

# LORENZ-TABANLI DİFERANSİYEL KAOS KAYDIRMALI ANAHTARLAMA (DCSK) MODELİ KULLANILARAK KAOTİK BİR HABERLEŞME SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU

**Funda Ergün YARDIM ve Erkan AFACAN**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi,, Maltepe 06750, Ankara  
[fundaergun@gazi.edu.tr](mailto:fundaergun@gazi.edu.tr), [e.afacan@gazi.edu.tr](mailto:e.afacan@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 09.02.2009 ; Kabul/Accepted: 07.07.2009)

## ÖZET

Kaotik sistemler, "başlangıç şartlarına hassas bağıllık gösteren ve ölçülemeyecek karmaşıklıkta sistemler" olarak tanımlanabilir. Başlangıç şartlarına olan duyarlılığının yanında kaotik sistemler, geniş bantlı, gürültü benzeri ve periyodik olmayan bir yapıya sahiptirler. Bu karakteristiklerinden dolayı, kaotik sistemler farklı bilim dallarında özellikle mühendislik konularında geniş uygulama alanı bulmuştur. Kaotik sistemlerin önemli uygulama alanlarından biri haberleşmedir. Kaotik haberleşme sistemlerinde; kaotik maskeleyme, kaotik modülasyon, kaotik kaydırmalı anahtarlama ve tahmini kontrol yöntemi kullanılır. Bu çalışmada yayılı spektrum kaotik haberleşmenin uygulama alanlarından olan Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama (DCSK) yönteminin simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon yöntemi olarak hızlı olmasından dolayı C dili kullanılmıştır. Literatürde kaotik sistemlerle yapılan uygulamalarda kaos üretici olarak genellikle Chua devresi kullanılmaktadır. Kaos üretici olarak Lorenz sistemi kullanılarak DCSK yöntemi ilk kez bu çalışmada incelenmiştir. Lorenz sisteminin performansının Chua devresi ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kaos, kaotik sistemler, Lorenz sistemi, Chua devresi, kaotik haberleşme, diferansiyel kaos kaydırmalı anahtarlama (DCSK)

## SIMULATION OF A COMMUNICATION SYSTEM USING LORENZ-BASED DIFFERENTIAL CHAOS SHIFT KEYING (DCSK) MODEL

### ABSTRACT

Chaotic systems can be defined as "sensitively dependent to initial conditions and immeasurably complex" systems. Besides the sensitive dependence to the initial conditions, chaotic systems have a wideband, noise-like and non-periodic structure. With this characteristics, chaotic systems has found wide application areas; in different branches of science, especially in engineering. Communications is one of the important applications of chaotic systems. Chaotic masking, chaotic modulation, chaotic shift keying and predictable control method are used in chaotic communications systems. In this study, Differential Chaos Shift Keying, that is a spread spectrum chaotic communication method, was simulated. Because of its fast implementation, "C" programming language was chosen as the simulation environment. In literature, Chua Circuit is usually used as a chaos generator in chaotic system applications. In this study, first time implementation of DCSK method combined with Lorenz system as a chaos generator was examined. It has been seen that the performance of Lorenz system is better when compared with Chua's circuit.

**Keywords:** Chaos, chaotic systems, Lorenz system, Chua's circuit, chaotic communication, differential chaos shift keying (DCSK)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaos kavramının bilim tarihine girişi 18. yüzyılda olmuştur. Kaos alanındaki en önemli keşiflerden biri, 1963 yılında havanın basitleştirilmiş bir modelini çalışmak üzere basit bir matematiksel bilgisayar programı yazan meteorolog Edward Lorenz tarafından yapılmıştır [1]. Lorenz, hava tahmininde başlangıç koşullarındaki çok küçük değişikliklerin belirgin farklılıklara sebep olduğunu fark etmiştir. Lorenz'in atmosfer modelinde kullandığı matematik 1970'lerde geniş bir biçimde araştırılmış ve zamanla, kaotik bir sistemin temel özelliği olarak iki farklı başlangıç koşulları dizgesindeki en küçük bir farklılığın, sistemin durumunda büyük farklılıklara neden olacağı, bilinen bir gerçek haline gelmiştir.

Dinamik sistemler, deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılırlar. Deterministik dinamik sistemler, durumları zamanla deterministik şekilde değişen sistemlerdir [2]. Evrensel olarak analog ve sayısal haberleşme sistemlerinde taşıyıcı olarak kullanılan sinüzoidal sinyaller, sürekli deterministik dinamik sistemlerin periyodik çözümleridir. Periyodik sinyallerin zaman bölgesindeki dalga şekli ve spektrumu Şekil 1(a)'da görülmektedir. Deterministik dinamik sistemler aynı zamanda geniş güç spektrumlu sürekli "gürültüsel" yapı ile karakterize edilen, periyodik olmayan sinyallerden oluşan kaotik sinyalleri de içine alır. Zaman bölgesindeki kaotik sinyaller Şekil 1(b)'de de görüldüğü gibi rastgele bir şekilde ortaya çıkarlar.

Kaotik sistemler için iki temel kural söylenebilir: i) Başlangıç şartlarına hassas bağımlılık: Kaotik sistemler, başlangıç şartlarına çok hassas bir biçimde bağımlıdır. ii) Rastgele olmama durumu: Kaotik sistemler biz belirleymesek de içsel bir düzene uyarlar, rastgele değildirler.

Ayrıca kaotik işaretler, geniş bantlı spektruma sahip, gürültüye benzer ve önceden tahmin edilmesi zor işaretlerdir. Diferansiyel veya fark denklemleri ile ifade edilen doğrusal olmayan bir dinamik sistemin kaotik davrandığını söyleyebilmek için; sistemin, başlangıç şartlarına hassasiyeti, frekans spektrumu, faz resmi görünümü ve Lyapunov üstelleri gibi

özelliklerinin incelenmesi gerekir [4]. Literatürde çok sayıda otonom kaotik devre geliştirilmiş olsa da üzerinde en çok çalışma yapılan ve kaotik dinamikleri iyi bilinen otonom sistemler Chua osilatörü, Rössler osilatörü ve Lorenz sistemidir [5]. Chua devresi ve Lorenz tabanlı devre modeli, hem analog hem de dijital formdaki işaretlerin iletimi için kullanılabilir devre modelleridir. Literatürde kaos ve kaotik sistemlerle yapılan uygulamalarda kaos üretici olarak genellikle Chua devresi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Chua devresi ve Lorenz sisteminin kaotik davranışları incelenmiştir. Daha sonra kaotik haberleşme sistemlerinden mükemmel gürültü performansına sahip olan DCSK modelinin performans analizi simülasyonu Lorenz sistemi kullanılarak yapılmış ve performansı, Chua devresi ile karşılaştırılmıştır.

