

MOSFET BSIM3V3 EŞİK GERİLİMİ VE MOBİLİTE PARAMETRELERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE ÇIKARTILMASI

M.Emin BAŞAK¹

Ayten KUNTMAN²

Hakan KUNTMAN³

^{1,2}İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik&Elektronik Müh., 34850, Avcılar, İstanbul, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik &Elektronik Mühendisliği Fakültesi, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

¹e-posta: mebasak@istanbul.edu.tr

²e-posta: akuntman@istanbul.edu.tr

³e-posta: kuntman@ehb.itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada*, MOS BSIM3V3 modelinde C35 işleminde kullanılan parametreler kullanılmış ve büyük boyutlu $W=10\mu\text{m}$ ve $L=10\mu\text{m}$ transistör kullanılarak eşik gerilimi ve mobilite parametrelerinin çıkartımı yapılmıştır. BSIM MOSFET model parametreleri deneysel veriler kullanılarak Genetik Algoritma (GA) ile belirlenmiştir. GA, MATLAB'de yazılmış, SPICE Programı ile transistör karakteristikleri elde edilmiştir. Bulunan sonuçlar gerçek karakteristiklere ilişkin sonuçlarla karşılaştırılmış, böylelikle yöntemin başarımının görülmesi sağlanmıştır.

1. Giriş

MOS transistörün en uygun parametre değerlerinin çıkartımı karmaşık bir problemdir. Geleneksel yöntemlerdeki değişim ölçüsüne göre en uygun parametreyi bulmaya çalışan parametre çıkartımı yerel noktalarda çözüm uzayını aradığı için en uygun sonucu bulmaktan uzaktır. Genetik Algoritma (GA) ise düzensiz parametre uzayında en uygun parametreleri bulmakta çok başarılıdır.

VLSI (Very Large Scale Integration) devrelerde gerçek üretim aşamasından önce tasarlanan devrenin performansını tahmin etmek ve ölçmek için hassas ve güçlü bir modelimizin olması gerekmektedir. Geleneksel model çıkartma yöntemleri, model eşitlikleri üzerinde matematiksel sadeleştirmeler yaparak yüksek dereceden lineer olmayan model eşitliklerini optimize etmeye çalışmaktadırlar [1]. Model ve verinin karmaşıklığından bu yöntemle çok az parametre birer birer optimize edilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca optimizasyonun yerel bir çözüm uzayında sağlanmış olması model için doğru bir sonuç üretmemektedir [2]. Bu çalışmada doğru parametre çıkarımını gerçekleştirmek için Genetik Algoritmaya dayalı eşik gerilimi ve mobilite ile ilgili parametre çıkarımını gerçekleştirdik.

2. BSIM3V3 Modelleme

BSIM3V3 modeli mikron altı MOSFET'lerin fiziksel modülü ile kısa kanal etkilerini içermektedir. BSIM3V3 diğer modellere göre daha az parametre içermekte ayrıca her parametre kendi fiziksel anlamını da içermektedir

Modelin çözümleyici ve basit doğasından, fiziksel parametrelerin transistör performansının etkisi açıklanabilir [1].

Mikronaltı MOSFET'lerin çıkış karakteristiğinin ölçekleme etkilerini BSIM3V3 modeli ile öngörebiliriz. Bu model hem örneksel hem de sayısal devre benzetimlerinde kullanılabilir. Sayısal devre benzetimleri için hızlı bir seçime, örneksel devre benzetimleri için ise hassas bir seçime sahiptir. Tüm akımlar ve birinci dereceden türevler sürekli iken benzetimin yakınsaması geliştirilmiş ve yinmeler azaltılmıştır. Sonuçta hesaplamalardaki verimlilik için zamana bağlı fonksiyonlar BSIM3V3'den kaldırılmıştır [1, 3].

BSIM3V3 modeli $0,2\ \mu\text{m}$ 'nin altındaki en ve boy ile geçit oksit kalınlığı 5nm 'nin altındaki transistörlerde iyidir. Modelin fiziksel yapısından ötürü eski işlemlerde çıkarılan parametreler gelecek nesilde bulunacak cihazın davranışı tahmin edilebilmektedir [4].

