.0864	4.1575E-06
	0.0600	0.0600	21.4254	3.7398E-07
	0.0600	0.0500	23.0090	4.0157E-08
	0.0600	0.0400	24.9472	1.5542E-10
	0.0600	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.0700	0.1200	15.4048	2.9265E-03
	0.0700	0.1100	16.1605	1.4522E-03
	0.0700	0.1000	16.9884	6.2412E-04
	0.0700	0.0900	17.9035	2.1305E-04
	0.0700	0.0800	18.9266	4.9823E-05
	0.0700	0.0700	20.0864	1.3398E-05
	0.0700	0.0600	21.4254	1.1454E-06
	0.0700	0.0500	23.0090	5.1107E-08
	0.0700	0.0400	24.9472	2.6278E-09
	0.0700	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.0800	0.1200	15.4048	3.2957E-03
	0.0800	0.1100	16.1605	1.7075E-03
	0.0800	0.1000	16.9884	7.7586E-04
	0.0800	0.0900	17.9035	2.8706E-04
	0.0800	0.0800	18.9266	7.7679E-05
	0.0800	0.0700	20.0864	2.0505E-05
	0.0800	0.0600	21.4254	2.2121E-06
	0.0800	0.0500	23.0090	1.0940E-07
	0.0800	0.0400	24.9472	2.8136E-09
	0.0800	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.0900	0.1200	15.4048	3.7567E-03
	0.0900	0.1100	16.1605	2.0197E-03
	0.0900	0.1000	16.9884	9.7958E-04
	0.0900	0.0900	17.9035	3.9487E-04
	0.0900	0.0800	18.9266	1.2365E-04
	0.0900	0.0700	20.0864	3.4911E-05
	0.0900	0.0600	21.4254	5.1374E-06
	0.0900	0.0500	23.0090	7.6608E-07
	0.0900	0.0400	24.9472	6.0672E-09
	0.0900	0.0300	27.4460	1.5392E-10
	0.1000	0.1200	15.4048	4.3194E-03
	0.1000	0.1100	16.1605	2.4312E-03
	0.1000	0.1000	16.9884	1.2497E-03
	0.1000	0.0900	17.9035	5.4875E-04
	0.1000	0.0800	18.9266	2.2394E-04
	0.1000	0.0700	20.0864	6.2689E-05
	0.1000	0.0600	21.4254	1.2527E-05
	0.1000	0.0500	23.0090	1.7406E-06
	0.1000	0.0400	24.9472	3.3924E-08
	0.1000	0.0300	27.4460	2.6688E-09

EK-4

ST= 0.5 MODU

TASARLANAN MINIMUM HATA OLASILIKLI 5B-4TH HAT KODU

TERMINAL OLASILIKLARI:

 $P_0(-0.5) = 0.5$ $P_0(0.5) = 0.5$

HAT KODUNUN VARYANSI:

 $\text{Var}(s) = 0.59375$

HAT KODUNUN BOZUCU VARYANSI:

 $\text{VarD}(s) = 0.1875$

ALFABELER:

ST=-0.5 MODU

1	-1	0	0
1	-1	1	-1
1	0	-1	0
1	0	0	-1
0	0	1	-1
0	1	-1	0
0	1	0	-1
1	-1	0	1
1	-1	1	0
1	0	-1	1
1	0	0	0
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	-1	1
0	1	0	0
0	-1	1	1
0	0	-1	1
0	-1	1	0
-1	1	0	0
1	0	1	-1
-1	1	1	-1
1	1	-1	0
1	-1	-1	1
1	1	-1	-1
-1	1	0	1
0	1	1	-1
-1	1	1	0
1	1	0	-1
-1	0	1	0
-1	0	1	1
-1	1	-1	1
0	-1	0	1

$P_{-0.5}(-0.5) = 0.3046875$
 $P_{-0.5}(0.5) = 0.47$
 $P_{-0.5}(-1.5) = 0$
 $P_{-0.5}(-1.5) = 0.1018125$
 $P_{-0.5}(-1.5) = 0.1018125$

