

## مدل سازی مقاومت حافظه دار (ممریستور)

فرحناز ذاکریان<sup>۱</sup>، ستار میرزا کوچکی<sup>۲</sup>، افسانه شادآرام<sup>۳</sup>

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران<sup>۱</sup>

[F\\_zakerian@yahoo.com](mailto:F_zakerian@yahoo.com)

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران<sup>۲</sup>

[M\\_kuchaki@iust.ac.ir](mailto:M_kuchaki@iust.ac.ir)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران<sup>۳</sup>

[afsaneh\\_shadaram@yahoo.com](mailto:afsaneh_shadaram@yahoo.com)

**چکیده** – در سال ۱۹۷۱ تئوری وجود چهارمین عنصر اصلی مدار به نام ممریستور توسط Lean Chua مطرح و با پیشرفت علم در مقیاس نانو مدل فیزیکی آن در سال ۲۰۰۸ توسط دانشمندان گروه HP ساخته شد. این عنصر غیر فعال، حافظه دار، آنالوگ، کوچک، دارای سرعت سوئیچینگ بالا بوده و قابلیت یکپارچه سازی با مدارات مجتمع را دارد. حال برای آنکه بتوانیم بهره برداری مناسبی از این عنصر داشته باشیم باید کاربردهای خاصی شناسایی شوند که در آنها ویژگی های بی همتای ممریستور، امکاناتی را در اختیار بگذارد که توسط دیگر عنصرهای رایج امروز قابل دستیابی نباشد، بدین منظور باید عملکرد مدل رفتاری ممریستور کاملاً بررسی و مشخصات آن استخراج شود. در این مقاله با کمک مدلی که بر اساس رفتار ممریستور ساخته شده، طراحی کرده ایم به بررسی مدل فیزیکی و عملکرد آن پرداخته و رفتار این قطعه را در شرایط مختلف ارزیابی می کنیم.

**کلید واژه** – فیلم لایه نازک، مدل فیزیکی خطی، مدل فیزیکی غیر خطی، ممریستور

### ۱- مقدمه

یا مدلی برای ممریستور وجود نداشت و تنها به صورت تئوری ریاضی قابل بحث بود؛ تا اینکه در سال ۲۰۰۸، استنلی ویلیامز<sup>۱</sup> و همکارانش در کمپانی امریکایی هولت پاکارد<sup>۲</sup> ممریستور را با وسایل فیلم نازک<sup>۳</sup> در مقیاس نانو ساختند. آنها یک مدل فیزیکی از ممریستور ارائه دادند و به این ترتیب ممریستور به صورت کامل کشف شد [۱-۲]

قابل ذکر می باشد که نقش علم نانو تکنولوژی، در پیدایش ممریستور بسیار موثر بود زیرا تنها در مقیاس نانو خواص ممریستور هویدا می شود. در نهایت می توان گفت کشف این عنصر را مدیون پیشرفت علم نانو مواد هستیم. [۲]

مدارهای مجتمع هم شامل قطعات فعال مثل ترانزیستور و هم قطعات غیر فعال، مقاومت ( $R$ )، خازن ( $C$ ) و حتی سلف ( $L$ ) می باشند. این سه عنصر غیر فعال در اکثر مدارات استفاده می شوند و به عنوان سه عنصر اصلی شناخته شده اند و هیچ کس فکر نمی کرد که ممکن است عنصر مداری چهارمی نیز وجود داشته باشد.

در سال ۱۹۷۱، یک پروفیسور نه چندان مشهور به نام Lean Chua در دانشگاه UC Berkeley مقاله ای، منتشر کرد که در آن ادعا می کرد عنصر مداری چهارمی وجود دارد [۱]. Chua این عنصر را ممریستور نام نهاد. او با توجه به اهمیت وجودی ممریستور، حتی پیشنهاد کرد که کتابهای تئوری مدار به سبب وجود این عنصر، باز نویسی شوند. هیچ کس توجه جدی روی این کشف علمی نکرد، زیرا نمونه فیزیکی

1- S. Williams

2- Hewlett Packard (HP)

3- Thin Film

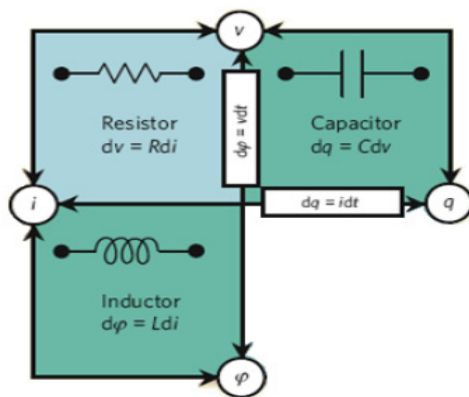
سه رابطه‌ی دیگر توسط تعاریف بدیهی سه عنصر کلاسیک مداری بیان می‌شوند. یک خازن به وسیله رابطه بین بار الکتریکی  $q(t)$  و ولتاژ  $v(t)$ ، یک مقاومت ایده آل به وسیله جریان  $i(t)$  و ولتاژ  $v(t)$  و یک سلف به وسیله شار مغناطیسی  $\phi(t)$  و جریان  $i(t)$  بصورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$dv = R di \quad (3)$$

$$dq = C dv \quad (4)$$

$$d\phi = L di \quad (5)$$

توجه به شکل ۱، یک سوال طبیعی مطرح می‌شود: آیا نوعی عنصر ایده آل وجود دارد که رابطه بین  $q(t)$  و  $\phi(t)$  را برقرار کند؟



شکل ۱: سه عنصر اصلی مدار

بر اساس این استدلال تقارن، در سال ۱۹۷۱، لئون چوا<sup>۱</sup>، یک عنصر ایده آل جدید را بدیهی شمرد که با رابطه  $d\phi = M(q) dq$  تعریف می‌شود. وی این عنصر را ممپرستور<sup>۲</sup> نامید ( $M$ ) که مخفف مقاومت حافظه دار<sup>۳</sup> است (شکل ۲).

