مهدی گردی ارمکی، سید ابراهیم حسینی و محمدکاظم انوری فرد

چکیده: در این مقاله روش جدید و کارآمدی برای مدلسازی دقیق افزارههای نیمههادی با استفاده از مدل تقریبی و به کمک شبکه عصبی ارائه شده است. بر خلاف مدلهای دقیق که دارای پیچیدگی بالا و هزینه زمانی و پردازشی زیادی هستند، روش پیشنهادی از پیچیدگی کمتر و سرعت پردازش بیشتری برخوردار است. در این روش از شبکه عصبی RBF برای محاسبه پارامتر اصلاحی در مدل نفوذ – رانش استفاده شده است. بدین صورت حل مدل تقریبی اصلاح شده منجر به جواب دقیق می شود. روش پیشنهادی ابتدا برای دیود n-i-n سیلیکونی به صورت یک بعدی و سپس برای ترانزیستور اثر میدانی سیلیکونی به صورت دوبعدی برای دو حالت درونیابی و برونیابی در رنج محدود، شبیه سازی شده است که نتایج آن برای متغیرهای اساسی مدل، مثل توزیع الکترون و پتانسیل در طول افزاره در ولتاژهای مختلف، دقت بالای روش پیشنهادی را تایید میکنند.

کلید واژه: شبکه عصبی RBF، نگاشت فضایی عصبی، مدل سازی نیمههادی، معادله بولتزمن.

۱- مقدمه

مدلسازی افزارههای نیمههادی نقش مهمی در بهبود روشهای طراحی و درک بهتر آنها دارد. لذا این روشها همواره در حال تکامل میباشند. برای بهدست آوردن پارامترهای نیمههادی دو گروه کلی برای روشهای مدلسازی میتوان متصور شد: ۱- استفاده از مدل تقریبی که منجر به حل نادقیق و تقریبی پارامترهای نیمههادی میشود. ۲- استفاده از مدل دقیق که البته در کنار دقت، پیچیدگی بیشتری دارند و مستلزم صرف زمان و هزینه پردازشی بالاتری هستند. اما در مدل تقریبی علی رغم داشتن نقص نادقیق ودن، پیچیدگی مسأله کمتر و سرعت محاسبات بیشتر میباشد.

از زمان بهوجود آمدن افزارههای نیمههادی تاکنون، سرعت آنها افزایش چشم گیری پیدا کرده و طول کانال این افزارهها همواره کوچک تر شده است، بهطوری که طول کانال افزارههای نیمههادی کنونی، در مرز ۴۵ نانومتر قرار دارد [۱] و [۲]. هرچه طول کانال کوچک تر شود، تفاوت نتایج حاصل از روش مدلسازی دقیق و تقریبی افزایش می یابد، به طوری که در افزارههای با طول کانال خیلی کوچک حتماً باید اثرات مرتبه بالا و کوانتمی اعمال شود.

شبکههای عصبی مصنوعی، ابزارهای محاسباتی هوشمندی هستند که تاکنون جهت مدلسازی، شبیهسازی و بهینهسازی مدارات فرکانس بالا [۳]، مدلسازی و بهینهسازی اتصالات داخلی مدارات VLSI [۴] و

این مقاله در تاریخ ۱۲ مرداد ماه ۱۳۸۸ دریافت و در تاریخ ۱۰ خرداد ماه ۱۳۸۹ بازنگری شد.

سید ابراهیم حسینی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، سبزوار، کدپستی ۴۶۱۷۶۳۸۴۵۴ (email: ehosseini@sttu.ac.ir).

محمدکاظم انوری فرد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، سبزوار، کدپستی ۹۶۱۷۶۳۸۴۵۴ (email: m.anvarifard@gmail.com).

تقویت کنندههای فرکانس بالا [۵] استفاده شدهاند. همچنین با این روشها مدلسازی عملکرد غیر خطی MOSFET ، MOSFET و HEMT نیز در [۶] و [۷] بررسی شده است. در [۸] نیز پاسخ گذرای دروازههای منطقی MOSFET از نوع GaAs با روش MLP مدلسازی و بررسی شده است.

در این مقاله هدف، پیداکردن نگاشت فضایی عصبی مابین مدل تقریبی و مدل دقیق ادوات نیمههادی است تا بدین صورت پارامترهای نادقیق بهدست آمده توسط مدل تقریبی به پارامترهای دقیق تر تبدیل شوند.

با توجه به ماهیت غیر خطی معادلات نیمههادی، این نگاشت بر مبنای شبکه عصبی میباشد. نگاشت فضایی عصبی (NSM) از سال ۱۹۹۹ تاکنون کاربرد وسیعی در طراحی مدارات فرکانس بالا پیدا کرده است [۹] و [۱۰].

در بخش ۲ این مقاله دو روش مدل سازی تقریبی و دقیق به کار رفته، معرفی شده است. سپس در بخش ۳ خصوصیات شبکه عصبی پیشنهادی و نحوه مدل سازی توضیح داده شده است. همچنین در بخش ۴ نیز نتایج شبیه سازی برای دیود n-i-n در حالت یک بعدی بررسی شده است.

