

Genetik Algoritma ile MOS Parametrelerinin Belirlenmesi ve Optimizasyonu MOS Parameter Extraction and Optimization with Genetic Algorithm

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

Günümüz teknolojisinde çok önemli bir yere sahip olan MOS transistörler için uygun bir parametre seti belirlemek güç bir problemdir. Geleneksel yöntemler parametrelerin çözüm uzayındaki yerel noktalara yakınsamasından dolayı optimum çözümden başka sonuçlar verebilmektedirler. Genetik algoritmalar düzensiz dağılmış parametrelerin bulunması için çok uygundur.

Bu çalışmada*, genetik algoritma ile MOS transistörün parametreleri belirlenmiş ve optimizasyonu yapılmıştır. Parametre çıkartımında MOS BSIM3V3 modelinde C35 üretim sürecinde kullanılan 0.35µm üretim teknolojisi ile belirlenen SPICE parametre sonuçları kullanılmıştır. Belirlenen parametrelerin karakteristiklerine ilişkin sonuçlar ile gerçek karakteristiklere ilişkin sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Abstract

Extracting an optimal set of parameter values for a MOS device is great importance in contemporary technology is a complex problem. Traditional methods of parameter extraction can produce far from optimal solutions because of the presence of local optimum in the solution space. Genetic algorithms are well suited for finding near optimal solutions in irregular parameter spaces.

In this study*, MOS transistor's Parameters have been extracted and optimized with genetic algorithm. 0.35µm fabricated by C35 process have been used for the results of experimental studies of parameter extraction. Extracted parameters characteristic data results have been compared with measurement results.

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

I.Giriş

Bu çalışmada; karmaşık bir problem olan MOS transistörlerin parametre değerlerinin çıkartımı yapılmıştır. Doğru parametrelerin belirlenmesi için genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Model parametresi belirlenmesi yöntemlerindeki model eşitlikleri üzerinde matematiksel sadeleştirmeler yapılarak ya da gradient ve inverse Hessian matrix gibi karmaşık hesaplamalar kullanılan Least-Square, Newton - Raphson ya da Marquardt gibi yöntemler yerine [1], model eşitliklerinin sadeleştirilmeden global olarak belirlenmesi istenmiştir. Global optimizasyon metodlarından olan SaPOSM [2] ve Fast Diffusion'un [3] hesaplamalarda türevi kullanmaları kodlama ve işlem gücünü yavaşlatmakta ve zorlaştırmaktadır; bu nedenle işlem gücü daha hızlı ve kodlaması daha kolay olan GA tercih edilmiştir.

Modern VLSI (Very Large Scale Integration) teknolojisi ile üretilen devrelerin büyük bir kısmı MOS transistörleriyle ve bunların bağlantılarıyla oluşturulmaktadır. Ayrıca gerçek üretim aşamasından önce tasarlanan devrenin performansını

tahmin etmek ve ölçmek için hassas ve güçlü bir modelin olması gerekmektedir. İyi bir model ileriye yönelik çalışmalara ve transistörlerin geliştirilmesine büyük faydalar sağlar. Bu nedenle devrelerin tasarımı için doğru sonuçlar veren transistör modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda MOS transistörlerinin modellenmesi konusunda bir çok çalışma yapılmış, yüzlerce model ortaya konulmuş ve halen de bu çalışmalar yapılmaktadır [1 - 6]. Gelişen teknoloji ile birlikte transistör boyutlarının azalması ve değişen yapı nedeniyle ortaya çıkan yeni fiziksel özellikler modellerin değişmesine yeni yöntemler ve bakış açıları getirmelerine sebep olmaktadır.

