

# ELEKTRONİK DEVRELERDE DOĞRUSAL OLMAYAN DİRENÇLERİN ETKİLERİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mustafa Türk, Fikret Ata

**Özet-**Bu çalışmada üç tane enerji depolayan devre elemanı içeren bir elektronik devrede, doğrusal olmayan direncin devre dinamiğine etkisi incelendi. Bu dirençle tanımlanan denge noktalarının değişiminin kaotik rejime etkisi incelenerek deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı. Kararlı olmayan simetrik denge noktalarının değişimi ile devre dinamiğinin oldukça değiştiği görüldü. Ayrıca elde edilen sinyal seviyelerinin genliğinin bu iki kararsız denge noktasını değiştirerek ayarlanabildiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler-** Kaos, Doğrusal olmayan Dirençler, Parça-parça doğrusallaştırma, Denge Noktası.

**Abstract-** In this study, the effects of nonlinear resistance on circuit dynamic are examined in an electronic circuit that contains three energy storage elements. The effects of variation of the equilibrium points defined by the nonlinear resistance on the chaotic regimes are studied and compared with practical results. It has been shown that the circuit dynamic can be considerable varied by changing unstable symmetric equilibrium points. Furthermore, the transmission power level can be adjusted by magnitude of these two unstable equilibrium points.

**Keywords-** Chaos, Nonlinear Resistances, Piece-wise Linearization, Equilibrium Point.

## I. GİRİŞ

Kaotik sistemler başlangıç şartlarına duyarlı sistemler olarak bilinirler. Kaotik davranışlar ne genlik ne de frekans modülasyonu ile açıklanabilirler. Sınırsız sayıda farklı periyodik osilasyonlar gösterirler. En önemli özelliklerinden biri de gürültü benzeri güç spektrumlarına sahip olmalarıdır [1]. Pratik ortamlarda bahsedilen bu alışla gelmiş olmayan davranış türü, deneysel ortamlarda daha önce fark edilmiş fakat bu davranışlar, devreye dışarıdan etkiyen bir bozucu veya beyaz gürültü şeklinde yorumlanmıştır.

M.Türk, F. Ata; Fırat Üniv., Müh. Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ. mturk@firat.edu.tr, fata@firat.edu.tr.

Anlaşılması zor ve garip olan bu davranış türleri başlangıçta devre parametrelerini değiştirip elimine edilme yoluna gidilmiş veya teorik olarak doğrusallaştırma ile bilinen cevapların elde edildiği çalışma alanlarına yönlendirilmiştir. Başlangıçta bu tür devrelerin tasarımından ve bunların sistem dizaynında, kontrol uygulamalarında, haberleşme alanlarında, işaret işlemede kullanılmasından kaçınılmıştır. Daha sonraları doğrusal olmayan dinamik sistem teorisindeki gelişmeler ve çok yüksek performanstaki bilgisayarların devre simülasyonunda kullanılması ile devreye dışarıdan herhangi bir etki olmadan devrenin kendisinin genliği ve frekansı sabit osilasyonlar (*limit cycling*) meydana getirebileceği ortaya konulmuştur [2].

Yaklaşık 15 yıl önce Japon bilim adamı Prof. Y. Ueda [3], Duffing denkleminin dinamik davranışını bir analog simülatörde incelemek için geliştirdiği düzenekte alışla gelmiş davranış türlerinden başka bir davranışın varlığını fark etmişti. Bu davranış şeklini garip davranış (*strange attractor*) olarak adlandırdı. Ancak bu çalışma bilimsel ortamda ilk olarak sunulduğunda bir çok muhafazakar dinamikçi tarafından reddedildi. Daha sonra periyodik olarak zorlanan varaktör diod elemanlı devre, PLL ve Chua devresi diye adlandırılan elektronik devrelerde de bu davranış görüldü ve buna kaos denildi [4-5].

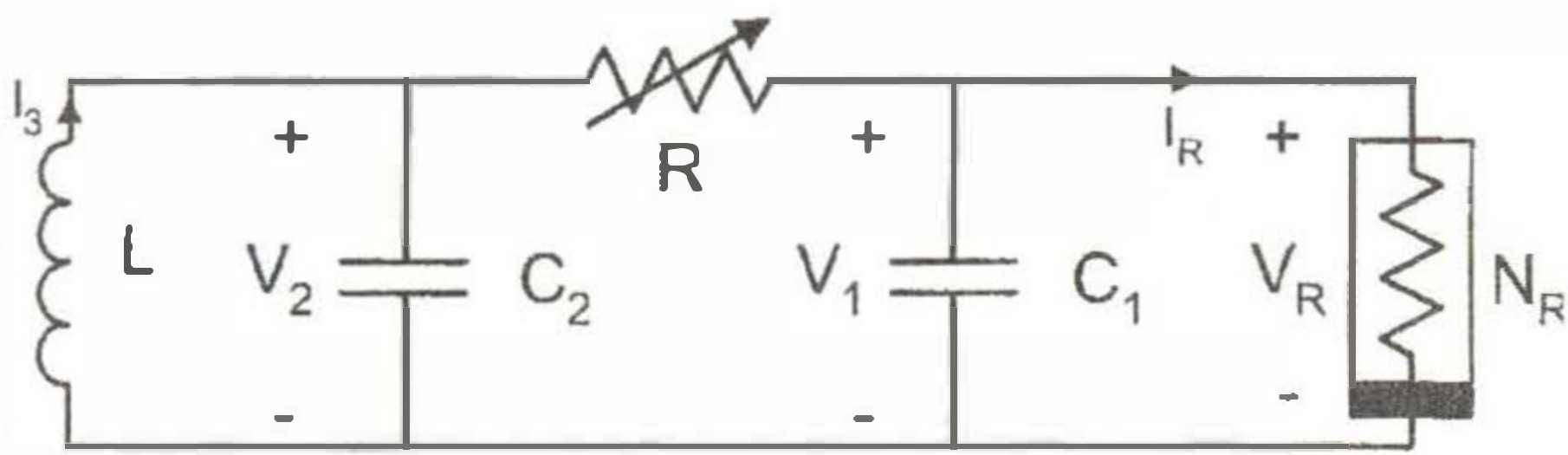
Kaos, günümüzde lazerlerin gücünün artırılmasında, elektronik devrelerinin çıkışlarının senkronize edilmesinde, kimyasal reaksiyonlardaki osilasyon kontrolünde, sağlıklı hayvan kalplerindeki düzensiz kalp atışlarının kararlı hale getirilmesinde, beyin dalgalarının incelenmesinde, görüntü sıkıştırma ve haberleşme gizliliğinde elektronik mesajların çözümlenmesi gibi çok farklı ve çok yaygın kullanım alanı vardır [6-8]. Bu nedenle teorik ve pratik olarak bir çok model, kaotik davranışların incelenmesi için önerilmiştir [9-11].

Bu çalışmada, önerilen bu devrelerden Chua devresi [12], sistemin tüm davranışlarını inceleyebilmek açısından dinamik üzerinde etkili ve devreyi farklı çalışma bölgeleri içerisine çeken elemanların etkilerinin de incelenmesine olanak veren tüm devre elemanları değişken olarak seçilerek dizayn edildi. Bu çalışmada hem deneysel hem de nümerik olarak devre dinamiği incelenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı.

## II. DEVRENİN DENGE NOKTALARI

Ele alınan herhangi bir doğrusal olmayan elektronik devre ilk olarak incelenirken devre denge noktalarına göre genellikle doğrusallaştırılarak incelenir. Burada da parça-parça doğrusallaştırma metodu kullanıldı [5]. Bu analiz tekniği ile global anlamda devrenin tüm davranışlarını elde etmek elbette mümkün değildir [1]. Ancak belirli bölgeler için devre cevabı elde edilerek bu cevapların birleştirilmesi ile global davranış hakkında yaklaşık bir fikir elde edilebilir.

Burada ele alınan devre, şekil 1'de gösterilen ve Chua devresi olarak bilinen, oldukça zengin davranışlar sergileyen basit bir osilatör devresidir [13].



