

ELEKTRONİK ELEMANLARIN MODELLENMESİ VE BİLGİSAYARLA BENZETİM

H. Hakan Kuntman
İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Müh. Bölümü
34469, Maslak, İstanbul
Tel : 0-212-285 36 47
Faks: 0-212-285 36 79
e-mail :kuntman@itu.edu.tr

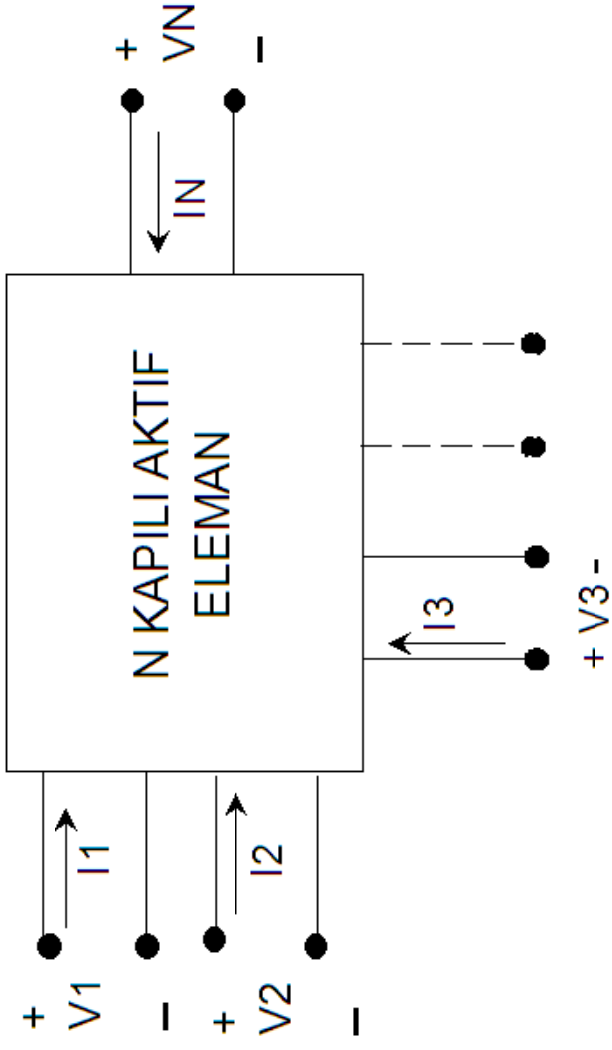
- Bilgisayarların ve buna bağlı olarak bilgisayar programlarının gelişmesiyle bilgisayar destekli tasarım gittikçe önem kazanarak ön plana çıkmıştır.
- Bilgisayar destekli tasarımın veya elektrik devrelerinin ve elektronik devrelerin bilgisayarla simüle edilmesinin sağladığı yarar, tasarımının laboratuvar ölçmeleri ile elde etmesinin olanaksız olduğu sonuçların simülasyonla kolayca elde edilebilmesidir.

- Tasarımcı bilgisayar kullanarak:
- dalga şekillerini ve frekans cevabını izleyebilir;
- çeşitli eleman parametrelerinin devre üzerine etkilerini birbirinden ayırmak ve izole etmek üzere, sonsuz band genişliğine ve kazanca sahip elemanlar kullanılabilir;
- bir deney plakentinin yahut board'unun getireceği parazitik etkiler olmaksızın bir tümdevrenin yüksek frekanslardaki davranışını inceleyebilir;

- çok hızlı darbeler veya darbelerle sinüzoidal işaretlerin karışımı gibi ideal dalga şekillerini bir devreye uygulayabilir;
- devrenin temel yapısını anlayabilmek üzere doğru akım kısmını diğer bölümden ayırabilir;
- doğru gerilim seviyelerini bozmadan bir geribesleme çevrimini açabilir;
- çok geniş bir yapıya sahip devreler için bile transfer fonksiyonunun sıfırlarını ve kutuplarını bulabilir;

- gürültü, duyarlık, en kötü hal analizlerini ve istatistiksel analiz yapabilir.
- Bütün bunlardan anlaşılacağı gibi, bilgisayarla simülasyon bir anlamda en iyi ölçü yöntemi olmaktadır.
- Simülasyon sonuçlarının doğru olabilmesi için, elemanları temsil eden modellerinde yeteri kadar doğru olması gerekeceği açıktır. Başka bir deyişle, model ne kadar iyi kurulmuşsa, bilgisayarla simülasyon da o derece doğru sonuç verecektir.

N kapılı doğrusal olmayan aktif eleman



N kapılı doğrusal olmayan aktif elemanın uç büyüklükleri arasındaki ilişki

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(V_1, V_2, \dots, V_N) \\ f_2(V_1, V_2, \dots, V_N) \\ \cdot \\ f_N(V_1, V_2, \dots, V_N) \end{pmatrix}$$

Türev Matrisi

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_1} & \frac{\partial f_1}{\partial V_2} & \cdot & \frac{\partial f_1}{\partial V_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial V_1} & \frac{\partial f_2}{\partial V_2} & \cdot & \frac{\partial f_2}{\partial V_N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_N}{\partial V_1} & \cdot & \cdot & \frac{\partial f_N}{\partial V_N} \end{pmatrix}$$

Türevler: ilgili kapılardan içeriye doğru görülen iletkenlikler ve kapılararası geçiş iletkenlikleri
Türevler (iletkenlikler) doğru modellenmeli

• DOĞRULUK KRİTERLERİ:

- Elemanın hesap sonucu bulunan özeğrilerinin ölçü sonucu bulunan özeğrileriyle uyumluluğu.
- Elemanın küçük işaret parametrelerinin çalışma akım ve gerilimleriyle değişimleri için ölçü ve hesapla bulunacak değerler arasındaki tutarlılık.

MODEL TIPLERİ

- Eleman Modelleri
Bipolar tranzistor, MOS, JFET, MESFET Modelleri
- Makromodeller
İşlemsel Kuvvetlendirici, OTA, Akım Taşıyıcı, FTFN, Analog Çarpma Devresi, Mantık Devreleri, Güç MOSFET'i Makromodelleri vb.

ELEMAN MODELLERİ

▪ Diyot Modeli

▪ BJT Modelleri

Ebers-Moll Modeli

Gummel-Poon Modeli

Yüksek Doğruluklu BJT Modeli

▪ MOS Modelleri

1. Düzey, 2. Düzey, 3. Düzey MOS Modelleri
BSIM3 Modeli

ELEMAN MODELLERİ

Örnek 1: BJT Modelleri

- Bir bipolar tranzistorda V_{BE} , I_B , V_{CE} , I_C şeklinde dört temel uç büyüklüğü
- İki bağımsız değişken olarak seçildiğinde, diğerleri bu bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilebilir.
- En çok karşılaşılan durumlar aşağıda verilmiştir:

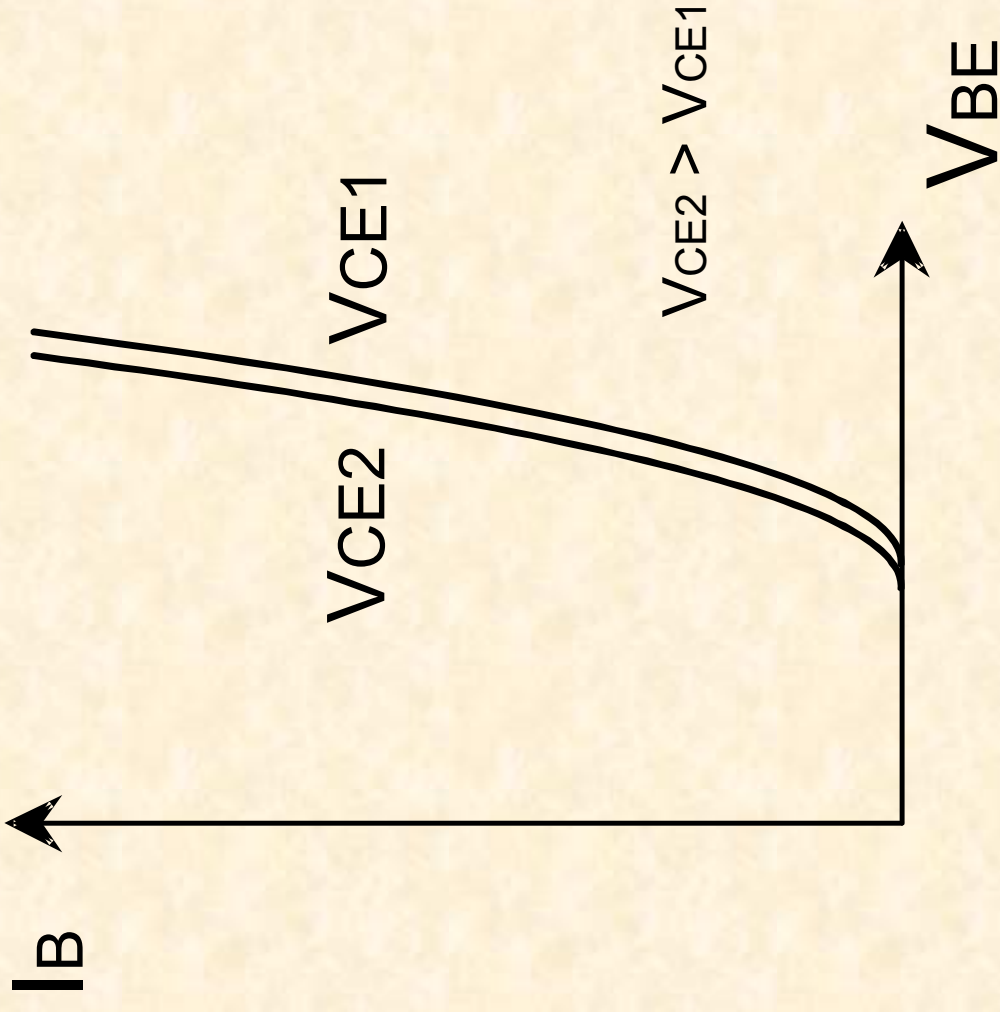
$$I_B = I_B(V_{BE}, V_{CE}) \quad (3.10)$$

$$I_C = I_C(V_{BE}, V_{CE}) \quad (3.11)$$

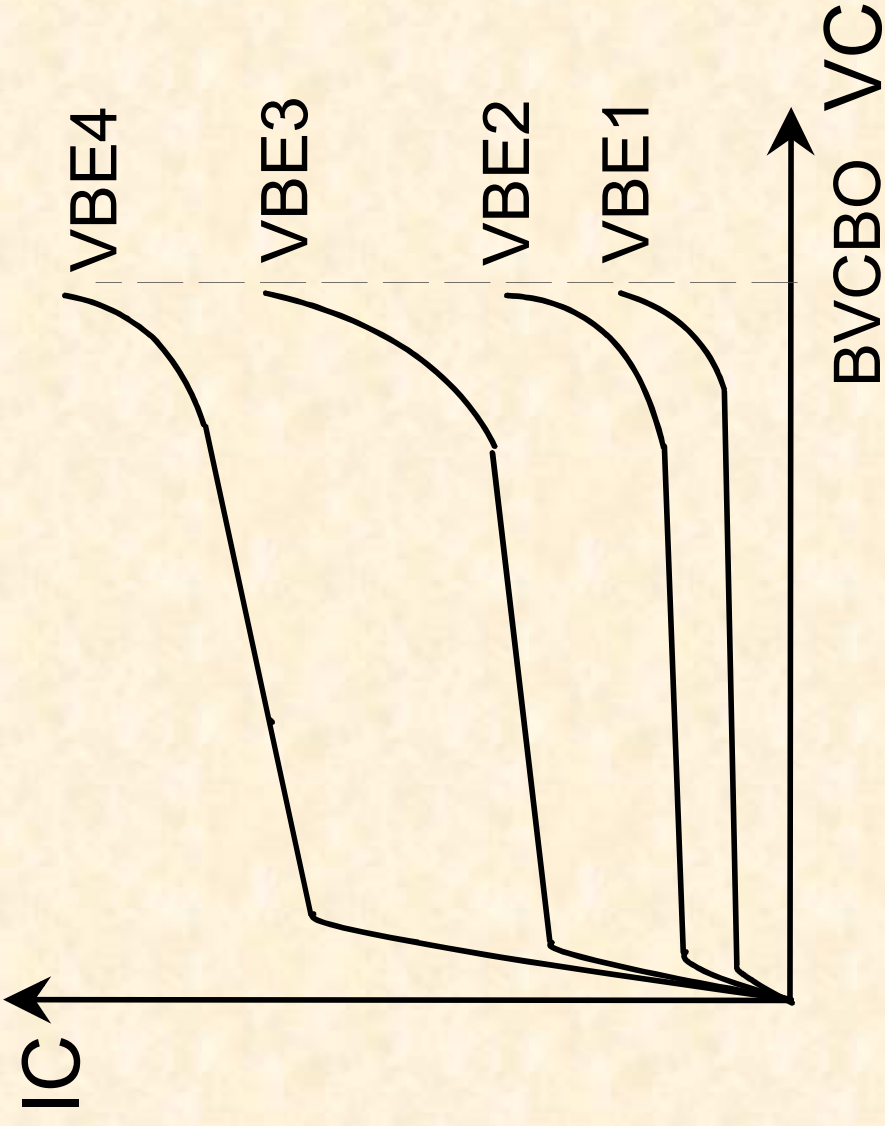
$$V_{BE} = V_{BE}(I_B, V_{CE}) \quad (3.12)$$

$$I_C = I_C(I_B, V_{CE}) \quad (3.13)$$

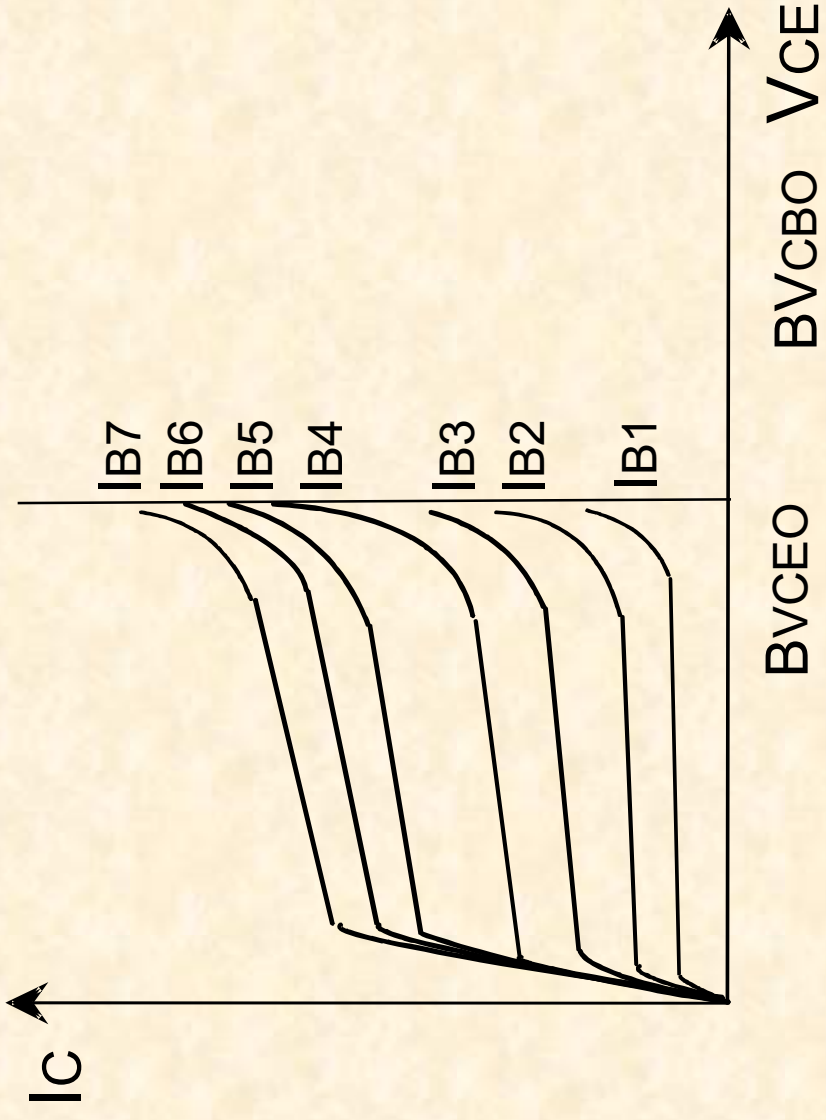
- (3.10) ve (3.12) ilişkileri giriş öz eğrisi,
- (3.11) bağıntısı sabit V_{BE} çıkış öz eğrisi,
- (3.13) bağıntısı sabit I_B çıkış öz eğrisi



Giriş öz eğrisi.