## 2. KAOTİK SİSTEMLER (CHAOTIC SYSTEMS)

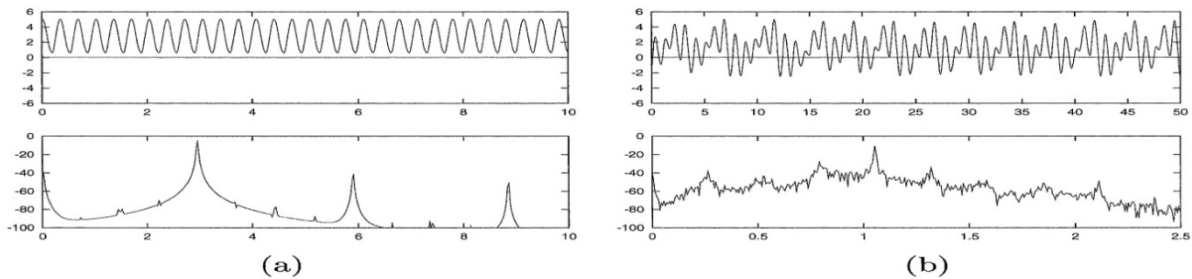
### 2.1. Kaotik Lorenz Sistemi (Chaotic Lorenz System)

Kaotik Lorenz sistemi iki boyutlu akışkan davranışı için ortaya atılan, bilinen en meşhur kaotik sistemdir. Kaotik Lorenz sistemi aşağıdaki denklem takımıyla tanımlanmaktadır:

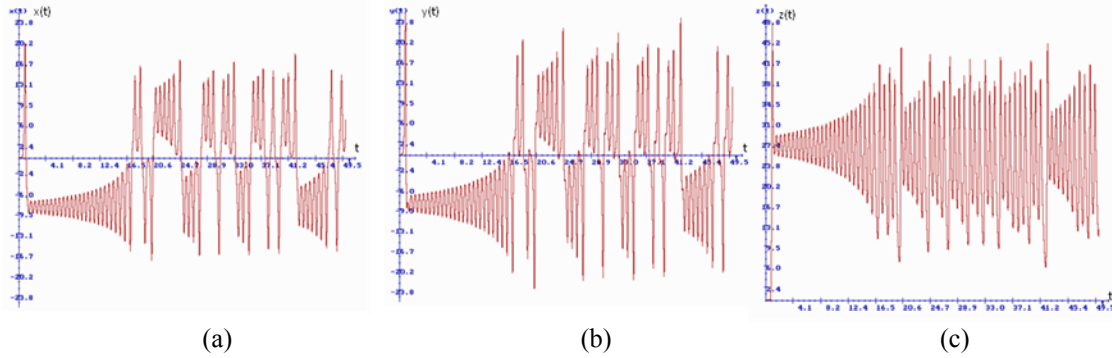
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -ax + ay \\ \frac{dy}{dt} &= cx - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= -bz + xy \end{aligned} \quad (1)$$

Burada a, b ve c sistem parametreleri, x, y ve z dinamik değişkenlerdir. Denklemlerden görüldüğü gibi bu kaotik sistem, lineer çarpım terimleriyle nonlineerliğin sağlandığı 3. dereceden bir sistemdir. Sistemin karakteristik özelliği, spektrumu geniş bir frekans bölgesine yayılmış periyodik olmayan salınımlar üretmesidir.

Bu salınımlar gürültüye benzediği ve tahmini zor bir şekilde başlangıç koşullarına bağlı oldukları için gizli



Şekil 1. Zaman (yukarı) ve frekans (aşağı) bölgesinde (a) Periyodik (b) Kaotik sinyaller ((a) periodic, (b) chaotic signals in time (upper) and frequency (lower) domain) [3]



**Şekil 2.** Lorenz sistemi kaotik dinamiklerinin gösterimi (a)  $x(t)$ , (b)  $y(t)$ , (c)  $z(t)$  (Chaotic Dynamics of Lorenz System (a)  $x(t)$ , (b)  $y(t)$ , (c)  $z(t)$ )

haberleşmede kullanılabileceği fark edilmiştir [6]. Lorenz sistemi için  $x(t)$ ,  $y(t)$  ve  $z(t)$  kaotik dinamiklerinin zamana karşı çizimleri sırasıyla Şekil 2’de verilmiştir.

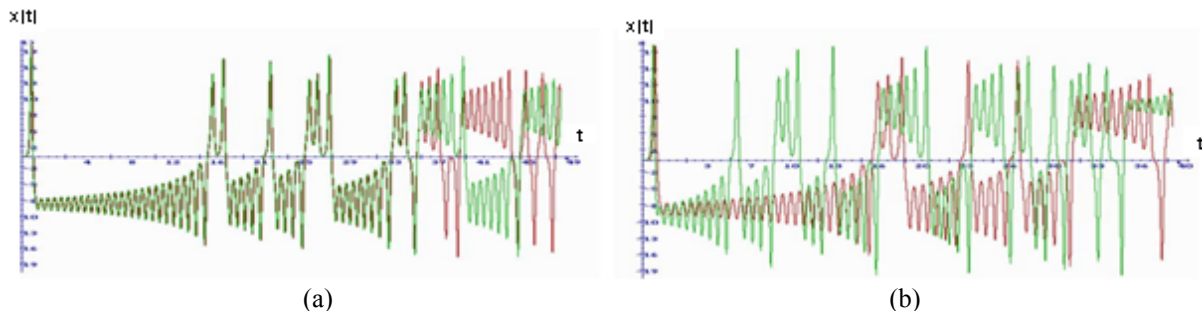
Kaotik sistemler “başlangıç koşullarına aşırı duyarlılık” ile tanımlanır. Benzer yapıdaki iki kaotik sistem başlangıç değerlerindeki küçük bir farklılık ile çalışmaya başlarsa kısa bir süre sonra birbirlerinden uzaklaşacaklardır. Bu özelliği açıklamak amacıyla Lorenz sisteminin, farklı başlangıç değerleri için simülasyonu yapılmıştır. Kaotik Lorenz sisteminde,  $a=10.0$ ,  $b=8.0/3$  ve  $c=28$  sistem parametreleriyle başlangıç değerlerindeki küçük bir değişiklik neticesinde  $x$  değişkeninin zamanla değişimi Şekil 3(a)’da görülmektedir. Şekilde kırmızı çizgiyle belirtilen grafik  $x(0)=0.001$ ,  $y(0)=0.0$ ,  $z(0)=0.0$  başlangıç şartına oluşan  $x(t)$  kaotik dinamiğini gösterirken, yeşil çizgiyle gösterilen grafik ise  $x(0)=0.002$ ,  $y(0)=0.0$ ,  $z(0)=0.0$  başlangıç şartında oluşan  $x(t)$  dinamiğini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi başlangıç şartlarındaki çok küçük bir değişime karşılık  $x(t)$  kaotik dinamiğinde önemli bir değişim meydana gelmektedir. Bu özellik, yani başlangıç şartlarına hassas bağımlılık kaotik sistemleri karakterize eden bir özelliktir.