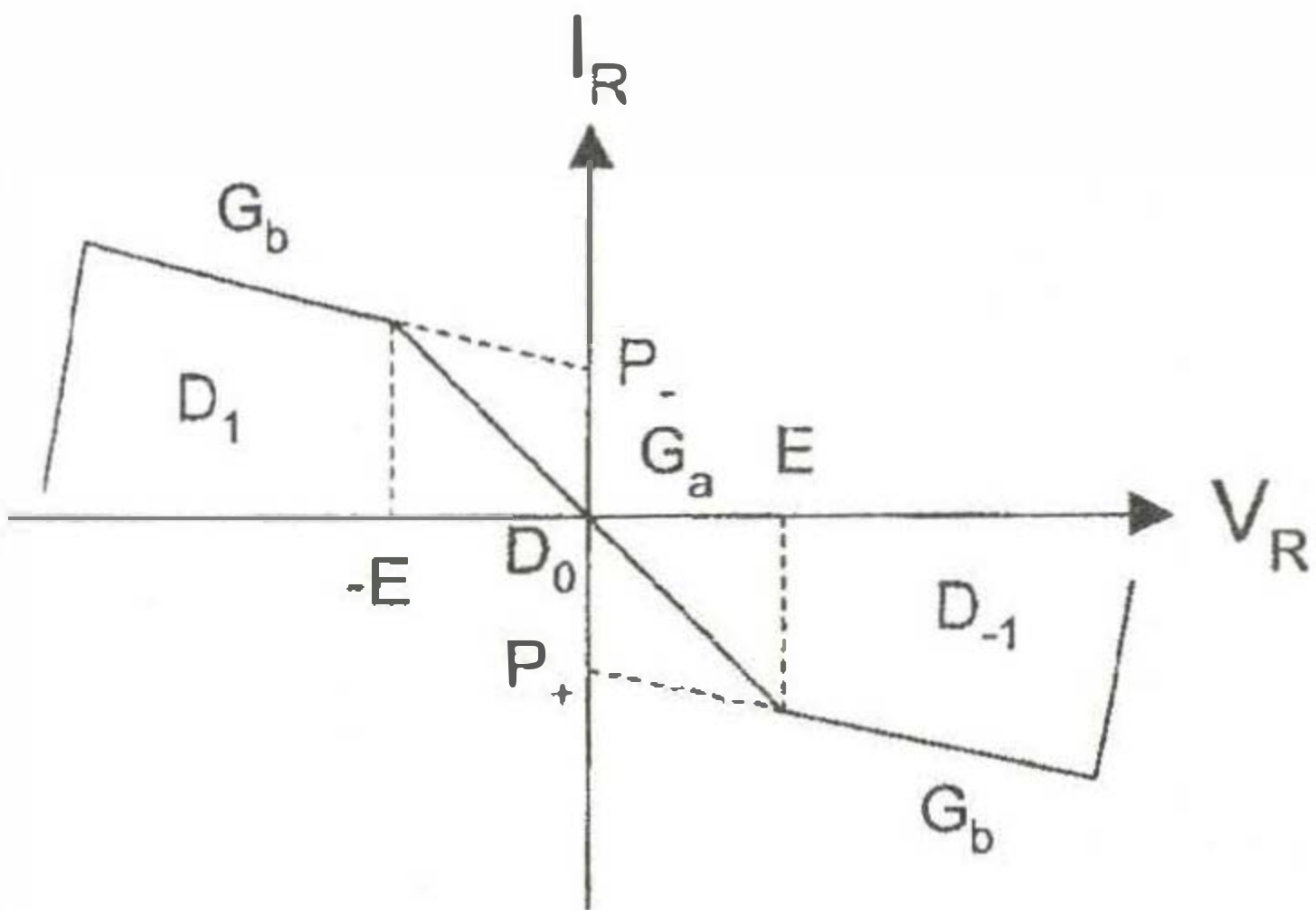
Şekil 1. Chua devresi.

Devrenin durum denklemleri denklem (1)'de verilmiştir. Şekil 2'de doğrusal olmayan direncin akım-gerilim, karakteristiği incelenirse belirli aralıklarda parça-parça doğrusallaştırma tekniği uygulanmaya uygun olduğu görülür.

Parça-parça doğrusallaştırma analizine göre karakteristiği şekil 2'de verilen doğrusal olmayan direnç üç bölgeye ayrılır. Bu bölgeler  $V_R < -E$ ,  $|V_R| \leq E$  ve  $V_R > E$  olmak üzere sırasıyla  $D_1$ ,  $D_0$  ve  $D_{-1}$  diye adlandırılırlar.

$$\begin{aligned} \frac{dI_3}{dt} &= -\frac{1}{L}V_2 \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}I_3 - \frac{G}{C_2}(V_2 - V_1) \\ \frac{dV_1}{dt} &= \frac{G}{C_1}(V_2 - V_1) - \frac{1}{C_1}f(V_1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$f(V_R) = G_b V_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b)[|V_R + E| - |V_R - E|]$$



Şekil 2. Doğrusal olmayan direnç karakteristiği.

Devrenin  $D_1$  ve  $D_{-1}$  dış bölgelerindeki denge noktaları denklem (1)'in çözülmesi ile devre parametrelerine bağlı denge noktalarının değişimi denklem (2)'deki gibi elde edilebilir.

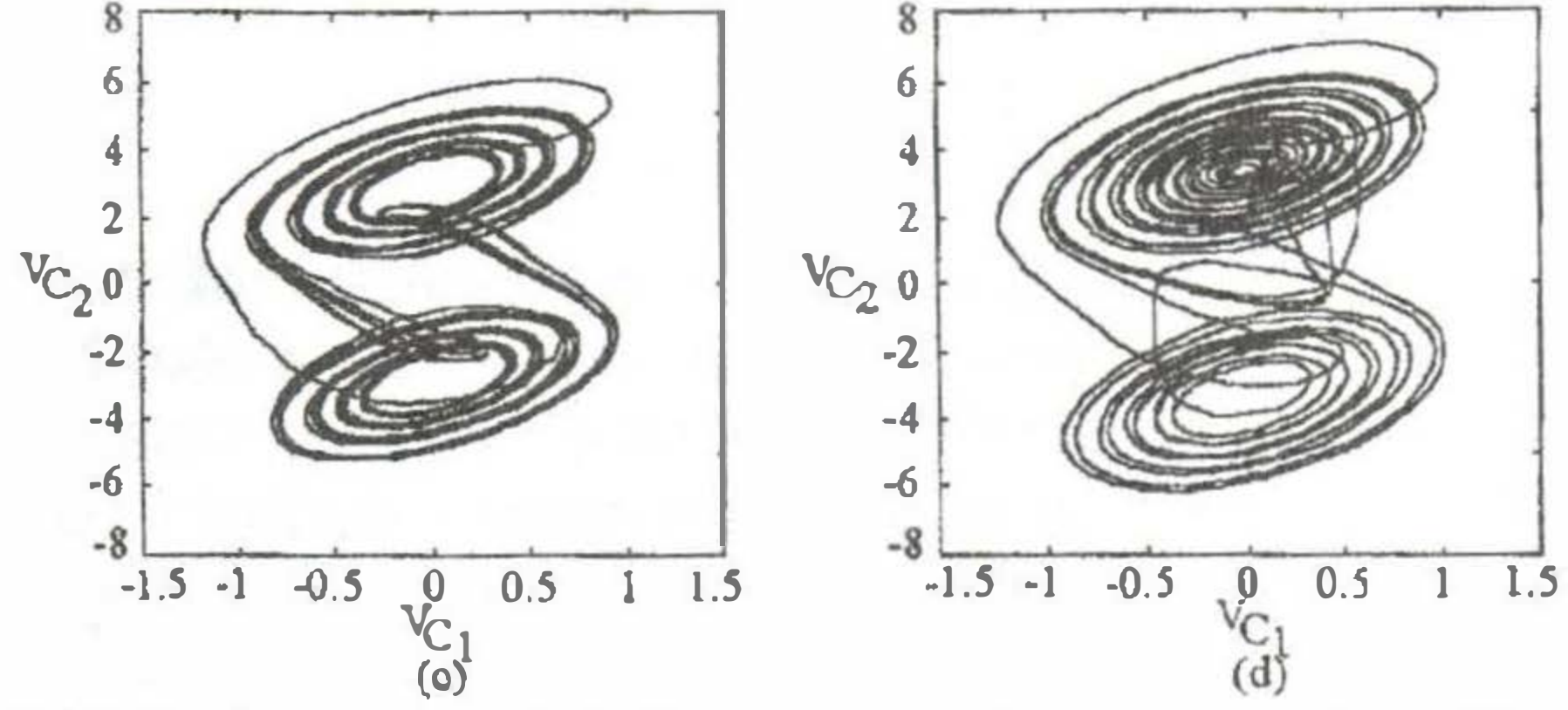
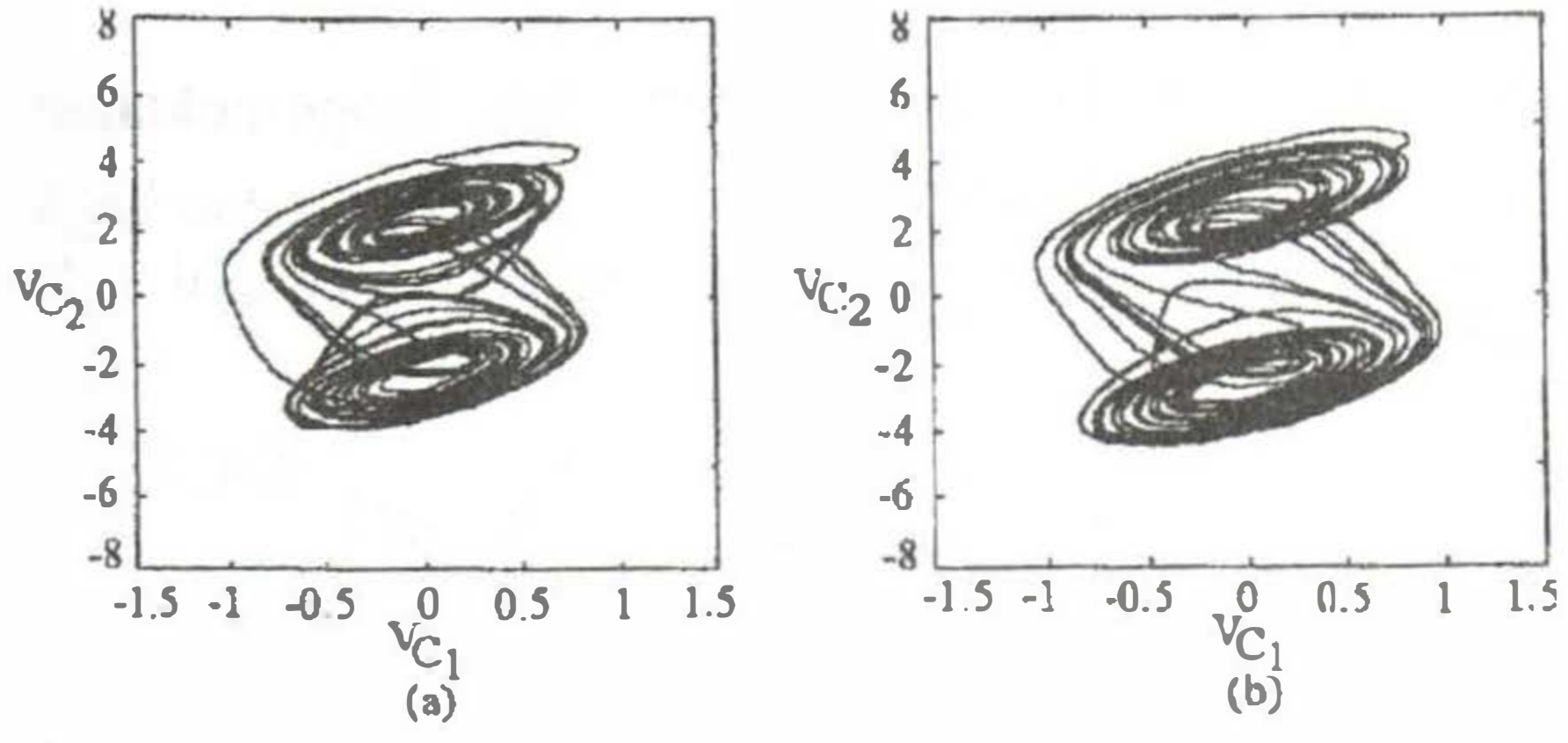
$$P_- = \begin{bmatrix} \frac{G(G_b - G_a)E}{G + G_b} \\ 0 \\ \frac{(G_a - G_b)E}{G + G_b} \end{bmatrix} \quad P_+ = \begin{bmatrix} \frac{G(G_a - G_b)E}{G + G_b} \\ 0 \\ \frac{(G_b - G_a)E}{G + G_b} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denklem (2)'den görüldüğü üzere denge noktaları üzerinde sadece doğrusal olmayan direncin elemanları ve şekil 1'deki devredeki  $R$  direnci etkilidir. Diğer parametrelerinin değişimi devre davranışını değiştir fakat devrenin denge noktalarını etkilemez. Parça-parça doğrusallaştırma tekniği ile devre [12]'de incelenmiş, ancak bu teknik devrenin global davranış konusunda çok sınırlı bir fikir edinilmiştir.