با ساخت مدل فیزیکی ممپرستور توجه بسیار زیادی روی کار Chua و ممپرستور او برانگیخته شده است. در حال حاضر این عنصر در طراحی انواع مدارات بسیار مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات زیادی در راستای استفاده و کاربرد های آن در حال انجام است.[۳]

ممپرستور پیامد های بسیار جذابی دارد. ویلیامز پیش بینی می کند با طراحی دوباره برخی از مدارها به گونه ای که بتوان ممپرستور را در آنها گنجاند، می توان با عنصرها و اجزای مداری کمتری به همان کارکردها دست یافت که در نتیجه این تغییرات، مدارها ارزانتر شده و میزان مصرف انرژی در آنها نیز به طور چشم گیری کاهش خواهد یافت.[۴]

در این مقاله سعی بر آن است که با استفاده از اطلاعات ممپرستور ساخته شده در شرکت HP، مدلی بسیار نزدیک به رفتار مداری آن طراحی نموده و به بررسی ویژگی و عملکرد این عنصر در شرایط مختلف پرداخته شود تا با توجه به رفتار ممپرستور در شرایط مختلف و خواص آن بتوان به راحتی کاربردهای آن را شناسایی و مورد استفاده قرار داد و بدین ترتیب اکثر محققینی که ممپرستور ساخته شده را در دسترس ندارند، قادر به استفاده و بهره برداری از این اطلاعات برای طراحی و شبیه سازی مدارات خود باشند.

بدین منظور ابتدا در مورد تئوری ممپرستور و مدل فیزیکی ساخته شده آن توضیح مختصری داده و سپس با توجه به مدل نرم افزاری تهیه شده از ممپرستور به بررسی آن در شرایط مختلف و رابطه‌ی آن با تغییرات پارامترهایی مانند دامنه ولتاژ، فرکانس و... پرداخته‌ایم.

## ۲- تئوری ممپرستور

از دیدگاه نظریه مداری، سه عنصر دو پایه اصلی مدار، بر حسب رابطه‌ی بین دو عدد از چهار متغیر اصلی مدار یعنی جریان " $i$ "، ولتاژ " $v$ "، بار " $q$ " و شار پیوندی " $\phi$ " قابل تعریف است. از شش ترکیب ممکن از این چهار متغیر، پنج حالت منجر به روابط شناخته شده ای می‌شوند.

دو تا از این روابط به صورت زیر تعریف می‌شوند:

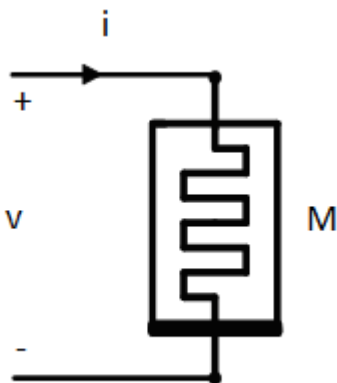
$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (2)$$

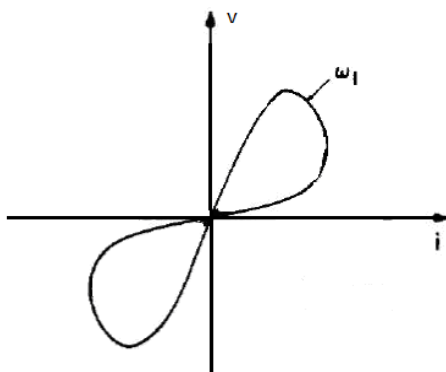
مشاهده می‌کنیم که مقدار ممریستانس (ممداکتانس) در هر زمان  $t_0$  بستگی به انتگرال زمان جریان ممریستور (ولتاژ) از  $t = -\infty$  تا  $t = t_0$  دارد. از این رو، در حالیکه ممریستور در یک لحظه از زمان  $t_0$  مثل یک مقاومت معمولی رفتار می‌کند مقاومت (رسانایی) آن به جریان (ولتاژ) ممریستور در زمان گذشته وابسته است.

این مشاهده، انتخاب نام مقاومت حافظه دار یا ممریستور را تصدیق می‌کند. جالب توجه است که وقتی یکبار ولتاژ  $v(t)$  یا جریان  $i(t)$  ممریستور تعیین می‌شود، ممریستور شبیه یک مقاومت متغیر با زمان خطی عمل می‌کند. در خیلی از موارد ویژه جاییکه منحنی  $q - \phi$  ممریستور یک خط مستقیم است،  $R = M(q) = G(\phi)$  یا  $W(\phi) = G$  شده و ممریستور به یک مقاومت خطی تغییرناپذیر با زمان تبدیل می‌شود. از این رو، نقطه معرفی ممریستور خطی در تئوری شبکه خطی وجود ندارد. در دیاگرام های مدار، یک ممریستور را به طور نمادی مطابق شکل ۳ نشان می‌دهند [۱]

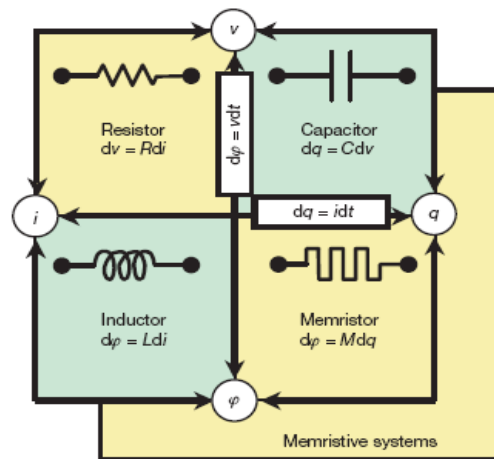
شکل ۴ منحنی مشخصه  $i-v$  ممریستور را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نماد مشخصه مداری یک ممریستور



شکل ۴: منحنی مشخصه  $i-v$  ممریستور



شکل ۲: چهار عنصر اصلی مدار

طبق تعریف او یک ممریستور به وسیله رابطه‌ی  $g(\phi, q) = 0$  مشخص می‌شود.