Kaotik sistemler, sistem parametrelerine de hassas bağımlılık gösterirler. Belirli sistem parametrelerinde yapılacak değişiklik sistemin kaotik davranışını da değiştirecektir. Bu sistemlerde, sistemi kaotik davranış moduna sokacak kritik parametreler vardır. Kaotik sistemlerde bu parametrelere dallanma (bifurcation)

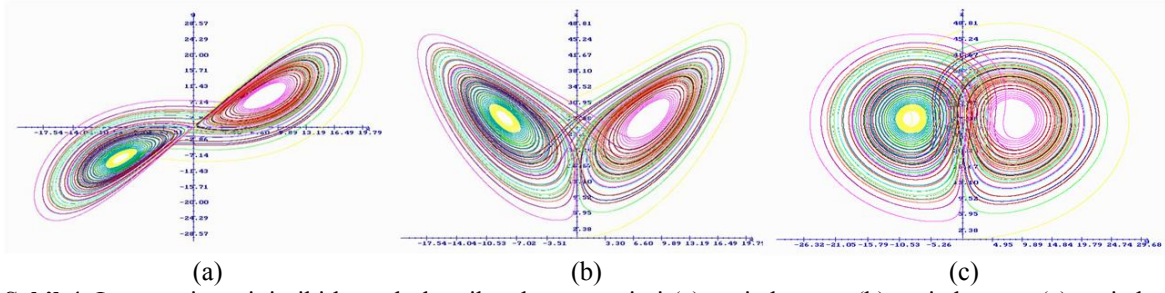
parametresi denmektedir. Lorenz sisteminin kritik parametresi  $c$ ’dir. Şekil 3(b)’de  $c=28$  ve  $c=35$  olmak üzere iki farklı değer için simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi (c) parametresinde yapılan değişiklik kaotik sistemin davranışını değiştirmiş ve başka bir kaotik davranışa dönüştürmüştür. Sistem dallanma parametresine bağlı olarak periyot-1, periyot-2, periyot-4... gibi katlı periyodik davranışlardan sonra kaosa gider.

Kaotik Lorenz sisteminde verilen bir andaki hava, üç boyutlu faz uzayında bir nokta ile havanın zaman içerisindeki seyri ise bu noktalardan geçen bir yörünge ile temsil edilir. Bu yörünge dinamik sistemin geçmişini gösterir. Kaotik sistemler doğrusal olmadıkları için yörüngeleri çok karışıktır fakat rasgele değildir. Zaman ilerledikçe, yörüngeler faz uzayını doldurmaya başlar ve hiçbir zaman üzerine kapanmaz; tekrar eder. Bu şekilde bir davranış kaosa işaretler. Sistemin çalıştırılması sonucu elde edilen

olası hava durumlarının kümesi ise Lorenz çekeri olarak adlandırılır. Lorenz çekeri üç boyutlu uzayda herhangi bir hacim işgal etmez. Diğer taraftan bu ne bir boyutlu basit bir eğri ne de iki boyutlu bir yüzeydir. Çeker 2.06 gibi tam sayı olmayan (fraktal) bir boyuta sahiptir ve bu nedenle garip veya acayip sıfatları ile nitelendirilir. Şekil 4(a), Şekil 4(b) ve Şekil 4(c)’de kaotik Lorenz sisteminin ait faz resimleri görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi kaotik Lorenz sisteminin  $xy$  yörüngesi iki simetrik sabit nokta etrafında dönmektedir.



**Şekil 3.** Lorenz sisteminin  $x(t)$  kaotik dinamikleri (a) iki farklı başlangıç değeri için (b) iki farklı “ $c$ ” değeri için  $x(t)$  chaotic dynamics of Lorenz system (a) for two different initial values, (b) for two different “ $c$ ” values)



Şekil 4. Lorenz sisteminin iki boyutlu kaotik çeker gösterimi (a) xy izdüşümü (b) xz izdüşümü (c) yz izdüşümü (2-D chaotic attractor plots of Lorenz System (a) xy projection, (b) xz projection, (c) yz projection)

## 2.2. Kaotik Chua Devresi (Chaotic Chua's Circuit)

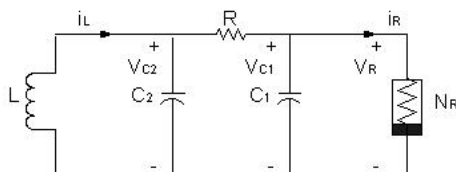
Laboratuvar koşullarında kaotik davranış oluşturmaya yatkın Lorenz sistemine benzer ilk gerçek fiziksel dinamik sistem Chua tarafından tanıtılmıştır [7]. Chua, birçok dinamik davranış sergileyen üçüncü dereceden basit bir otonom devre oluşturmuştur. Kaotik Chua devresi, Lorenz denklemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Chua devresi, Lorenz denklemlerine göre sadece bir değişkenli bir nonlineerlik içerir ve laboratuvar ortamında kolaylıkla oluşturulabilir.

Kaosu sergilemek için, dirençler, kapasitörler ve bobinlerden oluşan otonom bir devre; en az bir nonlineer eleman, en az bir yerel aktif direnç, en az üç enerji depolayan elemanı içermelidir. Chua devresi bu kriterleri sağlayan en basit elektronik devredir [8]. Ek olarak, bu devre, kaosu varlığının matematiksel olarak kanıtlandığı bir fiziksel sistemdir. Şekil 5'de Chua devresi olarak adlandırılan nonlineer bir osilatör devresi görülmektedir.

Şekilden görüldüğü gibi, Chua devresi kapasitör, indüktör gibi enerji depolayan elemanlar, lineer direnç ve Chua diyodu olarak adlandırılan bir nonlineer direnç  $N_R$ 'den oluşmakta ve aşağıdaki üç otonom durum denkleminiyle tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} &= \frac{(V_{C_2} - V_{C_1})}{R} - f(V_{C_1}) \\ C_1 \frac{dV_{C_2}}{dt} &= \frac{(V_{C_1} - V_{C_2})}{R} + I_L \\ L \frac{dI_L}{dt} &= -V_{C_2} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada;



Şekil 5. Otonom Chua Devresi (Autonomous Chua Circuit)

$$\begin{aligned} \dot{I}_R &= f(V_R) \\ &= G_b V_R + 0.5(G_a - G_b) \left\{ |V_R + B_p| - |V_R - B_p| \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

denklemleri ile karakterize edilir. Denklem 2'de verilen ifadelerde, değişkenler yeniden düzenlenerek durum denklemleri Denklem 4'deki gibi boyutsuz bir forma dönüştürülebilir [9].

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= \alpha(y - x - f(x)) \\ \frac{dy}{d\tau} &= x - y + z \\ \frac{dz}{d\tau} &= -\beta y \end{aligned} \quad (4)$$

Burada;

$$\begin{aligned} x &= \frac{\Delta V_{C_1}}{B_p}, y = \frac{\Delta V_{C_2}}{B_p}, z = I_L \left( \frac{R}{B_p} \right), \alpha = \frac{\Delta C_2}{C_1}, \beta = \frac{\Delta R^2 C_2}{L} \\ \tau &= \frac{\Delta t}{RC_2}, a = RG_a, z = RG_b, \alpha = \frac{\Delta C_2}{C_1}, \beta = \frac{\Delta R^2 C_2}{L} \end{aligned}$$

olarak verilmektedir.