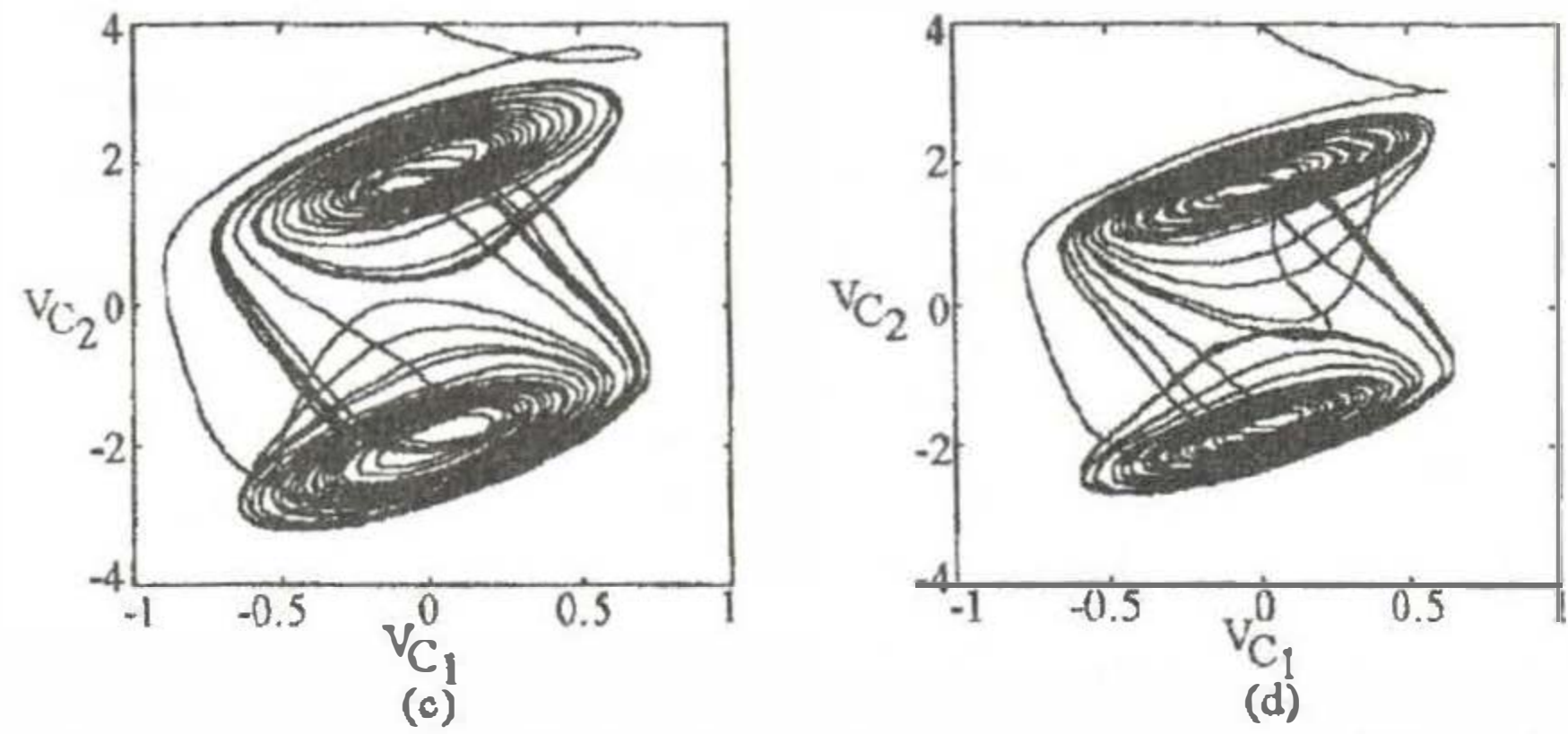
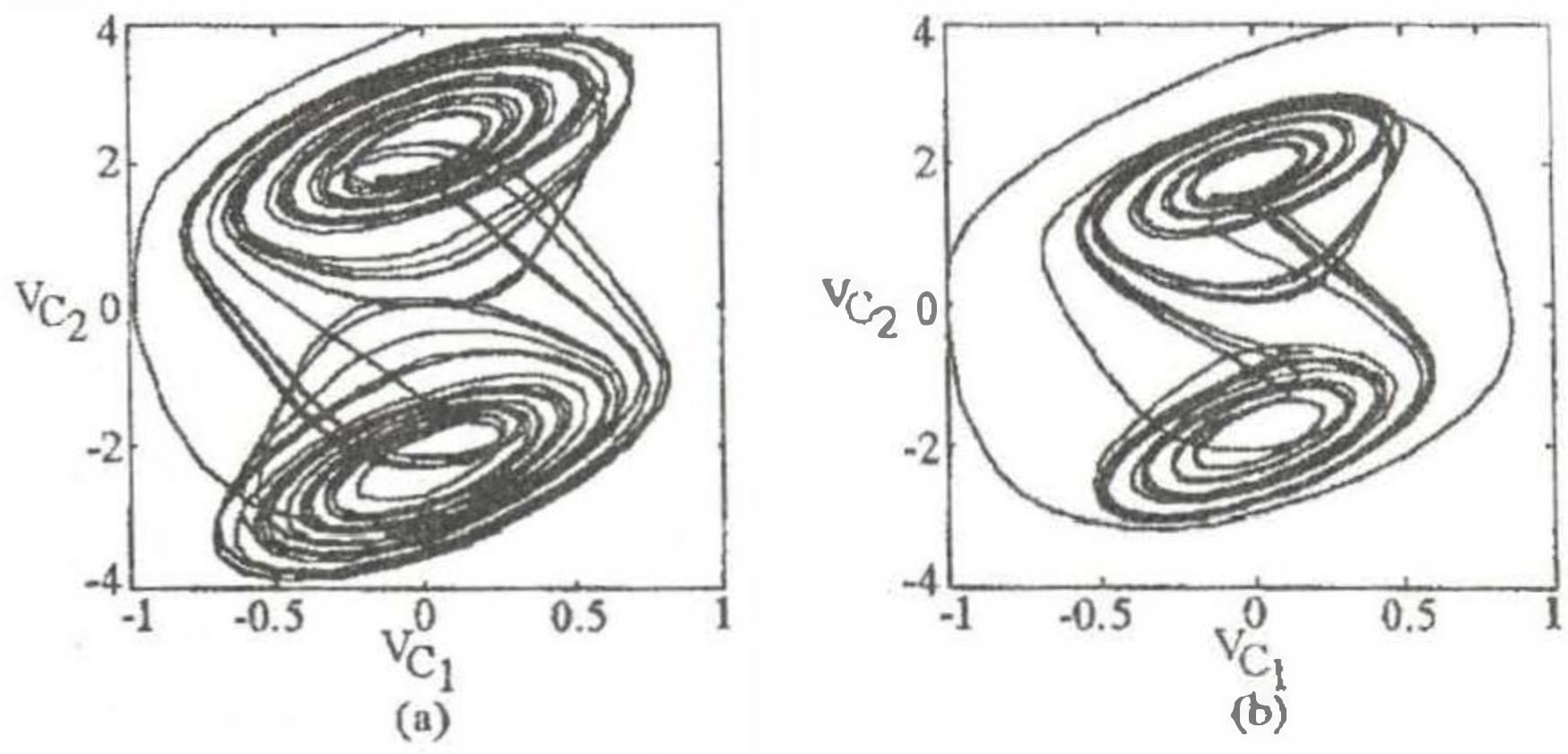
## III. DOĞRUSAL OLMAYAN DİRENCİN ETKİLERİ

