KNO-1102-4406

# یک مدل ساده اما دقیق اتصالات نانولوله کربنی

هادی صمدی[۱] h.samadimehreh@email.kntu.ac.ir
فرامرز آقائی لیاولی[۲] f.aghaei1989@gmail.com
[۱] کارشناسی ارشد برق، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
[۲] گروه برق، شرکت هل، شهر صنعتی البرز، قزوین، ایران

## چکیده

در این مقاله ما یک مدل ساده ولی دقیق از نانولوله کربنی فلزی ارائه داده‌ایم. با استفاده از برازش منحنی ضرایبی در مدل ساده‌تر اضافه کرده‌ایم، که وجود این ضرایب باعث شد مدل پیشنهادی ما نزدیک به ۶ در صد خطا در مقایسه با مدل پیچیده تر بشود.

کلمات کلیدی: نانولوله کربنی، CNT، اتصالات، Veriloge-a، HSPICE

## ۱.مقدمه

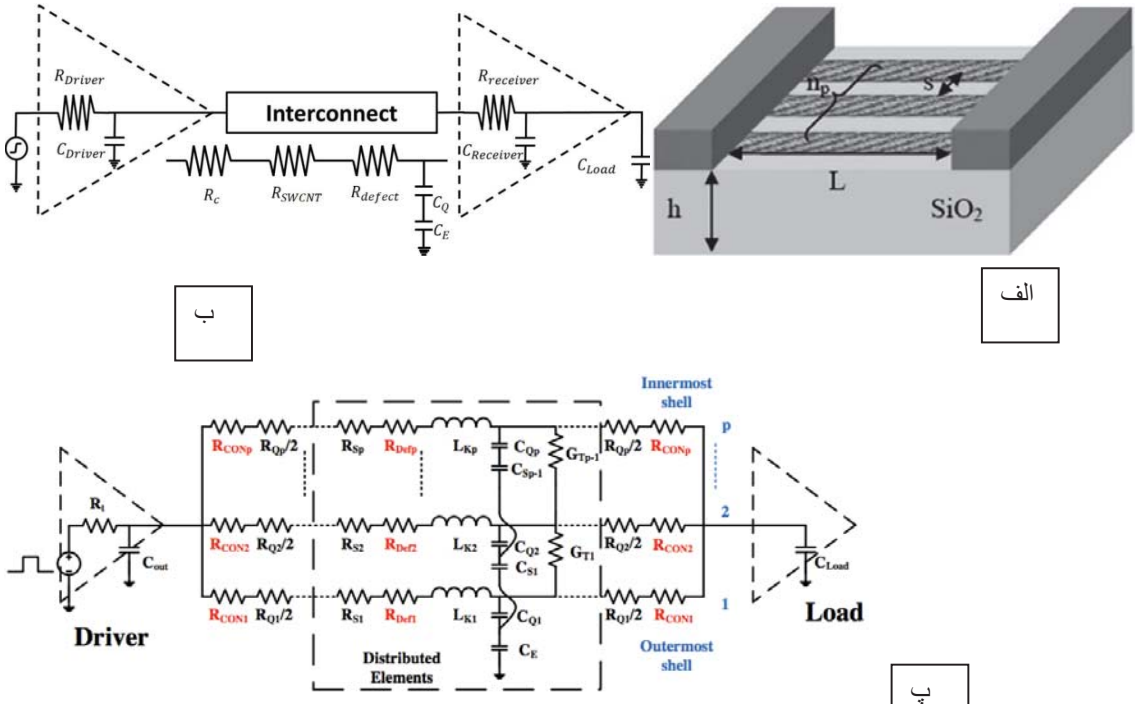
در مدارهای مجتمع (IC) محاسبه تاخیر اتصالات امری اجتناب ناپذیر است. یک مدل ساده می‌تواند کمک زیادی به طراح بکند. مدل-های پیچیده‌تر هزینه محاسباتی بالایی دارد. جالب است بدانید با مدلهای ساده‌تر به کمک برازش منحنی[۸]می‌توان به دقت بالای مدلهای پیچیده‌تر با محاسبات کمتر دست پیدا کرد[۱]. مدلهای زیادی از اتصالات نانولوله کربنی (CNT) در مقاله‌های مختلف به چاپ رسیده است. یک مدل ساده در [۲] به زبان سخت افزاری Veriloge-a قابل دانلود است. کدهای Veriloge-a با شبیه‌ساز مداری HSPICE قابل شبیه‌سازی هستند. مدل پیچیده تری از اتصالات CNT در [۳] ارائه شده است. ما در این مقاله می‌خواهیم یک مدل ساده RC با دقت بالای مدل‌های پیچیده‌تر ارائه کنیم.

ما با استفاده از نرم‌افزار HSPICE و کد Veriloge-a مدل پیچیده داده های زیادی بدست می‌آوریم. ایده‌ی اصلی با بدست آوردن رگرسیون خطی چندگانه[۴] از داده‌ها بدست می‌آید.

