

ارایه یک مدل بهبودیافته برای ترانزیستورهای ماسفت کانال کوتاه و بهینه‌سازی

شاخص‌های آن توسط الگوریتم جستجوی گرانشی

محمد مهدی پژمان^۱، عصمت راشدی^۲ و احمد حکیمی^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، گروه برق و کامپیوتر، کرمان، ایران

pezhmanmehdi@gmail.com

۲- استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، گروه برق و کامپیوتر، کرمان، ایران

e. rashedi@kgut.ac.ir

۳- دانشیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان، گروه مهندسی برق، کرمان، ایران

hakimi@mail.uk.ac.ir

چکیده: پیشرفت سریع تکنولوژی و به دنبال آن کاهش بعد ترانزیستورهای ماسفت باعث شده است که این ترانزیستورها رفتار متفاوتی در مدارات الکترونیکی از خود نشان دهند. در دهه اخیر، مدل‌های زیادی برای تخمین رفتار ترانزیستورهای ماسفت کانال کوتاه ارائه شده است. در این مقاله، یک مدل جدید برای پیش‌بینی رفتار و عملکرد ترانزیستورهای ماسفت کانال کوتاه پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی با ایجاد تغییراتی روی مدل MOS n th-power law دقت این مدل را افزایش و خطای آن را کاهش داده است. شاخص‌های مدل پیشنهادی نسبت به دو ویژگی واقعی BSIM3 در تکنولوژی ۱۳۰ نانومتر و TSMC_CM018RF در تکنولوژی ۱۸۰ نانومتر، که امروزه کاربرد بسیاری در مدارات الکترونیکی به ویژه مدارات فرکانس بالا دارند، محاسبه شده است. به منظور افزایش دقت مدل پیشنهادی، شاخص‌های آن، توسط سه الگوریتم وراثتی، بهینه‌سازی جمعیت ذرات و جستجوی گرانشی محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که برای مدل ارائه شده، الگوریتم جستجوی گرانشی نتایج بهتری به دست داده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم وراثتی، الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات، الگوریتم جستجوی گرانشی، ترانزیستور ماسفت کانال کوتاه، مدارات فرکانس بالا

۱- مقدمه

شبیه‌سازی، تحلیل و بررسی مدارات طراحی شده به‌ویژه در فرکانس‌های بالا چه در حوزه دیجیتال و چه آنالوگ، باعث می‌شود که فرآیند طراحی، پیاده‌سازی و اجرا با دقت و صحت بیشتر و همچنین، هزینه کمتر انجام شود. به همین علت در اختیار داشتن مدل‌های مناسب برای تقریب و نمایش این قطعات الکترونیکی، امری ضروری و غیر قابل انکار است. برای مثال، برای طراحی یک مدار پیچیده فرکانس بالا، با انجام یک سری محاسبات ساده می‌توان به اطلاعات زیادی از عملکرد مدار دست پیدا کرد [۱]. در نتیجه داشتن این اطلاعات کمک بسیاری به طراحی مدار قبل از فرآیند ساخت می‌کند. یکی از این قطعات که در

امروزه تخمین و پیش‌بینی رفتار قطعات الکترونیکی پیش از ساخت آن‌ها، اهمیت بسیاری دارد و بخش جدایی‌ناپذیر در فرآیند طراحی مدارات پیشرفته است.

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۵

نام نویسنده مسئول: محمد مهدی پژمان

نشانی نویسنده مسئول: ایران- کرمان- دانشگاه تحصیلات تکمیلی

صنعتی کرمان- گروه برق و الکترونیک

ذرات (PSO)^۵ [۱۴ و ۱۵] و جستجوی گرانشی (GSA)^۶ [۱۶] برای بهینه‌سازی شاخص‌های مدل بهبودیافته استفاده و دقت آن‌ها روی مدل مطرح شده مقایسه شده است. در بخش دوم، مدل انتخابی ماسفت کانال کوتاه توصیف شده است. مدل پیشنهادی این مقاله در بخش سوم آورده شده است. بخش چهارم اشاره‌ای به الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده دارد. در بخش پنجم، نتایج مقایسه دقت مدل انتخابی نسبت به بهبودیافته آن آورده شده و همچنین، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقایسه شده‌اند. در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش ششم آورده شده است.

۲- مدل انتخابی ماسفت کانال کوتاه

پیشرفت سریع تکنولوژی CMOS و به دنبال آن کاهش طول کانال ترانزیستورها باعث شد که این ترانزیستورها عملکرد متفاوتی نشان دهند [۱۷]. به ماسفت‌های با طول کانال کمتر از یک میکرومتر به اصطلاح، ماسفت کانال کوتاه می‌گویند.