Elemanın fiziksel davranışına ait sorunlar elemanın doğru şekilde modellenmesiyle de sona ermez. Sonuçta modellenmek istenen eleman bazı fiziksel özellikler içermekte

ve bu özellikler de matematiksel yollarla modelde ifade edilmeye çalışılmaktadır. Bu yüzden modelde ifade edilen parametrelerin optimum sonucu verecek şekilde belirlenmesi de ayrı bir problemdir [1]. Bir çok optimizasyon problemine çözüm üreten Genetik Algoritma MOS parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

BSIM3V3 modeli yarı-deneysel modellerin problemlerini çözmek ve kendinden önceki modelleri tamamlayarak başarılı bir model ortaya çıkarmak için geliştirilmiştir. BSIM3V3 modeli kanal boyu, kanal genişliği, geçit oksiti kalınlığı, jonksiyon derinliği ve katkı yoğunluğu gibi çok önemli işlem parametreleri içermektedir. BSIM3V3 diğer modellere göre daha az parametre içermekte ayrıca her parametre kendi fiziksel anlamını da göstermektedir. Tüm akımlar ve birinci dereceden türevler sürekli iken benzetimin yakınsaması geliştirilmiş ve yinmeler azaltılmıştır. Hesaplamalardaki verimlilik için zamana bağlı fonksiyonlar BSIM3V3'den kaldırılmıştır [7]. Modelin çözümleyici ve basit doğasından ötürü bu çalışmada BSIM3V3 modeli kullanılacaktır.

Önceki çalışmamızda [8] MOS BSIM3V3 modelinde C35 üretim sürecinde kullanılan 7 adet eşik gerilimi ve mobilite parametresi büyük boyutlu ($W=10\mu\text{m}$ ve $L=10\mu\text{m}$) transistör kullanılarak belirlenmiştir; bu çalışmada büyük boyut ($W=10\mu\text{m}$ ve $L=10\mu\text{m}$) transistörün kullanılması yanında kısa kanal ($W=0.35\mu\text{m}$, $W=0.7\mu\text{m}$, $W=1\mu\text{m}$), dar kanal ($L=0.35\mu\text{m}$, $L=0.7\mu\text{m}$, $L=1\mu\text{m}$) ve küçük boyut ($W=0.35\mu\text{m}$, $L=0.35\mu\text{m}$) transistör kullanılarak 26 adet eşik gerilimi ve mobilite parametresi GA ile belirlenmiştir.

II. Genetik Algoritma

Geleneksel model çıkartma yöntemleri, model eşitlikleri üzerinde matematiksel sadeleştirmeler yaparak yüksek dereceden lineer olmayan model eşitliklerini optimize etmeye çalışmaktadırlar. 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 [7].

Çok değişkenli fonksiyonların optimizasyonu amacıyla kullanılan genetik algoritma (GA), çözüm uzayından tesadüfi olarak seçilen noktalar üzerinde operatörler yardımıyla sadece amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyarak daha iyi noktalara ulaşmaya çalışır. Çözüm uzayı çok büyük problemler için, bu arama sırasında iyi sonuç vermeyecek 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 [9].

III. BSIM3V3 MOSFET Model Parametresi Belirlenirken Uygulanan Adımlar

BSIM3V3 MOSFET model parametreleri belirlenirken beş farklı adım uygulanmıştır. Bu adımlar sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

i) Adım 1 (Eşik ve Eşik Altı Bölge Parametrelerinin Belirlenmesi)

Bu adımda kanal boyu ($L = 10\mu\text{m}$) ve kanal genişliği ($W = 10\mu\text{m}$) büyük boyutlu transistör kullanılarak **VTH0**, **K1**, **K2**, **μ_0** , **UA**, **UB** ve **UC** parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. $V_{ds} = 0.05\text{V}$ olmak şartı ile V_{bs} 'nin 0, -1.1V, -2.2V ve -3.3V olduğu değerlerdeki $I_d - V_{gs}$ eğrileri elde edilmiş. Aşağıdaki Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak elde edilen parametre değerleri genetik algoritma ile $I_d - V_{gs}$ değerleri esas alınarak belirlenmiştir [7, 10].

$$V_{th} = V_{TH0} + K_1 \left(\sqrt{\phi_s - V_{bs}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bs} \quad (1)$$

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

ii) Adım 2 (Eşik Değişimi Etkili Parametrelerinin Belirlenmesi)