Denklem 3 ile verilen  $f(V_R)$ ,  $N_R$  nonlineer direncin, iç bölgede  $G_a$  ve dış bölgede  $G_b$  eğimli V-I karakteristiğidir.  $G_a$ ,  $G_b$  ve  $B_p$  için uygun değerler seçildiğinde, Chua diyodu için herhangi bir parçalı lineer V-I karakteristiği tanımlanabilir. Burada  $\mp B_p$  ifadesi de kırılma noktalarını vermektedir.  $B_p$  kırılma noktasından mutlak değerce küçük olan voltaj değerleri için karakteristik  $G_a$  negatif eğimli bir parçaya sahiptir.  $B_p$  kırılma noktasından daha yüksek voltaj değerleri için karakteristik  $|G_a| < |G_b|$  olan  $G_b$  negatif eğimli lineer iki parçaya sahiptir. Bu karakteristik analitik olarak aşağıdaki gibi verilir [9],[10]:

$$\begin{aligned} I_R &= f(V_R) \\ &= \begin{cases} G_b V_R + (G_b - G_a) B_p & V_R < -B_p \\ G_a V_R & -B_p \leq V_R \leq B_p \\ G_b V_R + (G_a - G_b) B_p & V_R > B_p \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

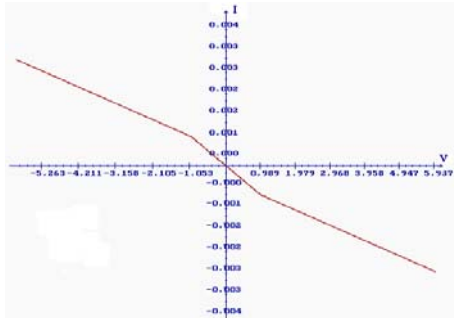
Burada  $B_p > 0$ ,  $G_a < 0$  ve  $G_b < 0$ 'dır.

Literatürde nonlinear direnç elemanı  $N_R$ , elektronik elemanlarla değişik formlarda gerçekleştirilmiştir. Bunlara diyotlu, Op-amp'lı, transistörlü ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricileri (OTA-Operational Transconductance Amplifier) ile gerçekleştirilen nonlinear direnç devre yapıları örnek gösterilebilir [8],[10].

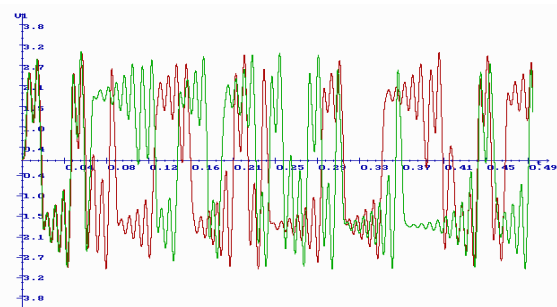
İki Op-amp'la gerçekleştirilen  $N_R$ 'nin yapılan simülasyonla elde edilen V-I karakteristiği Şekil 6'da görülmektedir. Bu simülasyonda kullanılan nonlinear karakteristikler  $G_a = -0.410$  mS,  $G_b = -0.780$  mS ve  $B_p = \pm 1$ 'dir.

Şekil 7'de Chua devresinde iki farklı başlangıç şartı için (kırmızı çizgi:  $V_1(0) = 0.01V$ , yeşil çizgi  $V_1(0) = 0.02V$ ) elde edilen  $V_1(t)$  kaotik dinamik gösterimi verilmiştir.

Önceki bölümde incelenen Lorenz sistemindeki dallanma parametresi (c)'nin yerini Chua devresinde R direnç değeri almıştır. Şekil 5'deki R direnç değerinin  $2K\Omega$ 'dan yavaş yavaş sıfıra doğru azaltılmasıyla Chua devresi çok çeşitli dallanma ve periyot katlanmalarını (periyot-1, periyot-2, periyot-4, periyot-n) takiben Rössler tipi kaotik Chua çekere ve çift spiralli (double scroll) kaotik Chua çekere dönüşür [10],[11]. Çift spiralli kaotik çekerin (Double Scroll Attractor) varlığını ispatlamak için, Chua devresinde  $R = 1.7K\Omega$  alınarak elde edilen kaotik çeker gösterimleri Şekil 8'de görülmektedir. Chua devresinde R değeri  $1.8K\Omega$ 'da sabit tutularak  $C_1$  elemanı da ikinci bir



**Şekil 6.** Otonom Chua Devresinin V-I Karakteristiği (V-I characterisite of autonomous Chua circuit)



**Şekil 7.** Chua devresinde iki farklı başlangıç değeri için elde edilen  $V_1(t)$  kaotik dinamikleri ( $V_1(t)$  chaotic Dynamics of Chua circuit for two different initial values)

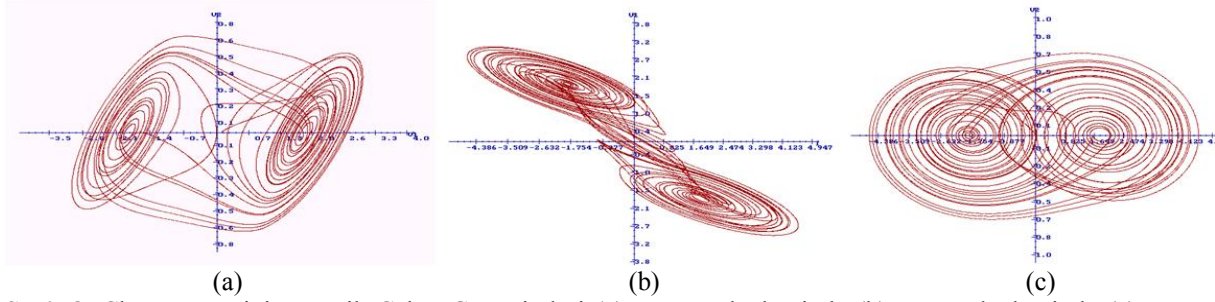
değişim parametresi olarak kullanılabilir.

### 3. KAOTİK SİSTEMLERİN HABERLEŞME UYGULAMALARI (COMMUNICATION APPLICATIONS OF CHAOTIC SYSTEMS)

Bir sayısal haberleşme sisteminde, iletilecek bilgi sembolü modülatör tarafından bir analog örnek fonksiyona çevrilir ve analog bir kanaldan geçirilir. Kanalda, analog sinyal zayıflatma, bant geçiren filtreleme ve toplanır beyaz Gauss gürültüyü (AWGN) kapsayan belli sayıda bozucu etkileşimin etkisi altına girer. Demodülatörün görevi algılanan bozulmuş örnek fonksiyonun temelinde, hangi sembolün gönderildiğine karar vermektir. Geleneksel bir haberleşme sisteminde, bir sembolü belirten T süreli analog örnek fonksiyonu, sinüzoidal temelli fonksiyonların bir lineer kombinasyonudur ve sembol süresi T temel fonksiyonun periyodunun tam katıdır. Kaos tabanlı bir sayısal haberleşme sisteminde bir sembolü belirten T süreli analog örnek fonksiyonu kaotik tabanlı bir fonksiyondur. Hangi sembolün iletildiğinin kararı, alınan örnek fonksiyonun bazı özelliklerinin kestirilmesi ile verilir. Bu özellik, kaotik sinyalin enerjisi veya iletilen sinyalin değişik parçaları arasında ölçülen korelasyon olabilir. Kaotik dalga şekilleri periyodik olmamalarından dolayı T süreli her bir örnek fonksiyon farklıdır. Bu, iletilen her bir sembolün birim analog örnek fonksiyonu olarak ifade edilmesi avantajına sahiptir ve kaotik örnek fonksiyonları arasındaki korelasyon oldukça az olduğundan kaotik modülasyon çok yollu yayılım koşulları altında en iyi performansı önerir şekilde olmalıdır. Bundan dolayı, kaotik modülasyon güçlü geniş bant haberleşmesi için potansiyel olarak basit çözümler önerir. Bunun yanında, sonlu süreli örnek fonksiyonlardan oluşan kaotik prosesin uzun zamanlı istatistiklerinin kestirimi ile ilişkili bir problemi de beraberinde getirir.