Kullanıcılar henüz transistör üretilmeden BSIM3V3 modelini kullanarak MOSFET'in performansını ve ölçüm etkilerini tahmin edebilirler. BSIM3V3 kaynak akımı için bazı basit varsayımlar yapar ki bu doğruluk derecesini düşürüyor gibi gözükse de basit çözümsel ifadeleri verimli bir hesaplama için ve transistörün fiziksel olarak çalışıyor olduğunu göstermeye yardımcı olmaktadır. Çıkarılan fiziksel parametreler transistör üretiminde tanımlanabilir ve böylece devre performansının benzetimi yapılabilir [1-5].

Kısa kanal ve katkı etkilerinin göz önüne alınmadığı standart uzun kanal eşik gerilimi eşitliği aşağıda gösterilmiştir [1-5].

$$V_{th} = V_{Tideal} + K_1 \left(\sqrt{\Phi_s - V_{bs}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bs} \quad (1)$$

Burada V_{th} eşik gerilimi, V_{Tideal} V_{bs} geriliminin sıfır olduğu eşik gerilimi, K_1 ve K_2 eşik geriliminin gövde etkisi duyarlılığı, ϕ_s yüzey potansiyeli, V_{bs} ise taban – savak gerilimini ifade etmektedir.

Yüzey taşıyıcı mobilitesi modelleme için önemli bir yere sahiptir. Dağılım mekanizması fononların, coulombic

*Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu tarafından desteklenmektedir. Proje Numarası: T-36/15122006

saçılma kanunlarının ve yüzey pürüzlülüğünün içeren yüzey mobilitesinin dağılım mekanizması için sorumludur. Deneysel olarak çıkan mobilite parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + (E_{eff}/E_o)^p} \quad (2)$$

Taylor açılımı mobMod=1 için;

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0}{1 + (U_a + U_c V_{bs}) \left(\frac{V_{gst} + 2V_{th}}{Tox} \right) + U_b \left(\frac{V_{gst} + 2V_{th}}{Tox} \right)^2} \quad (3)$$

Buradaki μ_{eff} efektif mobilitiyi, μ_0 27°C deki mobilitiyi, U_a birinci derece mobilite bozulma katsayısını, U_b ikinci derece mobilite bozulma katsayısını, U_c gövde duyarlılığı mobilite katsayısını, V_{gs} geçit gerilimini, V_{th} eşik gerilimini, T_{ox} geçit oksit kalınlığını $V_{gst} = V_{gs} - V_{th}$ ifade etmektedir [1].

3. Genetik Algoritma

Genetik algoritma sezgisel bir yöntem olup geniş uygulama alanına sahiptir. Çok karmaşık bir yapıya sahip olmayan genetik algoritma sıklıkla başvurulan bir optimizasyon tekniğidir [2].

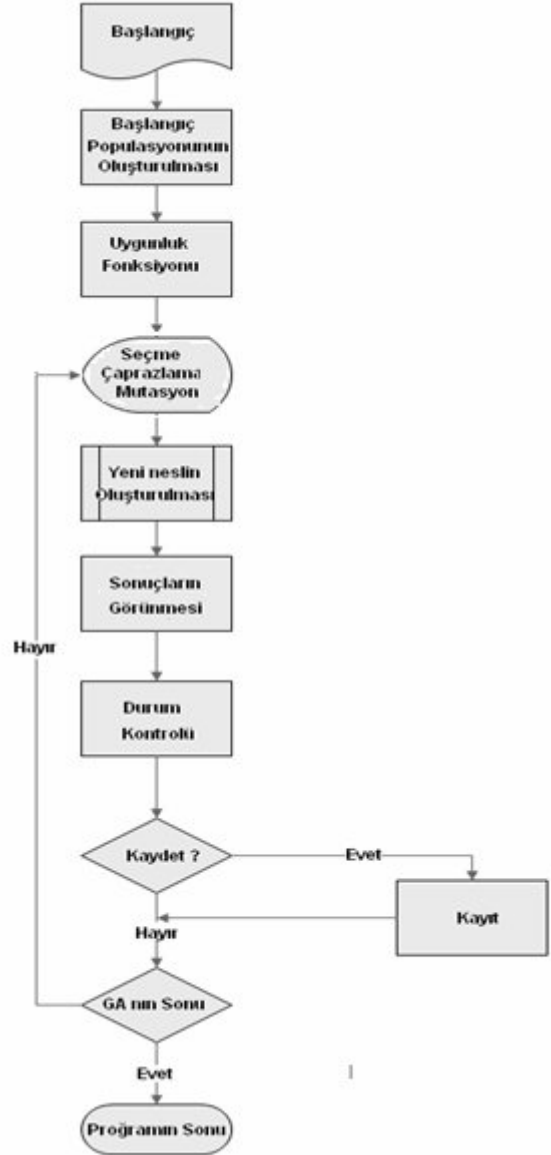
Genetik algoritmalar çok değişkenli fonksiyonların optimizasyonu amacıyla kullanılan sezgisel bir yöntemdir. Sadece amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyan bir optimizasyon tekniğidir. Çözüm uzayından tesadüfi olarak seçilen noktalar üzerinde operatörler yardımıyla daha iyi noktalara ulaşmak amaçtır. Çözüm uzayı çok büyük problemler için, bu arama sırasında iyi sonuç vermiyecek alanlarda gereksiz arama yapılmaması hızlı bir şekilde çözüme ulaşmak açısından oldukça iyi bir tekniktir. Yapılmış bir çok uygulamada genetik algoritma sayesinde hızlı bir şekilde çözüme ulaşıldığı görülmüştür [6].