Bu adımda kanal genişliği kısa ve farklı ($W = 0.35\mu\text{m}$, $W = 0.7\mu\text{m}$, $W = 1\mu\text{m}$) birden çok transistör ile kanal boyu sabit ($L = 10\mu\text{m}$) büyük boyutlu transistör kullanılarak **K3**, **W0** ve **K3B** parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. $V_{ds} = 0.05\text{V}$ olmak şartı ile V_{bs} 'nin 0, -1.1V, -2.2V ve -3.3V olduğu değerlerdeki $I_d - V_{gs}$ eğrileri elde edilmiş; Denklem 3 kullanılarak elde edilen parametre değerleri genetik algoritma ile $I_d - V_{gs}$ değerleri esas alınarak belirlenmiştir [7, 10].

$$V_{th} = V_{TH0} + K_1 \left(\sqrt{\phi_s - V_{bseff}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bseff} + K_1 \left(\sqrt{1 + \frac{N_{LX}}{L_{eff}}} - 1 \right) \sqrt{\phi_s} + \left(K_3 + K_{3B} V_{bseff} \right) \frac{T_{OX}}{W_{eff} + W_0} \phi_s - D_{VT0} \left(\exp \left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{2l_i} \right) + 2 \exp \left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{l_i} \right) \right) \left(V_{bi} - \phi_s \right) - \left(\exp \left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{2l_{to}} \right) + 2 \exp \left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{l_{to}} \right) \right) \left(E_{TA0} + E_{TAB} V_{bseff} \right) V_{ds} \quad (3)$$

iii) Adım 3 (Eşik Değişimi ve Kanal Direnci Etkili Parametrelerinin Belirlenmesi)

Bu adımda kanal boyu kısa ve farklı birden çok transistör ($L = 0.35\mu\text{m}$, $L = 0.7\mu\text{m}$, $L = 1\mu\text{m}$) ile kanal genişliği sabit ($W = 10\mu\text{m}$) büyük boyutlu transistör kullanılarak **RDSW**, **DVT0**, **DVT1**, **DVT2**, **NLX**, **PRWG** ve **PRWB**, parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. $V_{ds} = 0.05\text{V}$ olmak şartı ile V_{bs} 'nin 0V, -1.1V, -2.2V ve -3.3V olduğu değerlerdeki $I_d - V_{gs}$ eğrileri elde edilmiş; aşağıdaki Denklem 5 ve Denklem 6 kullanılarak elde edilen parametre değerleri genetik algoritma ile $I_d - V_{gs}$ değerleri esas alınarak belirlenmiştir [7, 10].

$$\begin{aligned}
V_{th} &= V_{TH0} + K_1 \left(\sqrt{\phi_s - V_{bseff}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bseff} \\
&+ K_1 \left(\sqrt{1 + \frac{N_{LX}}{L_{eff}}} - 1 \right) \sqrt{\phi_s} + (K_3 + K_{3B} V_{bseff}) \frac{T_{OX}}{W_{eff} + W_0} \phi_s \\
&- D_{VT0} \left(\exp\left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{2l_i}\right) + 2 \exp\left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{l_i}\right) \right) (V_{bi} - \phi_s) \\
&- \left(\exp\left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{2l_{to}}\right) + 2 \exp\left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{l_{to}}\right) \right) (E_{TA0} + E_{TAB} V_{bseff}) W_{ds}
\end{aligned} \quad (5)$$

$$R_{ds} = \frac{R_{DSW} \left(1 + P_{RWG} V_{gsseff} + P_{RWB} \left(\sqrt{\phi_s - V_{bseff}} - \sqrt{\phi_s} \right) \right)}{\left(10^6 W_{eff} \right)^{W_r}} \quad (6)$$

iv) Adım 4 (Gövde Yükü Etkisi Parametrelerinin Belirlenmesi)