۲- مدل تقریبی و دقیق

معادله انتقال بولتزمن در شبیهسازی افزارههای نیمههادی، کاربردی وسیع دارد [۱۱]. روش متداول حل معادله بولتزمن استفاده از مومنتمههای معادله موازنه (بقا) میباشد [۱۲]. این معادلات عبارتند از

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla .(n \mathbf{v}) = G \tag{(1)}$$

$$\frac{\partial (m^* n \mathbf{v})}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla .(w) + qn \mathbf{E} = \frac{-m^* n \mathbf{v}}{\tau_p}$$
(Y)

$$\frac{\partial (nw)}{\partial t} = qn \mathbf{v} \mathbf{E} - \nabla .(nw \mathbf{v} + nK_B T \mathbf{v}) - \frac{n(w - w)}{\tau_w} + wG$$
(7)

که (۱)، (۲) و (۳) بهترتیب معادله بقای دره، بقای مومنتم و بقای انرژی m میباشد. در روابط فوق ($w = \cdot_{\lambda} \Omega(mv^{\dagger} + \pi kT)$ نرخ بازترکیب، m میباشد. در روابط فوق (v سرعت الکترون، p اندازه بار الکترون، \mathbf{E} میدان جرم مؤثر الکترون، v سرعت الکترون، p زمان واهلش مومنتم⁽ میباشد. برای مدل سازی پارامترهای نیمههادی، معادلات بالا به همراه معادله پواسون حل می شوند

$$\nabla^{\mathsf{Y}}\Psi = -\frac{q}{\varepsilon}(N_D - n) \tag{9}$$

در صورتی که دمای الکترون (انرژی الکترون) ثابت فرض شود دیگر نیازی به حل (۳) نخواهد بود و یک مدل تقریبی برای شبیهسازی بهدست میآید. مدل تقریبی آسانتر و سریعتر است، اما در شبیهسازی افزارههای

1. Relaxation Time

مهدی گردی ارمکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، سبزوار، کدپستی ۹۶۱۷۶۳۸۴۵۴ (email: me.ko.ar@gmail.com).



شکل ۱: نمودار شبکه عصبی RBF به کار رفته.

با ابعاد کوچک دقت کافی را ندارد. استفاده از معادله انرژی دقت شبیه سازی را افزایش می دهد، اما از طرفی زمان شبیه سازی بیشتر شده و گذشته از آن پیچیدگی حل عددی افزایش می یابد. پس در این تحقیق، مدل تقریبی حل هم زمان معادلات (۱)، (۲) و (۴) در نظر گرفته شده است. در این مدل تقریبی جریان در جهت x در حالت پایدار، از دو معادله اول چنین به دست می آید

$$J_{x} = q \,\mu_{x} n E_{x} + q D_{x} \,\frac{\partial n}{\partial x} \tag{(a)}$$

x که μ_x و D_x بهترتیب قابلیت تحرک و ضریب نفوذ الکترون در جهت x میباشند. همچنین در مدل دقیق نیز حل همزمان معادلات (۱) تا (۴) در نظر شده گرفته است که در این حالت جریان پایدار در جهت x چنین بهدست میآید

$$J_{x} = q \,\mu_{x} \, nE_{x} - Sq \,\mu_{x} \,K_{B}T \,\frac{\partial n}{\partial x} - Sq \,\mu_{x} \,K_{B}T \,\frac{\partial T_{x}}{\partial x} \qquad (\mathcal{F})$$

که S فلوی انرژی می باشد. با توجه به این که محدوده تغییرات متغیرها بسیار بزرگ است، تغییر مقیاس در متغیرها صورت گرفته و برای حل عددی معادلات از روش تفاضل محدود استفاده شده است. به منظور افزایش همگرایی معادلات در تغییرات شدید میدان الکتریکی، معادله جریان باید به فرم نمایی نوشته شود، بنابراین (۵) در حالت گسسته چنین خواهد بود

$$J_{x} = \frac{D_{x}}{h} (FB (-\beta_{x} \Delta v) n_{i,j} - FB (\beta_{x} \Delta v) n_{i+i,j})$$
(Y)

که β_x و FB چنین تعریف می شود

$$\beta_x = \frac{\mu_x}{D_x}$$
, $FB(x) = \frac{x}{1 - \exp(x)}$

۳- نگاشت فضایی عصبی

۳-۱ شبکه عصبی RBF

توانایی یادگیری و تعمیم دادهها، خاصیت پردازش غیر خطی و ساختار پردازش موازی همگی مزایایی است که باعث می شود از شبکههای عصبی در مدل سازی با ابعاد بالا و مسایل غیر خطی زیادی از جمله معادلات نیمههادی استفاده شود [۱۳].