اگر رابطه فوق تنها به صورت تابعی یک متغیره از بار (شار پیوندی) بیان شود ممریستور را کنترل شونده با بار (کنترل شونده با شار پیوندی) گویند. ولتاژ دو سر ممریستور کنترل شونده با بار طبق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$v(t) = M(q(t))i(t) \quad (۶)$$

بطوریکه:

$$M(q(t)) = \frac{d\phi(q)}{dq} \quad (۷)$$

$M(q)$  بخشی از مقاومت است و ممریستانس<sup>۱</sup> نامیده خواهد شد.

به طور مشابه جریان ممریستور کنترل شونده با شار از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$i(t) = W(\phi(t))v(t) \quad (۷)$$

به طوریکه:

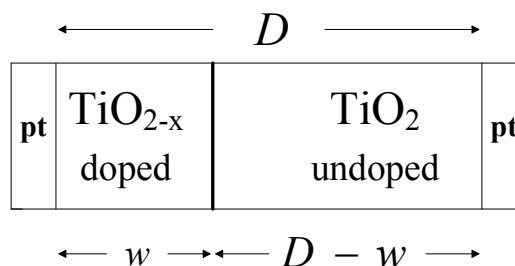
$$W(\phi(t)) = \frac{dq(\phi)}{d\phi} \quad (۸)$$

تابع  $w(\phi)$  از این پس ممداکتانس<sup>۲</sup> نامیده خواهد شد چون دارای بخشی از رسانایی است.

1- Memristance  
2- Memductance

### ۳- مدل فیزیکی ممریستور

ممریستور از یک فیلم لایه نازک اکسید تیتانیم  $TiO_2$  دو لایه، با ضخامت  $D$  ساندویچ شده بین دو اتصال نانو سیم پلاتین تشکیل شده است. یک لایه با اکسیژن زیاد ناخالص- شده و به نیمه هادی با مقاومت کم تبدیل شده است. ناحیه باقی مانده ناخالص نشده و مقاومت زیادی دارد. [۵] [۶]



شکل ۴: مدل فیزیکی ممریستور

مقاومت کلی عنصر، معادل مجموع دو مقاومت متغیر سری می باشد که هر دو وابسته به عرض  $w$  و مقدار  $R_{ON}, R_{OFF}$  می باشند:

$$M(x) = R_{ON}(x) + R_{OFF}(1-x) \quad (9)$$

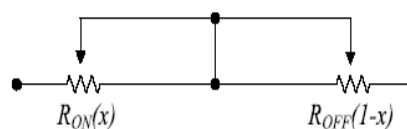
$$x = \frac{w}{D}, \quad 0 \leq x \leq 1$$

$D$  طول کل و  $w$  طول متغیر قسمت ناخالص شده و  $x$  نسبت طول ناحیه ی ناخالص شده به کل طول ممریستور است.  $R_{ON}$ ، مقاومتی است که در آن کل ناحیه ی  $D$  ممریستور، آلایش شده باشد ( $w=D$ ) و  $R_{OFF}$ ، مقاومت ممریستور در حالتی است که کل ناحیه آلایش نشده باشد، یعنی تمام قطعه را خالص (ذاتی) فرض کنیم ( $w=0$ ).

با اعمال ولتاژ  $V(t)$  به ممریستور، مرز بین دو ناحیه ی آلایش شده و نشده، جابجا شده و باعث تغییر اندازه مقاومت معادل آن می شود:

$$V(t) = (R_{ON}(x(t)) + R_{OFF}(1-x(t))) i(t) \quad (10)$$

$V(t)$  ولتاژ دو سر پایانه ممریستور،  $i(t)$  جریان عبوری از آن می باشد.



شکل ۵: ممریستور به صورت دو مقاومت سری متغیر

زمانیکه ولتاژ خارجی قطع گردد مرز در همان حالت فعلی خود باقی مانده و مقدار مقاومت ممریستور حفظ می شود که خود گویای حافظه ممریستور می باشد. [۷] [۸]

### ۴- مدل سازی ممریستور در طراحی مدارات

برای بررسی کاربرد ممریستور در طراحی مدارات، ابتدا مدلی براساس رفتار ساختار فیزیکی آن باید طراحی و شبیه سازی کرد. بنابراین در این بخش مراحل طراحی مدل ممریستور و کامل شدن آن را بررسی می کنیم.

#### ۴-۱- رانش خطی در ممریستور

در مدل رانش خطی، مرز بین نواحی خالص و ناخالص با سرعت ثابت در کل بدنه ی ممریستور حرکت کرده و در این مدل  $w(t)$  بین صفر تا  $D$  تغییر می کند ولی به این دو محدوده نمی رسد. [۸]

شکل (۶)، نمودار ولتاژ و جریان ممریستور بر حسب زمان را نشان می دهد. در شکل ولتاژ خارجی  $v(t) = 1.1 \sin(w_0 t)$  با فرکانس  $f_0 = 100 \text{ Hz}$  اعمال شده است. مشاهده می شود که جریان با ولتاژ هم فاز است اما شکل آن در مقایسه با سیگنال سینوسی ورودی، خطی نیست و این خود نشان دهنده ی رفتار غیر خطی ممریستور می باشد.