Nümerik olarak dinamik sistemlerin incelenmesinde oldukça yaygın olarak kullanılan Matlab programlama dili bu çalışmaya boyunca kullanıldı. Devrenin denklem (1)'de verilen durum denklemleri 5 adımlı Runge-Kutta nümerik metodu kullanılarak integrasyon adımı  $10^{-3}$  alınarak  $10^{-6}$  hassasiyetinde çözdürüldü. Şekil 1'deki devrede  $C_2=100\text{nF}$ ,  $C_1=10\text{nF}$ ,  $L=18\text{mH}$  ve  $R=1780\Omega$  değerlerinde sabit tutularak sırasıyla doğrusal olmayan direncin doğrusal parçalarının eğimleri ve kırılma noktaları değiştirildi. Devrenin yukarıdaki parametrelere bağlı değerler için gösterdiği davranış literatürde *Double Scroll Çekici* olarak adlandırılan davranış türüdür. Devrenin dinamik davranışı ise enerji depolayan devre elemanları üzerindeki gerilimlerin zaman eksenini ortadan kaldırılarak birbirine göre inceleme olanağı veren durum uzay diyagramı yardımı ile incelendi. Devredeki enerji depolayan devre elemanlarından  $C_2$  kondansatörü üzerindeki başlangıç şartı 4V olarak seçildi.

Şekil 3-6'da eğimlerin ve kırılma noktalarının değişiminin devre davranışına etkileri gösterilmiştir. Doğrusal olmayan direncin eğimleri artırılınca devre tepkimesinin hızlandığı ve dolayısıyla sistemin geçici rejim süresinin oldukça kısaldığı görülmüştür. Genlik olarak da kaotik işaretlerinin büyüdüğü gözlenmiştir. Aynı şekilde doğrusal olmayan direncin kırılma noktaları birbirlerine yaklaştırılırsa başlangıçtaki geçici rejim süresi artacak ve kaotik sinyallerin genliğinde bir azalma olacaktır. Devrede kırılma noktalarının gerilimlerinin mutlak değer olarak artırılması ile devrenin denge noktaları orijinden uzaklaşmaya başlayacak, belirli bir değerden sonra devrenin asimptotik sönümlü bir davranış gösterdiği gözlenmiştir.



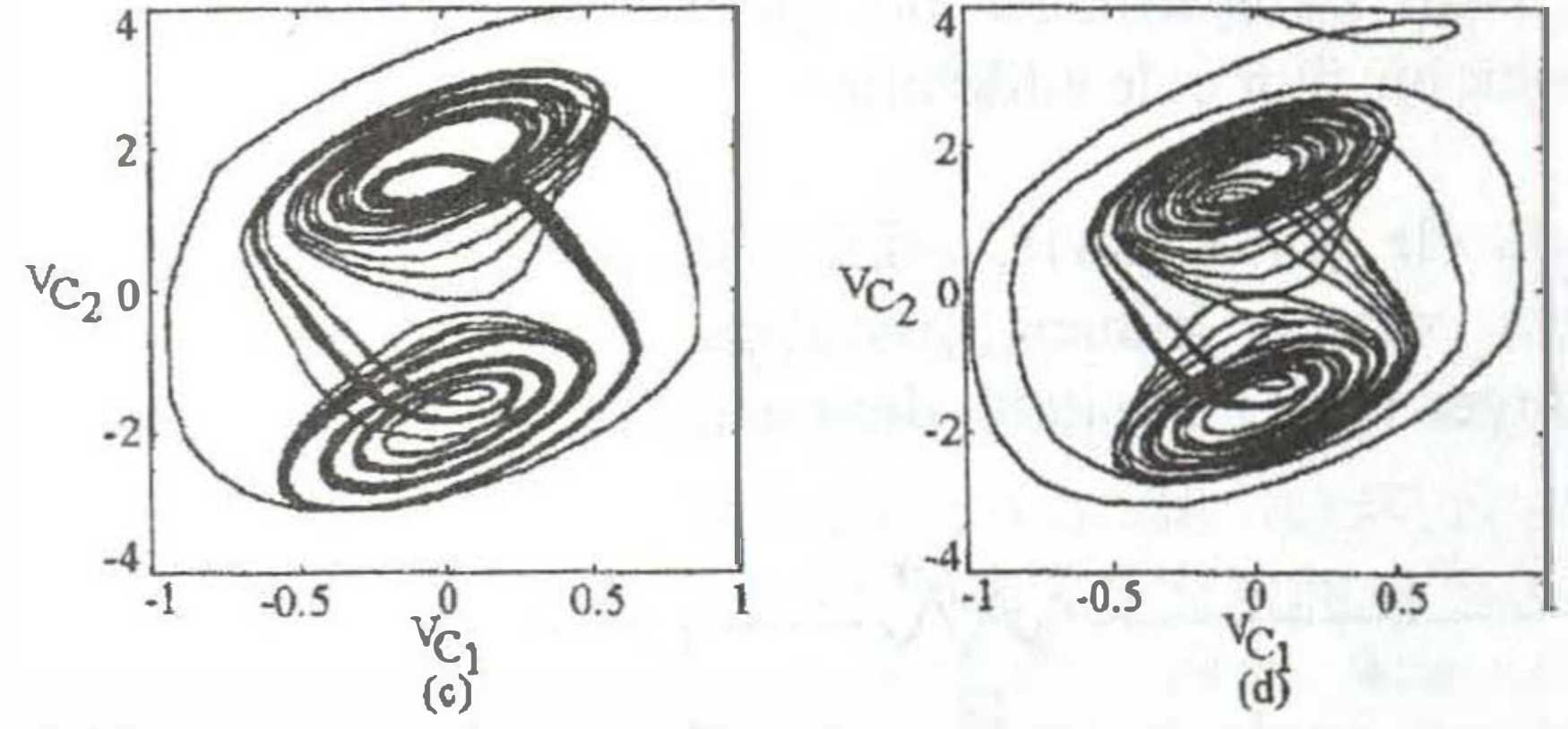
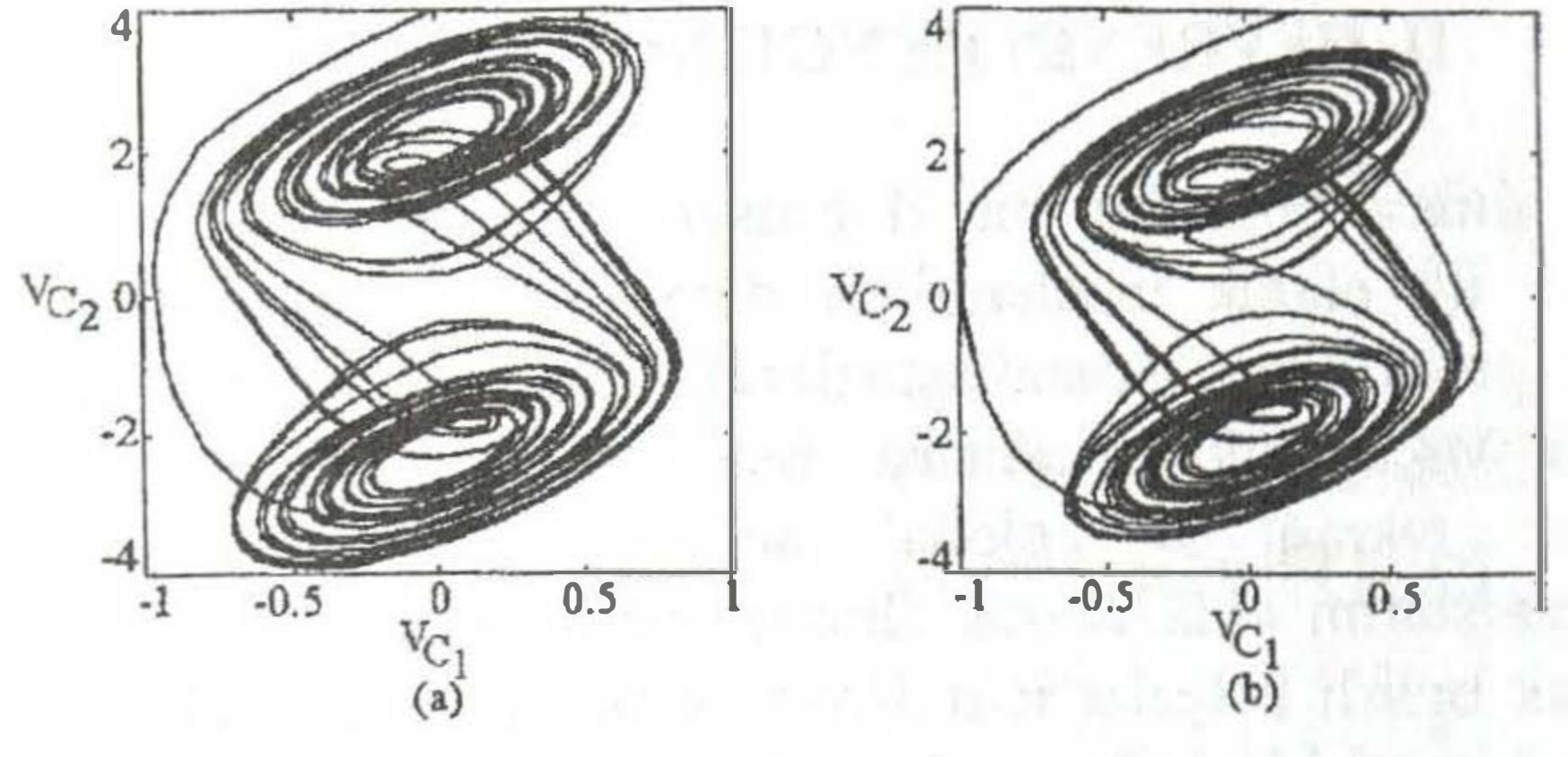
Şekil 3.  $G_a$  ve  $G_b$  değerlerinin artmasına devrenin verdiği tepkiler. a-b)  $G_b$  sabit,  $G_a$  artarken. c-d)  $G_b$  sabit,  $G_a$  artarken