یکی از مهمترین شبکههای عصبی مورد استفاده در مسایل تخمین تابع، شبکه عصبی RBF است. این نوع شبکه نسبت به شبکههای عصبی پرسپترون پیشخوردی، مزایای زیادی دارد [۱۴]. بر خلاف شبکههای RBF که میتوانند دارای لایههای متوالی متعددی باشند، شبکه RBF تنها از سه لایه ثابت تشکیل شده است. لایه ورودی که محل تزریق سیگنالهای ورودی به شبکه است؛ لایه میانی یا طبقه RBF که شامل توابع شعاعی پایه میشود و لایه خروجی که ترکیبی خطی از کلیه SID.ir

خروجیهای طبقه RBF را میسازد. در اکثر موارد از توابع گوسی در لایه میانی استفاده میشود که این توابع با دو پارامتر مرکز گوسی و واریانس یا میزان گستردگی گوسی شناسایی میشوند. ساختمان یک شبکه RBF در شکل ۱ مشاهده میشود.

عملیاتی که در این شبکه انجام می شود در فرم ماتریسی به صورت (۸) و (۹) است

$$d_i(P) = \sum_{j=1}^{N} \varphi_j(P) w_{ij} \qquad (A)$$

$$\varphi_{j} = \exp\left(\frac{-\gamma}{\gamma \sigma_{j}^{\gamma}} \left\| P - C_{j} \right\|^{\gamma}\right) \tag{9}$$

که در آن $d_i(P)$ خروجی iام شبکه و $\varphi_j \neq \varphi_j$ خروجی گره RBF ام j RBF بهازای بردار ورودی P است. w_{ij} نیز اتصال سیناپسی میان آن دو است. تعداد کل نرونهای لایه پنهان نیز N است. بردار j را مرکز گوسی مینامیم و σ_j نیز مشخص کننده میزان گستردگی گوسی است.

آموزش شبکه مذکور بدین صورت است که باید مقادیر مناسبی را σ_j و σ_j برای یافته و وزنهای لایه خطی آخر نیز به درستی تنظیم شوند. همچنین تعداد نرونها در لایه میانی نیز باید مشخص شود.

۲-۳ نحوه ایجاد نگاشت

یکی از روش ها برای ایجاد نگاشت ما بین مدل دقیق و تقریبی، اصلاح پارامترهایی از مدل تقریبی است که باعث شود حل مدل تقریبی به نتایج دقیق تری منجر شود. در نگاشت فضایی پیشنهادی، توزیع پارامتر β در (۲) با شبکه عصبی بهنحوی مدلسازی می شود که نتایج حل مدل تقریبی و دقیق با هم برابر (یا بسیار نزدیک) باشند. شکل ۲ نمودار نگاشت فضایی عصبی پیشنهادی را نشان می دهد.

با توجه به (۴) و (۲) برای یک افزاره تکقطبی حامل الکترون، متغیرهای اصلی، توزیع الکترون (*n*)، توزیع پتانسیل (ψ) و پارامتر اصلاحی (توزیع β) می اشند. بنابراین اگر بتوان یکی از دو متغیر *n* یا ψ را با پارامتر اصلاحی β دقیق تر محاسبه کرد، متغیر دیگر نیز بهصورت دقیق تر از حل معادله پواسون به دست می آید. همچنین از آنجایی که $\Delta \alpha$ در (۲) تعیین کننده میزان جریان است، بنابراین برای آموزش β از توزیع ψ استفاده شده است. برای این که تضمین شود جریانها در دو مدل دقیق و تقریبی با هم برابر می شوند، بعد از هر محاسبه β جریان نیز از (۲) به دست آمده و با جریان دقیق مقایسه می شود. بنابراین اختلاف جریانها هم در آموزش شبکه مؤثر است.

شبکه عصبی مورد استفاده RBF میباشد، زیرا در صورت آموزش صحیح و انتخاب مناسب پارامترها، برای یادگیری هر تابعی با تعداد محدودی ناپیوستگی و هر دقتی کفایت میکند [۱۴] و [۱۵]. از آنجا که امکان محاسبه با دقت مناسب برای مشتقات جزئی تابع خطا نسبت به پارامترهای مدل وجود ندارد و نیز بهمنظور فرار از کمینههای محلی، از روش آموزش تصادفی برای آموزش شبکه استفاده شده است.

٤- شبیهسازی و نتایج

۱−٤ شبیهسازی دیود n-i-n

n-i در این قسمت نتایج شبیه سازی نگاشت فضایی عصبی برای دیود n-n n- از جنس سیلیکون در حالت یک بعدی ارائه شده است. طول دیود nm ۱۰۰ با ۶۰ نقطه مش که به صورت یکنواخت در آن توزیع شده است. مشخصات دیود مذکور در شکل ۳ آمده است.



برای شبیه سازی ابتدا با مدل تقریبی و دقیق، مقادیر n و ψ برای ولتاژهای بایاس ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۲ با گام ۲۰۰۵ ولت محاسبه و ذخیره شده است. از ۲۳ نمونه مذکور، ولتاژهای ۲۵/۵ – ۲۵/۵ – ۲۰/۵ – ۱/۱۵ ولت بهعنوان داده آزمون و بقیه بهعنوان داده آموزش استفاده شده اند. همچنین برای حالت برون یابی ولتاژ ۱/۲۵ و ۱/۳۰ ولت نیز به نمونه های آزمون فوق افزوده شدند.