شکل ۷، نمودار جریان ممریستور بر حسب ولتاژ خارجی را نشان می دهد. این منحنی مشخصه ی ممریستور، رفتاری غیر خطی شبیه به رفتار هیستریزیس را دارد که از شبیه سازی مدل ذکر شده به دست آورده ایم و کاملاً شبیه به رفتار منحنی  $i-v$  ممریستور در مرجع [۲] می باشد.

#### ۲-۴- رانش غیرخطی در ممریستور

رانش خطی در بخش قبلی، مشخصه‌های مهم ممریستور را در نظر می‌گرفت. این رفتار، امکان تحلیل بعضی از مدارها را نیز ایجاد می‌نمود (مدارهای با مقدار ولتاژ خاص، مدارات شامل ممریستور و خازن، ممریستور و سلف و ...). اما محدوده‌ی ولتاژ اعمالی به آن مهم است و نباید حرکت مرز به دو لبه برسد. با توجه به نمودارهای قسمت قبل مشاهده می‌شود که مرز از محدوده‌ی بین دو لبه‌ی  $w=0, w=D$  می‌شود که مرز از محدوده‌ی بین دو لبه‌ی  $x=0, x=1$  خارج نشده است.

حال مدل ممریستور را کامل نموده و پارامترهای دیگری به مدل اضافه می‌کنیم تا بتوان شرایطی را بررسی کرد که مرز به محدوده‌ی دو لبه ممریستور می‌رسد یعنی محدوده‌ی کاربردی آن وسیع‌تر گردد.

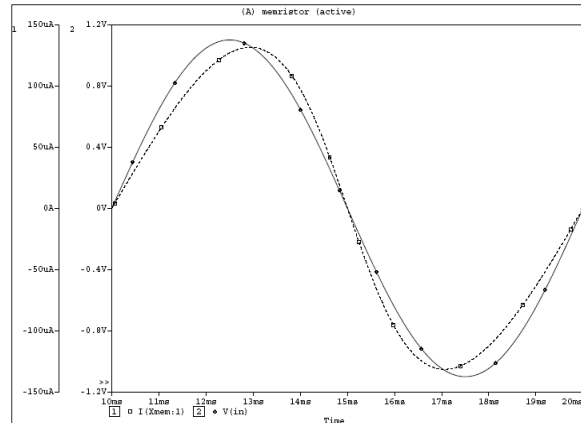
#### ۴-۲-۱- رانش غیرخطی در ممریستور و شرایط مرزی

با افزایش ولتاژ اعمالی به ممریستور ممکن است که  $w(t)$  به لبه‌ی صفر و  $D$  برسد بنابراین باید مدل قبل را به گونه‌ای تغییر داد که  $x(t)$  محدود به صفر و یک شده و اگر مرز به یکی از دو لبه‌ی  $w=0, w=D$  رسید در همان لبه باقی بماند و خارج از محدوده صفر و یک نرود.

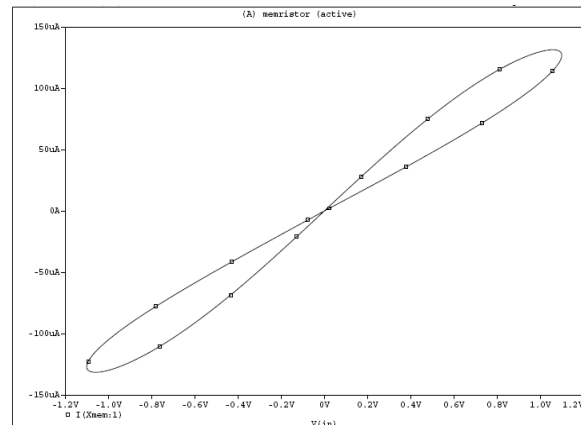
مشکل محدود شدن در مرزها برای  $w(t)$  در اثر ممریستوری را، با اضافه کردن چند پارامتر به مدل اصلی حل کرده و در روند اصلی و عملکرد ممریستور تغییری صورت نگرفته است.

در مدل اصلی رنج تغییر حرکت مرز را بین ۰ و ۱ در نظر گرفته و در صورتی که مرز به این دو لبه رسید مقدار تغییرات ممریستانس را نگه داشته و ممریستور به عنوان یک مقاومت ثابت در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی دیگر هر گاه مرز به لبه‌ی  $w=D$  رسید، کل ناحیه‌ی ممریستور را قسمت آلاش شده فرا می‌گیرد و مقدار مقاومت ممریستور همان  $R_{ON}$  می‌شود و در این مقدار ثابت می‌ماند تا زمانی که جهت حرکت مرز تغییر کند و در همان مدت زمان، رفتار ممریستور تبدیل به رفتار یک مقاومت ثابت می‌شود.

شکل ۹(الف)، منحنی حرکت مرز در شبیه سازی مدل را نشان می‌دهد. زمانیکه مقدار  $x(t)$ ، به ۰.۱ و ۰.۹ رسیده است، در همان مقدار ثابت مانده و از محدوده‌ی خود خارج نشده است. شکل ۹(ب)، منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور را نشان می‌دهد. مقدار ممریستور در زمانی که مرز به لبه‌ها رسیده، ثابت مانده است بنابراین شیب منحنی  $i-v$  ثابت شده است.