Geleneksel ile kaotik sistemler arasındaki temel farklılık, kaotik haberleşmede sinüzoidlerin yerine daha çok kaotik dalga şekli parçalarının temel fonksiyonlar olarak kullanılmasıdır. Kaotik sinyallerin periyodik olmayan özelliğinden dolayı, kaotik ve geleneksel sistemler arasında temel bir farklılık olmaktadır. İletilen bilgiyi yeniden oluşturmak amacı ile ihtiyaç duyulan alınmış kaotik dalga şeklinin parametreleri sonlu uzunluklu örnek fonksiyonlardan kestirilmelidir. Gürültüsüz durumda dahi, sembol süresi belli bir alt sınırın altına indirilmemelidir.

Geleneksel sayısal modülasyon tekniklerinde sinüzoidal sinyallerin temel fonksiyonlar olarak kullanılması mükemmel bant genişliği verimliliği sağlamaktadır. Bu temel fonksiyonlar alıcıda tek bir sinüzoidal taşıyıcıyı yeniden oluşturarak kolayca elde edilebilir. Kaos tabanlı sayısal haberleşme sistemlerinde, geleneksel haberleşmede olduğu gibi, iletilen semboller eşzamanlı olan [12], [13] ve eşzamanlı olmayan [3], demodülasyon teknikleri ile tekrar



**Şekil 8.** Chua Devresinin Kaotik Çeker Gösterimleri (a)  $V_{C1}$ - $V_{C2}$  düzleminde (b)  $V_{C1}$ - $I_L$  düzleminde (c)  $V_{C2}$ - $I_L$  düzleminde (Chaotic attractor plot of Chua circuit (a) on  $V_{C1}$ - $V_{C2}$  plane (b) on  $V_{C1}$ - $I_L$  plane (c) on  $V_{C2}$ - $I_L$  plane)

oluşturulabilir. Senkronizasyon (taşıyıcı düzeltilmesi anlamında), eşzamanlı olmayan modülasyon tekniğinin kullanıldığı durumlarda gerekli değildir.

Demodülasyon aynı zamanda senkronizasyon olmasa da işler. Bu hem periyodik hem de kaotik örnek fonksiyonlar için geçerlidir [7]. Bu durumda, alıcı, gürültülü sinyalden temel fonksiyonu yeniden elde etmeden, iletilen bilgiyi taşıma özelliği (bit enerjisi gibi) tahmin edebilir. Hangi sembolün gönderildiğinin tahmini, bir eşik değeri üzerinden karşılaştırma yapılarak kestirilir. Dört adet eşzamanlı olmayan kaotik haberleşme alıcı konfigürasyonu:

- 1) Kaotik Kaydırmalı Anahtarlama (CSK),
- 2) Kaotik Var-Yok Anahtarlama (COOK),
- 3) Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama (DCSK),
- 4) Frekans Modülasyonlu Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama (FM-DCSK)

şeklinde. Bunların içinden DCSK ve FM-DCSK en iyi gürültü performansına sahiptir. Kaotik haberleşme sistemleri konusundaki araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [14], [15].

### 3.1. Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Chaos Shift Keying)

#### 3.1.1. Verici (Transmitter)

Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama, iletilecek her bit iki kaotik örnek fonksiyonu ile ifade edilir. İlk örnek fonksiyon referans gibi davranırken, ikincisi bilgiyi taşır. "1" biti, kaos üretici tarafından sağlanan bir referans sinyali ileterek art arda iki kez gönderilirken, "0" biti için referans kaotik sinyal aynı sinyalin tersine çevrilmiş bir kopyasının takibi ile iletilebilir [2]. Böylece, eğer "1" sembolü  $[t_i, t_i+T)$  aralığında iletirse

$$s_i(t) = \begin{cases} x(t) & t_i \leq t < t_i + T/2 \\ +x(t - T/2) & t_i + T/2 \leq t < t_i + T \end{cases} \quad (6)$$

ve eğer "0" sembolü  $[t_i, t_i+T)$  aralığında iletirse

$$s_i(t) = \begin{cases} x(t) & t_i \leq t < t_i + T/2 \\ -x(t - T/2) & t_i + T/2 \leq t < t_i + T \end{cases} \quad (7)$$

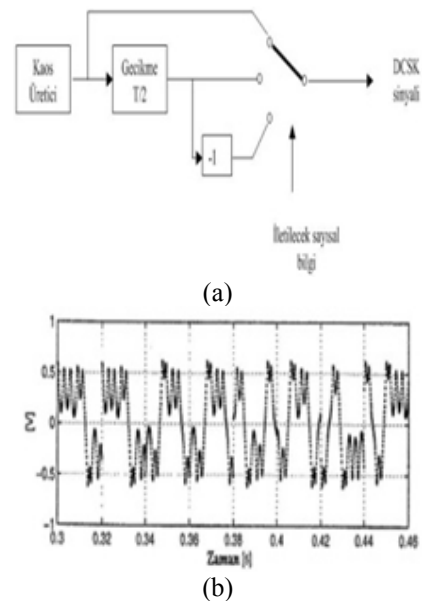
elde edilir. Burada  $x(t)$  referans kaotik sinyali ve  $s_i(t)$  ise  $[t_i, t_i+T)$  aralığında iletilen DCSK sinyalini ifade etmektedir.

Şekil 9(a) ve (b) sırasıyla bir DCSK modülatörü ve 1100 bit dizisine karşılık gelen tipik bir DCSK sinyalini göstermektedir.

Bu örnekte, kaotik sinyal bir analog faz kilitlemeli çevrim (APLL) ile üretilir ve bit süresi 40ms'dir.

#### 3.1.2. Alıcı (Receiver)

DCSK modülasyon modelinde, bilgi sinyali sonlu uzunluktaki kaotik örnek fonksiyonlara aktarılır. Alınan gürültülü sinyal bit süresinin yarısı ile ( $T/2$ ) geciktirilir ve alınan sinyal ile geciktirilen sinyalin kopyası arasındaki korelasyon bulunur. Karar bir seviye karşılaştırıcısı ile verilir. DCSK demodülatörünün blok şeması Şekil 10'da görülmektedir.



**Şekil 9.** (a) DCSK modülatörü blok şeması (b) 1100 dizisine karşılık gelen DCSK sinyali ((a) Block diagram of DCSK modulator, (b) DCSK signal with respect to 1100 array) [2]

Şekil 11 iletilen sinyal için ilintilendirici çıkışını göstermektedir. İletilen bit serisini (1100) yeniden oluşturma yönünde gözlem sinyali  $z_i$ , 0.32s ve 0.36s karar anlarında pozitif ve 0.4s ve 0.44s’lerde negatiftir.