امروزه مدل‌های زیادی برای رفتار ترانزیستورهای ماسفت کانال کوتاه معرفی شده است [۸، ۱۸ و ۱۹]. این مدل‌ها به همان میزان که دقت بالایی دارند، پیچیده‌تر شده‌اند. از طرفی، هر چه مدل پیچیده‌تر باشد محاسبات آن نیز بیشتر بوده و در نتیجه احتمال خطا در انجام محاسبات بالا می‌رود. به همین علت در این مقاله پس از بررسی‌های انجام شده از میان مدل‌های موجود، مدل MOS nth-power law [۱۰ و ۱۱] انتخاب شده است که پیچیدگی کمتری دارد. مدل انتخابی توسط رابطه‌های (۱) تا (۵) بیان می‌شود.

$$I_D = I_{DSAT} (1 + \lambda V_{DS}), \lambda = \lambda_0 - \lambda_1 V_{BS} \quad (1)$$

(ناحیه اشباع: $V_{DS} \geq V_{DSAT}$)

$$I_D = I_{DSAT} \left(2 - \frac{V_{DS}}{V_{DSAT}} \right) \cdot \frac{V_{DS}}{V_{DSAT}} \cdot (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2)$$

(ناحیه خطی: $V_{DS} \leq V_{DSAT}$)

$$V_{DSAT} = K (V_{GS} - V_T)^m \quad (3)$$

$$I_{DSAT} = \frac{w}{L_{eff}} \cdot B \cdot (V_{GS} - V_T)^n \quad (4)$$

$$V_T = V_{T0} + \gamma (\sqrt{2\phi_f - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_f}) \quad (5)$$

بیشتر مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شود، ماسفت یا ترانزیستور اثر میدانی نیمه‌رسانا-اکسید-فلز است^۱ [۲]. ماسفت‌ها در نواحی مختلف کاری ویژگی‌های منحصر به فردی داشته و برای کاربردهای گوناگون در مدارهای مختلف به کار برده می‌شوند. از طرفی، پیشرفت روز افزون تکنولوژی ساخت و به دنبال آن کاهش طول کانال ترانزیستورها، در عملکرد آن‌ها بی تأثیر نبوده است [۳]. بدیهی است که آگاهی و اطلاع کامل از چگونگی رفتار ماسفت در نواحی مختلف کاری، باعث دقت بیشتر در طراحی مدارات مختلف می‌شود [۴]. بنابراین، باید به دنبال یک مدل مناسب برای پیش بینی رفتار و عملکرد ماسفت‌ها، با توجه به تکنولوژی و شرایط ساخت باشیم. هدف اصلی این مقاله، ارائه یک مدل ساده و در عین حال با دقت بالا، برای ماسفت‌های کانال کوتاه^۲ است [۵ و ۶]. سادگی مدل از آن جهت اهمیت دارد که در زمان انجام محاسبات صرفه جویی شده و اشتباه در محاسبه شاخص‌ها کمتر انجام می‌شود.

امروزه اگر چه مدل‌های بسیاری در این زمینه ارائه شده است که از دقت بالایی برخوردارند [۷-۹]، اما به همان نسبت، این مدل‌ها پیچیده‌تر شده‌اند و در کاربردهای مدارهای غیرخطی و فرکانس بالا چندان مناسب نیستند. در این مقاله، پس از پژوهش و بررسی‌های مستمر، یک مدل مناسب و با پیچیدگی کم با نام MOS nth-power law [۱۰ و ۱۱] برای محاسبه رابطه جریان-ولتاژ (I-V) ماسفت‌های کانال کوتاه انتخاب شده است. به منظور افزایش دقت مدل انتخابی، تغییراتی در آن ایجاد و یک مدل جدید که بهبودیافته مدل [۱۰] می‌باشد، پیشنهاد شده است. در قدم بعدی، با هدف تنظیم دقیق مدل پیشنهادی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی^۳ برای محاسبه شاخص‌های مدل استفاده شده است. به این صورت که اگر خطای مدل به شکل اختلاف نمودار (I-V) ویژگی واقعی نسبت به نمودار (I-V) مدل پیشنهادی در نظر گرفته شود، شاخص‌های مدل باید به گونه‌ای محاسبه شوند که این خطا به حداقل مقدار خود برسد [۱۲].

در این مقاله از سه الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری با نام‌های الگوریتم وراثتی (GA)^۴ [۱۳]، بهینه‌سازی جمعیت

طرفی چون ولتاژهای V_{GS} و V_T در اشباع ترانزیستور تاثیرگذارند، در رابطه (۶) در نظر گرفته شده‌اند. رابطه (۶) ولتاژ اشباع را دقیق‌تر محاسبه می‌کند که به موجب آن دقت کل مدل نیز بالایی رود. در این پژوهش، شاخص‌های مدل بهبودیافته برای تقریب هر چه بهتر ویژگی، توسط چندین الگوریتم بهینه‌سازی، محاسبه شده است. در نتیجه این کار، علاوه بر بهبود عملکرد مدل پیشنهادی، بهترین الگوریتم موجود برای بهینه‌سازی آن نیز مشخص می‌شود.

در ادامه این مقاله، از مدل بهبودیافته پیشنهادی برای تقریب رابطه (I-V) ترانزیستورهایی که امروزه کاربرد بسیاری در مدارات مختلف به ویژه مدارات فرکانس بالا و غیرخطی دارند، استفاده می‌شود [۲۰]. امروزه ترانزیستورهایی نظیر BSIM3 در تکنولوژی ۱۳۰ نانومتر [۲۱] و TSMC_CM018RF در تکنولوژی ۱۸۰ نانومتر، در بیشتر مدارات الکترونیکی استفاده می‌شوند و مدل واقعی آن‌ها در نرم افزارهای شبیه‌سازی پر کاربرد Spice [۲۲] و ADS^v موجود است. در نتیجه آگاهی از عملکرد ترانزیستورهای نام برده شده، کمک بسیاری در محاسبات و شبیه‌سازی مدارات پیچیده نظیر مدارات فرکانس بالا می‌کند [۲۳].