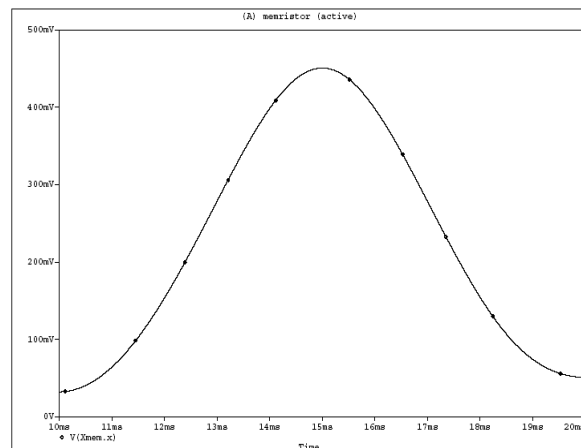


شکل ۶: منحنی خط‌پررنگ، ولتاژ  $v(t) = 1.1 \sin(w_0 t)$  با فرکانس  $f_0 = 100\text{Hz}$  را نشان می‌دهد. منحنی نقطه‌چین، جریان ایجاد شده در ممریستور می‌باشد.



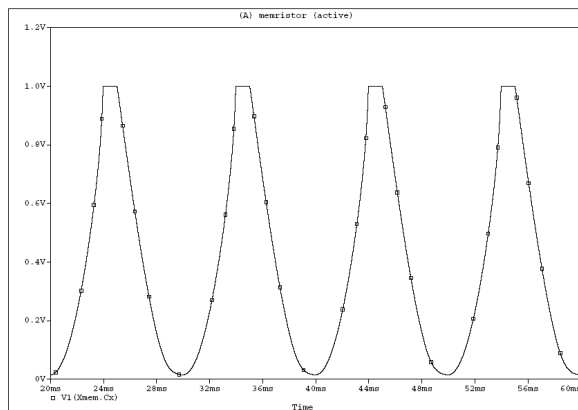
شکل ۷: منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور کنترل شونده با بار

نمودار شکل ۸، وابستگی زمانی  $x(t)$  یا همان  $w(t)/D$  را نشان می‌دهد. بایاس (مقدار اولیه) روی  $w$ ، در مقدار  $v = 0.78$  قرار داده شده است. در این مثال  $w(t)$  هیچگاه به مقادیر مرزی خود نمی‌رسد.



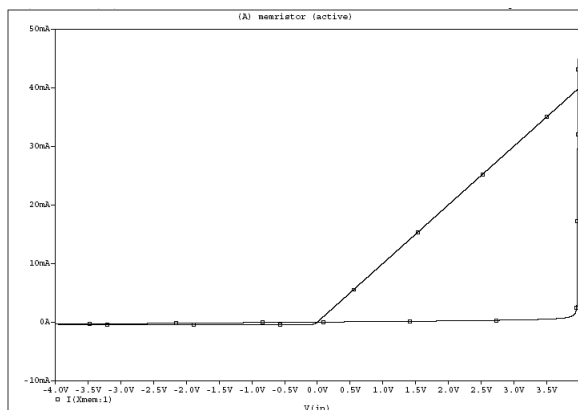
شکل ۸: شبیه‌سازی زمانی رفتار  $x(t)$  یک ممریستور

است. مقایسه این شکل با شکل ۹ (الف)، ویژگی این مدل را کاملاً هویدا می‌کند.

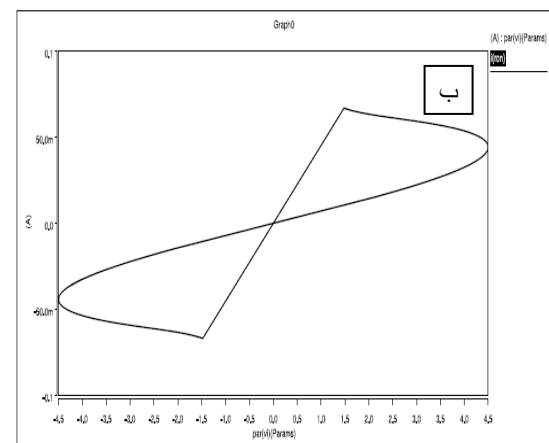
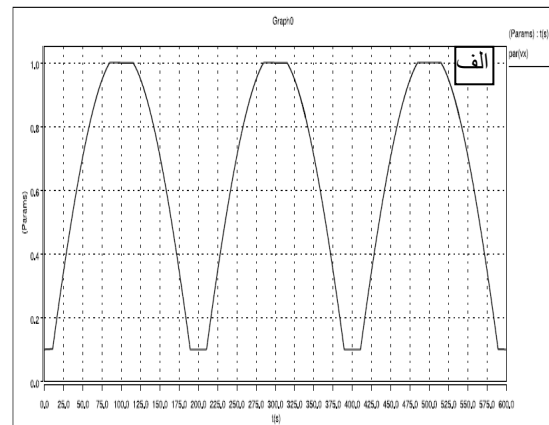


شکل ۱۰: منحنی حرکت مرز با محدوده‌ی شرایط مرزی و سرعت مرز

در شکل ۱۱ می‌بینیم که منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممیستور با در نظر گرفتن سرعت مرزی کاملاً با شکل ۹ (ب)، متفاوت می‌باشد و این منحنی با مرجع [۴] مطابقت دارد. با کامل کردن مدل ممیستور، حال می‌توانیم ویژگی‌های ممیستور را با کمک آن بررسی کنیم.



شکل ۱۱: منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممیستور با توجه به سرعت و محدوده‌ی شرایط مرزی



شکل ۹: (الف) منحنی حرکت مرز ممیستور (ب) منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممیستور با توجه به محدوده‌ی شرایط مرزی

## ۲-۲-۴- رانش غیر خطی ممیستور و سرعت حرکت

### مرز

از لحاظ کیفی مرز ما بین نواحی خالص و نا خالص با سرعت  $Vd$  در بدنه ممیستور حرکت می‌کند، اما با رسیدن این مرز به یکی از این دو لبه ( $w=0, w=D$ ) سرعت از بین می‌رود و رانشی در لبه‌ها وجود ندارد.