OLASILIKLI OLASILIKLI HATA OLASILIKLI

$P_{-0.5}(-0.5) = 0.0734375$
 $P_{-0.5}(0.5) = 0.234375$
 $P_{-0.5}(-1.5) = 0.140625$
 $P_{-0.5}(-1.5) = 0.140625$

ST= 0.5 MODU

```

-----
-1 1 0 0
-1 1 -1 1
-1 0 1 0
-1 0 0 1
0 0 -1 1
0 -1 1 0
0 -1 0 1
-1 1 0 -1
-1 1 -1 0
-1 0 1 -1
-1 0 0 0
0 0 0 -1
0 0 -1 0
0 -1 1 -1
0 -1 0 0
0 -1 -1 -1
0 0 1 -1
0 1 -1 0
1 -1 0 0
-1 0 -1 1
1 -1 -1 1
-1 -1 1 0
-1 1 1 -1
-1 -1 1 1
1 -1 0 -1
0 -1 -1 1
1 -1 -1 0
-1 -1 0 1
1 0 -1 0
1 0 -1 -1
1 -1 1 -1
0 1 0 -1

```

OLURLU DURUMLARIN OLASILIKLARI:

$PS(1.5) = 0.0859375$
 $PS(0.5) = 0.4140625$
 $PS(-0.5) = 0.4140625$
 $PS(-1.5) = 0.0859375$

KOSULLU OLASILIKLAR:

$P(0.5 \mid 1.5) = 0.818181818$
 $P(1.5 \mid 1.5) = 0.181818182$
 $P(2.5 \mid 1.5) = 0$
 $P(-0.5 \mid 0.5) = 0.433962264$
 $P(0.5 \mid 0.5) = 0.396226415$
 $P(1.5 \mid 0.5) = 0.169811321$
 $P(-1.5 \mid -0.5) = 0.169811321$
 $P(-0.5 \mid -0.5) = 0.396226415$
 $P(0.5 \mid -0.5) = 0.433962264$
 $P(-2.5 \mid -1.5) = 0$
 $P(-1.5 \mid -1.5) = 0.181818182$
 $P(-0.5 \mid -1.5) = 0.818181818$

OLURLU DURUMLARIN HATA OLASILIKLARI:

$Per(1.5) = 0.015625$
 $Per(0.5) = 0.234375$
 $Per(-0.5) = 0.34375$
 $Per(-1.5) = 0.0859375$

SB-4TH HAT KODU HATA OLASILIK DEGERLERI:

L= 1	h	N	IGO	P(e)
	0.0400	0.1200	15.4048	2.1485E-03
	0.0400	0.1100	16.1605	9.3626E-04
	0.0400	0.1000	16.9884	3.5791E-04
	0.0400	0.0900	17.9035	9.3191E-05
	0.0400	0.0800	18.9266	1.0667E-05
	0.0400	0.0700	20.0864	9.5982E-07
	0.0400	0.0600	21.4254	1.9471E-07
	0.0400	0.0500	23.0090	1.6498E-10
	0.0400	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0400	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.0500	0.1200	15.4048	2.2035E-03
	0.0500	0.1100	16.1605	9.7599E-04
	0.0500	0.1000	16.9884	3.6876E-04
	0.0500	0.0900	17.9035	1.0121E-04
	0.0500	0.0800	18.9266	1.2537E-05
	0.0500	0.0700	20.0864	1.1700E-06
	0.0500	0.0600	21.4254	1.9954E-07
	0.0500	0.0500	23.0090	1.8317E-10
	0.0500	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0500	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.0600	0.1200	15.4048	2.2902E-03
	0.0600	0.1100	16.1605	1.0347E-03
	0.0600	0.1000	16.9884	4.0000E-04
	0.0600	0.0900	17.9035	1.1299E-04
	0.0600	0.0800	18.9266	1.5427E-05
	0.0600	0.0700	20.0864	1.5324E-06
	0.0600	0.0600	21.4254	2.1235E-07
	0.0600	0.0500	23.0090	1.2276E-08
	0.0600	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0600	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.0700	0.1200	15.4048	2.4094E-03
	0.0700	0.1100	16.1605	1.1138E-03
	0.0700	0.1000	16.9884	4.4214E-04
	0.0700	0.0900	17.9035	1.2947E-04
	0.0700	0.0800	18.9266	1.9777E-05
	0.0700	0.0700	20.0864	4.0729E-06
	0.0700	0.0600	21.4254	2.4299E-07
	0.0700	0.0500	23.0090	1.2152E-08
	0.0700	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0700	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.0800	0.1200	15.4048	2.5627E-03
	0.0800	0.1100	16.1605	1.2151E-03
	0.0800	0.1000	16.9884	4.9708E-04
	0.0800	0.0900	17.9035	1.5199E-04
	0.0800	0.0800	18.9266	2.6237E-05
	0.0800	0.0700	20.0864	5.0762E-06
	0.0800	0.0600	21.4254	3.1206E-07
	0.0800	0.0500	23.0090	1.2654E-08
	0.0800	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0800	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.0900	0.1200	15.4048	2.7523E-03
	0.0900	0.1100	16.1605	1.3302E-03
	0.0900	0.1000	16.9884	5.6721E-04
	0.0900	0.0900	17.9035	1.8233E-04
	0.0900	0.0800	18.9266	3.5757E-05
	0.0900	0.0700	20.0864	6.8396E-06
	0.0900	0.0600	21.4254	4.6307E-07
	0.0900	0.0500	23.0090	1.4972E-08
	0.0900	0.0400	24.9472	1.5769E-10
	0.0900	0.0300	27.4460	1.5769E-10
	0.1000	0.1200	15.4048	2.9809E-03
	0.1000	0.1100	16.1605	1.4842E-03
	0.1000	0.1000	16.9884	6.5552E-04
	0.1000	0.0900	17.9035	2.2279E-04
	0.1000	0.0800	18.9266	7.9405E-05
	0.1000	0.0700	20.0864	9.8667E-06
	0.1000	0.0600	21.4254	7.8316E-07
	0.1000	0.0500	23.0090	2.2488E-08
	0.1000	0.0400	24.9472	1.6498E-10
	0.1000	0.0300	27.4460	1.5769E-10