Bu adımda **A0** ve **AGS** parametrelerinin belirlenmesi için kanal genişliği sabit ($W = 10\mu\text{m}$) büyük boyutlu transistör ile kısa kanal boylu birden çok transistör ($L = 0.35\mu\text{m}$, $L = 0.7\mu\text{m}$, $L = 1\mu\text{m}$) kullanılırken, **B0**, **B1** ve **KETA** parametrelerinin belirlenmesi için kanal boyu sabit ($L = 10\mu\text{m}$) büyük boyutlu transistör ile kanal genişliği küçük ve farklı ($W = 0.35\mu\text{m}$, $W = 0.7\mu\text{m}$, $W = 1\mu\text{m}$) transistörler kullanılmıştır. $V_{bs} = 0\text{V}$ olmak şartı ile farklı V_{gs} değerlerine ait $I_d - V_{ds}$ eğrileri elde edilerek; aşağıdaki Denklem 7 kullanılarak elde edilen parametre değerleri genetik algoritma ile $I_d - V_{ds}$ değerleri esas alınarak belirlenmiştir [7, 10].

$$\begin{aligned}
A_{bük} &= \left(1 + \frac{K_{lox}}{2\sqrt{\phi_s - V_{bseff}}} \left(\frac{A_0 L_{eff}}{L_{eff} + 2\sqrt{X_J X_{dep}}} \left(1 - A_{gs} V_{gsseff} \left(\frac{L_{eff}}{L_{eff} + 2\sqrt{X_J X_{dep}}} \right)^2 \right) + \frac{B_0}{W_{eff} + B_1} \right) \right) \\
&\cdot \frac{1}{1 + Keta V_{bseff}} \quad (7)
\end{aligned}$$

v) Adım 5 (Küçük Boyut Parametrelerinin Belirlenmesi)

Bu adımda kanal boylu kısa ($L = 0.35\mu\text{m}$) ve kanal genişliği dar ($W = 0.35\mu\text{m}$) olan küçük boyutlu transistör kullanılarak **DVT0W**, **DVT1W** ve **DVT2W** parametreleri belirlenmiştir. $V_{ds} = 0.05\text{V}$ olmak üzere V_{bs} nin 0, -1.1V, -2.2V ve -3.5V olduğu değerlerdeki $I_d - V_{gs}$ eğrileri elde edilmiş; aşağıdaki Denklem 8 kullanılarak elde edilen parametre değerleri genetik algoritma ile $I_d - V_{gs}$ değerleri esas alınarak belirlenmiştir [7, 10].

$$\begin{aligned}
V_{th} &= V_{TH0} + K_1 \left(\sqrt{\phi_s - V_{bseff}} - \sqrt{\phi_s} \right) - K_2 V_{bseff} \\
&+ K_1 \left(\sqrt{1 + \frac{N_{LX}}{L_{eff}}} - 1 \right) \sqrt{\phi_s} + (K_3 + K_{3B} V_{bseff}) \frac{T_{OX}}{W_{eff} + W_0} \phi_s \\
&- D_{VT0} \left(\exp\left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{2l_i}\right) + 2 \exp\left(-D_{VT1} \frac{L_{eff}}{l_i}\right) \right) (V_{bi} - \phi_s) \\
&- \left(\exp\left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{2l_{to}}\right) + 2 \exp\left(-D_{SUB} \frac{L_{eff}}{l_{to}}\right) \right) (E_{TA0} + E_{TAB} V_{bseff}) W_{ds} \\
&- D_{VT0W} \left(\exp\left(-D_{VT1W} \frac{W_{eff} L_{eff}}{2l_{tw}}\right) + 2 \exp\left(-D_{VT1W} \frac{W_{eff} L_{eff}}{l_{tw}}\right) \right) (V_{bi} - \phi_s)
\end{aligned} \quad (8)$$

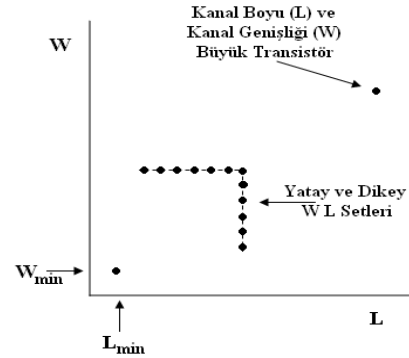
IV. Parametrelerin GA ile Belirlenmesi Süreci

Parametre belirlenmesi sırasında bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bilinmesi gereken bu parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca parametre belirlenmesi için çıkartımı yapılacak transistör grubuna ait $I_d - V_{gs}$ eğrileri ile $I_d - V_{ds}$ eğrilerinin de bilinmesi gerekmektedir.