Algoritma ilk olarak populasyon diye tabir edilen bir çözüm(kromozomlarla ifade edilir) seti ile başlatılır. Bir populasyondan alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi olacağı beklenen yeni bir populasyon oluşturmak için kullanılır. Yeni populasyon oluşturulması için seçilen çözümler uyumluluklarına göre seçilir. Çünkü uyumlu olanların daha iyi sonuçlar üretmesi olasıdır. Bu istenen çözüm sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Genetik algoritmanın işleyişini basit adımlarla ve bu adımların akış diyagramında şekillenmesiyle Şekil 1 de görülebilir. Çözüm uzayındaki (Search Space) tüm mümkün çözümler kodlanır (kromozom). Belirlenen büyüklükte bir çözüm kümesi tesadüfi olarak mümkün çözüm uzayı içerisinde Başlangıç populasyonu olarak seçilir. Başlangıç populasyonundaki her bir kromozomun uygunluk değeri (Fitness Value), uygunluk fonksiyonunda (Fitness Function) hesaplanır. Yeni bir populasyon oluşuncaya kadar aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir. Bir sonraki nesli oluşturacak kromozomlar (Parent), uygunlukları gözönüne alınarak yani olasılık değerine göre rastsal olarak seçilirler (Selection). Aynı kromozom bir çok kere seçilebilir. Seçilen kromozomlar belli bir olasılıkla çaprazlamaya (Crossover) tabi tutulur.

Böylelikle yeni kromozomlar (Offspring) meydana gelir. Yeni kromozomlar üzerinde genetik çeşitliliği sağlamak amacıyla düşük bir olasılık değeriyle mutasyon operatörü uygulanır. Yeni kromozomlardan oluşan yeni populasyon eski populasyonun yerini alır. Yeni populasyondaki tüm kromozomların uygunluk değerleri hesaplanır [7].

Baştan belirlemiş olduğumuz nesil (Döngü) sayısı tamamlanmamışsa seçme işlemine geri dönlür. Bu ana kadar en iyi uygunluk değerini veren kromozom sonuç değerimizi oluşturur.



Şekil 1 : Genetik Algoritmanın işleyişinin akış diyagramı

4. GA Parametre Çıkarımı

Şekil 1 de GA'nın temel akış şeması gösterilmiştir. Bu şemaya göre MOSFET parametrelerini çıkarırken başlangıç popülasyonu randomize olarak belirlenir. Her birey parametrelerin sıralı dizimiyle oluşturulur ve bu yatay satırların her biri kromozom olarak adlandırılır. Kullanıcı tarafından nesil sayısı, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı [0, 1] ve mutasyon oranı [0, 1] gibi değerler girilir. Bu başlangıç parametreleri girildikten sonra birinci nesil uygunluk fonksiyonuna girer, uygunluk fonksiyonu aşağıda belirtilen f dir.

$$f = \min \left[|f_1 - V_{th}| + |f_2 - \mu_{eff}| \right] \quad (4)$$

$$f_1 = V_{Tideal} + K_1 \left(\sqrt{\Phi_s - V_{bs}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bs} \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{\mu_0}{1 + \left(U_a + U_c V_{bseff} \right) \left(\frac{V_{gst} + 2V_{th}}{Tox} \right) + U_b \left(\frac{V_{gst} + 2V_{th}}{Tox} \right)^2} \quad (6)$$