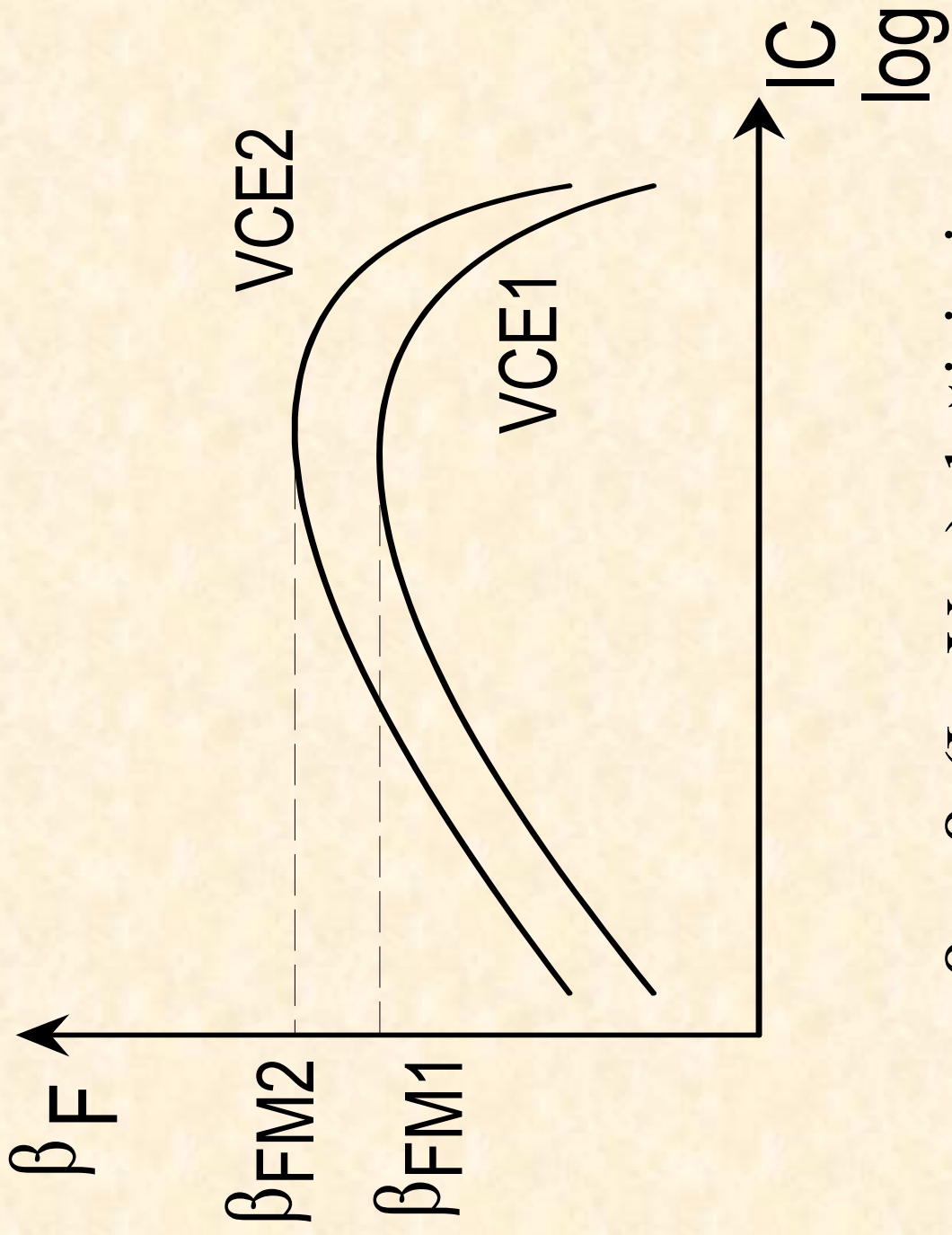


$V_{BE} = \text{sabit çıkış özgeçirileri}$



$$I_{B7} > I_{B6} > I_{B5} > I_{B4} > I_{B3} > I_{B2} > I_{B1}$$

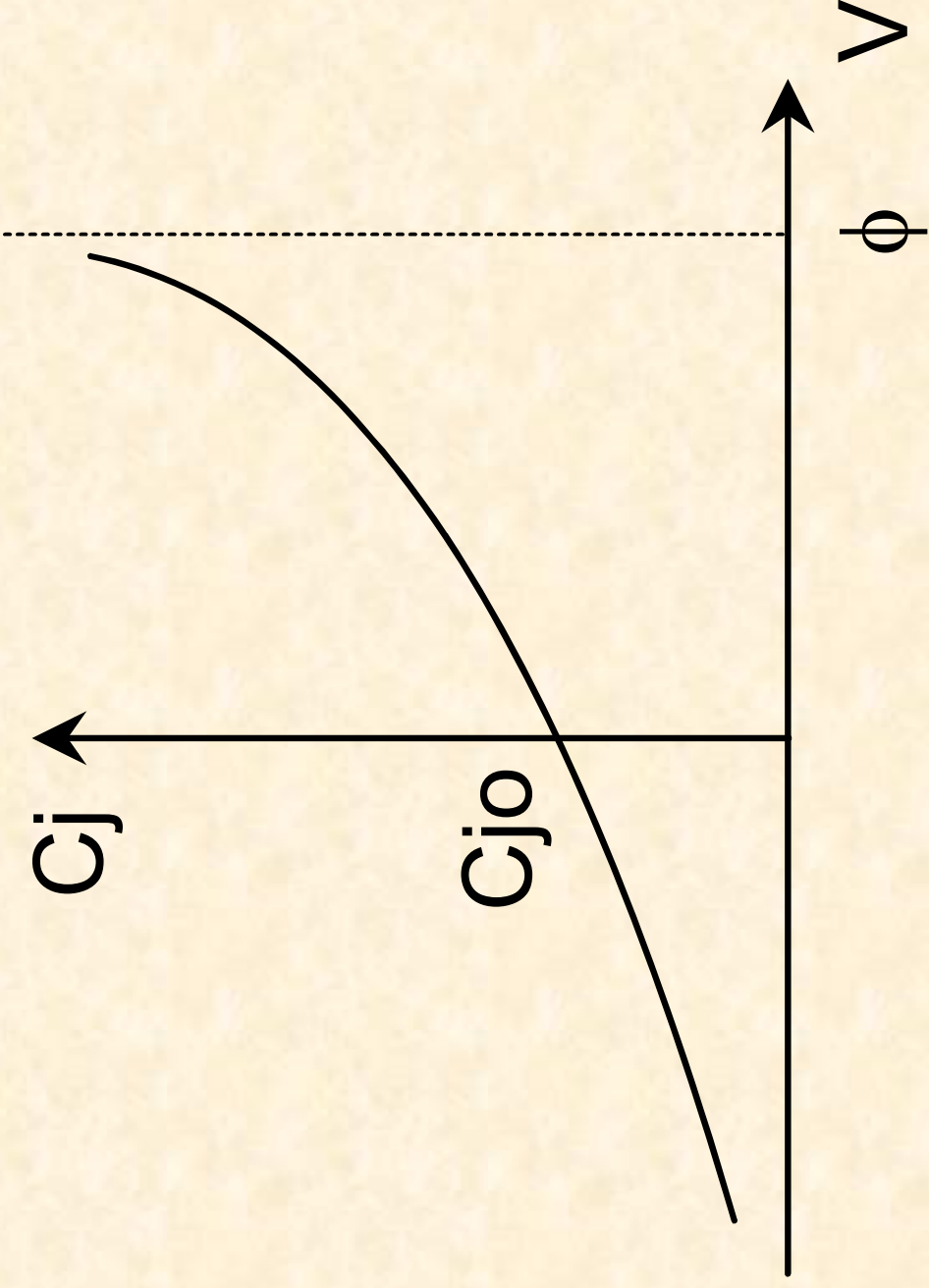
$I_B = \text{sabit çıkış öz eğrileri}$



$$\beta_F = \beta_F(I_C, V_{CE}) \text{ de\u011fi\u015fimi}$$

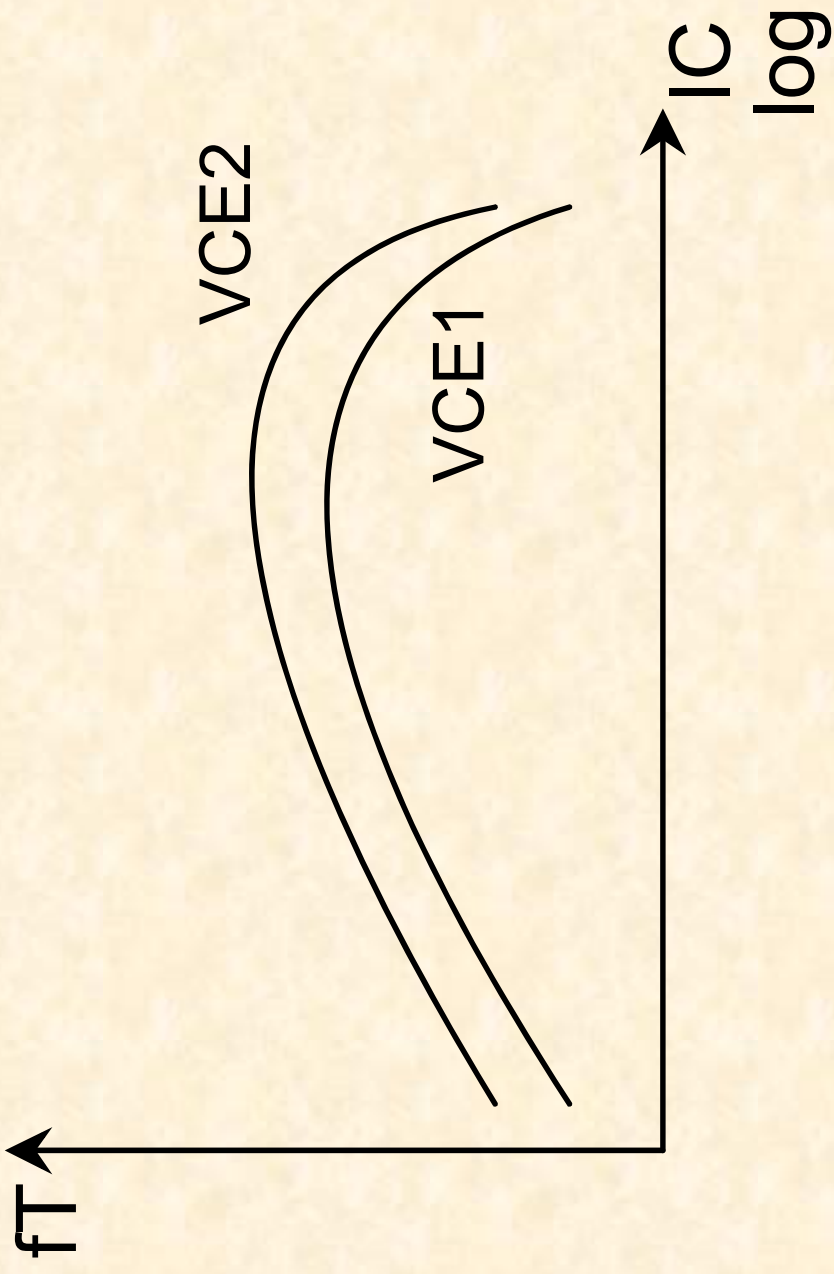
- IC akımının küçük değerlerinden itibaren arttırılmasıyla akım kazancı önce artmakta, belli bir bölgeye ulaştıktan sonra yaklaşık olarak sabit kalmakta, daha sonra tekrar azalmaktadır.