Tablo 1: Parametre çıkartımı öncesi değeri bilinmesi gereken parametreler

Parametre	Tanımı
T_{ox}	Geçit oksiti kalınlığı
N_{ch}	Kanal içi katkılama yoğunluğu
T	Ortam sıcaklığı
L_{drawn}	Maskeleme seviyeli kanal uzunluğu
W_{drawn}	Maskeleme seviyeli kanal genişliği
X_j	Jonksiyon derinliği

Parametrenin belirlenmesi sürecinde Şekil 1'de de görüldüğü gibi kanal boyu (L) ve kanal genişliği (W) büyük olan bir transistör, kanal boyu ve genişliği küçük olan bir transistör ile farklı genişliklere sahip ancak sabit büyüklükte transistörler ve farklı uzunluklarda ancak sabit genişlikte transistörler kullanılmıştır. Bazı parametrelerin transistörün boyutuna göre önem arzetmesi parametre çıkartımı süresince boyutları önemli hale getirmektedir [11].



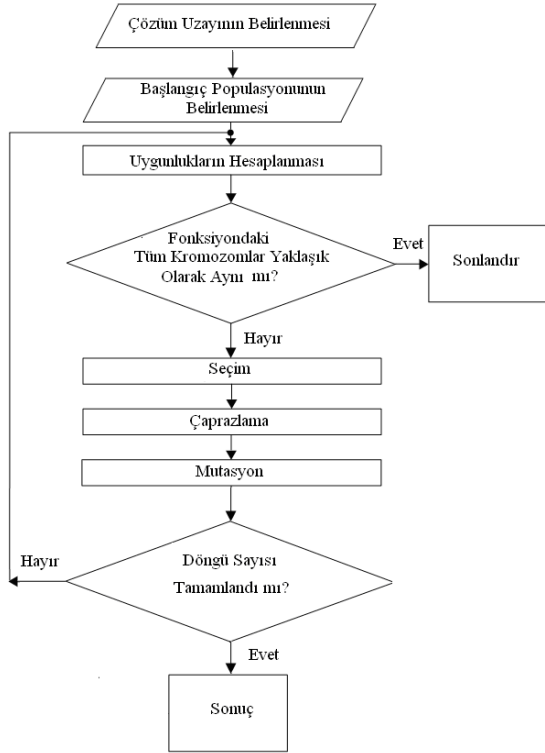
Şekil 1: Çıkarımda kullanılan transistörlerin geometrik özellikleri

Parametre belirlenmesinde uygulanan GA akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Çözüm uzayı belirlenecek olan MOSFET BSIM3V3 parametreleridir. SPICE BSIM3V3 $0.35\mu\text{m}$ üretim teknolojisine göre belirlenecek parametreler **VTH0**, **K1**, **K2**, **U0**, **UA**, **UB**, **UC**, **DSUB**, **NLX**, **DVT0**, **DVT1**, **DVT2**, **RDSW**, **PRWB**, **PRWG**, **W0**, **K3**, **K3B**, **A0**, **AGS**, **B0**, **B1**, **KETA**, **DVT0W**, **DVT1W**, **DVT2W**'dir.

Bulunan akım değerleri Denklem 9'da gösterilen uygunluk fonksiyonuna parametre belirlemede kullanılan uygunluk fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

$$f = \sum (I_{d,lab} - I_{d,mod el})^2 \quad (9)$$

Buradaki $I_{d,lab}$ laboratuvarda ölçülen ya da SPICE ile elde edilen $I_d - V_{ds}$ ya da $I_d - V_{gs}$ eğrilerinde savak akımı; $I_{d,model}$ ise GA ile belirlenen model parametrelerinden elde edilen savak akımıdır.



Şekil 2: GA akış diyagramı

Bireyler seçildikten sonra çaprazlama operatörü uygulanabilir. Çaprazlama için rasgele olarak seçilen ebeveynler yine rasgele belirlenmiş çaprazlama oranı ile çarpılarak yeni bireyler elde edilir. Çaprazlama işlemi $[0, 1]$ aralığında değişen β ile ifade edilirse,

$$p_{new} = \beta p_{mn} + (1 - \beta) p_{dn} \quad (10)$$

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 [9].