Herhangi bir parametre belirlemeden önce buradaki bazı parametrelerin de kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir. Bunlar geçit oksit kalınlığı (Tox), kanaldaki katkı yoğunluğu (N_{ch}), verilerin alındığı sıcaklık (T), Jonksiyon derinliği (X_j), Kanal eni (W) ve kanal boyu (L) gibi işlem parametreleridir. Burada yukarıdaki uygunluk fonksiyonundan da görüleceği gibi kısa ve dar kanal ile parasitik direnç etkisinden uzak VTideal ya da VTH0 eşik gerilimi, K1 ve K2 gövde etkisi katsayılarını ayrıca mobilite ile ilgili U0, Ua, Ub, Uc parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle W ve L'si büyük boyutlu transistörlerle yapılır. Bulunan parametreler kullanılarak dar ve kısa kanallı transistör için gerekli diğer parametreler çıkarılır. O sebeple bu çalışmada W = 10µm ve L=10µm seçilmiş ve parametre çıkarımı ona göre yapılmıştır. Bunun için MOSFET'e ait Vds =0.05 için farklı Vbs gerilimleri için Ids - Vgs eğrileri ölçüldü. Parametre belirlemede kullanılan yöntem aşağıda Şekil 2'de görülmektedir.

Uygunluk fonksiyonunu kullandıktan sonra çıkan değerlerle s fonksiyonunu kullanılır ki seçme işleminde en uygun değerleri popülasyon içinde bulundurulabilsin.

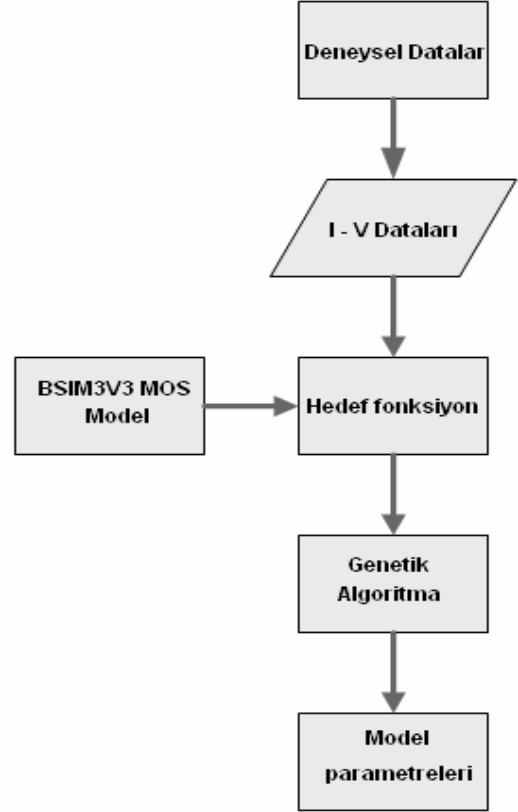
$$s = \sum \left(\frac{I_{d,lab} - I_{d,model}}{I_{d,model}} \right)^2 \quad (7)$$

Buradan rulet tekerleği seçme yöntemiyle oluşturulan popülasyon (intermediate) ara popülasyonu oluşturur. Daha sonra mutasyon ve çaprazlama işlemleri ile yeni nesil popülasyon oluşturulur. Çaprazlama işlemi [0, 1] aralığında değişen β ile ifade edilirse,

$$p_{new} = \beta p_{mn} + (1 - \beta) p_{dn} \quad (8)$$

Burada β [0, 1] aralığındaki random ya da seçilen bir sayıyı, p_{new} yeni nesilde oluşturulan bireyi, p_{mn} çaprazlama için değişkenlerden birinden alınan n. sayıyı, p_{dn} diğer değişkenden alınan n. sayıyı ifade etmektedir [5].

Çaprazlamadan sonra mutasyon operatörü uygulanabilir. Populasyondaki herhangi birey düşük olasılıklı m mutasyon olasılığı ile mutasyona uğratılabilir. Genellikle mutasyon oranı %1 den küçük seçilir.



Şekil 2: Parametre belirleme akış diyagramı

En uygun fonksiyon bakış açısıyla, mutasyon operatörü rasgele araştırma yöntemi ile yerel araştırma yönteminin birleşmiş hali gibi görülebilir. Mutasyon ile genlerde küçük sayısal değişiklikler yaparak nesildeki çeşitlilik artırılmış olur. Seçme, çaprazlama ve mutasyonun tamamlanmasıyla yeni nesil oluşturulabilir. Gerçekte de GA seçme, çaprazlama, mutasyon ve yeniden üretim aşamalarından oluşmaktadır.