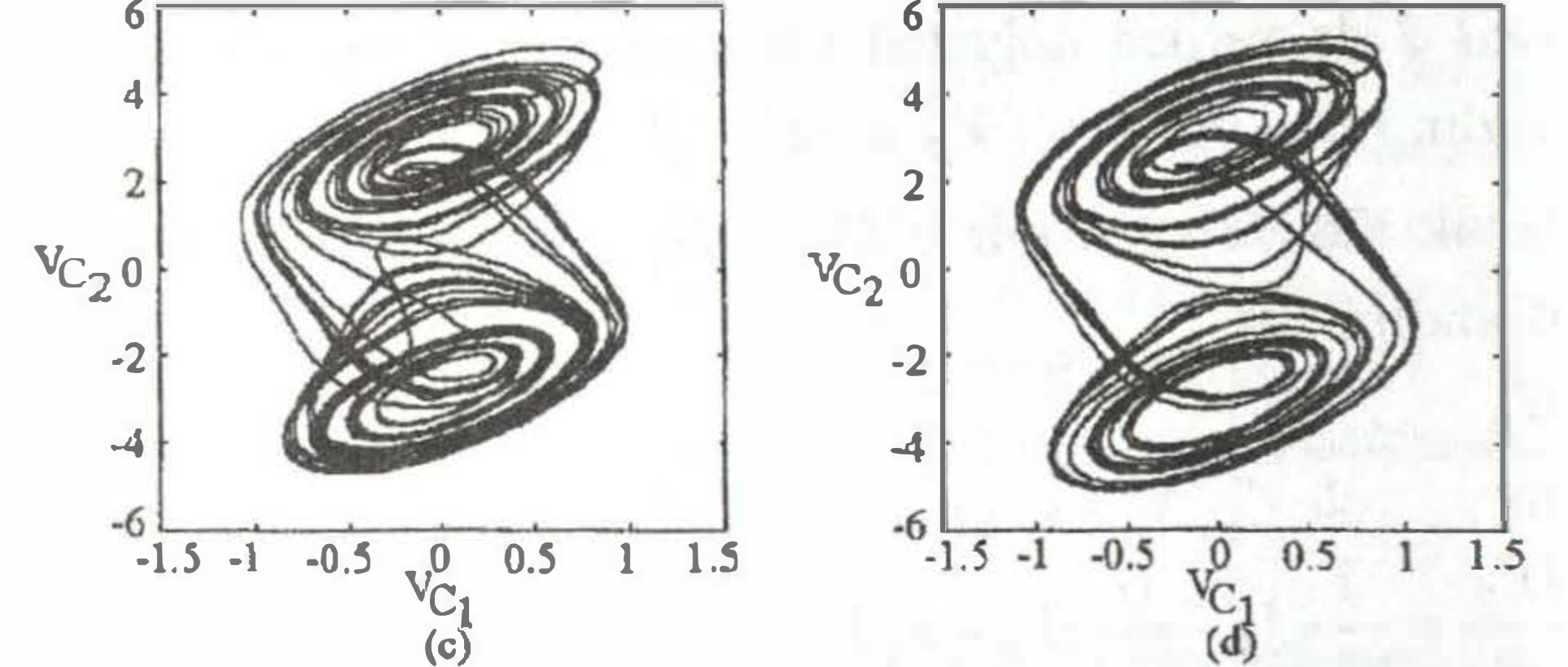
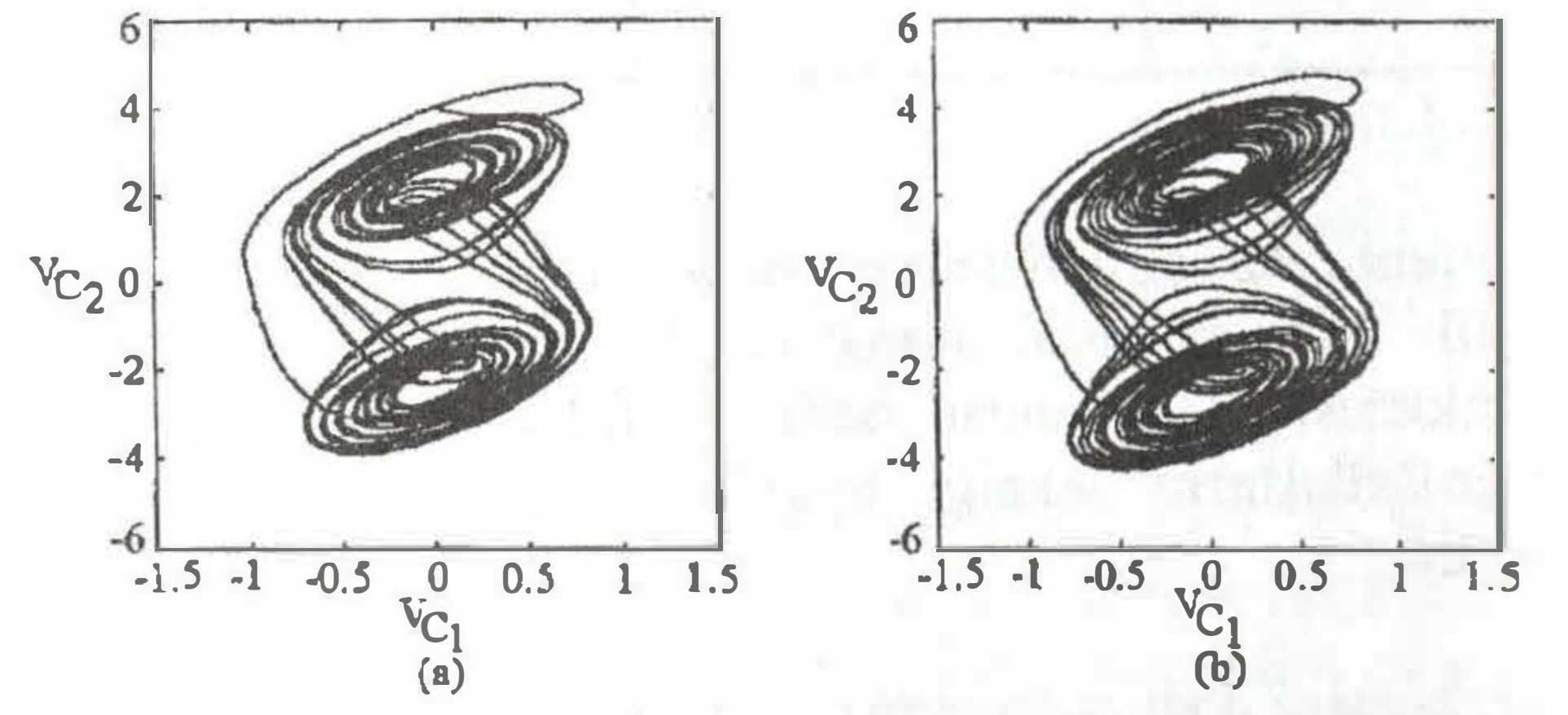
Şekil 4.  $G_a$  ve  $G_b$  değerlerinin azalmasına devrenin verdiği tepkiler a-b)  $G_b$  sabit,  $G_a$  azalırken c-d)  $G_a$  sabit,  $G_b$  azalırken.