KAYNAKLAR

- [10] P.J. VAN GERWEN,
"On the Generation and Application of Pseudo-ternary Codes in
Pulse Transmission", Philips Res. Repts, August 1965, Vol.20,
p.469-484.
- [11] M.R. AARON,
"PCM Transmission in the Exchange Plant",
A.T.R. Vol.9, No.1, 1975, p.1-17.
- [12] P.A.FRANASZEK,
"Sequence-State Coding for Digital Transmission",
Bell Syst. Tech. J., Jan 1968, p.143-157.
- [13] P.BYLANSKI and D.G.W.INGRAM,
Digital Transmission Systems, Herts., England: Peter Peregrinus,
1976.
- [14] F.F.E OWEN,
PCM and Digital Transmission System, McGraw-Hill, New York, 1982.
- [15] W.R.BENETT,
"Statistiks of Regenerative Digital Transmission",
Bell Syst. Techn. J., Vol.37, 1958, p.1501.
- [16] A.CROISIER,
"Introduction to Pseudoternary Transmission Codes",
IBM J. Res. Dev., Vol.14, July 1970, p.354-367.
- [17] R.W.S. CHANG, T.M. JAKUBOW and A.LEON-GARCIA,
"Line Code Design for Channels with a Low Frequency Cutoff",
IEEE N.T.C. Innovative Telecommunications-Key to the future
E 5.6/1-6, Vol.3, 1981.
- [18] R.W.S. CHANG, T.M. JAKUBOW and A.LEON-GARCIA,
"Line Code Design for High-Capacity Baseband Digital Transmission
Systems",
IEEE Trans.Comm., Vol. COM-30, No.7, July 1982.
- [19] B.S. BOSIK,
"The Spectral Density of a Coded Digital Signal",
Bell Syst. Tech. J., Vol.51, No.4, April, 1972 p.921-932.

- [10] P.J. van GERWEN,
"On the Generation and Application of Pseudo-ternary Codes in Pulse Transmission", Philips Res. Repts, August 1965, Vol.20, p.469-484.
- [11] M.R. AARON,
"PCM Transmission in the Exchange Plant",
Bell Syst. Tech. J., Jan. 1962, p.99-141.
- [12] E.R. KRETZMER,
"Generation of a Technique for Binary Data Communication",
IEEE Trans. on comm., COM-14, Feb.1966,p.67-68.
- [13] H.KOBAYASHI,
"A Survey of Coding Schemes for Transmission or Recording of Digital Data",
IEEE Trans. on Comm., Vol. COM-19, Dec. 1971, p.1087-1100
- [14] J.M. SIPRESS,
"A New Class of Selected Ternary Pulse Transmission Plans for Digital Transmission Lines",
IEEE Trans. on Comm., vol.13, No.3, Sept. 1965, p.366-372.
- [15] A. CROISIER,
"Compatible High-Density Bipolar Codes: An Unrestricted Transmission Plan for PCM Carriers",
IEEE Trans. on Comm., June 1970, p.265-268.
- [16] V.I. JOHANNES,
"Comments on Compatible High-Density Bipolar Codes: An Unrestricted Transmission Plan for PCM Carriers",
IEEE Trans. on Comm., Feb.1972, p.78-79.
- [17] M.RODRIGUEZ and CATTERMOLLE,
"New Codes for Digital Transmission",
Electron. Lett., June 1977, p.340-341.
- [18] K.W. CATTERMOLLE,
"Codes for Digital Line Transmission",
Electron. Lett., II 1975, p.548-550.