بُعد ورودی و خروجی شبکه عصبی RBF استفادهشده ۶۰ و نیز از ۱۰ نرون در لایه پنهان استفاده شده و آموزش شبکه با الگوریتم شبیهسازی گرمایی [۱۶] صورت گرفته است.

شکلهای ۴ و ۵ چگالی الکترون و پتانسیل را برای ولتاژهای آزمون برای دو حالت مدل دقیق و مدل پیشنهادی (نگاشت فضایی عصبی) نشان میدهد.

www.SID.ir

شکل ۶۰ توزیع β (خروجی شبکه عصبی RBF) برای ولتاژ بایاس ۱٬۱۵ ولت به عنوان نمونه.

30 Mesh 40

50

60

04

10

20

شکل \mathcal{F} چگونگی توزیع β را برای یکی از نمونههای آزمون نشان میدهد. از روی توزیع β میتوان به چگونگی تصحیح مدل تقریبی توسط β پی برد.

همان طور که دو شکل ۴ و ۵ نشان می دهند، نتایج مدل اصلاح شده بسیار به مدل دقیق نزدیک است. جدول ۱ مقادیر نرم خطا در ولتاژهای مختلف و نیز درصد خطای ایجادشده با مدل پیشنهادی برای دو حالت چگالی الکترون و پتانسیل را نشان می دهد.



 $V_{_b}=\cdot_{,\Delta}$ شکل ۱۰: توزیع پتانسیل در طول ترانزیستور (زیر گیت) برای ولتاژهای $V_{_b}=\cdot_{,\Delta}$ و ۲.



 $W_{_b}=$ ۱ شکل ۱۱: توزیع الکترون در طول ترانزیستور (زیر گیت) برای ولتاژهای $V_{_b}=$ ۱. و $V_{_g}=$ ۱٫۴

جدول ۱: خطای مدل سازی برای دیود N-I-N سیلیکونی شبیه سازی شده.

ψ توزيع	توزيع n	نرم خطادر ولتاژهای
٠,٠٩	•,• ٣۶	$V_{b} = \cdot$, ۳۵ V
۰ _/ ・۱۶	•,• ٣۶	$V_{_{b}}=\cdot$, ad V
٠ _/ ٠ ١٩	•/• ٣٢	$V_b = \cdot V \Delta V$
•/•))	٠,٠٢	$V_b = \cdot 4 \Delta V$
•,• **	•,• ۴٣	$V_b = 1/1\Delta V$
۰ _/ ・۱۶	•,• 48	$V_b = \gamma r \Delta V$
•/•)	•,• *7	$V_b = 1/\mathbf{r} \cdot \mathbf{V}$

$$V_{gate} = \mathbf{1}_{\mathbf{1}}\mathbf{F}, \mathbf{V}_{ds} = \mathbf{1}_{\mathbf{1}}\mathbf{F}, \mathbf{1}_{\mathbf{1}}\mathbf{F}$$

نيز به مجموعه آزمون افزوده شدند.

بهعلت افزایش همگرایی از دو شبکه عصبی RBF موازی با ۲۰ نرون در لایه پنهان و با بُعد ورودی ۱۶۰ (۸۰×۲۰) و خروجی ۸۰ برای تولید β استفاده شده و آموزش شبکه با الگوریتم شبیهسازی گرمایی [۱۶] صورت گرفته است.

شکلهای ۹ و ۱۰ چگالی الکترون و پتانسیل را برای ولتاژ گیت ۷ ۱،۲ و ولتاژ بایاس ۷ ۰/۵ برای سه حالت مدل تقریبی، مدل دقیق نگاشت فضایی عصبی در زیر گیت (اولین سطر ماتریس دوبعدی) بهعنوان نمونهای از نتیجه درونیابی نشان میدهد.

این دو شکل نشان میدهند که نگاشت به خوبی میتواند نتایج مدل دقیق را تولید کند. این در حالی است که نتایج مدل تقریبی اختلاف قابل توجهی با نتایج دقیق دارد.

شکلهای ۱۱ و ۱۲ چگالی الکترون و پتانسیل را برای ولتاژ گیت ۷ ۱/۴ و ولتاژ بایاس ۷ ۱/۰ بهعنوان نمونهای از نتیجه برونیابی نشان میدهند. در شکل ۱۱ تنها در بخشهای کمی از کانال، اختلاف اندک بین مدل دقیق و نگاشت فضایی عصبی دیده می شود، در حالی که مدل تقریبی نتایج کاملاً نادقیق دارد.



شکل ۲: جریان دیود n-i-n در بایاسهای ۰٫۳۵ – ۰٫۵۵ – ۰٫۷۵ – ۰٫۹۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵ – ۱٫۲۵



شکل ۹: توزیع الکترون در طول ترانزیستور (زیر گیت) برای ولتاژهای $V_{_b}=\cdot_{_0}$ و ۲.
(. $V_{_g}=1_{_0}$

شکل ۷ میزان دقت جریان بهدست آمده توسط نگاشت فضایی عصبی را در مقایسه با مدل تقریبی نشان میدهد. جریان در مدل پیشنهادی از (۷) بهدست آمده است.