Parametre çıkartımında populasyonu oluşturan kromozomların sayısı (Nkromozon) ile gen sayısı (Ngen) ve kullanıcı tarafından belirtilen mutasyon oranı (Mrate) ile çarpılarak mutasyona uğrayacak birey sayısı (Msayı) belirlenir.

$$Msayı = Mrate * Nkromozon * Ngen \quad (11)$$

Mutasyona uğrayacak birey sayısı belirlendikten sonra hangi bireylerin mutasyona uğrayacağı rastlantısal olarak belirlenip o bireyin yerine yeni randomize sayı atanır. Böylelikle mutasyon operatörü de uygulanmış olur. Parametrelerin belirlenmesine ilişkin algoritmalar, MATLAB programı altında yazılmış ve parametreler belirlenmiştir.

Çıkarımı gerçekleştirilen parametre değerleri, gerçek model parametreleri ile birlikte, karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir.

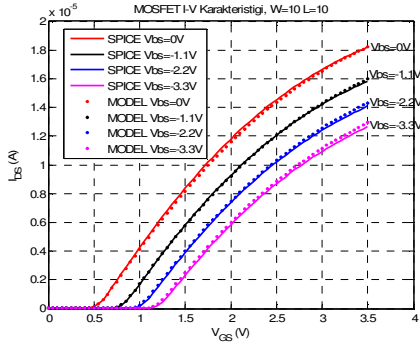
Tablo 2: Parametrelerin SPICE değerleri ve GA ile belirlenmiş değerleri

Parametreler	SPICE Değer	GA ile Belirlenmiş Değer
VTHO	$4.979 \cdot 10^{-1}$	$5.003 \cdot 10^{-01}$
K1	$5.0296 \cdot 10^{-01}$	$4.8451 \cdot 10^{-01}$
K2	$3.3985 \cdot 10^{-02}$	$3.4712 \cdot 10^{-02}$
U0	$4.758 \cdot 10^{+02}$	$4.618 \cdot 10^{+02}$
UA	$4.705 \cdot 10^{-12}$	$4.595 \cdot 10^{-12}$
UB	$2.137 \cdot 10^{-18}$	$1.7711 \cdot 10^{-18}$
UC	$1.000 \cdot 10^{-20}$	$5.1660 \cdot 10^{-17}$
NLX	$1.888 \cdot 10^{-7}$	$2.0317 \cdot 10^{-7}$
DVT0	$5.000 \cdot 10^1$	$4.513 \cdot 10^1$
DVT1	1.039	1.29139
DVT2	$-8.375 \cdot 10^{-3}$	$-7.5576 \cdot 10^{-3}$
RDSW	$3.449 \cdot 10^2$	$3.710 \cdot 10^2$
PRWG	0	$9.921 \cdot 10^{-12}$
PRWB	$-2.416 \cdot 10^{-1}$	$-1.966 \cdot 10^{-1}$
WR	1	1.0294
W0	$2.673 \cdot 10^{-7}$	$2.31 \cdot 10^{-7}$
K3	-1.136	-1.529
K3B	$-4.399 \cdot 10^{-1}$	$-4.061 \cdot 10^{-1}$
A0	2.541	2.479
AGS	$2.408 \cdot 10^{-1}$	$2.398 \cdot 10^{-1}$
B0	$4.301 \cdot 10^{-9}$	$4.59 \cdot 10^{-9}$
B1	0	$3.2300 \cdot 10^{-15}$
KETA	$2.032 \cdot 10^{-2}$	$2.320 \cdot 10^{-2}$
DVT0W	$1.089 \cdot 10^{-10}$	$1.199 \cdot 10^{-10}$
DVT1W	$6.671 \cdot 10^4$	$6.7702 \cdot 10^4$
DVT2W	$-1.352 \cdot 10^{-2}$	$-1.505 \cdot 10^{-2}$