- Bir jonksiyonun tıkama yönünde kutuplanması halinde etkili olan jonksiyon kapasitesi, jonksiyonun uçlarına uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur.



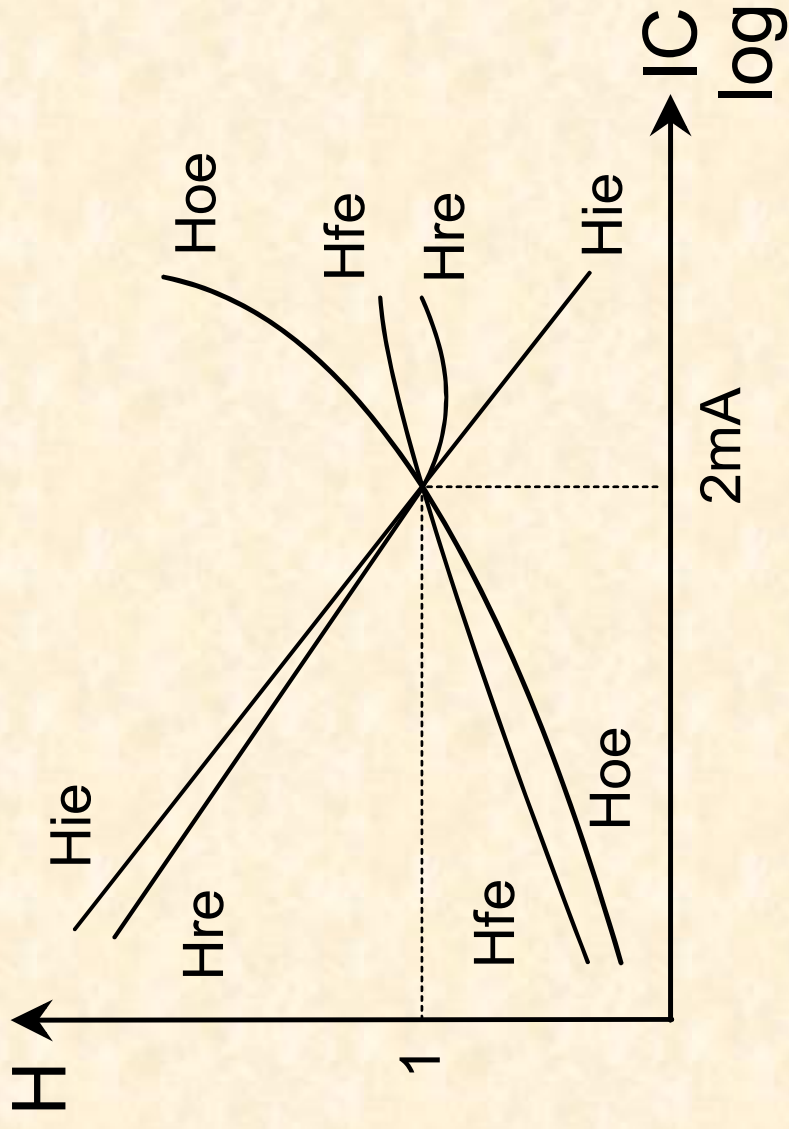
Jonksiyon kapasitesi-gerilim değişimi

- Difüzyon kapasitesi, geçirme yönünde kutuplanan bir jonksiyonda baskın olan dinamik bileşendir.
- Bu bileşen tranzistorun f_T geçiş frekansı ile ilişkili bir büyüklüktür.



$f_T = f_T(I_C, V_{CE})$ değişimi

- Küçük işaret h parametrelerinin, yani akım-gerilim bağıntılarının uç büyüklüklerine göre kısmi türevlerinin, çalışma gerilimi ve akımına göre değişimleri