۴- الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد استفاده

امروزه برای محاسبه متغیرهای توابع پیچیده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها زمان و هزینه محاسبات را نسبت به روش‌های کلاسیک کاهش می‌دهند. در این بخش سه الگوریتم وراثتی، بهینه‌سازی جمعیت ذرات و جستجوی گرانشی که در بیشتر مسائل مهندسی استفاده می‌شوند، مطرح می‌شود.

۴-۱- الگوریتم وراثتی

الگوریتم وراثتی یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای محاسبه جواب بهینه در مسائل مختلف است [۲۴] و در پژوهش‌های بسیاری از آن برای تقریب شاخص‌ها استفاده شده است. ایده اصلی این الگوریتم این است که افراد با توانایی بیشتر، شانس ازدواج و تولید مثل بیشتری در

جریان ترانزیستور در ناحیه اشباع و ناحیه خطی با در نظر گرفتن مدلاسیون طول کانال با رابطه‌های (۱) و (۲) مشخص می‌شود. در این رابطه‌ها، محدوده هدایت درین در ناحیه اشباع با λ_1 و λ_0 مدل می‌شود و V_{GS} ، V_{DS} ، V_{BS} به ترتیب ولتاژهای گیت سورس، درین سورس و بالک سورس ترانزیستور هستند. رابطه‌های (۳) و (۴) به ترتیب ولتاژ و جریان ترانزیستور را در ناحیه اشباع محاسبه می‌کنند. در رابطه (۳)، m و K ویژگی‌های ناحیه خطی را کنترل می‌کنند. در رابطه (۴)، W عرض گیت، L_{eff} طول مؤثر کانال و n و B ویژگی‌های ناحیه اشباع را تعیین می‌کنند. ولتاژ آستانه ترانزیستور است و با رابطه (۵) محاسبه می‌شود. در این رابطه V_{T0} ولتاژ آستانه ترانزیستور در ولتاژ بالک-سورس صفر ($V_{BS}=0$)، γ عامل اثر بدنه و ϕ_f خمیدگی بدنه نیمه هادی در شروع اثر وارونگی است.

همان‌طور که بیان شد دقت و پیچیدگی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند. پس مدلی که در بالا مطرح شد هر چند مدل ساده‌ای است اما دقت چندان خوبی ندارد. به منظور حل این مشکل، با انجام تغییراتی روی مدل، یک مدل بهبودیافته معرفی شده که دارای دقت بالایی بوده و در عین حال سادگی خود را نیز حفظ کرده است.

۳- مدل بهبودیافته

با پیشرفت تکنولوژی ساخت و به دنبال آن کاهش طول کانال ترانزیستورهای ماسفت، این ترانزیستورها سریع‌تر وارد ناحیه اشباع می‌شوند. در نتیجه به دست آوردن ولتاژ اشباع این ترانزیستورها اهمیت بسیاری دارد. بنابراین، مدلی که ولتاژ در ناحیه اشباع را به درستی محاسبه کند، می‌تواند مدل مناسبی باشد. به همین منظور رابطه ۳ که مربوط به محاسبه ولتاژ اشباع ترانزیستور است به شکل رابطه (۶) اصلاح شده است.

$$V_{DSAT} = K \cdot \tanh m \cdot (V_{GS} - V_T) \quad (6)$$

از آنجا که نمودارهای (I-V) ترانزیستورهای ماسفت، شبیه تابع $\tanh x$ می‌باشند، می‌توان از خاصیت این تابع، برای محاسبه دقیق ولتاژ اشباع ترانزیستور استفاده کرد. از

طبیعت دارند.

۵- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش، شاخص‌های مدل انتخابی و بهبودیافته آن، توسط سه الگوریتم بهینه‌سازی وراثتی، جمعیت ذرات و جستجوی گرانشی محاسبه شده است. میزان خطای مدل نسبت به مقادیر واقعی ترانزیستورها با رابطه (۷) به دست می‌آید [۱۱]:

$$Error = \frac{1}{N_{V_{GS}}} \sum_{\forall V_{GS}} \left(\sum_{\forall V_{DS}} \frac{(I_{D_{mod}}^2 - I_{D_{mes}}^2)^2}{I_{D_{max}}^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

در این رابطه، $I_{D_{mod}}$ جریان محاسبه شده توسط مدل، $I_{D_{mes}}$ جریان اندازه‌گیری شده و $I_{D_{max}}$ حداکثر جریان اندازه‌گیری شده در ولتاژ گیت-سورس خاص است. همچنین، $N_{V_{GS}}$ تعداد نمودارها در هر ویژگی است که هر کدام از این نمودارها به ازای (V_{GS}) خاصی است. در این مقاله، هر ویژگی پنج نمودار دارد یعنی $N_{V_{GS}} = 5$ است. هر چه مقدار خطای محاسبه شده در رابطه (۷) کمتر باشد و به سمت صفر میل کند، دقت مدل بیشتر است. برای محاسبه شاخص‌ها و بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های مورد نظر، هر شاخص مدل به عنوان یک متغیر، مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که همان شاخص‌های مدل انتخابی، برای مدل بهبودیافته نیز در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): متغیرهای نسبت داده شده به شاخص‌های مدل

انتخابی و مدل بهبودیافته

شاخص مدل	متغیر نسبت داده شده
B	X1
N	X2
K	X3
M	X4
	X5
	X6
	X7
	X8
	X9

برای به‌دست آوردن شاخص‌ها و بررسی دقت و درستی مدل از ویژگی (I-V) ترانزیستور ماسفت BSIM3 در تکنولوژی ۱۳۰ نانومتر و ترانزیستور

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات یکی از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری است که بر مبنای جمعیت کار می‌کند [۲۵ و ۲۶].