۲-٤ شبیهسازی ترانزیستور اثر میدانی

در این قسمت نتایج شبیه سازی نگاشت فضایی عصبی برای ترانزیستور اثر میدانی از جنس سیلیکون در حالت دوبعدی ارائه شده است. طول ترانزیستور nn ۲۰۰ با ۲۰ مش و عرض آن نیز nm ۲۰ با ۸ نقطه مش است که مش ها در آن به طور یکنواخت توزیع شده اند. مشخصات ترانزیستور مذکور در شکل ۸ آمده است.

برای شبیه سازی ابتدا با مدل تقریبی و دقیق، مقادیر دوبعدی n و ψ برای ولتاژهای ۱/۰ تا ۱/۳ ولت با گام ۰/۱ برای گیت و ولتاژ درین محاسبه و ذخیره می شوند. از مجموع ۱۶۹ نمونه مذکور، ۱۸ مجموعه ولتاژیعنی

$$V_{gate} = \cdot_{i} \mathcal{F}, V_{ds} = \cdot_{i} \mathcal{T}, \cdot_{i} \Delta, \cdot_{i} \mathcal{V}, \cdot_{i} A, 1_{i} \Lambda, 1_{i} \mathcal{T} V$$

$$V_{gate} = \cdot_{i} A, V_{ds} = \cdot_{i} \mathcal{T}, \cdot_{i} \mathcal{F}, \cdot_{i} \mathcal{F}, \cdot_{i} \Lambda, 1_{i} \cdot, 1_{i} \mathcal{T} V$$

$$V_{acte} = 1_{i} \mathcal{T}, V_{ds} = \cdot_{i} \mathcal{T}, \cdot_{i} \Delta, \cdot_{i} \mathcal{V}, \cdot_{i} A, 1_{i} \cdot, 1_{i} \mathcal{T} V$$

برای آزمون و مابقی برای آموزش استفاده شده است. نحوه انتخاب نمونههای آزمون با توجه به میزان خطای مدل تقریبی بوده و محدوده ولتاژهایی انتخاب شدهاند که بیشترین خطا را در مدل تقریبی داشته باشند. همچنین برای آزمایش برونیابی شبکه، ۶ ولتاژ



 $W_{_b}=$ ۱ شکل ۱۲: توزیع پتانسیل در طول ترانزیستور (زیر گیت) برای ولتاژهای $V_{_b}=$ ۱/۴ و $V_{_g}=$ ۱/۴



شکل ۱۳: توزیع پارامتر اصلاحی در جهت x برای ولتاژ آزمون ۲٫۳ = V_b و ۱٫۲ = V_g . (سمت چپ شکل)

ازی شده.

شبي	ستور	انزيد	در تر	پتانسیل	توزيع	۱: حطای	جدول	

X	$V_{b}(\mathbf{v})$	۳,۰	۰٫۵	۰ _/ ۲	٠ _/ ٩	١,١	۳/۲	
V Sv	Δ	•/77	•,48	•,YY	١/•٩	۲۳۲/	1/47	
v _{gate} = 1/7 v		•/۱۱	•/11	٠,٠٩	۶، _ا ، ا	۶، _ا ، ا	۰ _/ ۱۳	
JJ	\otimes	۱ <i>/</i> ۶۹	۱/۳۶	١/•٨	٠٫٧۴	• ,89	۰ ٫۹۶	
	$V_{b}(\mathbf{v})$	۰٫۲	۰٫۴	۶٫۰	۰ _/ ۸	۱/۰	١/٢	
$V = \cdot 9 v$	Δ	۱/۸۱	۱/۸۰	۱/٩۶	۲/۲۱	۲/۴۳	۲/۵۴	
gate /		•,7•	٠٬١۵	٠٬١٨	• ،۲۱	٠٬١٨	۰ _/ ۱۶	
	\otimes	۱,۰۵	٠ _/ ٩٢	•,۹٨	۰,۹۸	• ٫۸۷	٠ _/ ٧٩	
	$V_{b}(\mathbf{v})$	۳,۰	۰٫۵	۰ _/ ۲	٠ _/ ٩	١,١	۳/۲	
$V = \lambda \nabla v$	Δ	١٢/٣	۱۰/۴	٨ /٩٩	٨, • ٨	۷٫۴۰	۶٫۸۳	
gate 1/1 v		۰٫۴۱	۰ ٬۴۷	۰,۲۸	• ۲۱	•/۲۷	۰٫۳۶	
	\otimes	+،۵۲	۰٫۶۵	۰,۵۰	•/۴۲	۰/۵۶	۰ _/ ۷۳	
$V_{gate} = V_{j} \mathbf{\hat{r}} \mathbf{v}$	$V_{b}\left(\mathbf{v}\right)$	۲/۰	۴/۴	۶₁۰	•,∧	١/•	٧,٢	
	Δ	۲۰٫۴	22/2	۱۸٫۶	۱۵/۹	۱۴/۰	۲/۶	
		۵/۱۱	۲/۳۸	٥,٠۵	۲/۴۴	۱/۴۰	۱,••	
	\otimes	۱/۴۰	۳,۰۳	•,۷۵	۰ _/ ۹۶	۱,••	•٫٩٠	
Δ					\otimes			
نرم خطا در		نرم خطا در			درصد خطا در			
مدل تقريبي		مدل پیشنهادی			مدل پیشنهادی			

مقدار جریان بهبودیافته نیز از (۲) حاصل می شود. شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب توزیع دو پارامتر اصلاحی β در جهت x (β_x) و در جهت y (β_y) و در جهت β را برای یک ولتاژ بهعنوان نمونه نشان می دهد.