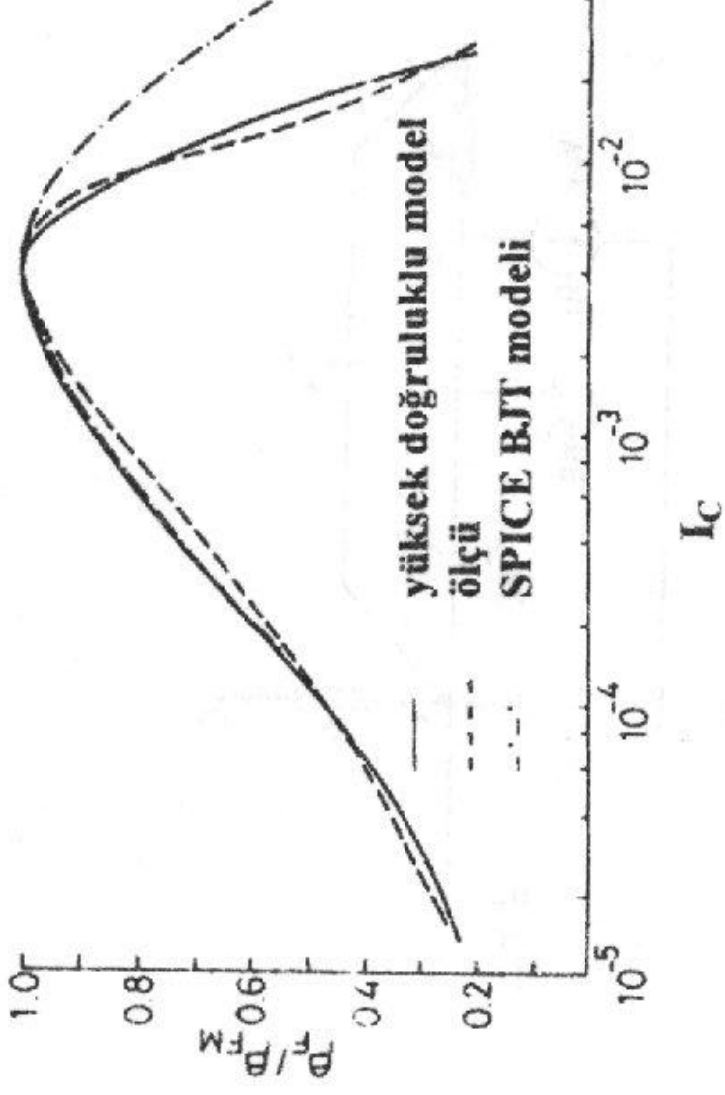
h parametrelerinin I_C ile değişimi, $V_{CE} = \text{st}$

- Bir bipolar tranzistorun lineer olmayan davranışını belirleyen çok sayıda etken.
- yeterli doğruluk için model yardımıyla elde edilen sonuçların ölçü sonucu bulunanlarla uyumluluğu.
- Bu uyumluluk ne kadar fazla ise, kullanılan model de o derece doğru olur.

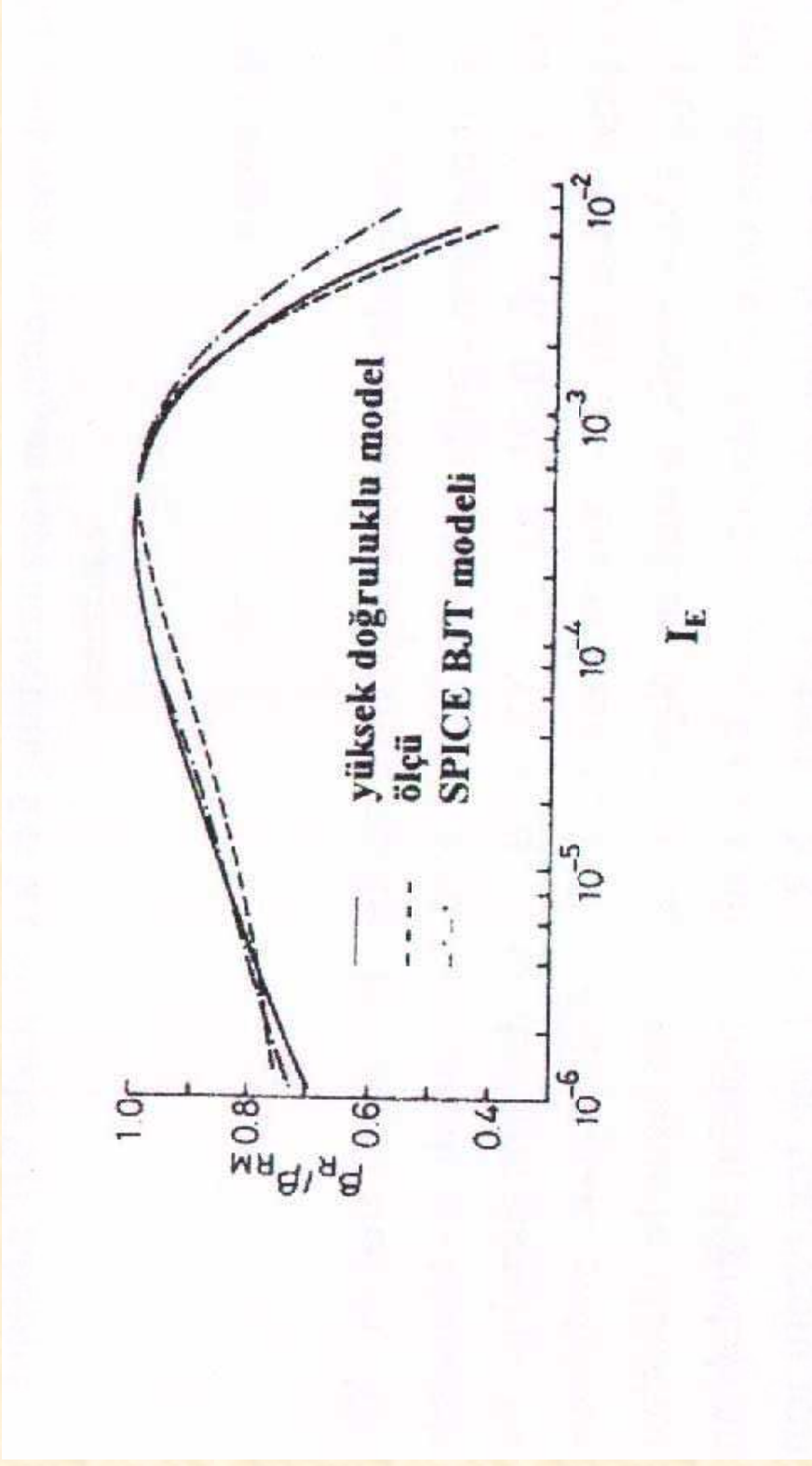
- Modelin doğruluğu için çok sayıda fiziksel olay temsil edilmeli
- çok sayıda parametre.
- Bu parametrelerin bazıları gerçek fiziksel büyüklüklere dayanan parametreler
- Bazıları eğri uydurmaya yarayan, fiziksel anlamı bulunmayan, sadece matematisel anlam taşıyan parametreler.

Modelin Doğruluğu

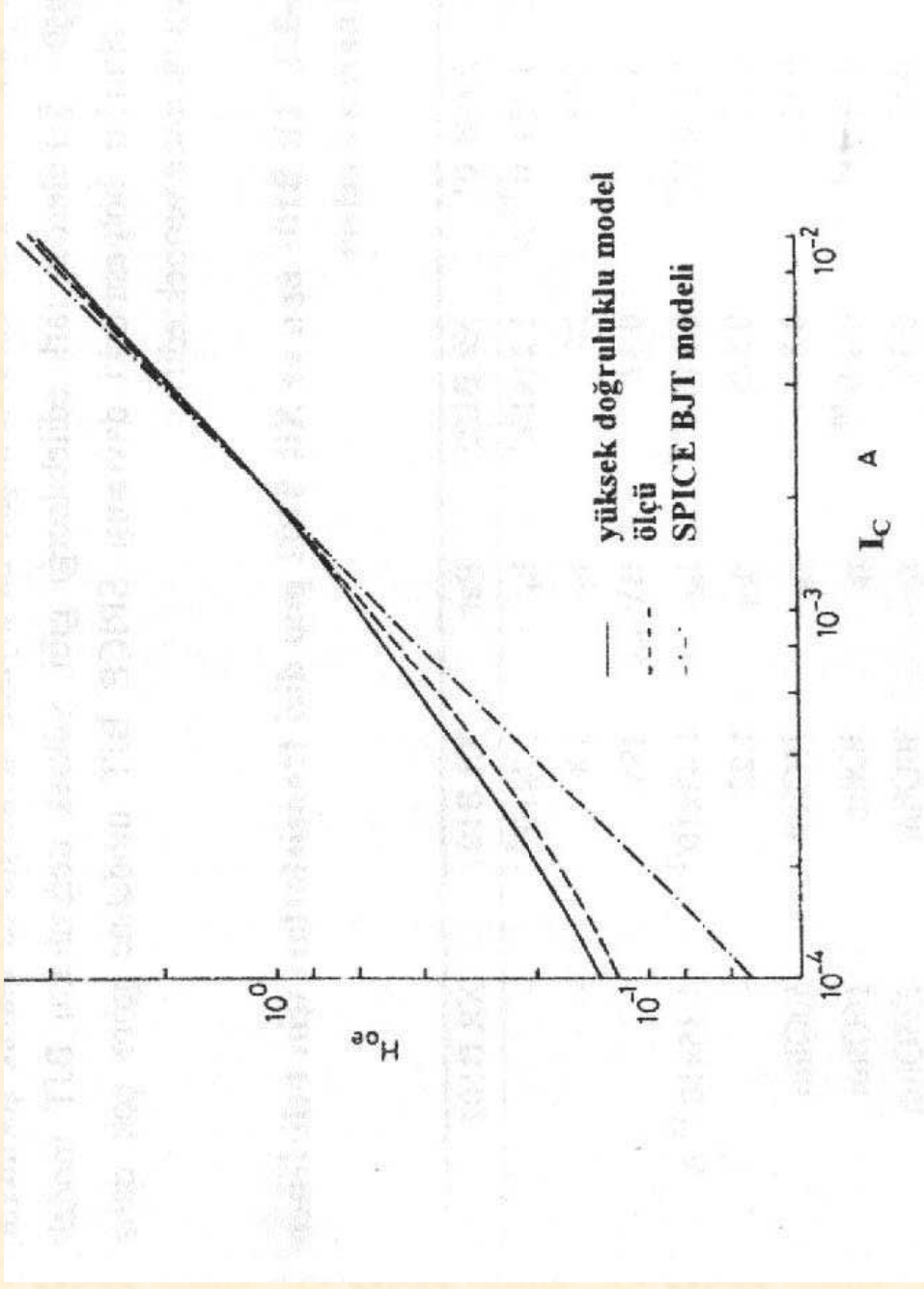
Modelin doğruluğundan ne anlaşılacağı
SPICE BJT modeli, Yüksek Doğruluklu
BJT modeli sonuçları ölçüm sonuçlarıyla
kıyaslanarak gösterilmiştir.



Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen β_F - I_C değişimleri, $\beta_{FM} = 150$, $V_{BC} = 0$.

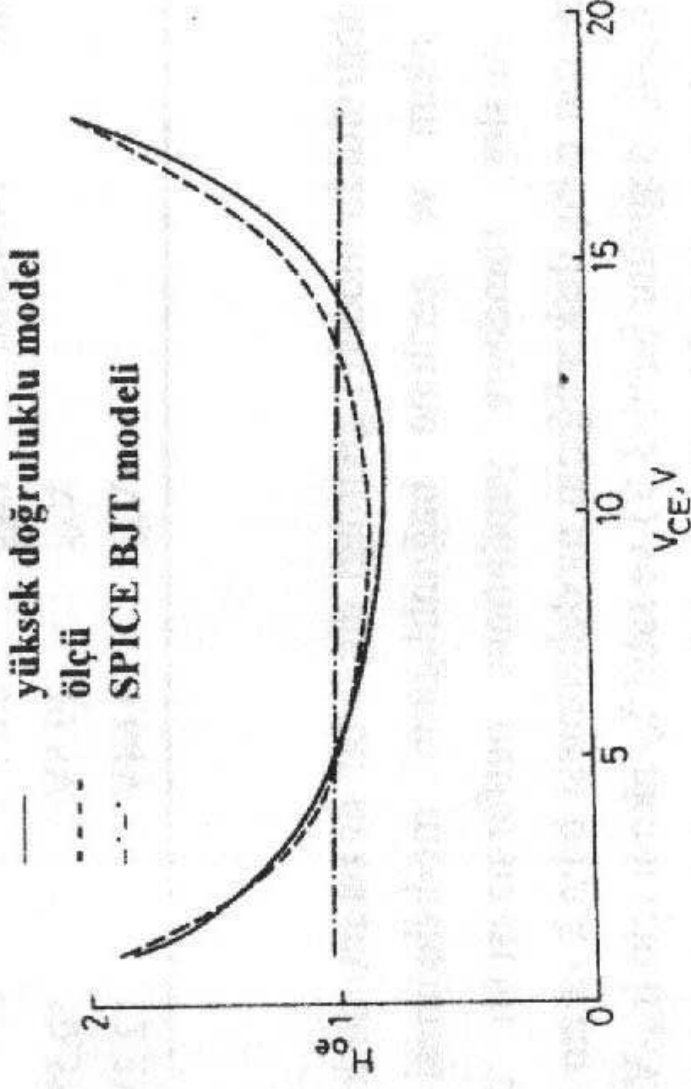


Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen β_R - I_E değişimleri, $\beta_{RM} = 2.94$, $V_{BE} = 0$.

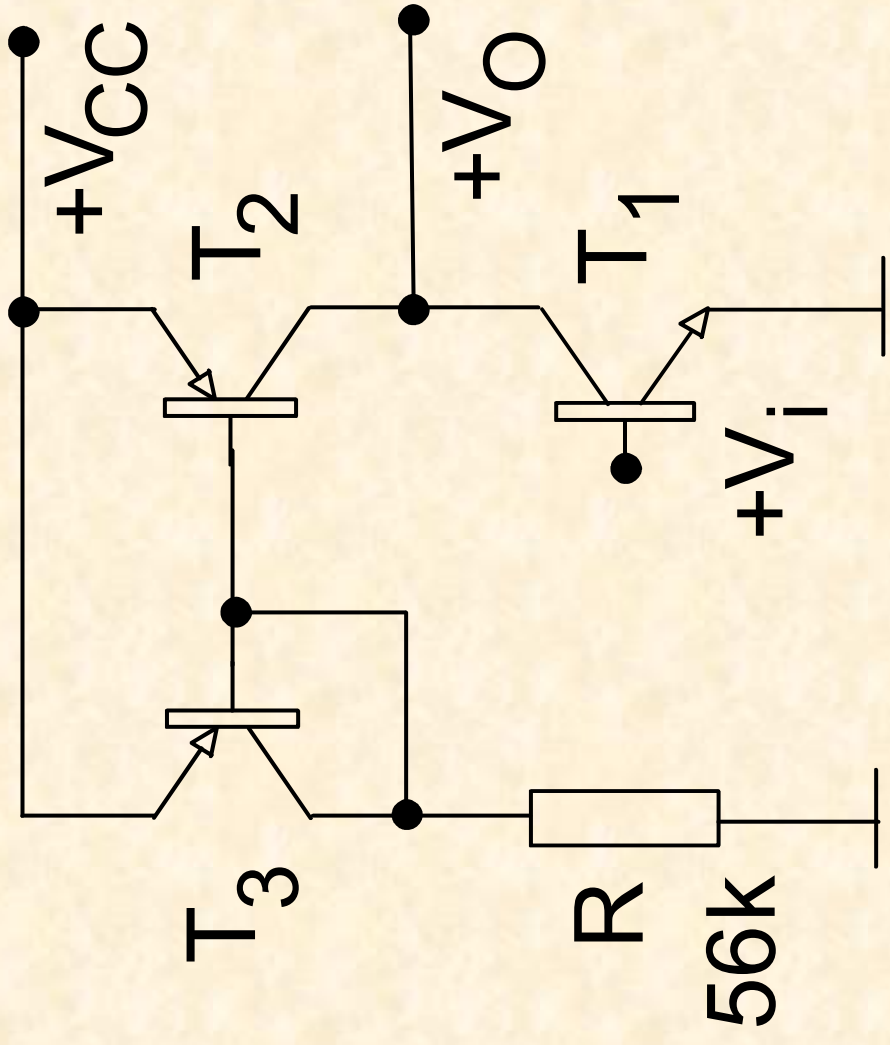


Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen normalize hoe- I_C değişimleri,