DCSK’da gözlem sinyali,

$$z_i = \int_{T/2}^T r_i(t) r_i(t - T/2) dt \quad (8)$$

$$= \int_{T/2}^T [s_i(t) + n(t)][s_i(t - T/2) + n(t - T/2)] dt$$

formundadır. “1” sembolü iletildiği zaman,

$$z_i = \int_{T/2}^T s_i^2(t) dt + \int_{T/2}^T s_i(t)[n(t) + n(t + T/2)] dt \quad (9)$$

$$+ \int_{T/2}^T n(t)n(t - T/2) dt$$

şeklini ve “0” sembolü için,

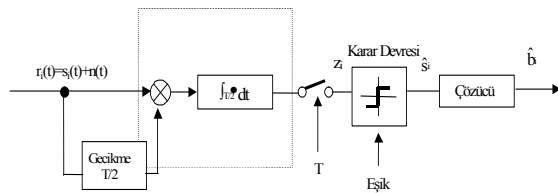
$$z_i = - \int_{T/2}^T s_i^2(t) dt - \int_{T/2}^T s_i(t)[n(t) - n(t + T/2)] dt \quad (10)$$

$$+ \int_{T/2}^T n(t)n(t - T/2) dt$$

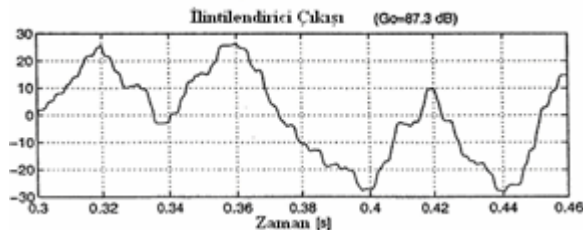
şeklini alır.

Aynı zamanda bu modelin kestirim probleminden etkilendiğini unutmamak gerekir.  $z_i$ ’nin sıfırdan farklı varyansı, kaotik sinyalin periyodik olmayan doğasından kaynaklanmaktadır. Eğer aynı sembol tekrarlı gönderilse bile,  $\int_{T/2}^T s_i^2(t)$  sabit değildir.

Kestirim problemi aynı zamanda kendini gürültü performans karakteristiklerinde ortaya koymaktadır. Eğer bit süresi  $T$  azaltılırsa, karar aşamasının



Şekil 10. DCSK alıcısının blok şeması (Block diagram of DCSK receiver) [16]



Şekil 11. 1100 dizisine karşılık gelen ilintilendirici çıkışı (Correlator output with respect to 1100 array) [2]

gürültüye olan duyarlılığı artar ve BER sadece  $E_b/N_0$ ’ı artırarak düşürülebilir. Oldukça büyük  $T$  için, DCSK’nın gürültü performansı geleneksel sinüzoidal tabanlı modülasyon modeli ile karşılaştırılabilir. Tam anlamıyla,  $BER=10^{-3}$  için  $E_b/N_0=13.5$  dB’ye ihtiyaç vardır. Mükemmel gürültü performansına ek olarak, karar eşik değeri  $E_b/N_0$ ’dan bağımsız olarak sıfırdır.

DCSK’nın bir diğer avantajı da, referans ve örnek bilgi fonksiyonlarının aynı kanaldan geçmesidir. Bu sebepten dolayı, modülasyon modeli kanal bozulmasından bağımsız hale getirilebilir. DCSK aynı zamanda eğer bit süresi  $T$  için kanal parametreleri sabit kalırsa zaman bağımlı bir kanal üzerinden de çalışabilir.

DCSK modülasyon modelinde, bilgi sinyali sonlu uzunluktaki kaotik örnek fonksiyonlara aktarılır. Alıcıdaki karar devresinin ihtiyaç duyduğu özellik, kaotik sinyalin doğasından kaynaklanan periyodsuzluk nedeniyle sadece kestirilebilir. Sadece gürültüsüz durumda kestirim sıfırdan farklı varyansa sahiptir; bu bit süresine bir alt sınır getirir ve böylece veri hızını sınırlar.

DCSK modülasyonu ile ilgili simülasyonlarda kaotik Lorenz Sistemi ve Chua devresi kullanılmıştır [17]. Chua devresinin  $V_1(t)$  kaotik dinamik gösterimi ( $V_1(0)=0.1V$ ) Şekil 12(a)’da verilmektedir.

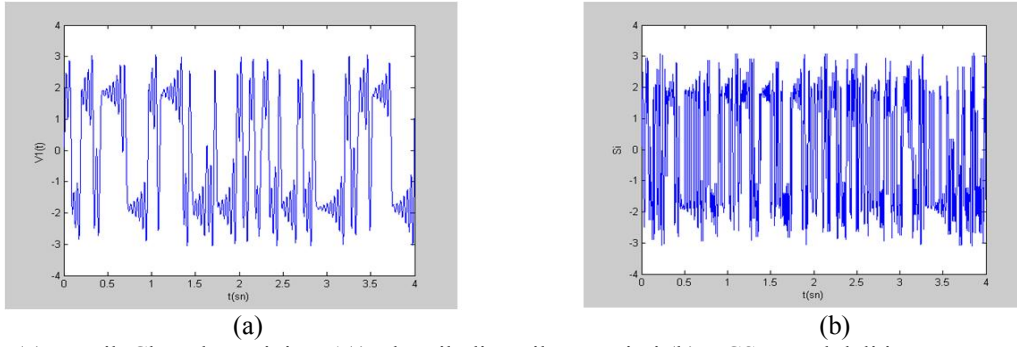
Yapılan simülasyonda giriş bit dizisi rasgele üretilerek, vericide kaotik işaret ile modüle edilmiş ve iletim kanalına gönderilmiştir. Şekil 12(b)’de DCSK kullanılarak elde edilen modüleli sinyal görülmektedir. Yapılan DCSK simülasyonunda,  $SNR=10$ dB,  $T=40$ ms alınarak 100 bit uzunluklu bilgi sinyali için sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 13(a)’da Kaotik Lorenz sistemi kullanılarak ( $x(0)=0.001$ ) elde edilen modüleli sinyal Şekil 13(b)’de gösterilmiştir. Lorenz sistemi ile ilgili simülasyonlarda  $T=10$ ms,  $SNR=10$ dB ve bit dizisi uzunluğu 100 bit alınmıştır.

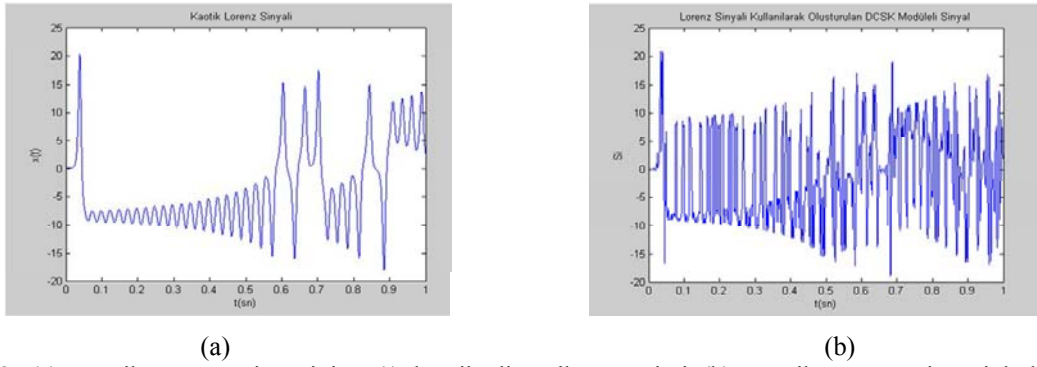
Alınan gürültülü sinyal bit süresinin yarısı ( $T/2$ ) kadar geciktirilir ve alınan sinyal ile geciktirilen sinyalin kopyası arasındaki korelasyon bulunur. Karar bir seviye karşılaştırıcısı ile verilir. Bu işlemlerin sonucunda çıkış bit dizisi elde edilir.