همان طور که شکلهای ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان میدهند، نتایج مدل پیشنهادی بسیار به مدل دقیق نزدیک است. جداول ۲ و ۳ مقادیر نرم خطا در ولتاژهای مختلف و نیز درصد خطای ایجادشده با مدل پیشنهادی را برای دو حالت چگالی الکترون و پتانسیل نشان میدهند که درصد خطای مدل پیشنهادی از فرمول زیر محاسبه شده است

$$\operatorname{Error} = \log\left(\dots \times \frac{RSSE_App}{RSSE_NSM}\right) \tag{(1)}$$



شکل ۱۴: توزیع پارامتر اصلاحی در جهت y برای ولتاژ آزمون ۱ $y_{b} = 1$ و $V_{b} = V_{b}$. (سمت چپ شکل) جدول ۳: خطای توزیع الکترون, در ترانز بستور شبیهسا; ۲, شده.

بحول (۱۰ مصف) توریح (۲ مرون در تر تر تر شید ساری سند)								
	$V_{b}\left(\mathbf{v}\right)$	۰ ٫٣	۰٫۵	۰ ٫۷	+/٩	ν_{ℓ}	١/٣	
$V_{gale} = \cdot / \mathcal{F} \mathbf{v}$	Δ	۱٫۸۶	٣/٧۴	۵٫۷۳	۲/۴۵	۸٫۴۹	<i>٨</i> ,۶۶	
		۱۹٫۶	<i>۱</i> ۶۱ ب	٠٫۴۵	•/٣۶	٠ _/ ۴۹	۰٫۹۵	
	\otimes	۱٬۵۲	١,٢١	٠ _/ ٨٩	۶ <i>۲</i> /۶۸	۰,۷۶	۴, ۱	
	$V_{b}(\mathbf{v})$	٠,٢	۴,۰	<i>ع</i> ار •	۰ _/ ۸	١/•	١/٢	
V _ 9 v	Δ	٣/۶۴	۷٫۸۴	۱۱٫۸	١۴٫٩	۱ <i>۶</i> /۶	۱۷٫۰	
$V_{gate} \equiv \cdot / \langle \nabla \rangle$		۰٫۷۱	۶۸	• _/ YY	• /YY	١,•٧	۰٫۵۹	
	\otimes	١/٢٩	۰ ٫۹۴	۰٫۸۱	۰٫۷۱	۰۸۱	۰٫۵۴	
${V}_{gate} = V_{/} \Upsilon v$	$V_{b}(\mathbf{v})$	۰,٣	۰٫۵	• _/ Y	+/٩	١,١	١/٣	
	Δ	۱۲/۲	۱۵/۶	۱۸٫۶	۲۰٫۷	۲۱٫۵	۲۱/۱	
		۶۸ _/ ۰	۲/۳۱	۱/۸۳	۱/۴۸	۱/۳۷	۲/۲۹	
	\otimes	۰٫۸۳	$\nu_{/}\nu_{V}$	∙ _/ ۹۹	۰,۸۵	۰ _/ ۸۰	۳, ۱	
${V}_{gate}=V/{ m Fv}$	$V_{b}(\mathbf{v})$	۰,۲	۴/	۶٫۰	۰ _/ ۸	١,.	١/٢	
	Δ	١۴٫٣	۲۱,۶	۲۲/۸	۲۳٫۶	۲۴/۱	۲۳/۷	
		٣/٢۵	8,84	٣/٣٠	۶ _/ ۶۷	۵ _/ ۶۹	۴٬۵۰	
	\otimes	۱٫۳۵	١٫۴٩	۱/۱۶	۱٫۴۵	١,٣٧	1/77	
Δ					\otimes			
نرم خطا در		نرم خطا در			درصد خطا در			
مدل تقريبي		مدل پیشنهادی			مدل پیشنهادی			

که در آن پارامتر RSSE_NSM نُرم خطا (جذر مجموع مربعات خطا) در مدل پیشنهادی (نگاشت فضایی عصبی) و RSSE_App نُرم خطا در مدل تقریبی می باشد.

جدول ۴ مقدار خطای جریان (نرمالیزه شده) برای دو مدل تقریبی و مدل نگاشت فضایی در ولتاژهای مختلف را نشان می دهد. همان طور که از این جدول دیده می شود، مدل نگاشت فضایی عصبی به مراتب خطایی کمتر از مدل تقریبی دارد.