## ۲.مدل اتصالات CNT

در شکل یک نمای جانبی و مدل اتصالات CNT [۲] و [۳] آورده شده است.

[8] Curve fitting




**شکل ۱: (الف) نمای جانبی از اتصالات CNT [۵]، (ب) مدل RC ساده اتصالات CNT [۲]، (پ) مدل RLC پیچیده اتصالات CNT [۳]**

مقاومت یک نانولوله کربنی تک دیواره (SWCNT) از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۲]:

$$R_{SWCNT} = \frac{h}{4e^2}\left(1 + \frac{L}{L_{MFP}}\right) + R_C \quad (1)$$

که در آن $R_C$ مقاومت ناحیه تماس می‌باشد، که ایده‌آل در نظرگرفته شده است. $L_{MFT}$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_{MFP}^{metallic} = \frac{D\sqrt{3}\psi^2}{2\sigma_\varepsilon{}^2 + 9\sigma_\psi{}^2} \quad (2)$$

که در آن برای CNT دست نخورده $\sigma_\varepsilon$ =0.04 ev و $\sigma_\psi$=0 و برای CNT آلاییده شده $\sigma_\varepsilon$ =0 و $\sigma_\psi$=0.06 ev.

مقدار خازن SWCNT از رابطه زیر بدست می‌آید[۲]:

$$C_Q = 4\frac{2e^2}{h\vartheta_F} \quad (4)$$

$$C_E = \frac{2\pi\varepsilon}{ln\left(\frac{H}{D}\right)} \quad (5)$$

$$C_{SWCNT} = \frac{C_Q C_E}{C_Q + C_E} \quad (6)$$

که در آن $V_F \approx 8 10^5$ سرعت فرمی است. بقیه نمادهای استفاده شده در جدول یک آورده شده است.

| Parameter name | Physical meaning | Values |
|---|---|---|
| L | SWCNT Length | User dependency, should be reasonable for experimental process. |
| D | SWCNT Diameter | User dependency, should be reasonable for experimental process. |
| H | Distance from SWCNT line to Ground (used for electrostatic capacitance calculation) | Fixed in the model for 1μm. User can define upon the experimental possibility. |
| Rc | Contact resistance | User dependency, experimental measurement dependency. |
| Nc | Doping enhancement parameter (Number of conducting channels on SWCNT) | Nc=2 significate for pristine SWCNT. Nc is suggested to vary up to 10. |

**جدول ۱: نمادهای استفاده شده در روابط مقاومت و خازن مدل نانو لوله کربنی[۲]**

### مدل ساده و دقیق پیشنهادی

تاخیر را حاصلضرب مقاومت و خازن می‌دانیم:

R×Cτ=

تاخیر برازش شده پیشنهاد شده ما از رابطه زیر بدست می‌آید. که در آن پارامترهای A , B و C با روش رگرسیون خطی چندگانه از مقدار ۱۰ داده‌های محاسبه شده مدل [۳] توسط نرم افزار HSPICE حاصل می‌شود. با استفاده از قابلیت trade linear در نرم افزار EXCLE ضرایب برازش A=1.05، B=1.02 و C=0.05 شدند.

$$F\tau = R.C = \left(\frac{Ah}{4e^2}\left(1+\frac{L}{L_{MFP}}\right)+R_C\right).\left(\frac{BC_QC_E}{C_Q+C_E}\right)+C$$

### شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه سازی پاسخ پله در شکل زیر آورده شده است.

شکل ۲: پاسخ پله مدل پیشنهادی ، [۲] و [۳]

## نتیجه گیری

مدل ساده اتصالات نانو لوله کربنی فلزی را با تکنیک برازش منحنی با خطای نزدیک به ۶ درصد به مدل پیچیده تر نزدیک کردیم.

## ۱. منابع

1. Abou-Seido, Arif Ishaq, Brian Nowak, and Chris Chu. "Fitted Elmore Delay: A Simple and Accurate Interconnect Delay Model." *IEEE TRANSACTIONS ON VLSI SYSTEMS* (2004)

2. LIANG, J.; Todri, A. (2017). CNRS - Carbon Nanotube Interconnect RC Model. nanoHUB. doi:10.4231/D3SJ19T14

3. Chen, R.; LIANG, J.; Lee, J.; Georgiev, V.; Todri, A. (2018). Multi-walled/Single-walled Carbon Nanotube (MWCNT/SWCNT) Interconnect Lumped Compact Model Considering Defects, Contact resistance and Doping impact. nanoHUB. doi:10.4231/D3183448N

4. R. L. Ott, *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*, 4th ed. Pacific Grove, CA, 1993

5. S. Sinha, A. Balijepalli, and Y. Cao, “Compact model of carbon nanotube transistor and interconnect,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 56, no. 10, pp. 2232–2242, Oct. 2009.