Tablo I.  $G_a$  eğiminin değişimine karşılık R direncinin ve davranışların değişimi.

Direncin Eğimleri		R Direncinin Değişimi( $\Omega$ )			
$G_a(\mu S)$	$G_b(\mu S)$	Düzenli Davranışlar		Düzensiz Davranışlar	
		Asimptotik Kararlı	Limit Çevrim	Spiral Çekici	Double Scroll Çekici
-847	-409	2050	2020	1995	1960
-817	-409	2045	2015	1990	1955
-787	-409	2040	2010	1985	1950
-757	-409	2030	2000	1975	1930
-727	-409	2025	1995	1950	1905
-697	-409	2020	1990	1940	1875
-667	-409	2010	1985	1925	1815



Şekil 5. Kırılma noktası gerilimleri a)  $E=1V$ , b)  $E=0.9V$ , c)  $E=0.8V$ , d)  $E=0.7V$ .



Şekil 6. Kırılma noktası gerilimleri a)  $E=1V$  b)  $E=1.1V$  c)  $E=1.2V$  d)  $E=1.3V$ .

Tablo II.  $G_b$  eğiminin değişimine karşılık R direncinin ve davranışların değişimi.

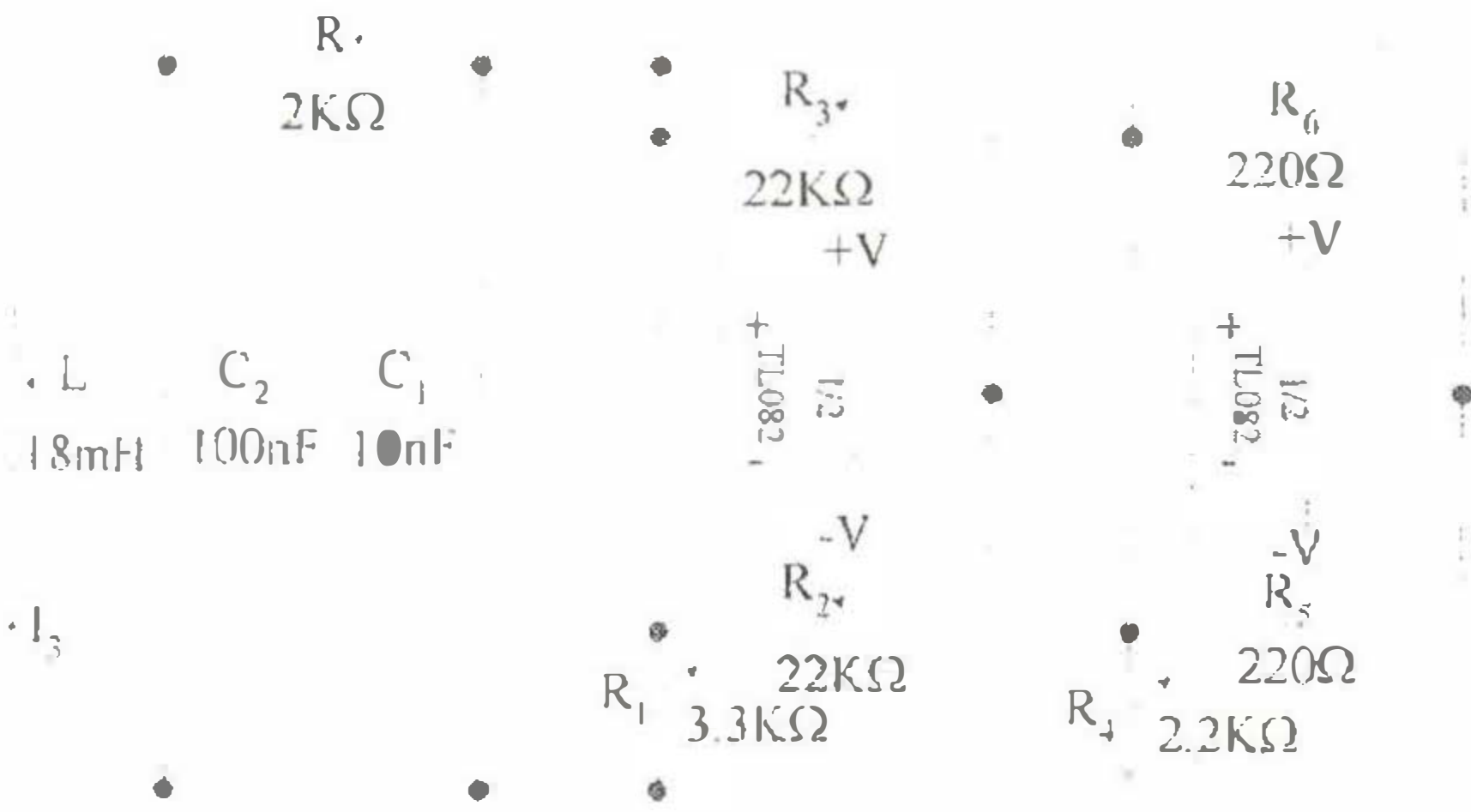
Direncin Eğimleri		R Direncinin Değişimi( $\Omega$ )			
$G_a(\mu S)$	$G_b(\mu S)$	Düzenli Davranışlar		Düzensiz Davranışlar	
		Asimptotik Kararlı	Limit Çevrim	Spiral Çekici	Double Scroll Çekici
-757	-499	1900	1800	1775	1750
-757	-469	1930	1870	1830	1800
-757	-439	1970	1940	1900	1875
-757	-409	2030	1995	1970	1930
-757	-379	2090	2060	2020	1980
-757	-349	2150	2110	2070	2020
-757	-319	2190	2140	2080	2050

Sadece devredeki doğrusal olmayan direncin eğimleri değiştirilerek diğer devre parametreleri sabit tutularak devrenin hangi değerlerde asimptotik kararlı, limit çevrim, *Spiral Çekici* ve *Double Scroll Çekici* davranışları sergilediği ve doğrusal olmayan direncin etkilerinin devre dinamiği üzerindeki etkilerine daha farklı bir bakış açısı olması yönünden Tablo I ve II'deki değerler elde edildi. Bu sonuçlar elde edilirken devrede sadece  $R$  direnci ve belirtildiği gibi doğrusal olmayan direncin eğimleri değiştirildi.

#### IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel devre şekil 7'de belirtilen devre elemanları ile gerçekleştirildi. Devredeki opamplar özellikle FET girişli oldukları için TL serisinden tercih edilmişlerdir. Bu tip op-amp'ların offset gerilimlerinin seviyeleri oldukça düşük olup yaklaşık 1mV civarındadır. Ölçülen saturasyon seviyeleri ise yaklaşık 8.3V civarındadır. Devrede kesikli çizgilerle gösterilen op-amp'lardan oluşturulmuş devre doğrusal olmayan gerilim kontrollü bir direnç devresidir.