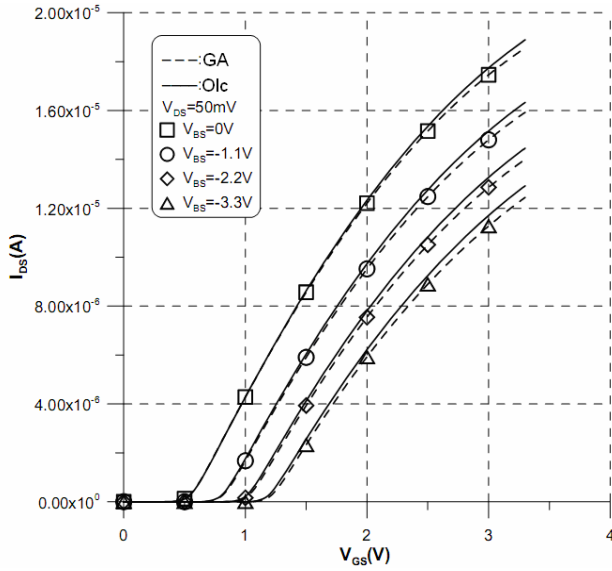
Eşik gerilimi ve mobilite ile ilgili parametrelerin çıkarılmasında geniş ve uzun boyutlu (W = 10µm ve L = 10µm) MOSFET kullanılmıştır. En uygun kromozomu elde etmek için Genetik Algoritma parametrelerinin farklı kombinasyonları denenmiştir. Nesil sayısı 200 alınmış, nesil sayısını 200 den büyük aldığı durumlarda RMS (root mean square)hata oranının %2'den daha fazla olduğu ve uygun olmayan değerlerin çıktığı görülmüştür.

Tablo 1'de farklı mutasyon ve çaprazlama oranlarına göre bulunan minimum % RMS hata oranı verilmiştir. Mutasyon oranını sırasıyla 0,002; 0,005 ve 0,007 şeklinde arttırdığımızda

ortalama hatanın azaldığını görmekteyiz. Ancak mutasyon oranını 0,01 yaptığımızda ortalama hatanın tekrar yükseldiği görülür. Mutasyon oranının artması neslin devamlılığı için önemlidir, ancak yüksek mutasyon oranı çözüm uzayında benzer sonuçların çıkmasına ve performansın düşmesine yol açacaktır. Populasyonun küçük olması çözüm uzayının küçük olmasına, bu sebepten de doğru sonucun bulunamamasına neden olacaktır. Öte yandan populasyonun çok büyük olması da sistemin araştırmadan çok işleme uğraşmasına neden olacaktır. Buradan GA'nın doğru sonuçları verebilmesi için en uygun seçme, çaprazlama ve populasyon büyüklüklerinin seçilmesinin ne kadar önemli olduğu görülmüştür.

Tablo 1: Farklı GA parametreleri ile yapılan örnek testler

Test No	Populasyon Büyüklüğü	Mutasyon oranı	Çaprazlama oranı	Min % RMS hata oranı
1	100	0,002	0,9	3,0
2	100	0,005	0,9	1,9
3	100	0,007	0,9	1,98
4	100	0,01	0,9	2,5
5	100	0,005	0,7	1,8
6	100	0,005	0,7	2,9
7	100	0,005	0,5	1,7
8	100	0,005	0,5	1,4



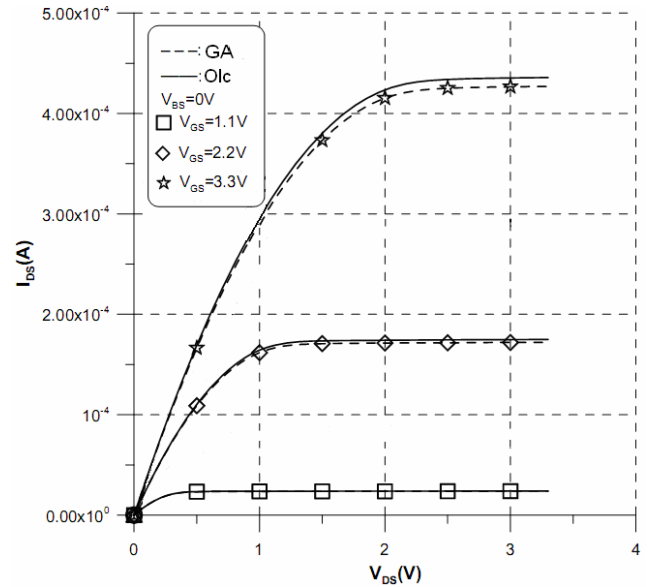
Şekil 3: Gerçek MOSFET Id - Vgs eğrisi (düz çizgi); GA ile çıkartılan MOSFET BSIM3V3 model parametreleriyle çizilen Id - Vgs eğrisi (kesikli çizgi).