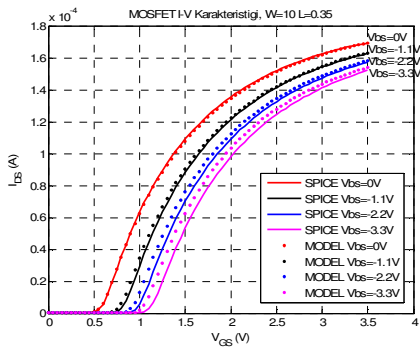
Belirlenen parametrelere göre elde edilen eğriler SPICE parametreleri ile elde edilen eğriler ile Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6'da karşılaştırılmışlardır. SPICE parametreleri ile elde edilen eğriler düz çizgi ile gösterilmiş olup, SPICE olarak da belirtilmiştir. GA ile modellenen parametreler ise kesikli çizgiler ile ifade edilmiştir. Benzetimler farklı boyut transistörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu benzetimler sırasında uygulanan genetik algoritma parametreleri ise populasyon sayısı olarak 500, nesil sayısı olarak 50 ve mutasyon oranı olarak ise 0.02 tercih edilmiş olup sonuçlar öyle bulunmuştur. Bulunan parametrelerin değerleri aynı koşullar altında yapılsa bile aynı sonuçları veremeyeceği genetik algoritmanın yapısından ve işleyiş biçiminden kaynaklanmaktadır.

Elde edilen değerler, SPICE parametreleri ile direk olarak karşılaştırıldığında, bir iki çok farklı sonucun dışında sonucun gerçekten iyi olduğu söylenebilir. Burada parametrelerin bulunuşu sırasında grup olarak rasgele biçimde elde edilişi de göz önüne alınırsa sonuç gerçekten güzeldir. Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6'da verilen MOSFET $I_d - V_{gs}$ geçiş karakteristiği eğrileri SPICE parametreleri ve GA ile

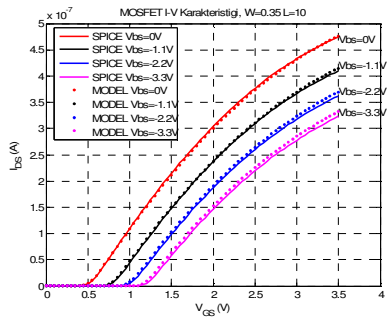
modellenen eğriler olmak üzere incelendiğinde uygulanan yöntemin ne kadar başarılı olduğu gözlemlenebilir.



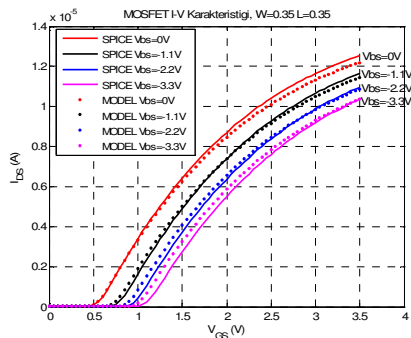
Şekil 3: Büyük boyutlu ($W=10\mu\text{m}$ $L=10\mu\text{m}$) MOSFET I_d - V_{gs} karakteristiği, $V_{ds}=0.05\text{V}$, V_{bs} parametre



Şekil 4: Kısa kanallı ($W=10\mu\text{m}$ $L=0.35\mu\text{m}$) MOSFET I_d - V_{gs} karakteristiği, $V_{ds}=0.05\text{V}$, V_{bs} parametre



Şekil 5: Dar kanallı ($W=0.35\mu\text{m}$ $L=10\mu\text{m}$) MOSFET I_d - V_{gs} karakteristiği, $V_{ds}=0.05\text{V}$, V_{bs} parametre



Şekil 6: Küçük boyutlu ($W=0.35\mu\text{m}$ $L=0.35\mu\text{m}$) MOSFET I_d - V_{gs} karakteristiği, $V_{ds}=0.05\text{V}$, V_{bs} parametre

Tablo 3 ile verilen hata analizi ile yüzde ortalama karesel hatanın özellikle tüm bölge için %2.5 - %3 dolaylarında olduğu görülmektedir.