طبق مرجع [۴] حرکت مرز در نزدیکی دو لبه مطابق با تغییرات تابع  $f(w) = w(D-w)/D^2$ ، کاهش یافته و به صفر می‌رسد.

حال علاوه بر محدوده‌ی مرزی، شرط حرکت مرز زمانی که به لبه‌ها نزدیک می‌شود را نیز به مدل اعمال کرده و مدل را به گونه‌ای اصلاح می‌کنیم که این دو شرط را با هم داشته باشد.

بدین ترتیب مدل ممیستور کامل شده و برای شبیه‌سازی در تمام مدارات قابل اجرا می‌باشد.

شکل ۱۰، منحنی حرکت مرز را نشان می‌دهد که در آن تمام شرایط محدوده‌ی مرزی و سرعت مرز رعایت شده

## ۵- بررسی رفتار ممریستور در شرایط مختلف

حال با توجه به طراحی مدل ممریستور و بررسی درستی آن با مدل فیزیکی ساخته شده توسط گروه  $HP$ ، در این بخش به بررسی ویژگی و عملکرد این عنصر در شرایط مختلف می-پردازیم؛ بنابراین با توجه به مدل نرم افزاری تهیه شده از ممریستور به بررسی آن در شرایط مختلف و رابطه‌ی آن با تغییرات پارامترهایی مانند دامنه ولتاژ ، فرکانس و... پرداخته‌ایم.

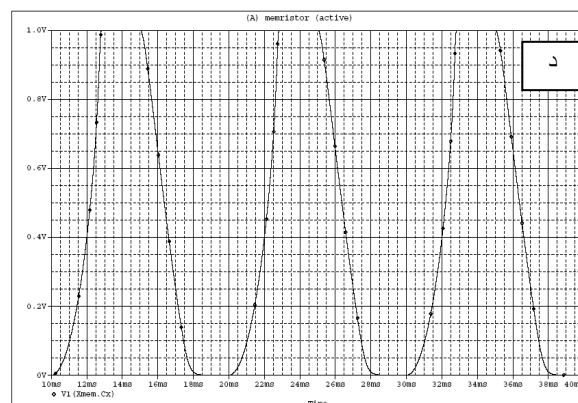
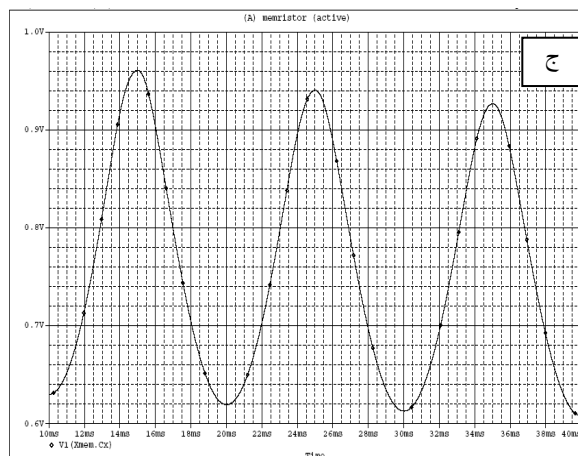
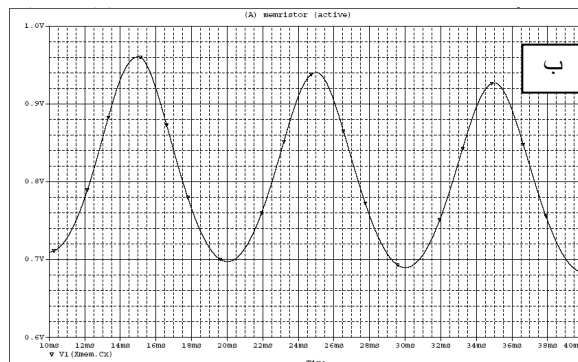
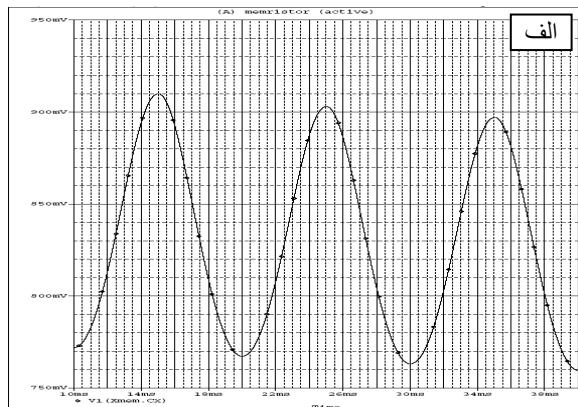
### ۵-۱- بررسی تغییرات ولتاژ ورودی بر رفتار ممریستور

حرکت مرز در ممریستور بارزترین مشخصه‌ی رفتار ممریستور است که جابجایی آن با تغییرات دامنه‌ی ولتاژ اعمالی رابطه‌ی مستقیم دارد. در شکل ۱۲، این تغییرات حرکت مرز را با اجرای مدل طراحی شده، در ولتاژهای مختلف از ۱.۱ تا ۴.۱ ولت با گام یک ولت در فرکانس ۱۰۰ هرتز نشان داده‌ایم . با مقایسه‌ی چهار منحنی در این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت مرز با افزایش ولتاژ در

حال نزدیک شدن به دو لبه‌ی صفر و یک می‌باشد.

در منحنی (د)، مشاهده می‌کنیم که در ولتاژ اعمالی مرز به دو لبه رسیده و مدت زمانی نیز در این دو لبه مانده و در آن زمان ممریستور رفتار یک مقاومت ثابت و معمولی را از خود نشان داده است که کاملاً در منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور (شکل ۱۱) هویدا می‌باشد و این باعث شده است که منحنی مشخصه‌ی ممریستور شکستگی داشته باشد.