این الگوریتم از رفتار دسته جمعی ماهی‌ها یا پرندگان برای یافتن غذا الهام می‌گیرد. در این الگوریتم هر جواب مسئله، یک پرنده در فضای جستجو است که ذره نامیده می‌شود. این ذرات در هر تکرار الگوریتم به گونه‌ای حرکت می‌کنند تا به جواب مطلوب برسند. الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات، پیچیدگی کمتر و سرعت بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

۴-۳- الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی با الهام از قانون گرانش طبیعت و با استفاده از قانون گرانش نیوتن عمل می‌کند [۱۶ و ۲۷]. در این الگوریتم، عامل‌های جستجو کننده، مجموعه‌ای از اجسام دارای جرم هستند. با توجه به قانون نیوتن، هر جسم توسط نیروی جاذبه، محل و جرم سایر اجسام را درک می‌کند و متناسب با جرم خود و فاصله‌ای که با دیگر اجسام دارد روی سایر اجسام تاثیر می‌گذارد و به آنها نیرو وارد می‌کند. بنابراین، می‌توان از این نیرو به عنوان ابزاری برای تبادل اطلاعات بین اجسام استفاده کرد.

طبق قانون گرانش به هر جسم از طرف سایر اجسام نیروهای گرانشی وارد می‌شود در نتیجه جسم مورد نظر به سمت برابند این نیروها شتاب می‌گیرد. در این الگوریتم بر اساس شایستگی اجسام (میزان مناسب بودن جواب) به هر جسم یک جرم نسبت داده می‌شود. در هر تکرار الگوریتم، جرم جسم با توجه به شایستگی اش عوض می‌شود. این روش ادامه پیدا می‌کند تا اینکه اجسام به سمت بهترین جواب همگرا می‌شوند.

می‌شود. تکنولوژی این ترانزیستور ۱۸۰ نانومتر (L=180nm) است.

شاخص‌ها و میزان خطای مدل انتخابی و بهبود یافته آن بعد از بهینه‌سازی توسط الگوریتم‌های مورد نظر، روی دو ویژگی BSIM3 و TSMC_CM018RF در جدول (۲) به طور کامل آورده شده است.

برای مثال، مدل بهبود یافته پیشنهادی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم وراثتی، خطا را از ۰/۲۱۶ به مقدار ۰/۱۸۷ و پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی جمعیت ذرات، خطا را از ۰/۲۲۵ به ۰/۱۷۹ برای ویژگی BSIM3 کاهش داده است. به منظور تحلیل بهتر نتایج، شاخص "درصد کاهش خطا مدل بهبود یافته" به شکل رابطه (۸) تعریف شده است.

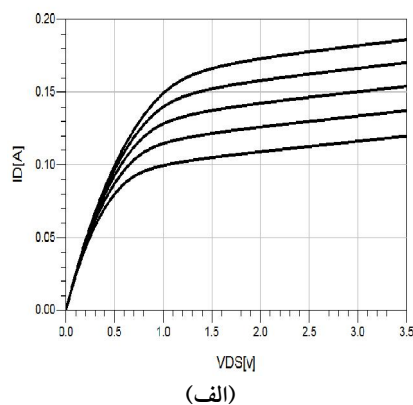
$$(۸) \quad ۱۰۰ * \frac{\text{خطای مدل بهبود یافته} - \text{خطای مدل انتخابی}}{\text{خطای مدل انتخابی}} = \text{درصد کاهش خطا}$$

در جدول (۳) درصد کاهش خطای مدل بهبود یافته برای هر الگوریتم آورده شده است. نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که مدل بهبود یافته، در حالت کلی خطا را کاهش می‌دهد. زیرا "درصد کاهش خطا" برای همه الگوریتم‌ها مقدار مثبتی است. اما تنها با استناد بر این موضوع نمی‌توان گفت که مدل بهبود یافته بهتر است. به علت این‌که خطای محاسبه شده در رابطه (۷) برابر مجموع خطا در هر دو ناحیه ترانزیستور (خطی و اشباع) است، پس باید دقت مدل بهبود یافته در هر دو ناحیه ترانزیستور بررسی شود.

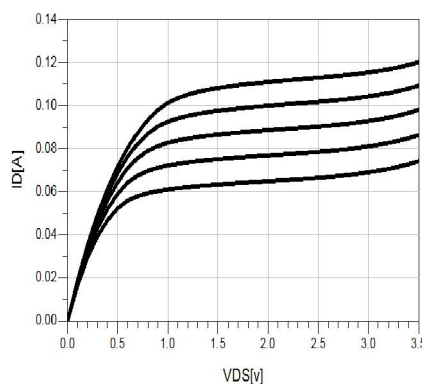
پس از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که مدل بهبود یافته اگرچه توسط دو الگوریتم وراثتی و بهینه‌سازی جمعیت ذرات خطای کل را کاهش می‌دهد اما در ناحیه خطی ترانزیستور جواب دقیق و مناسبی ندارد. شکل (۲) نتایج شبیه‌سازی مدل بهبود یافته را توسط الگوریتم وراثتی و بهینه‌سازی جمعیت ذرات برای دو ویژگی BSIM3 و TSMC_CM018RF نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود مدل بهبود یافته توسط دو الگوریتم GA و PSO در ناحیه خطی دقت خوبی ندارد. اما جدول (۳) نشان می‌دهد این دو الگوریتم خطا را کاهش داده‌اند. برای مثال "درصد کاهش خطا"