همچنین شبیهسازی این ترانزیستور با طول ۳۰۰ نانومتر نیز انجام شده است و نتایج مشابهی بهدست آمده است. با توجه به شباهت بسیار زیاد نتایج این دو ترانزیستور و نیز جلوگیری از طولانیشدن و تکراریشدن قسمت نتایج، از اضافه کردن آن خودداری شده است.

٥- نتيجه گيرى

در این مقاله روش جدیدی برای مدلسازی افزارههای نیمههادی با پیچیدگی کمتر توسط نگاشت فضایی عصبی ارائه شده است. برای این منظور از یک شبکه عصبی پیشخور تکلایه جهت مدلسازی پارامتر اصلاحی در معادله نفوذ – رانش استفاده شده است. دو افزاره دیود n-i-n سیلیکونی و ترانزیستور اثر میدانی سیلیکونی در ولتاژهای مختلف شبیهسازی شدهاند که نتایج برای دو حالت درونیابی و برونیابی در رنج

جدول ۴: خطای جریان نرمالیزه شده ترانزیستور برای مدل تقریبی و مدل نگاشت فضایی عصبی.

	-	$V_{b}(\mathbf{v})$						
		٠/٣	۰,۵	• _/ Y	•,٩	١,١	۱/۳	
	مدل تقريبي	۰/۰۴۸	•,• ૧ ۴	۰٬۱۵۳	•,777	•/٣١۴	٠٬۴۱۷	
• //	مدل NSM	•/•))	۰٬۰۱۴	۰ _/ ۰۱۶	۰٬۰۱۵	•،• ۱۸	•,•٣٩	
	مدل تقريبي	١/٢١١	۲,۲۳۱	٣/٠١٢	۳ <i>/۶</i> ۷۹	۴,۲۸۷	۴٫۸۵۶	
1/1	مدل NSM	•/•9۴	•,741	•,۲۷۳	•/۲۵۲	•/٣•۴	•,۳۵۵	
		V_b (v)						
		۰٫۲	۴,۰	۶٫۶	۰ _/ ۸	١,•	١/٢	
. 9	مدل تقريبي	۰,۲۴۸	٠٫۵٨٩	٠ _/ ٩٠٧	1/228	۱/۵۴۹	$\lambda_{/}$ AYY	
•/(مدل NSM	•,• ۴ ٧	۰,·۸۲	٠/•٩١	٠,٠ ٨ ٩	•/١•٢	۰٬۱۸۱	
\ 1 6	مدل تقريبي	• ۶۸٫۰	۲/۴۸۲	۳/۹۲۳	۵/۰۲۷	۵/۹۲۲	۶٫۷۰۴	
1/1	مدل NSM	•/184	•,٣٢•	•,۲۹١	•/۴۲۳	• /۳۸۱	۰,۵۳۹	
	۶، ۶ ۱٫۲ ۰٫۹	مدل تقریبی ۶٫۶ مدل تقریبی ۱٫۶ مدل تقریبی ۱٫۲ مدل تقریبی ۰٫۹ مدل تقریبی ۱٫۴ مدل تقریبی ۱٫۴	۰٫۳ ۰٫۳۸ مدل تقریبی ۶٫۰ ۱٫۰۱۸ مدل تقریبی ۶٫۰ ۱٫۲۱۱ مدل تقریبی ۲٫۱ ۱٫۲۱ مدل تقریبی ۲٫۲ ۰٫۲۴۸ مدل تقریبی ۹٫۰ ۱٫۴۲ مدل تقریبی ۹٫۰ ۱٫۴۲ مدل تقریبی ۱٫۴	۰٫۳ ۰٫۵ ۰٫۰۴۸ ۰٫۰۹۴ مدل تقریبی ۶٫۰ ۱٬۰۱۸ ۰٫۰۹۴ مدل تقریبی ۶٫۰ ۱٬۰۱۸ ۲٫۲۳۱ مدل تقریبی ۲٫۲۳ ۱٫۲۲ ۰٫۲۴۹ مدل تقریبی ۹٫۰ ۰٫۲۴۸ ۰٫۲۴۸ مدل تقریبی ۹٫۰ ۰٫۰۴۲ ۰٫۲۴۸ مدل تقریبی ۹٫۰ ۱٫۴۸ ۰٫۸۶۰ مدل تقریبی ۹٫۰	V_b V_b	$V_b(v)$ $V_b(v)$ $V_b(v)$ $V_b(v)$ V_{0}	V_b (v) $V_$	

- [13] S. Hatami, M. Y. Azizi, H. R. Bahrami, D. Motavalizadeh, and A. Afzali Kusha, "Accurate and efficient modeling of SOI MOSFET with technology independent neural networks," *IEEE Trans. on Computer Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 23, no. 11, pp. 1580-1587, Nov. 2004.
- [14] S. Heykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, 2nd Edition, 1998.
- [15] C. Christodoulou and M. Georgiopoulos, *Applications of Neural Networks in Electromagnetics*, Artech House Publishers, 2001.
- [16] B. Goffe, G. Ferrier, and J. Rogers, "Global optimization of statistical function with simulated annealing," *J. Econometrics*, vol. 60, no. 1-2, pp. 65-100, Jan./Feb. 1994.