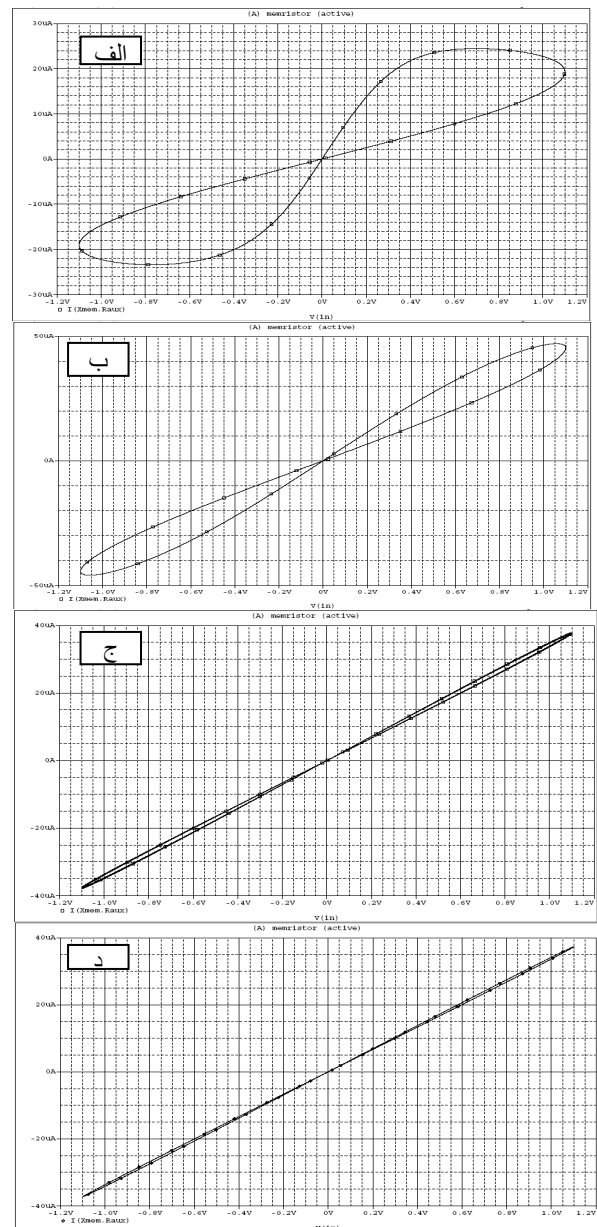
به عبارتی دیگر نمونه انتخابی ممریستور شبیه‌سازی شده، در ولتاژ ۴.۱ ولت به شکست می‌رود و می‌توان ولتاژ را از این مقدار به بعد افزایش داد تا به مرحله‌ی استفاده از ممریستور در حالت دیجیتال رسید. در این حالت شکستگی ممریستور، می‌توان از آن به عنوان سوئیچ استفاده کرد.



شکل ۱۲: نشان دهنده‌ی حرکت مرز ممریستور در فرکانس ۱۰۰ هرتز و (الف) در مقدار ولتاژ ۱.۱ ولت ، (ب) ولتاژ ۲.۱ ولت (ج) ولتاژ ۳.۱ ولت (د) ولتاژ ۴.۱ ولت می‌باشد.

## ۶- بررسی تغییرات فرکانس ولتاژ ورودی بر رفتار ممریستور

برای بررسی رابطه‌ی ممریستور و تغییرات فرکانس ولتاژ ورودی، فرکانس را از مقادیر ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز تغییر داده و ممریستور را با مدل مورد نظر شبیه‌سازی کردیم (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: نشان دهنده‌ی منحنی مشخصه‌ی ممریستور در مقدار ولتاژ ۱.۰ ولت و فرکانس: (الف) ۱۰ هرتز (ب) ۱۰۰ هرتز (ج) ۱ کیلو هرتز (د) ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد.

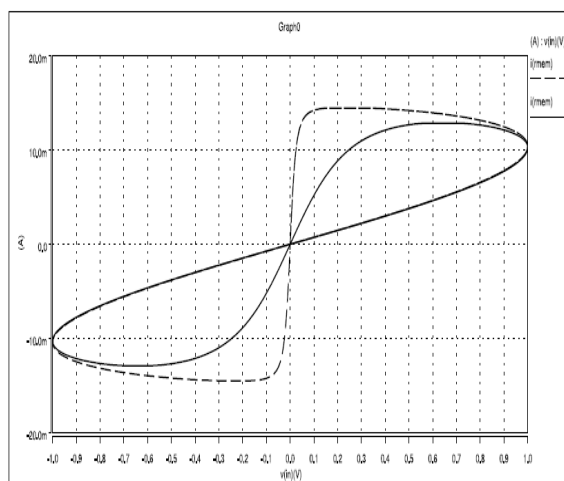
با توجه به شکل ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ممریستور کاهش

می‌یابد و منحنی مشخصه  $i-v$  آن تبدیل به یک خط شده و حالت هیستریزس خود را از دست می‌دهد و رفتاری مانند یک مقاومت معمولی از خود نشان می‌دهد.

## ۷- بررسی تغییرات مقاومت $R_{ON}$ بر رفتار ممریستور

تغییر  $R_{ON}$ ، محدوده‌ی مقدار تغییرات مقاومت ممریستور را تغییر می‌دهد (معادله ۹).

حال مدل را با تغییر این مقاومت در  $R_{ON}=1.8\ \Omega$  و  $R_{ON}=18\ \Omega$  شبیه سازی کرده و مشاهده نمودیم که منحنی مشخصه  $R_{ON}=1.8\ \Omega$  که در شکل ۱۴ نیز با خط چین نمایش داده است بر منحنی  $R_{ON}=18\ \Omega$  که با خط توپر مشخص شده، در شیب قسمتی از منحنی، که نشان‌دهنده‌ی مقدار  $R_{OFF}$  می‌باشد، بر هم مماس بوده و دو منحنی روی هم قرار گرفته‌اند اما در شیب  $R_{ON}$  با هم متفاوت می‌باشند.