TSMC_CM018RF در تکنولوژی ۱۸۰ نانومتر استفاده می‌شود که امروزه از ترانزیستورهای پر کاربرد در مدارات الکترونیک به‌ویژه مدارات فرکانس بالا هستند. ویژگی جریان-ولتاژ این ترانزیستورها در شکل (۱) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) ویژگی ولتاژ-جریان ترانزیستور ماسفت BSIM3، (ب) ویژگی ولتاژ-جریان ترانزیستور ماسفت TSMC_CM018RF

در ویژگی BSIM3 (شکل (۱)-الف) عرض ترانزیستور ۱۰۰ میکرومتر (W=100um) و $V_{BS} = -0.5v$ در نظر گرفته شده است. ولتاژ گیت-سورس (V_{GS}) از ۲ ولت شروع و با گام ۰/۲۵ زیاد می‌شود. تکنولوژی این ترانزیستور ۱۳۰ نانومتر (L=130nm) است.

در ویژگی TSMC_CM018RF (شکل (۱)-ب) عرض ترانزیستور ۱۰۰ میکرومتر (W=100um) و $V_{BS} = -0.5v$ در نظر گرفته شده است. ولتاژ گیت-سورس (V_{GS}) از ۲ ولت شروع و با گام ۰/۲۵ زیاد

از مقدارهای ۰/۰۹۵ و ۰/۱۰۹ در مدل اصلی به مقدارهای ۰/۰۷۹ و ۰/۰۸۰ در مدل بهبود یافته کاهش داده است. مزیت مهم این الگوریتم این است که نه تنها کم‌ترین خطا را در بین الگوریتم‌ها دارد بلکه خطا در ناحیه اشباع و خطی را به طور هم‌زمان کاهش می‌دهد. شکل (۳) بیانگر این موضوع است.

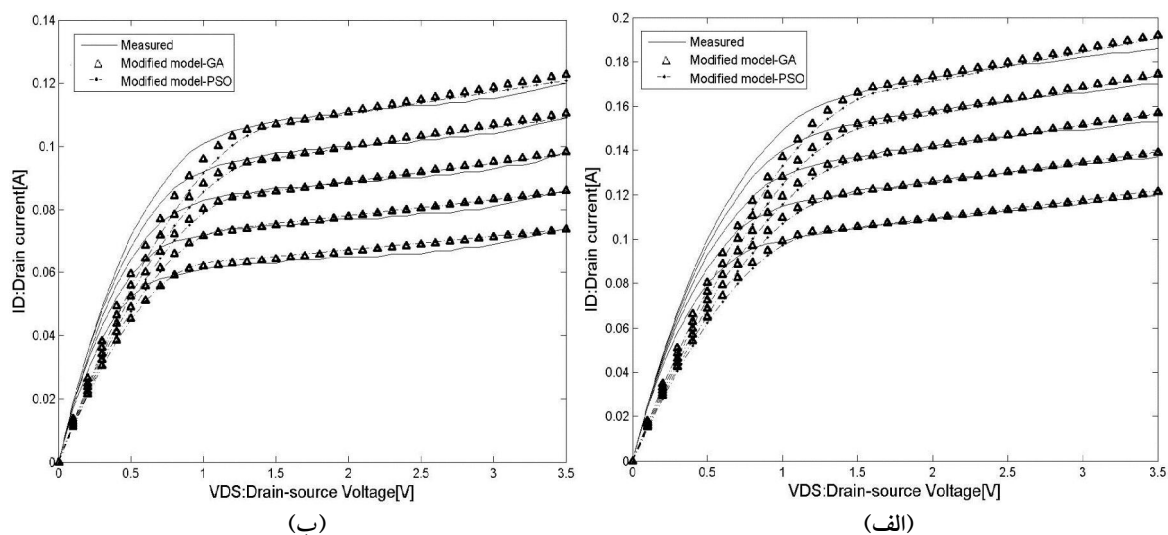
توسط دو الگوریتم GA و PSO برای ویژگی BSIM3 به ترتیب ۱۳/۴ و ۲۰/۴ است. علت این تفاوت این است که این دو الگوریتم فقط دقت ناحیه اشباع را زیاد می‌کنند. اما الگوریتم جستجوی گرانشی، خطا را برای تقریب ویژگی BSIM3 در تکنولوژی ۱۳۰ نانومتر و ویژگی TSMC_CM018RF در تکنولوژی ۱۸۰ نانومتر به ترتیب

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی مدل پیشنهادی توسط سه الگوریتم وراثتی، بهینه‌سازی جمعیت ذرات و جستجوی گرانشی