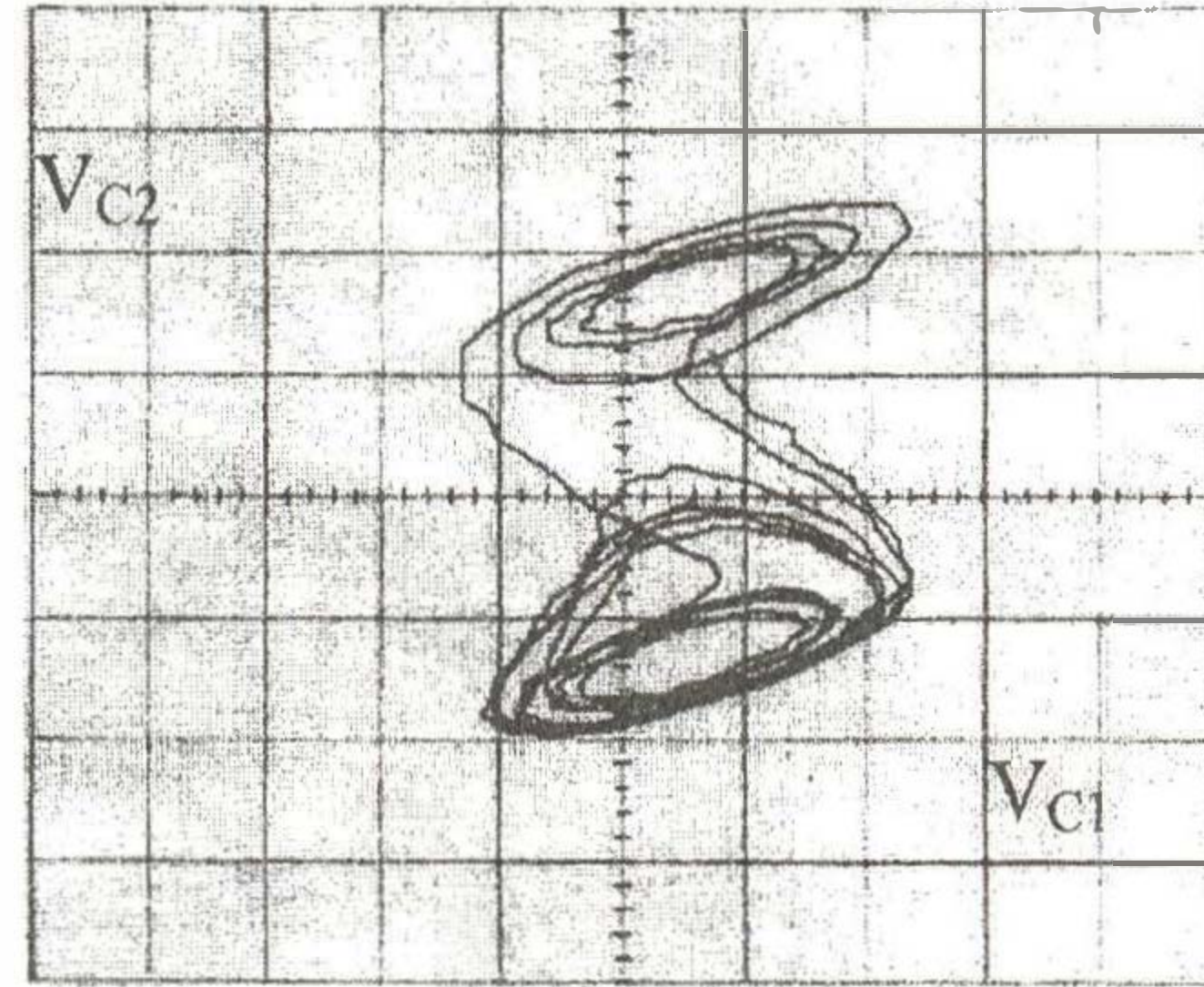
Şekil 7. Deneysel Chua devresi.



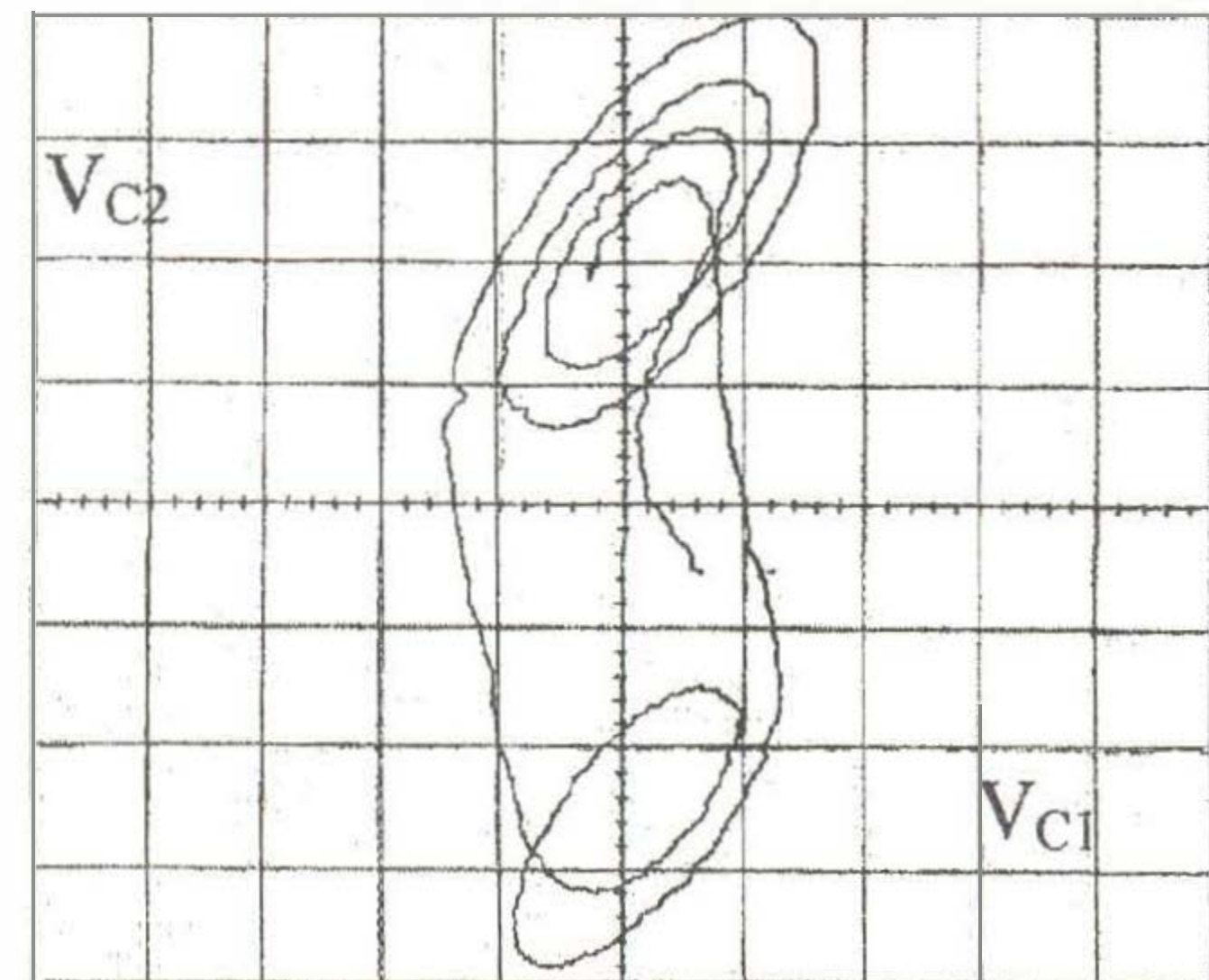
Eğer devredeki  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ve  $R_4$  değişken seçilirse doğrusal olmayan direncin hem eğimleri hem de kırılma noktaları değiştirilebilir. Şekil 2'de karakteristiği gösterilen doğrusal olmayan direncin eğimleri  $R_1$ ,  $R_3$  ve  $R_4$  dirençlerine bağlı iken kırılma noktaları sadece  $R_1$  ve  $R_2$  dirençlerine bağlıdır.  $G_a = -1/R_1 - 1/R_4$ ,  $G_b = -1/R_3 - 1/R_4$  ve kırılma noktaları ise  $E = \mp R_1 E_{sat} / (R_1 + R_2)$  şeklinde devre parametreleri cinsinden elde edilebilir. Denklem (2)'de verilen devre parametrelerine bağlı denge noktalarının bu değerlere bağlı değişimi teorik ve deneysel olarak incelenebilir.