شکل ۱۴: مقایسه‌ی منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور در مقاومت‌های  $R_{ON}=1.8\ \Omega$  (خط چین) و  $R_{ON}=18\ \Omega$  (خط توپر) با ولتاژ اعمالی ۱ ولت و فرکانس ۱۰۰ هرتز و  $R_{OFF}=2.9K\ \Omega$

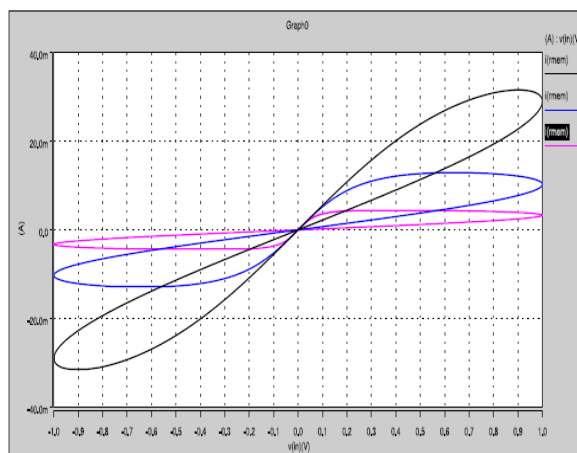
## ۸- بررسی تغییرات مقاومت $R_{OFF}$ بر رفتار ممریستور

با توجه به آن که تاثیرات  $R_{OFF}$  طبق رابطه‌ی ۹ بر میزان جریان داخل ممریستور چشمگیر بود، بنابراین شبیه‌سازی را که با تغییرات  $R_{ON}$  انجام دادیم را نیز با تغییر  $R_{OFF}$  بر روی مدل در مقدارهای ۲۹۰ اهم، ۲.۹ کیلو اهم، ۲۹ کیلو اهم اجرا نموده و نتیجه شبیه سازی آن را در شکل ۱۵ نشان داده‌ایم. در این شکل مشاهده می‌کنیم که شیب منحنی مقاومت‌های  $R_{OFF}=290\ \Omega$  (خط سیاه)،  $R_{OFF}=2.9K\ \Omega$  (خط آبی)،  $R_{OFF}=29K\ \Omega$  (خط صورتی)، در شیب  $R_{OFF}$  منطبق نمی‌باشد اما در شیب  $R_{ON}$  روی هم قرار گرفته‌اند.



## مراجع

- [1] L.O. Chua, "Memristor - the missing circuit element", IEEE Trans Circuit Theory, 1971.
- [2] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, and R.S. Williams, "The missing memristor found," Nature (London) 453. 2008
- [3] WILLIAMS, R. S. "Finding the Missing Memristor" IEEE CPMT Chapter, Santa Clara Valley. February 2009.
- [4] Borghetti Julien . Li, Zhiyong . Straznick Joseph and Williams, R. Stanley. "A hybrid nanomemristor/transistor logic circuit capable of self-programming." PNAS, , vol. 106, no 6, 1699-1703 February 10, 2009
- [5] WANG, F.Y. "Memristor for introductory physics". arXiv:0808.0286 v1 [physics.class-ph] . 2008.
- [6] WILLIAMS, R. S. , " How we found the missing memristor ", IEEE Spectrum, 12/01/2008.
- [7] J. M. Tour and T. He, "The fourth element," Nature 453, 42-43 (2008).
- [8] JOGLEKAR, Y.N., WOLF, S. J. "The elusive memristor: properties of basic electrical circuits". arXiv:0807.3994 v2 [cond-mat.meshall] . 2009



شکل ۱۵: مقایسه‌ی منحنی‌های مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور با ولتاژ اعمالی ۱ ولت، فرکانس ۱۰۰ هرتز و  $R_{ON}=18\Omega$  در مقاومت‌های  $R_{OFF}=290\Omega$  (خط سیاه)،  $R_{OFF}=2.9K\Omega$  (خط آبی)،  $R_{OFF}=29K\Omega$  (خط صورتی)

## ۹- نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد ویژگی‌های ممریستور می‌توان گفت که این عنصر در هر ولتاژی رفتار خاصی دارد و با توجه به نوع استفاده و میزان ولتاژ مدار باید نوع ممریستور را انتخاب کرده و طراحی نمود. تغییرات فرکانس نیز عامل چشمگیری در خاصیت اصلی ممریستور یعنی حالت هیستریزس آن دارد و همچنین تغییرات مقاومت  $R_{OFF}$  و  $R_{ON}$  نیز بر شیب منحنی  $i-v$  ممریستور تاثیر می‌گذارد که تمام این پارامترها و رابطه آن‌ها با رفتار ممریستور در این مقاله با مدل طراحی شده از ممریستور شبیه سازی و بررسی شد. قابل ذکر می‌باشد که ممریستورها عناصر پسیو هستند و بنابراین توانایی تزریق انرژی به مدار را ندارند. به همین دلیل به منظور کارکرد صحیح، ممریستورها نیازمند مجتمع شدن با مداراتی هستند که شامل عناصر اکتیو باشند، مانند ترانزیستورها که قادر به تقویت یا سوئیچ سیگنال‌های الکترونیکی هستند. مداری که شامل ممریستور و ترانزیستور باشد، می‌تواند مزایایی چون کارایی بهتر، تعداد اجزای کمتر و در مقابل، سطح تراشه و میزان مصرف انرژی کمتر را هم زمان داشته باشد.