مهدی گردی ارمکی در سال ۱۳۸۴ مدرک کاردانی را در رشته الکترونیک ناوبری هواپیما (اویونیک) از دانشگاه صنعت هواپیمایی کشوری و نیز به ترتیب در سالهای ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق را در گرایش الکترونیک از دانشگاه تربیت معلم سبزوار اخذ کرده است. وی تجربیاتی در زمینه مدلسازی ادوات نیمههادی و مدارات مجتمع و برخی روشهای هوش مصنوعی داشته و علاقه فراوانی به تلفیق روشهای هوشمند با انواع روشهای کلاسیک در حوزه الکترونیک جهت افزایش کارایی دارد.

سید ابراهیم حسینی در سال ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صتعتی اصفهان و در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. سپس برای ادامه تحصیل در دوره دکترای مهندسی برق وارد دانشگاه صنعتی شریف گردید و در سال ۱۳۸۰ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق- الکترونیک با گرایش نیمه هادی از دانشگاه مذکور گردید. دکتر حسینی از سال ۱۳۸۰ در دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود مشغول به فعالیت گردید. سپس در سال ۱۳۸۴ به دانشکده فنی دانشگاه تربیت معلم سبزوار پیوست و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده میباشد. زمینههای علمی مورد علاقه نامبرده انتقال الکترون در ادوات نیمههادی، شبیه سازی ادوات نیمههادی، روشهای عددی و ساختارهای نوین ترازیستوری میباشد.

محمد کاظم انوری فرد در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت معلم سبزوار دریافت نمود. از سال ۱۳۸۶ الی ۱۳۸۸ نامبرده ضمن تحصیل به عنوان مدرس دانشگاه در دانشگاه تربیت معلم سبزوار مشغول به کار شد و هماکنون نیز مدرس دانشگاه آزاد رامسر و آموزشکده فنی رامسر و موسسه غیرانتفاعی آیندگان تنکابن میباشد. زمینههای علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند افزارهای نیمههادی، روش های تحلیلی در ارزیابی ادوات و همچنین پردازش تصویر میباشد. محدود، نشان دهنده کارایی بالای مدل پیشنهادی برای پارامترهای مختلف افزاره از قبیل توزیع الکترون و پتانسیل می باشد.

مراجع

- A. Khakifirooz and D. Antoniadis, "MOSFET performance scaling, part I: historical trends," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 6, pp. 1401-1408, Nov. 2008.
- [2] A. Khakifirooz and D. Antoniadis, "MOSFET performance scaling, part II: feture directions," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 6, pp. 1391-1400, Nov. 2008.
- [3] Q. J. Zhang and K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*, Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [4] A. Veluswami, M. S. Nakhla, and Q. J. Zhang, "The application of neural networks to EM-based simulation and optimization of interconnects in high-speed VLSI circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 5, pp. 712-723, May 1997.
- [5] Y. Harkouss, J. Rousset, H. Chehade, E. Ngoya, D. Barataud, and J. P. Teyssier, "The use of artificial neural networks in nonlinear microwave devices and circuits modeling: an application to telecommunication system design," *Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 198-215, May 1999.
 [6] M. Lazaro, I. Santamaria, and C. Pantaleon, "NNs for large and
- [6] M. Lazaro, I. Santamaria, and C. Pantaleon, "NNs for large and small-signal modeling of MESFET/HEMT transistors," *IEEE Trans.* on Circuits Measure, vol. 50, no. 6, pp. 1587-1593, Dec. 2001.
- [7] S. Goasguen and S. M. El-Ghazaly, "A practical large signal global modeling simulation of a microwave amplifier using artificial neural network," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 7, pp. 273-275, Jul. 2000.
- [8] P. H. da F. Silva, M. A. B. de Melo, and A. D. D. Neto, "Using neural network models for efficient GaAs MESFET time domain nonlinear circuit analysis," in *Proc. IJCNN*, vol. 3pp. 2282-2287, 2002.
- [9] J. W. Bandler, M. A. Ismail, J. E. Rayas Sanchez, and Q. J. Zhang, "Neuromodeling of microwave circuits exploiting space - mapping technology," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 12, pp. 2417-2427, Dec. 1999.
- [10] L. Zhang, J. Xu, M. C. E. Yagoub, R. T. Ding, and Q. J. Zhang, "Efficient analytical formulation and sensitivity analysis of neurospace mapping for nonlinear microwave device modeling," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2752-2767, Sep. 2005.
- [11] M. Lundstrom, Fundamentals of Carrier Transport, 2nd ed., Cambridge University Press, 2000.
- [12] S. E. Hosseini and R. Faez, "Novel quantum hydrodynamic equations for semiconductor devices," *Jap. J. Appl. Phys.*, pt. 1, vol. 41, n. 3A, 1300-1304, 15 Mar. 2002.