Tablo 2'de 10 μ /10 μ boyutlarındaki MOSFET'in gerçek ve GA ile belirlenmiş eşik gerilimi ve mobilite parametrelerinin değerleri görülebilir. Şekil 3 ve Şekil 4'de ise Savak akım - Geçit gerilimi (Id - Vgs) ile Savak akım - Savak gerilimi (Id - Vds) eğrileri görülür. Populasyonun 100 olduğu mutasyon oranının 0,005 ve çaprazlama oranının 0,5 olduğu bir

populasyonda 200 nesil sonrasındaki RMS hata yaklaşık olarak %1,4 olarak bulunmuştur.

Tablo 2: Parametrelerin gerçek ve GA ile çıkarılmış değerleri

Parametreler	Gerçek Değer	GA ile Çıkarılmış Değer
VTHO	4.979×10^{-1} V	5.105×10^{-1} V
K1	5.0296×10^{-01} V 1/2	5.0756×10^{-01} V 1/2
K2	3.3985×10^{-02}	3.033×10^{-02}
U0	$4.758 \times 10^{+02}$ cm ² /Vs	$4.137 \times 10^{+02}$ cm ² /Vs
Ua	4.705×10^{-12} m/V	4.08870×10^{-12} m/V
Ub	2.137×10^{-18} (m/V) ²	2.0943×10^{-18} (m/V) ²
Uc	1.000×10^{-20} m/V ²	2.947×10^{-18} m/V ²



Şekil 4: Gerçek MOSFET Id - Vds eğrisi (düz çizgi); GA ile çıkartılan MOSFET BSIM3V3 model parametreleriyle çizilen Id - Vds eğrisi (kesikli çizgi).

5. Sonuç

Bu çalışmada, genel uygunluk algoritması olan Genetik Algoritma ile MOSFET'in uzun - geniş kanal eşik gerilimi ve mobilite parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen değerlerden özellikle transistörün birçok çalışma koşulunda belirleyici olan VTHO, K1, K2 ve μ_0 gibi parametrelerin yüksek doğrulukta bulunmuş olması çalışmanın başarısıdır. Ayrıca Uc'nin gerçek değerden farklı olması model parametreleri sağlayıcısının, sonuca etkisinin zaten çok olmadığını düşündüğü parametreyi tamamen göz ardı etmesindedir.

Parametre belirlemede karşılaşılan zaman problemini Genetik Algoritma ile aşarak en uygun parametre en az mühendislik eforu ile bulunmuştur. Intel Centrino 1,7MHz işlemci ve 512 Mb Ram'e sahip bir bilgisayar kullanılarak ve sonuçlar 10-12 sn arası bir zamanda bulunmuştur. Genetik Algoritma ile

çıkartılan parametreleri kullanarak transistörün gerçek sonuçlarıyla karşılaştırıldığında RMS hatanın çok düşük olduğu görülmektedir. Buradan da bir çok optimizasyon problemine çözüm üreten Genetik Algoritma ile MOS parametrelerinin bulunmasında ve optimizasyonunda kolaylık gösterebileceği görülmüştür.

6. Kaynakça

- [1] Weidong Liu, Xiadong Jin, Xuemei Xi, James Chen, Min-Chie Jeng, Zhihong Liu, Yuhua Cheng, Kai Chen, Mansun Chan, Kelvin Hui, Jianhui Huang, Robert Tu, Ping K. Ko, Chenming Hu, *BSIM3V3.3 Users' Manual*, 2005.
- [2] Goldberg, D. E. , *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA 1989.
- [3] Cheng Yuhua, Hu Chemming, *MOSFET Modeling &BSIM3 User's Guide*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] William Liu, *MOSFET Models for Spice Simulation including BSIM3V3 and BSIM4*, Wiley Interscience, 2001
- [5] P.Antognetti, G.Massobrio, *Semiconductor device modeling with Spice*, McGraw Hill, 2nd Edition, 1993.
- [6] M.Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, 1996.
- [7] Randy L. Haupt, Sue E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms* , Wiley-Interscience, 2004.