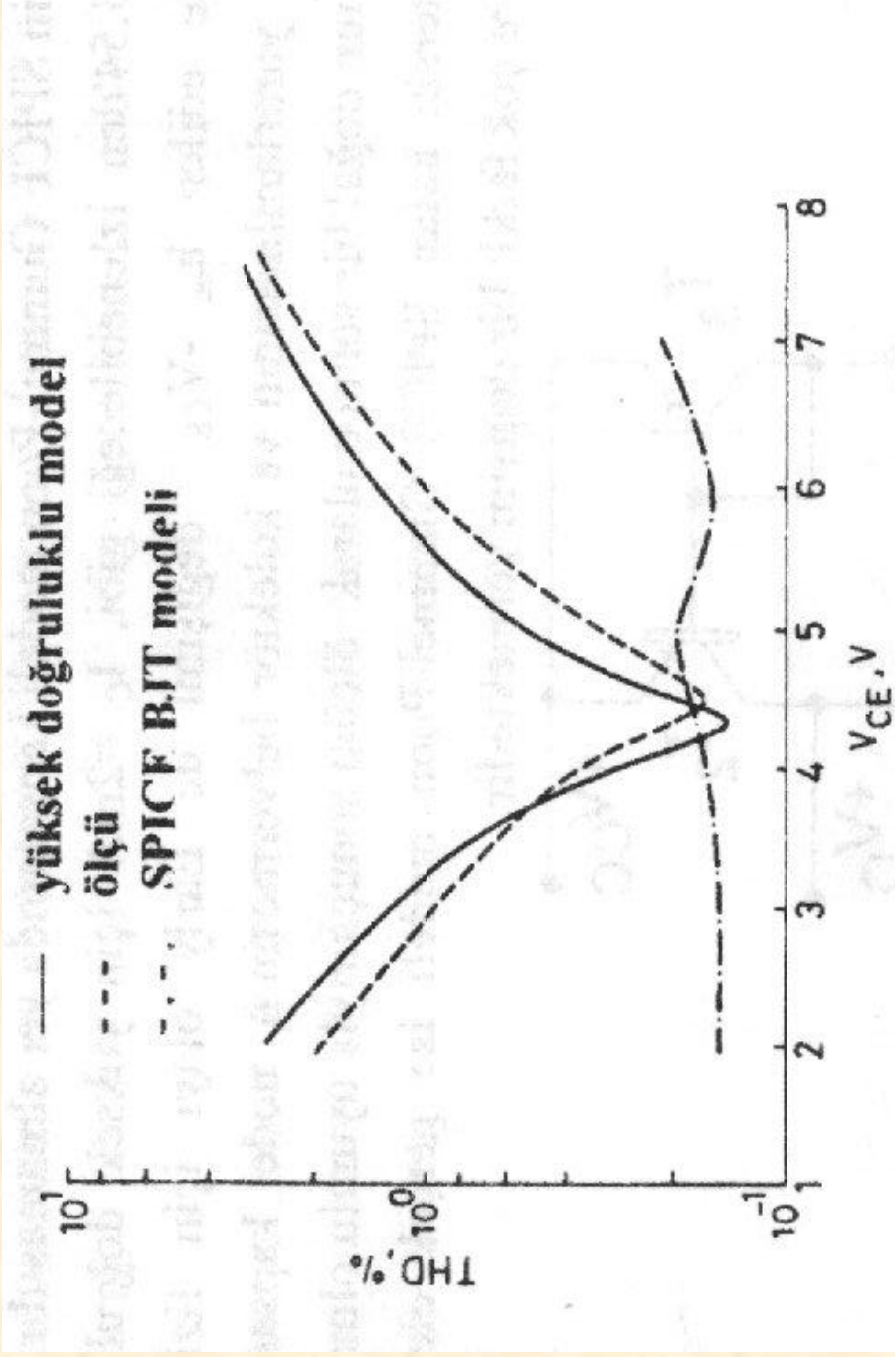
$$V_{CE} = 5V, I_C = 2mA.$$



Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen normalize hoe- V_{CE} değişimleri, $V_{CE} = 5V$, $I_C = 2mA$.



- Aktif yüklü kuvvetlendirici



Aktif yüklü kuvvetlendirici için klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen THD(%)- V_{CE} değişimleri

MAKROMODELLER

- Makromodeller, herhangi bir elemanın veya devrenin lineer ve lineer olmama özelliklerini aslına olabildiğince uygun modellemek üzere, lineer elemanlar, bağımlı ve bağımsız kaynaklar ve az sayıda diyot, tranzistor gibi lineer olmayan elemanlarla oluşturulan eşdeğer devreler.

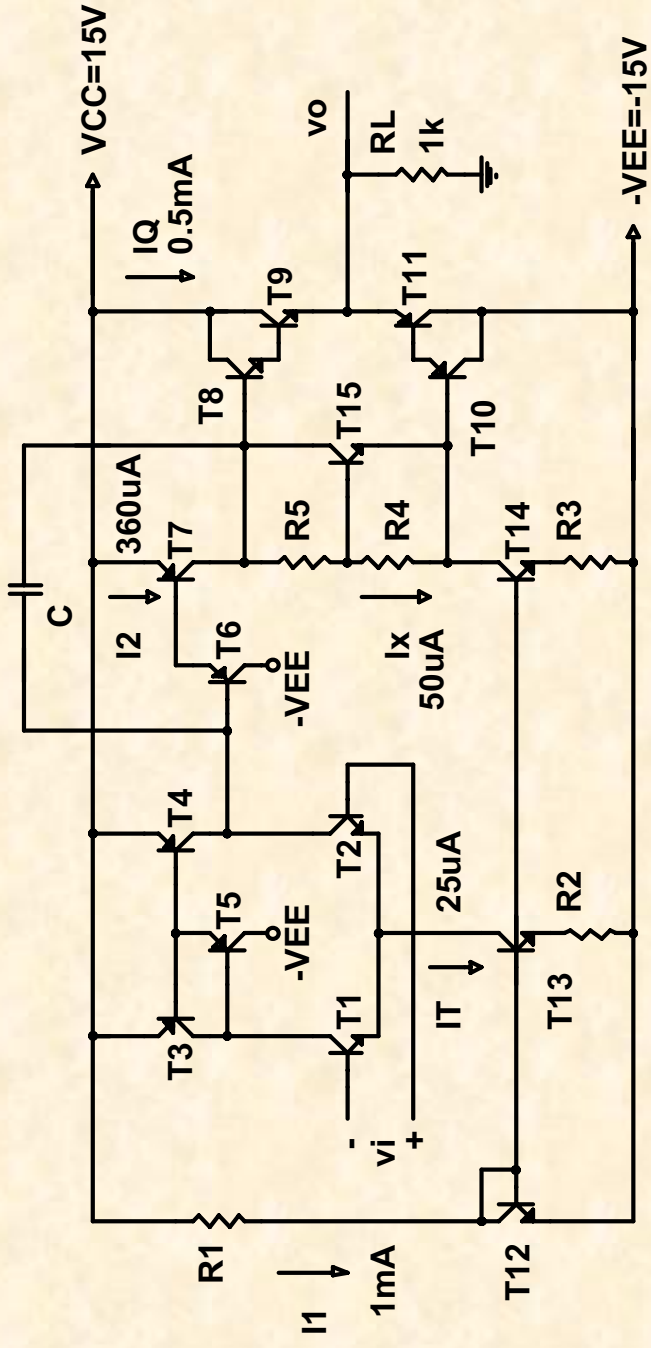
Makromodellerin amacı:

- Çok tranzistorlu yapılarda benzetim süresini kısaltmak
- Geniş ölçekli yapıların benzetiminde nümerik analiz problemlerinin giderilmesi
- Aktif elemanların idealsizlik analizi

Günümüzdeki makromodeller üç ana grup altında toplanabilirler:

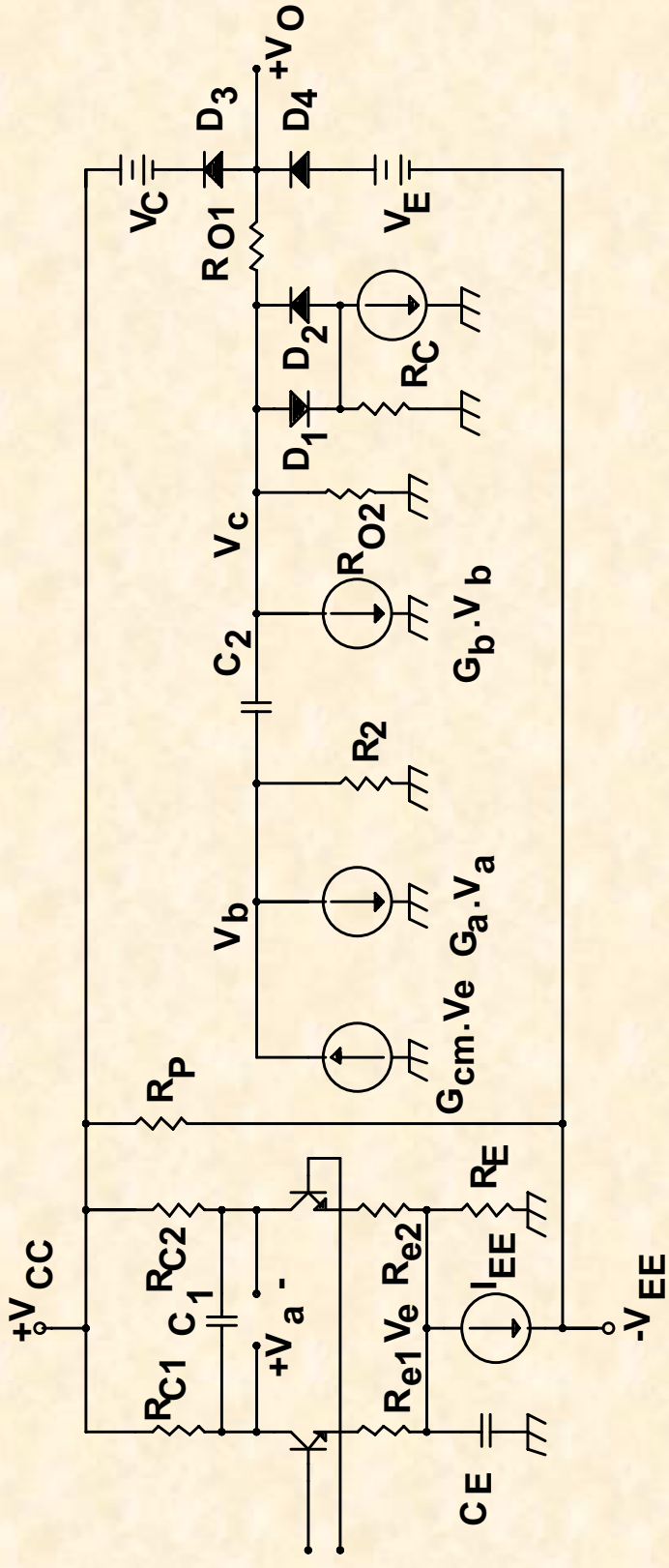
- **1. Lineer olmayan kontrollu kaynaklar içeren modeller**
 - Bu tür modellerde, lineer olmama özelliğini temsil eden analitik fonksiyonlar kullanılır.
- **2. Yarıiletken diyot içeren modeller**
 - Bu tür modellerde, lineer olmamayı temsil etmek üzere yarıiletken diyotların üstel akım-gerilim ilişkisinden yararlanılmaktadır.
- **3. Yarıiletken tranzistor ve diyot kullanan modeller**
 - Lineer olmamanın hem tranzistor, hem de diyot elemanlarının kullanılmasına temsil edildiği modeller bu gruba girmektedir.

Örnek 1: İşlemsel kuvvetlendirici makromodelleri



- İşlemsel Kuvvetlendirici Yapı Örneği

Örnek 1: İşlemsel kuvvetlendirici makromodelleri



- Transistörler, yarıiletken diyotlar, bağımsız ve bağımsız kaynaklar ve lineer elemanlar kullanılarak kurulan işlemsel kuvvetlendirici makromodeli (Boyle 1974)

- yapıda çok fazla sayıda yer alan fiziksel gerçek elemanlar yerine basit ideal elemanlar
- Basit bir diferensiyel giriş katı yardımıyla lineer olmayan giriş karakteristiğinin modellenmesi.

- T1-T2 tranzistorları ve bunlarla ilişkili diğer elemanlar ile yapının fark ve ortak işaret davranışı.
- CE kondansatörü yükselme eğimi,
- C1 kondansatörü faz yanıtı
- Ara kattaki G_{cm} , G_a , R_2 , RO_2 elemanları
- Fark ve ortak işaret kazançları

- Çıkış katında D1 , D2 , RC elemanları yapının kısadevre akımının maksimum değeri,
- D3 , VC ve D4 , VE elemanları çıkış geriliminin maksimum değerini ve kırılma sınırları

- Yapının ıkış katı devreye tam anlamıyla benzemeyen, ancak devre özelliklerini sağlayan bir topoloji kullanılarak kurulmuştur.
- Tüm makromodeller, bir tümdevre benzetim programı ile birlikte kullanılacakları düşüncesi ile tasarlanırlar.

- H. Kuntman, H. Çelik: A nonlinear analysis and simulation program for bipolar transistor circuits, Bulletin of The Technical University of Istanbul, Vol.39, No.1, pp.89-107, 1986.
- H. Kuntman: Novel modification on SPICE BJT model to obtain extended accuracy, IEE Proc. Pt-G, Vol.138, pp.673-678,1991.
- H. Kuntman and S. Özcan: Minimisation of total harmonic distortion in active-loaded differential BJT amplifiers, Electronics Letters, Vol.27, pp.2381-2383, 1991.
- H. Kuntman: On the harmonic distortion coefficients of active-loaded BJT amplifiers, International Journal of Electronics, Vol.72,pp.459-465,1992

- H. Kuntman, S. Özcan: Extraction of SPICE BJT model dynamic parameters from dc measurement data, International Journal of Electronics, Vol.74, No.4,pp.541-551,1992.
- E.I.Tekdemir, H. Kuntman: Implementation of a novel BJT model into the SPICE simulation program to obtain extended accuracy, International Journal of Electronics, Vol.75, NO.6, pp.1185-1199, 1993.
- H. Kuntman: Improved representation of channel-length modulation in junction field-effect transistors, International Journal of Electronics, Vol.75, No.1,pp.57-64, 1993.
- H. Kuntman: Simple and accurate nonlinear OTA macromodel for simulation of CMOS OTA-C active filters, International Journal of Electronics, Vol.77, No.6, pp.993-1006, 1994.

- N. Tarım, B. Yenen, H. Kuntman: Simple and accurate nonlinear current conveyor macromodel for simulation of active filters using CCIIs, International Journal of Circuit Theory and Applications, 26, pp.27-38, 1998.
- N. Tarım, B. Yenen, H. Kuntman: Simple and accurate nonlinear current conveyor macromodel, Melecon 96: 8th Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol.1, pp 447-450, May 13-16, Bari, Italy, 1996.
- M. Yazgı, H. Kuntman, A new approach for parameter extraction of complex models and an application for SPICE MOSFET level-3 static model, Microelectronics Journal, Vol.30, No.2, pp.149-155, 1999

- H. Kuntman and A. Toker, 'Novel nonlinear macromodel suitable for SPICE simulation of analogue multipliers realised with bipolar and CMOS technologies', Int. Journal of Circuit Theory and Applications, 27, pp.485-495, 1999.
- U. Cam and H. Kuntman, 'Simple and accurate non-linear macromodel for four terminal floating nullors (FTFNs)' Int. Journal of Electronics, Vol. 88, No.4, pp 435-447, 2001.

- U. Çam, H. Kuntman, Simple and accurate non-linear macromodel for four terminal floating nullor (FTFN), Proc. of Int. Conference on Electrical and Electronics Eng. ELECO'99, Electronics: pp. 73-77, Bursa, Turkey, 1-5 December 1999.
- H. Kuntman, A. Dolar: Implementation of a Novel MOSFET Model into SPICE Program to Obtain Extended Accuracy for Simulation of Analogue Circuits, Proc. of the 7th International Conference on OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT: OPTIM 2000, May 11-12, 2000 Brasov, ROMANIA, pp. 765-770.

- G. Düzenli, H. Kuntman, The Basic of an Analytical Model Development for the P-MOS Transistor Degradation, Proc. of OPTIM'2002 (8th International Conference: OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT), pp. 829-834, May 16-17, 2002 Brasov, ROMANIA.
- F. Kaçar, A. Kuntman, H. Kuntman, "A Simple Approach for Modelling The Influence of Hot-Carrier Effect ON Threshold Voltage Of MOS Transistors", Proceedings of the 13th International Conference on Microelectronics (ICM'2001), pp.43-46, Rabat, Morocco, October 29-31, 2001.

- H. Kuntman, Elektronik Elemanların Modellenmesi, İTÜ Kütüphanesi, 1998.
- H. Hakan Kuntman, Analog MOS Tümdevre Tekniđi, İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1587, 1997.
- H. H. Kuntman, Analog tümdevre tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
- P. Antognetti, G. Massobrio, Semiconductor device modeling with SPICE, Mc Graw Hill, 1988.

- **BOYLE, G.R., COHN, B.M., PEDERSON, D.O. and SOLOMON, J.E.,** Macromodeling of integrated circuit operational amplifiers, **IEEE Journal of Solid-State Circuits, 9,** 353-363, 1974.
- **PEIC, R. V.,** Simple and accurate nonlinear macromodel for operational amplifiers, **IEEE Journal of Solid-State Circuits, 26,** 896-899, 1991.