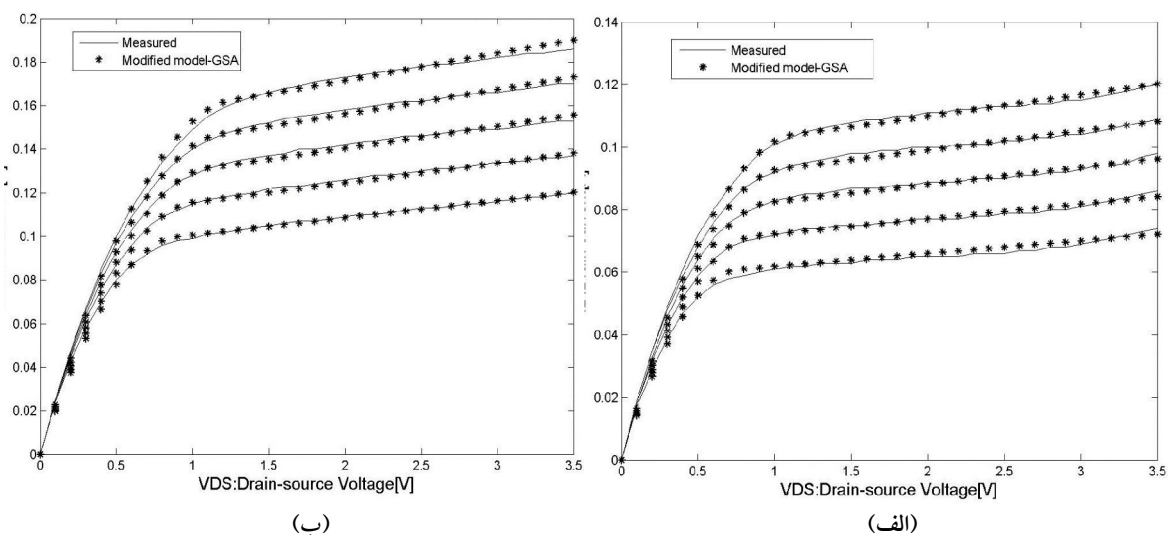
مدل	ویژگی	الگوریتم بهینه‌سازی	شاخص‌های پیشنهادی									خطا
			X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
مدل انتخابی	BSIM3	GA	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۸۶۹۷	۰/۷۲۹۳	۰/۴۵۱۳	۰/۰۹۶۷	۰/۰۰۳۵	۰/۴۱۹۸	۰/۲۱۸۰	۰/۲۳۵۷	۰/۲۱۶
		PSO	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۹۱۴۵	۰/۷۴۷۲	۰/۴۴۲۲	۰/۱۰۳۷	۰/۰۰۳۴	۰/۳۹۷۲	۰/۱۷۳۲	۰/۲۹۸۲	۰/۲۲۵
		GSA	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۸۷۷۱	۰/۷۹۴۲	۰/۴۰۲۸	۰/۰۸۳۸	۰/۰۰۳۷	۰/۴۲۰۴	۰/۲۴۷۲	۰/۲۵۹۱	۰/۰۹۵
مدل انتخابی	TSMC_CM018RF	GA	۰/۰۰۰۰۷۱	۱/۰۱۷۸	۰/۷۴۱۴	۰/۳۶۵۲	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۳۶	۰/۴۱۶۸	۰/۲۵۵۸	۰/۲۴۴۱	۰/۲۱۰
		PSO	۰/۰۰۰۰۷۰	۰/۹۷۳۷	۰/۶۷۲۵	۰/۴۵۲۰	۰/۰۸۵۸	۰/۰۰۴۳	۰/۴۵۶۵	۰/۲۴۴۷	۰/۲۷۱۸	۰/۲۰۴
		GSA	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۹۴۰۶	۰/۷۱۸۴	۰/۳۵۵۵	۰/۰۶۸۵	۰/۰۰۴۳	۰/۴۶۰۲	۰/۲۶۱۶	۰/۲۳۴۹	۰/۱۰۹
مدل بهبود یافته		GA	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۸۶۸۹	۱/۹۵۴۶	۰/۴۱۴۰	۰/۰۹۵۶	۰/۰۰۴۵	۰/۴۰۵۴	۰/۲۴۶۲	۰/۲۵۵۳	۰/۱۸۷
		PSO	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۸۶۷۱	۲/۲۷۳۲	۰/۴۳۰۷	۰/۰۹۲۱	۰/۰۰۴۵	۰/۴۳۸۰	۰/۲۴۷۴	۰/۱۹۸۶	۰/۱۷۹
		GSA	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۹۰۰۱	۱/۵۶۲۲	۰/۴۲۶۵	۰/۰۸۴۴	۰/۰۰۳۹	۰/۴۰۵۱	۰/۲۴۰۰	۰/۲۷۳۱	۰/۰۷۹
مدل بهبود یافته	TSMC_CM018RF	GA	۰/۰۰۰۰۶۸	۱/۰۱۶۱	۱/۸۳۰۲	۰/۴۳۲۵	۰/۰۷۸۱	۰/۰۰۴۹	۰/۴۲۷۸	۰/۲۳۳۷	۰/۲۴۴۷	۰/۱۷۴
		PSO	۰/۰۰۰۰۷۰	۰/۹۹۲۶	۱/۵۴۳۱	۰/۵۳۱۹	۰/۰۶۹۴	۰/۰۰۴۳	۰/۴۱۳۹	۰/۲۲۲۵	۰/۲۷۶۸	۰/۱۹۷
		GSA	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۹۶۹۸	۱/۵۵۰۳	۰/۳۷۸۹	۰/۰۷۱۹	۰/۰۰۴۱	۰/۴۶۹۱	۰/۲۷۷۴	۰/۲۸۰۷	۰/۰۸۰

جدول (۳): مقایسه خطای مدل انتخابی و مدل بهبود یافته در الگوریتم‌های مورد نظر

ویژگی	الگوریتم	خطای مدل	خطای مدل	درصد کاهش
BSIM3	GA	۰/۲۱۶	۰/۱۸۷	۱۳/۴
	PSO	۰/۲۲۵	۰/۱۷۹	۲۰/۴
	GSA	۰/۰۹۵	۰/۰۷۹	۱۶/۸
TSMC_CM018RF	GA	۰/۲۱۰	۰/۱۷۴	۱۷/۱۴
	PSO	۰/۲۰۴	۰/۱۹۷	۳/۴
	GSA	۰/۱۰۹	۰/۰۸۰	۲۶/۶