#### 4. DCSK PERFORMANS ANALİZİ (DCSK PERFORMANCE ANALYSIS)

Kaotik sinyallerin doğasındaki geniş bant özelliği, yayılı spektrum haberleşme sistemleri için umut verici olmuştur. Bir haberleşme modeli oluşturmada ilk adım performansın haberleşme kanalında analiz edilmesidir. Modülasyon modelinin performansını ölçmede kullanılacak en basit kanal modeli toplanır beyaz Gauss gürültülü (AWGN) lineer bir



**Şekil 12.** (a) Kaotik Chua devresinin  $V_1(t)$  kaotik dinamik gösterimi (b) DCSK modüveli işaret ((a)  $V_1(t)$  chaotic dynamic of Chua circuit, (b) DCSK modulated signal)



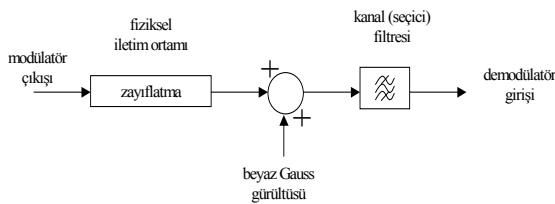
**Şekil 13.** (a) Kaotik Lorenz sisteminin  $x(t)$  kaotik dinamik gösterimi (b) Kaotik Lorenz sistemi kullanılarak oluşturulan DCSK modüveli işaret ((a)  $x(t)$  chaotic dynamic of Lorenz system, (b) DCSK modulated signal created by Lorenz system)

bant geçiren kanaldır. Bu bant geçiren AWGN kanal modelinin blok diyagramı Şekil 14’de görülmektedir.

Bu modelde, alınan sinyalin AWGN ile bozulduğu varsayılmıştır. Kanal filtresi alıcıda istenen iletişim frekansını seçmede ve fiziksel iletim ortamının frekans modelini çıkarmada kullanılır [18].

Gerçek bir haberleşme sisteminde, gürültü tam olarak beyaz veya Gauss olmayabilir. AWGN varsayımının sebepleri; i) hesaplamaları kolaylaştırır, ii) bu formda olan termal gürültü, çoğu pratik haberleşme sisteminde baskındır, iii) AWGN kanal modeli kullanan değişik modülasyon modellerinin nispi performansını gerçek kanal koşulları altında geçerliliğini korur.

Sayısal haberleşme sisteminin performansı alıcıda bit hata oranı (BER) olarak ölçülür. Genel olarak, bu kodlama modeline, kullanılan dalga formunun tipine, verici gücüne, kanal karakteristiklerine ve demodülasyon modeline bağlıdır [18]. Verilen geri



**Şekil 14.** Alıcının frekans seçiciliğini içeren toplanır beyaz Gauss gürültülü kanal modeli (Additive white Gaussian channel model with receiver frequency selectivity)

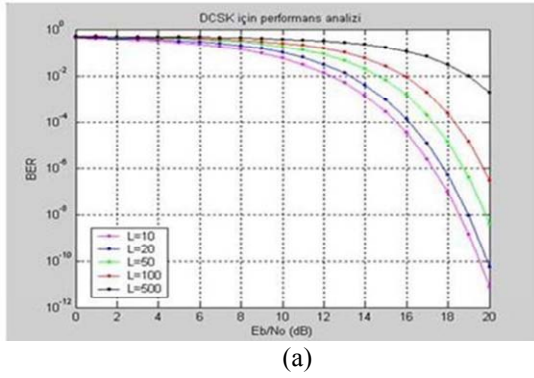
plan gürültü seviyesi için, BER her bir bit ile ilişkili enerjiyi artırarak azaltılabilir. Bu ya daha yüksek güç ile ileterek, ya da bit başına daha uzun periyot ile yapılabilir. Sayısal haberleşmedeki amaç, bit başına minimum enerjili belirlenmiş bir BER elde edebilmektir. İleri bir görüş, veri hızının kanal bant genişliğine oranı olarak tanımlanan bant genişliği verimliliğidir [19].

Bu bölümde yayılı spektrum haberleşme sistemlerinden DCSK modelinin performansı, AWGN kanal ve Kaos üretici olarak Lorenz sisteminin kullanıldığı durum için incelenmiştir. Aynı şekilde, simülasyonlarda Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN), “Box-Muller Algoritması” kullanılarak elde edilmiştir. DCSK modelinde iletilen bit başına enerji sabittir ve AWGN kanalında DCSK’nın BER’i aşağıdaki formda verilmektedir [20].

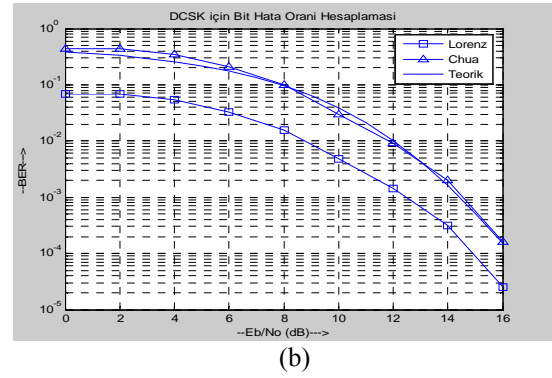
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \left( \sqrt{4 \frac{N_0}{E_b} + 4L \left( \frac{N_0}{E_b} \right)^2} \right)^{-1} \right) \quad (11)$$

Burada  $E_b$  bit başına enerjiyi,  $L$  (yaygınlaştırma faktörü) her bir bit için yaygınlaştırılmış sinyal sayısını ve  $N_0$  kanal gürültüsünün güç spektral yoğunluğunu tanımlamaktadır. Karar değişkenindeki gürültünün çapraz ilintinin artan etkisi,  $L$  artarken BER’in artmasına neden olmaktadır [21]. Bu durum Şekil 15(a)’da görülmektedir.





(a)



(b)

**Şekil 15.** DCSK modelinin gürültü performansı (a) farklı L değerleri için teorik, (b) L=40 için Lorenz sistemi ile Chua devresinin performans karşılaştırması (Noise performance of DCSK model (a) theoretical results for different L values, (b) performance comparison of Lorenz system and Chua's circuit for L=40)

Kaotik sinyal üretici olarak Lorenz sisteminin kullanıldığı DCSK modeli için yapılan simülasyon sonuçlarının Chua devresi ile karşılaştırılması Şekil 15(b)'de verilmiştir. Chua devresi kullanılarak yapılan DCSK simülasyonunun teorik sonuca yakın olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi SNR değerindeki artış BER değerinde azalmaya neden olmaktadır. Şekil 15(b)'den görüldüğü üzere kaos üretici olarak Lorenz sisteminin kullanıldığı DCSK modelinde  $10^{-5}$  bit hata olasılığı için yaklaşık değeri 16dB olan SNR değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, Lorenz sisteminin performansının Chua ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu görülmektedir.