Tablo 3: C35 transistörüne ait hata analizi sayısal değerleri

		Yüzde Ortalama Karesel Hata (%)		
		Eşik Altı Bölgesi	Güçlü evirtim Bölgesi	Tüm Bölge
W=10µm L=10µm	$V_{ds}=0.05\text{V}$	7.55	1.7331	2.7162
	$V_{ds}=3.3\text{V}$	6.2902	0.8961	1.8077
W=10µm L=0.35µm	$V_{ds}=0.05\text{V}$	8.9224	0.6460	2.0448
	$V_{ds}=3.3\text{V}$	7.4609	1.0108	2.100
W=0.35µm L=10µm	$V_{ds}=0.05\text{V}$	9.8994	0.9988	2.5031
	$V_{ds}=3.3\text{V}$	9.1055	1.3809	2.6863
W=0.35µm L=0.35µm	$V_{ds}=0.05\text{V}$	10.031	2.0934	3.4349
	$V_{ds}=3.3\text{V}$	11.027	0.8122	2.5386

V. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada MOS model parametreleri belirlenirken, problem sayısal optimizasyon problemi gibi ele alınmış; genetik algoritmanın lineer olmayan, süreksiz problemlerin çözümünde ne kadar etkili olduğu görülmüştür. SPICE parametrelerinin benzetim sonuçlarına göre belirlenen parametrelerin hata analizine bakıldığında; I_d - V_{ds} çıkış karakteristiği güçlü evirtim bölgesi için RMS hatanın %1 civarında iken I_d - V_{gs} çıkış karakteristiği hata analizi tüm bölge için yapıldığında hatanın %2.5 - %3 dolaylarında olduğu görülmüştür. Benzetim sonuçlarının belirlenen parametre sonuçlarına yakın olması aynı modelin matematiksel olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen değerlerden özellikle transistörün birçok çalışma koşulunda belirleyici olan V_{th0} , K_1 , K_2 ve μ_0 gibi parametrelerin yüksek doğrulukta bulunmuş olması çalışmanın başarısıdır.

VI. Kaynakça

- [1] M. Yazgı, 1996, "Spice MOSFET Statik Model Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Belirlenmesi", Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Y. H. Hu, S. W. Pan, October 1993, "SaPOSM: An Optimization Method Applied to Parameter Extraction of MOSFET Models", IEEE Trans on CAD, vol 12, no 19, pp 1481-1487.
- [3] T. Sakurai, B. Lin, R. Newton, February 1992, "Fast Simulated Diffusion: An optimization Algorithm for Multimimum Problems and Its Application to MOSFET Model Parameter Extraction", IEEE Trans on CAD, vol 11, no 2, pp 228-234.
- [4] K. Doganis, D. L. Scharfetter, 1983, "General Optimization and Extraction of IC Device Model Parameters",

IEEE Transactions on Electron devices, Vol. ED-30, No. 9, pp 1219-1228.

[5] H. Abebe, V. C. Tyree, October 2000, "BSIM3V3.1 Model Parameters Extraction and Optimization", USC-ISI, The MOSIS Service.

[6] S P. Antognetti, G. Massobrio, 1993, "Semiconductor Device Modeling With SPICE", McGraw-Hill Book Comp.

[7] W., Jin, X., Xi X., Chen. J., Jeng, M., Liu, Z., Cheng, Y., Chen, K., Chan, M., Hui, K., Huang, J., Tu, R., Ko, P. K., Hu, C., 2005, "BSIM3V3.3 User's Manual".

[8] M. E. Bařak, A. Kuntman, H. Kuntman, 5 - 9 December 2007 'Extraction of BSIM3V3 Threshold Voltage and Mobility Effect Parameters with Genetic Algorithm' ELECO 2007: The 5th International Conference on Electrical and Electronics, (Electronics), pp. 75-79, Bursa, Turkiye.

[9] S. E. Haupt, R. L. Haupt, 2004, "Practical Genetic Algorithms", A Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-45565-2.

[10] Y. Cheng and C. Hu, 2002, "Handbook MOSFET Modeling & BSIM3 User's Guide", Kluwer Academic Publishers.

[11] W. Liu, 2001, "MOSFET Models for SPICE Simulation Including BSIM3v3 and BSIM4", Wiley Interscience.