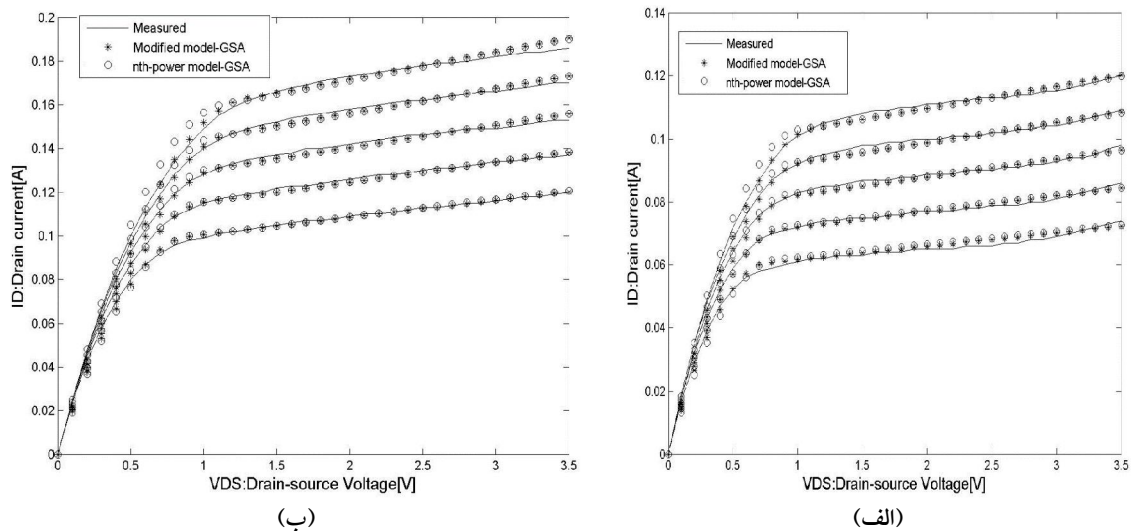
شکل (۲): شبیه‌سازی مدل بهبودیافته توسط الگوریتم‌های GA و PSO در ویژگی (الف) و ویژگی (ب) در ویژگی TSMC_CM018RF.



شکل (۳): شبیه‌سازی مدل بهبودیافته توسط الگوریتم GSA در ویژگی (الف) و ویژگی (ب) در ویژگی TSMC_CM018RF.

الگوریتم جستجوی گرانشی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، مدل انتخابی در مرز بین ناحیه خطی و اشباع دقت بالایی ندارد. علت این خطا، این است که مدل انتخابی ولتاژ اشباع را به طور دقیق محاسبه نمی‌کند. اما مدل بهبودیافته، این خطا را توسط رابطه (۶) کاهش داده است.

شکل (۳) شبیه‌سازی مدل بهبود یافته توسط الگوریتم جستجوی گرانشی را در دو ویژگی مورد نظر نشان می‌دهد. پس در بین الگوریتم‌های استفاده شده، الگوریتم جستجوی گرانشی بهترین الگوریتم برای بهینه‌سازی مدل بهبود یافته است. به منظور مقایسه مدل انتخابی با بهبود یافته می‌توان به شکل (۴) مراجعه کرد که شبیه‌سازی دو مدل را توسط



شکل (۴): مقایسه مدل انتخابی و بهبود یافته توسط الگوریتم GSA (الف) در ویژگی BSIM3 و (ب) در ویژگی

TSMC_CM018RF

مراجع

- [1] Bendix P. , Rakers P. , Wagh P. , Lemaitre L. , Grabinski W. , McAndrew C. , et al. , "RF distortion analysis with compact MOSFET models," in Custom Integrated Circuits Conference, Proceedings of the IEEE, pp. 9-12, 2004.
- [2] Sze S. , Ng K. K. , "MOSFETs," Physics of Semiconductor Devices, pp. 293-373, 2007.
- [3] Suzuki K. , Pidini S. , "Short-channel single-gate SOI MOSFET model," Electron Devices, IEEE Transactions on, Vol. 50, No. 5, pp. 1297-1305, 2003.
- [4] Galup-Montoro C. , Schneider M. C. , Cunha A. I. A. , de Sousa F. R. , Klimach H. , Siebel O. F. , "The advanced compact mosfet (acm) model for circuit analysis and design," in Custom Integrated Circuits Conference, IEEE, pp. 519-526, 2007.
- [5] Bhattacharyya A. B. , "Compact MOSFET models for VLSI design": Wiley-IEEE Press, 2009.
- [6] Montoro C. G. , Schneider M. C. , "MOSFET modeling for circuit analysis and design", World scientific, 2007.
- [7] Oritsuki Y. , Yokomichi M. , Kajiwara T. , Tanaka A. , Sadachika N. , Miyake M. , et al. , "HiSIM-HV A compact model for simulation of high-voltage MOSFET circuits," Electron Devices, IEEE Transactions on, Vol. 57, No. 10, pp. 2671-2678, 2010.
- [8] Ghasemi Shirvan M. , Fathipour M. , "A compact model for the ion implanted channel

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از موارد افزایش دقت و کاهش هزینه در فرآیند ساخت قطعات الکترونیکی، در اختیار داشتن مدل‌های مناسب برای تخمین رفتار و عملکرد این قطعات، پیش از ساخت است. یکی از قطعات الکترونیکی که در بیشتر مدارات استفاده می‌شود، ترانزیستور ماسفت است. در این مقاله، یک مدل ساده و با دقت بالا برای نمایش عملکرد ترانزیستورهای ماسفت کانال کوتاه ارائه شده است.