#### SONUÇ (CONCLUSION)

Kaos tabanlı güvenilir haberleşme sistemleri, iletilecek bilgi sinyallerinin spektrumunu geniş bir sahaya yayabilmeleri, gürültüye benzer bir yapıya sahip olmaları ve basit, pahalı olmayan kaotik devre düzenekleri ile gerçekleştirilebilmeleri nedeniyle, literatürdeki standart yayılı spektrumlu haberleşme sistemlerine alternatif olmuşlardır [22]. Son yıllarda, geniş bantlı haberleşme sistemlerinde kaosu kullanmaya yönelik ilgi dünya çapında oldukça fazla artış göstermiştir. Literatürde çok sayıda otonom kaotik devre geliştirilmiş olsa da üzerinde en çok çalışma yapılan ve kaotik dinamikleri iyi bilinen otonom sistemler Chua osilatörü, Rössler osilatörü ve Lorenz sistemidir. Kaos ve kaotik sistemlerle yapılan uygulamalarda kaos üretici olarak genellikle Chua devresi kullanılmaktadır. Bu çalışmada literatürde ilk kez kaos üretici olarak Lorenz sistemi kullanılarak kaotik haberleşme sistemlerinden DCSK modeli incelenmiştir. Kaotik sinyal üretici olarak Lorenz sisteminin kullanıldığı DCSK modeli için yapılan simülasyon sonuçlarının Chua devresi ile karşılaştırılması Şekil 15(b)'de verilmiştir.

Chua devresi kullanılarak yapılan DCSK simülasyonunun teorik sonuca yakın olduğu görülmektedir. Beklendiği gibi SNR değerindeki artış BER değerinde azalmaya neden olmaktadır.

Şekil 15(b)'den görüldüğü üzere kaos üretici olarak Lorenz sisteminin kullanıldığı DCSK modelinde  $10^{-5}$  bit hata olasılığı için yaklaşık değeri 16dB olan SNR değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, Lorenz sisteminin performansının Chua ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğu görülmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, Lorenz sisteminin sönmü (Fading) kanallardaki başarımı farklı modülasyon ve kodlama teknikleri kullanılarak incelenebilir.

#### SİMGELER VE SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$x, y, z, u, v, w$	Dinamik değişkenler
$f_n(x, y, z)$	Fonksiyon
$a, r, b, \sigma, \rho, \beta$	Sabit sistem parametreleri
$x(t), y(t), z(t)$	Durum vektörü
$V_{C1}, V_{C2}$	Kapasitör voltajı
$G$	Kondüktans
$f(V_{C1}), f(V_{C2})$	Parçalı lineer fonksiyon
$N_R$	Chua direnci
$\pm B_p$	Kırılma noktaları
$s(t)$	İletilen işaret
$m(t)$	Bilgi işareti
$u(t), x(t)$	Kaotik işaret
$b_n$	İkili veri dizisi
$T$	Periyot
$r_i$	Alınan dalga formu
$N_0$	Gürültü
$\text{erfc}(x)$	Hata fonksiyonu
$E_b$	Bit enerjisi
<b>DCSK</b>	Diferansiyel Kaotik Kaydırmalı Anahtarlama
<b>BER</b>	Bit Hata Oranı
<b>SS</b>	Yayıllı Spektrum
<b>AWGN</b>	Toplanırlı Beyaz Gauss Gürültüsü
<b>SNR</b>	Sinyal Gürültü Oranı

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gündüz, G., "Kargaşa Kaos ve Şekil Oluşumları", **METU Press**, 538-56 (2002).
- Kennedy, M. P. and Kolumban, G., "Digital Communications Using Chaos", **McGraw Hill**, New York, 477-499 (1999).

3. Kennedy, M. P., Kolumban, G., Jako, Z., Kis, G., "Chaotic Communications without Synchronization", *Conference Publication*, 451: 49-53 (1998)
4. Serin, T., "Kaotik Yapılarda Lyapunov Üstellerinin Tahmini", Y. Lisans Tezi *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-15 (2003).
5. Kılıç, R., "**Karışık Modlu Yeni Bir Kaotik Devre Modeli Tasarımı ve Güvenilir Haberleşme Amaçlı Sistem Gerçekleştirilmesinde Kullanılması**", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-20 (2000).
6. Hirsch, M. W. And Smale, S., "Diferential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra", **San Diego, CA: Academic**, (1974).
7. Chua, L.O., Desoer, C. A., Kuh, E. S., "Linear and Nonlinear Circuits", **McGraw Hill**, New York, (1987).
8. Kennedy, M. P., "Three Steps to Chaos - Part I: Evolution", *IEEE Trans. Circuits&Systems-I*, 40: 640-656 (1993).
9. Chua, L. O., Huynh, T., "Bifurcation Analysis of Chua's Circuit", **University of California, Berkeley**, 746-750, (1992).
10. Cruz, J. M., Chua, L. O., "A CMOS IC Nonlinear Resistor for Chua's Circuit", *IEEE Trans. Circuits&Systems-II*, 39, 985-995 (1992).
11. Chua, L. O., Wu, C. W., Huang, A., Zhong, G., "A Universal Circuit for Studying and Generating Chaos-Part I: Routes to Chaos", *IEEE Trans. Circuits&Systems-I*, 40, 732-761 (1993).
12. Cuomo, K.M., Oppenheim, A.V. and Strogatz, S.H., "Synchronization of Lorenz-Based Chaotic Circuits with Applications to Communications", *IEEE Trans. Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, 40: 626-633 (1993).
13. Dedieu, H., Kennedy, M. P., Hasler, M., "Chaos Shift Keying: Modulation and Demodulation of a Chaotic Carrier using Self-synchronizing Chua's Circuits", *IEEE Trans. on Circuits&Systems*, 40, 634-641 (1993).
14. Tam Wai M., Lau Francis C. M. And Tse Chie K., "Generalized Correlation Delay Shift-Keying Scheme for Non-coherent Chaos-Based Communication Systems", *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 53, (2006)
15. Chen Hongbin, Feng Jiuchao, Tse Chi K., "A General Non-coherent Chaos-Shift Keying Communication System and its Performance Analysis", *IEEE International Symposium*, 1: 2466-2469 (2007)
16. Kolumban, G., Kennedy, M. P., Chua, L., "The Role of Synchronization in digital Communications Using Chaos- Part II: Chaotic Modulation and Chaotic Synchronization", *IEEE Trans. On Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 45: 1129-1140 (1998).
17. Ergün, F., "**Kaotik Bir Haberleşme Sisteminin Simülasyonu**", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2005).
18. Kennedy, M. P., Kolumban, G., Chua, L., "The Role of Synchronization in digital Communications Using Chaos- Part I: Fundamentals of Digital Communications", *IEEE Trans. On Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applicatios*, 44: 927-937 (1997).
19. Haykin, S. S., "Communication Systems", **3rd ed., Wiley, New York**,(1994).
20. R. Rovatti, G. Setti, and G. Mazzini, "Chaos-based generation of optimal DS-CDMA sequences," in *Proc. NOLTA*, HI, 231-234 (1999).
21. Abel, A., Schwarz, W., G., M., "Statistical Analysis of Chaotic Communication Schemes", *IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, New York, 465-468 (1998).
22. Riaz A. and Ali M., "Chaotic Communications, their Applications and Advantages over Traditional Methods of Communication", *IEEE Communications, Networks Digital Signal Processing*, 10, 21-24.