Şekil 8'deki *Double Scroll Çekici* davranışı osiloskopta x-kanalı 0.5V/kare y-kanalı ise 1V/kare olacak şekilde ayarlanarak elde edildi. Şekil 9'da ise deneysel olarak elde edilen ve  $G_a$  ile  $G_b$  değerlerinin değişimine devrenin verdiği tepki görülmektedir. Şekil 10'da kırılma noktasının değişim ile elde edilen *Double Scroll Çekici* davranışının değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere bu

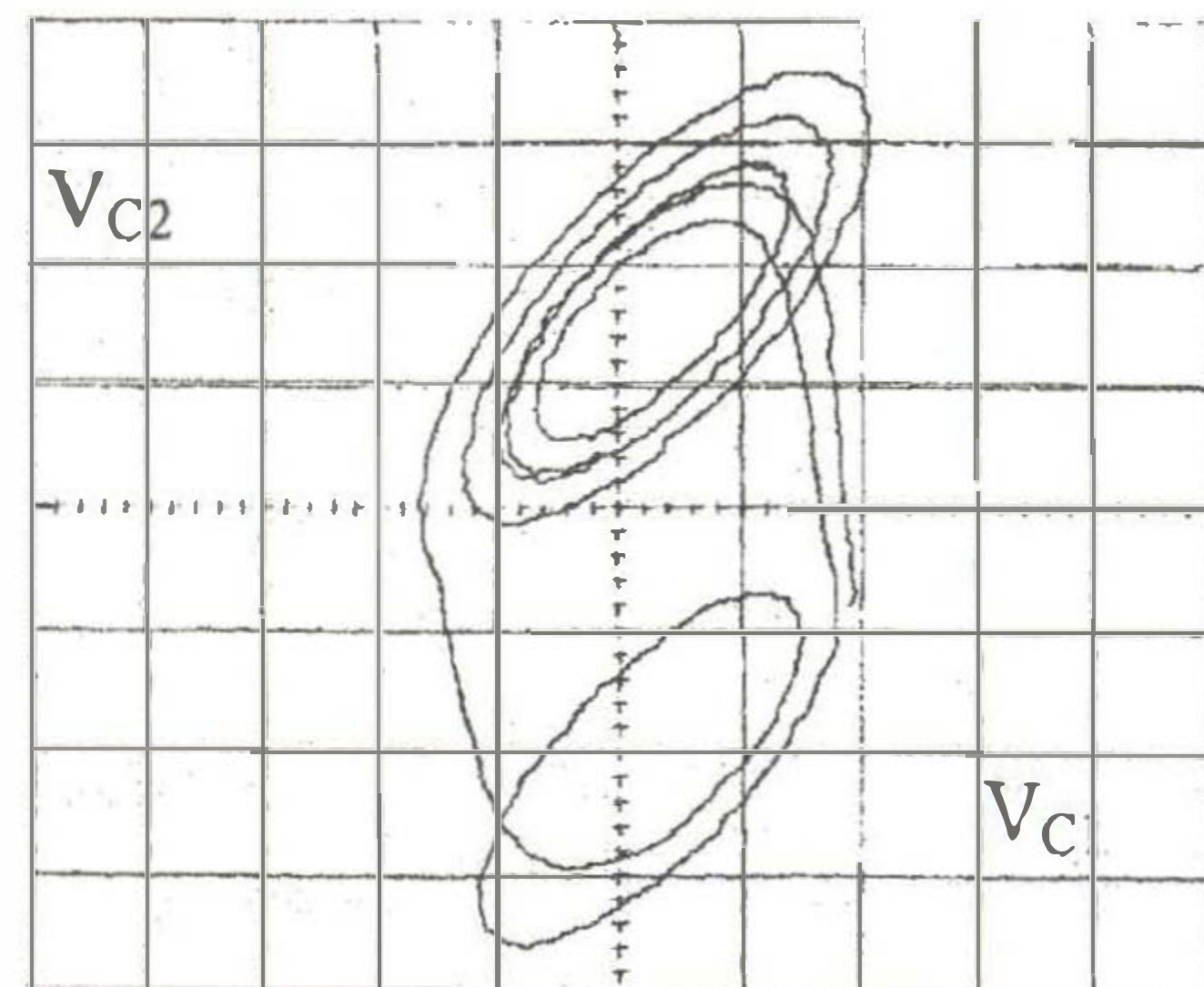
davranış türleri daha önce elde edilen nümerik sonuçlarla çok yakındır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki farklılıklar özellikle op-amp'ların çalışma şartlarının bu devrede hızla değişmesinden ve devre dış etkilerden çok iyi izole edilmediğinden ileri gelmektedir. Bu çalışmada değişken seçilen edüktansın özellikle dış etkilerden arındırılması gerekir.



Şekil 8.  $G_a$  ve  $G_b$  değerlerinin değişimine devrenin gösterdiği tepki.  $G_a = -747 \mu S$  ve  $G_b = -409 \mu S$ ,  $E=1V$



Şekil 9.  $G_a$  ve  $G_b$  eğimlerinin değişiminin devrede gösterdiği etki.  $G_a = -847 \mu S$  ve  $G_b = -459 \mu S$ ,  $E=1V$ .



Şekil 10.  $E$  kırılma noktası geriliminin değişiminin devrede gösterdiği etki.  $E=1.2V$

## V. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç enerji depolayan ve literatürde Chua devresi olarak bilinen elektronik devrenin dinamiği incelendi. Devrenin davranışına etkilerinin pratik olarak inceleyebilmek için uygun devre elemanları değişken seçilmiştir. Değişken seçilen bu devre elemanlarının değeri değiştirilerek oldukça farklı kaotik davranışlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan görülmüştür ki değiştirilen bu eleman değerleri denge noktalarını etkilememektedir ve kaotik davranışlardaki genlik değeri sabit kalmaktadır. Devrenin denge noktalarının değişimi ancak doğrusal olmayan direncin kırılma noktaları ve doğrusal eğimleri değiştirilerek yapılabileceği ortaya konulmuştur. Değiştirilen bu kararsız denge noktalarını değiştirmekle geçici zaman süreri artırılır. Eğer daha fazla artırılırsa op-amplarda bir doymaya sebep olacağından devre kaostan çıkar.

Kaos haberleşmede temel problemlerden birisi sınırlı genlikli işaretlerle çalışmaktır [14-15]. Bu çalışmayla, kaos ile ilgili önemli gizli bilgilerin iletilmesi istenen yerlerde doğrusal olmayan direncin eğimleri değiştirilerek kaotik sinyallerin güç seviyeleri ayarlanabilir ve böylece daha değişik güçteki sinyaller de iletilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] F.C. Moon, "Chaotic and Fractal Dynamics", John Wiley & Sons. NY, 1992
- [2] D.P. Atherton, "Nonlinear Control Engineering: Describing Function Analysis and Design", Van Nostrand Reinhold, London, 1982.
- [3] Y. Ueda, "Strange Attractors and the Origin of Chaos", Proc. the impact of Chaos on Science and Society, Tokyo University, 1991.
- [4] J.M.T. Thompson and H.B. Stewart, "Nonlinear Dynamics and Chaos", John Wiley & Sons, Chichester, U.K, 1986.
- [5] L.O. Chua, C.A. Desoer and E.S. Kuh, "Linear and Nonlinear Circuits", McGraw Hill, USA, 1987.
- [6] W.L. Ditto and L.M. Pecora,, "Mastering Chaos", Scientific American, 1993, pp.78-84, August.
- [7] A. Uçar, M. Türk, F. Ata, "A Practical Realization of Chaos Synchronization For Transmitting Information", The 32<sup>nd</sup> International Scientific Symposium of the Defense Research Agency, vol. 4, Bucharest-Romania, 2001, pp. 81-88.
- [8] M. Türk and F. Ata, "Performance Analysis of Adaptive Controllers on Chaotic Parameter Modulation and Variant Channel Gain", 1<sup>st</sup>. IEEE Int. Conference on Circuit and System for Communication, ICCSC'02, 2002, St.Petersburg, Rusia. (Accepted for poster presentation).

- [9] C.T. Sparrow, "Chaotic Behavior in a 3-dimensional Feedback System", J.Math. Anal. and Applics., 1981, vol.83, pp.275-291
- [10] M.P. Kennedy, "Experimental Chaos from Autonomous Electronic Circuits", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A., 1995, vol.353, pp.13-32.
- [11] M.Türk ve A. Gülten, "Doğrusal Olmayan Elektronik Devrelerin Bond Graf ile Modellenmesi" Sakarya Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2002, vol.6, no.1, Mart.
- [12] M.P. Kennedy, "Three Steps to Chaos-Part I: Evolution", IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1993, vol.40, no.10. pp 640-656.
- [13] M.P. Kennedy, "Three Steps to Chaos-Part II: Chua's Circuits Primer", IEEE Trans. on Circuits and Systems, 1993, vol.40, no.10. pp 657-673.
- [14] M. Türk ve A. Uçar, "Kaos Senkronizasyon ve Gizli Bilgi İletimi", Elektrik&Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, 2001, Kocaeli, ss.513-516.
- [15] M. Türk ve A. Uçar, "Kaos Senkronizasyonun Tek Yönlü Kuplaj Metodunda Karşılaşılan Pratik Problemler", NEUCEE'01, Bilgisayar-Elektrik-Elektronik Mühendisliği Sempozyum ve Fuarı, 2001, Kıbrıs, ss.281-284.