برای افزایش دقت مدل پیشنهادی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای محاسبه شاخص‌های مدل استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی، مشخص می‌شود که مدل پیشنهادی پس از تعیین شاخص‌ها توسط الگوریتم جستجوی گرانشی، خطای کمتر و دقت بیشتری نسبت به مدل اصلی دارد. مدل بهینه‌شده، خطا را برای تقریب ویژگی BSIM3 در تکنولوژی ۱۳۰ نانومتر و ویژگی TSMC_CM018RF در تکنولوژی ۱۸۰ نانومتر به ترتیب از مقدارهای ۰/۰۹۵ و ۰/۱۰۹ در مدل اصلی به مقدارهای ۰/۰۷۹ و ۰/۰۸۰ کاهش داده است. مزیت مهم الگوریتم جستجوی گرانشی نسبت به دیگر الگوریتم‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی مدل پیشنهادی این است که این الگوریتم دقت را هم در ناحیه خطی و هم در ناحیه اشباع، در مدل بهبودیافته افزایش داده است.

- Navarro D. , Suzuki G. , Takeda Y. , Miyake M. , et al. , "HiSIM2: Advanced MOSFET model valid for RF circuit simulation," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, Vol. 53, No. 9, pp. 1994-2007, 2006.
- [21] Cheng Y. , Hu C. , "MOSFET modeling and BSIM3 user's guide": Springer, 1999.
- [22] Zhang Q. , Liou J. J. , McMacken J. R. , Thomson J. , Layman P. , "SPICE modeling and quick estimation of MOSFET mismatch based on BSIM3 model and parametric tests," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, Vol. 36, No. 10, pp. 1592-1595, 2001.
- [23] Cheng Y. , Deen M. J. , Chen C. H. , "MOSFET modeling for RF IC design," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, Vol. 52, No. 7, pp. 1286-1303, 2005.
- [24] Houck C. R. , Joines J. A. , Kay M. G. , "A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation," *NCSU-IE TR*, Vol. 95, No. 7, 1995.
- [25] Kennedy J. , R. Eberhart C. , "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," *Computational Cybernetics and Simulation. , IEEE International Conference on*, pp. 4104-4108, 1997.
- [26] Kennedy J. , "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of Machine Learning*, ed: Springer, pp. 760-766, 2010.
- [27] Rashedi E. , Nezamabadi-Pour H. , Saryazdi S. , "BGSA: binary gravitational search algorithm," *Natural Computing*, Vol. 9, No. 3, pp. 727-745, 2010.
- LDMOS transistor," *Solid State Sciences*, Vol. 14, No. 4, pp. 471-475, 2012.
- [9] Gildenblat G. , *Compact modeling: principles, techniques and applications*: Springer, 2010.
- [10] Sakurai T. , Newton A. R. , "A simple MOSFET model for circuit analysis," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, Vol. 38 ,No. 4, pp. 887-894, 1991.
- [11] Abbasian A. , Taherzadeh-Sani M. , Amelifard B. , Afzali-Kusha A. , "Modeling of MOS transistors based on genetic algorithm and simulated annealing," in *Circuits and Systems. IEEE International Symposium on*, pp. 6218-6221, 2005.
- [12] Molaei Emamzadeh M. , Hakimi A. , Nezamabadi-Pour H. , "the optimization of the large signal models for high-speed transistors with numerical methods in genetic algorithms" *Computer society of Iran*, 2003.
- [13] Li Y. , "An automatic parameter extraction technique for advanced CMOS device modeling using genetic algorithm," *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, No. 4, pp. 260-272, 2007.
- [14] Thakker R. , Gandhi N. , Patil M. , Anil K. , "Parameter extraction for PSP MOSFET model using particle swarm optimization," in *Physics of Semiconductor Devices, International Workshop on*, pp. 130-133, 2007.
- [15] Thakker R. A. , Patil M. B. , Anil K. , "Parameter extraction for PSP MOSFET model using hierarchical particle swarm optimization," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 22, No. 2, pp. 317-328, 2009.
- [16] Rashedi E. , Nezamabadi-Pour H. , Saryazdi S. , "GSA: a gravitational search algorithm," *Information sciences*, Vol. 179, No. 13, pp. 2232-2248, 2009.
- [17] Veeraraghavan S. , Fossum J. G. , "Short-channel effects in SOI MOSFETs," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, Vol. 36, No. 3, pp. 522-528, 1989.
- [18] Lime F. , Iniguez B. , Moldovan O. , "A quasi-two-dimensional compact drain-current model for undoped symmetric double-gate MOSFETs including short-channel effects," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, Vol. 55, No. 6, pp. 1441-1448, 2008.
- [19] Cerdeira A. , Iniguez B. , Estrada M. , "Compact model for short channel symmetric doped double-gate MOSFETs," *Solid-State Electronics*, Vol. 52, No. 7, pp. 1064-1070, 2008.
- [20] Miura-Mattausch M. , Sadachika N. ,

زیر نویس ها

¹ Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

² Short channel Mosfets

³ Optimization Algorithms

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Particle Swarm Optimization

⁶ Gravitational Search Algorithm

⁷ Advanced Design System