- [19] R.J. CATCHPOLE,
"Efficient Ternary Transmission Codes",
Electron. Lett., Vol.2, no.20, 1975.
- [20] O.BRUGIA, M.DECINA and U.DE JULIO,
"Character Alignment for High-Capacity PCM Systems using
MS43 Line Code",
IEEE Trans. on Comm., vol. COM-23, No.8, August 1975, p.803-811.
- [21] R.W. LUCKY, J. SALZ, and E.J. WELDON,
Principles of Data Communication,
New. York: McGraw-Hill, 1968.
- [22] K.S.SHANMUGAM,
Digital and Analog Communication Systems,
Wiley, 1975.
- [23] GREGG,
Analog and Digital Communication,
Wiley, 1977.
- [24] M.I.ÇELEBİLER and O.SHİMBO,
"The Probability of Error Due to Intersymbol Interference and
Gaussian Noise in Digital Communication Systems",
IEEE Trans.on comm., Vol.COM-19, No.2, April 1971, p.113-119.
- [25] E.Y.HO and Y.S. YEH,
"A New Approach for Evaluating the Error Probability in the
Presence of Intersymbol Interference and Additive Gaussian Noise",
Bell Syst. Tech. J., Nov. 1970, p.2249-2265.
- [26] E.Y.HO and Y.S. YEH,
"Error Probability of a Multilevel Digital System With Intersymbol
Interference and Gaussian Noise",
The Bell.Syst. Tech., J., vol.50, Mar.1971, p.1017-1023.
- [27] F.E.GLAVE,
"An Upper Bound on the Probability of Error Due to Intersymbol
Interference for Correlated Digital Signals",
IEEE Trans.on Inform. Theory, vol.II, May. 1972, p.356-363.

- [28] S.BENEDETTO, G. DE VINCENTIIS, and A.LUVISON,
 "Error probability in the Presence of Intersymbol Interference
 and Additive Noise for Multilevel Digital Signals",
 IEEE Trans. on Comm., Vol.Com-21, No.3, March 1973, p.181-190.
- [29] V.K.PRABHU,
 "Intersymbol Interference Performance of System With Correlated
 Digital Signals",
 IEEE Trans.on comm., Oct. 1972, p.1147-1152.
- [30] I.KORN,
 "Bounds to Probability of Error in Binary Communication Systems
 with Intersymbol Interference and Dependent or Independent Symbols",
 IEEE Trans. on Comm., Feb.1974, p.251-254.
- [31] I.KORN,
 "Probability of Error in Digital Communication Systems with
 Intersymbol Interference and Dependent Symbols",
 IEEE Trans. on Inform. Theory, Vol.II-20, Sept.1974, p.663-668.
- [32] G.L.CARIOLARO and S.G. PUPOLIN,
 "Moments of Correlated Digital Signal for Error Probability
 Evaluations",
 IEEE Trans.on Inform. Theory, Vol.II-21, Sept.1975, p.558-568.
- [33] G.L.CARIOLARO and G.P.TRONCA,
 "Correlation and Spectral Properties of Multilevel (M,N).
 Coded Digital Signals With Applications to Pseudoternary (4,3)
 Codes",
 Alta Frequenza, Vol. XLIII, Jan.1974, p.2-15.
- [34] G.L:CARIOLARO and G.P.TRONCA,
 "Spectra of Block Coded Digital Signals",
 IEEE Trans. on comm., Vol. GM-22, Oct.1974, p.1555-1564.
- [35] J.R.PIERCE,
 "Some Practical Aspects of Digital Transmission",
 IEEE Spectrum, Nov.1968, p.63-70.
- [36] T.M.CHIEN,
 "Upper Bound on the Efficiency of DC-Constrained Codes",
 Bell.Syst. Tech. J., Vol.49, Nov.1970, p.2267-2287.

ÖZGEÇMİŞİ

Hüdaver ATASOY, 1960 yılında Ankara'nın Kızılcahamam kazasında doğdu. Yeni Turan ilkokulu ve Atatürk Ortaokulunu Ankara'da okudu. 1977 yılında, Kuleli Askeri Lisesini bitirdi ve 1981 yılında Kara Harp Okulundan Mu.Tğm. olarak mezun oldu. Kara Harp Okuluna öğretim üyesi olmak amacıyla, 1984 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik bölümünü bitirdi. 1984'den beri Yıldız Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümünde Yüksek Lisans öğrencisi olarak bulunmaktadır. Evli, bir çocuk babasıdır.