

**دانشگاه صنعتی امیرکبیر**  
**( پلی تکنیک تهران )**  
دانشکده مهندسی کامپیوتر

درس فناوری های حافظه  
دکتر حامد فربه

رضا آدینه پور  
۴۰۲۱۳۱۰۵۵

## تمرین تئوری اول

تدریسار:

مرتضی عادلخانی ([madelkhani@aut.ac.ir](mailto:madelkhani@aut.ac.ir))  
سارا زمانی ([sara.zamani73@aut.ac.ir](mailto:sara.zamani73@aut.ac.ir))

## ۱ سوالات صحیح و غلط

۱. PCM<sup>۱</sup> ها نسبت به DRAM ها از نظر فناوری مقیاس پذیری بیشتری دارند.

✓ درست

○ غلط

**توضیح:** در DRAM ها به دلیل وجود خازن، اندازه ترانزیستورها و خازن را نمی توان از حدی کوچک تر کرد اما در PCM ها به دلیل استفاده از موادی که تغییر فاز ایجاد می کنند می توان حافظه های چگال تری به نسبت DRAM ها ساخت

۲. عملیات خواندن و نوشتن در PCM ها به نسبت DRAM ها، بازده انرژی بیشتری دارد.

○ درست

✓ غلط

**توضیح:** فرایند نوشتن در DRAM شامل یک تخلیه بار خازن است که انرژی زیادی را متحمل نمی شود. اما همین عملیات نوشتن در PCM نیازمند انرژی بالایی است

۳. PCM تاخیر دسترسی کمی دارد اما در مقایسه با حافظه Nand Flash، استقامت<sup>۲</sup> دارد.

○ درست

✓ غلط

**توضیح:** PCM ها به دلیل توانایی سریع تعویض حالت، سرعت خواندن و نوشتن بالایی را ارائه می دهند که منجر به تاخیر دسترسی کمتری می شود. اما نسبت به Nand Flash تعداد کمتری می تواند در آن نوشته و از آن خوانده شود قبل از آنکه خراب شود

۴. NVM استقامت کمتری نسبت به DRAM دارد. زیرا فرایند نوشتن در NVM بسیار بیشتر طول می کشد.

○ درست

✓ غلط

**توضیح:** حافظه های غیر فرار، استقامت کمتری نسبت به DRAM ها دارند اما دلیل استقامت کم در صورت سوال به اشتباه بیان شده است. به دلیل مکانیزم پیچیده تر نسبت به DRAM ها استقامت کمتری دارند.

## ۲ سوالات چند گزینه ای

۵. کدام یک از گزینه های زیر یکی از اشکالات استفاده از حافظه Nand Flash به عنوان فایل سیستم را مطرح می کند؟

○ داده های ذخیره شده در آن با گذشت زمان از بین می روند و نیاز به بازتجدید دارند

○ سرعت خواندن از آن غیر قابل پیش بینی است و چالش هایی را برای زمان بندی I/O ایجاد می کند

○ زمان جستجو به طور قابل توجهی در مقایسه با دیسک های سنتی طولانی تر است

✓ به دلیل پشتیبانی محدود، محدودیت هایی را بر تعداد نوشتن در هر بلوک اعمال می کند.

**توضیح:** حافظه Nand flash به حافظه ای با تعداد محدود نوشتن و پاک کردن Program/Erase معروف است به همین دلیل این گزینه صحیح است.

<sup>۱</sup> Phase change memory  
<sup>۲</sup> Endurance

## ۳ سوالات جای خالی

۶. جدول زیر را با بهترین جمله تکمیل کنید.

	Registers	SRAM	DRAM	HARD Disk	Flash
Approx. Access Time (ns or s)	$\approx 1ns$	$\approx 2 - 10ns$	$\approx 10 - 100ns$	$\approx 5 - 10ms$	$\approx 25 - 50\mu s$
Density (Mb/area)	Very low	Low	High	Very high	High
Volatility	Volatile	Volatile	Volatile	Non-volatile	Non-volatile
Approx. Cost/Bit (\$)	Very High	High	Medium	Very low	Low
Power Usage (W)	High	Medium	Low	Medium	Low
Composition	Flip-flops	Transistors	Capacitors	Magnetic storage	Floating gate transistors
Example Usage	FPGAs	L2&L3 cache	Main memory	Hard disk	MicroSD

## ۴ سوالات تعریفی

۷. یک سلول SRAM-6T را در نظر بگیرید که برای پایداری در شرایط کاری بهینه شده است. به سوالات زیر پاسخ دهید.

۱. افزایش ولتاژ Wordline چه تاثیری بر پایداری خواندن سلول دارد؟ افزایش ولتاژ Wordline باعث کاهش پایداری خواندن می شود زیرا باعث افزایش قدرت access ترانزیستور شده و در نتیجه احتمال خراب شدن سلول حافظه را افزایش می دهد.

۲. افزایش ولتاژ Wordline چه تاثیری بر زمان دسترسی خواندن دارد؟ افزایش ولتاژ Wordline زمان دسترسی خواندن را کاهش می دهد زیرا باعث افزایش قدرت هدایت  $N_0$  می شود.

۳. افزایش ولتاژ Wordline چه تاثیری بر قابلیت نوشتن در سلول دارد؟ افزایش ولتاژ Wordline قابلیت نوشتن در سلول را بهبود می بخشد زیرا Access ترانزیستور با قدرت بیشتری هدایت می کند و در نتیجه احتمال غلبه بر سلول SRAM افزایش می یابد.

۴. یک پالس Wordline کوتاه شده چگونه بر ثبات خواندن سلول تاثیر می گذارد؟ کاهش زمان پالس Wordline پایداری خواندن را بهبود می بخشد زیرا کل جریان کشیده شده از سلول SRAM را کاهش می دهد.

۵. طولانی شدن Wordline چه تاثیری بر خوانایی سلول دارد؟ افزایش طول پالس Wordline قابلیت نوشتن در سلول را بهبود می بخشد زیرا به Access ترانزیستور زمان بیشتری برای خواندن می دهد.

۶. افزایش ولتاژ منبع تغذیه چگونه بر قابلیت نوشتن سلول تاثیر می گذارد؟ افزایش ولتاژ تغذیه سلول SRAM باعث کاهش قابلیت نوشتن آن می شود. افزایش VDD توانایی سلول SRAM را برای حفظ داده ها افزایش می دهد، بنابراین نوشتن در سلول را سخت تر می کند.

۸. حافظه دسترسی تصادفی مقاومتی مغناطیسی (MRAM) و حافظه تغییر فاز (PRAM یا PCRAM) نشان دهنده دو نوع حافظه غیر فرار با کاربردهای بالقوه در دستگاه های مصرف کننده آینده و سیستم های تعبیه

شده است. این فناوری ها را با توضیح اصول عملیاتی، مزایای اصلی به عنوان جایگزینی برای DRAM و یا SRAM، مزایای طراحان سیستم های جاسازی شده، محدودیت ها و زمینه هایی که ممکن است مناسب نباشند، مقایسه و مقایسه کنید.

MRAM داده ها را با استفاده از حالت های مغناطیسی ذخیره می کند. این حافظه شامل پیوندهای تونلی مغناطیسی (MTJ) است که داده ها را با تغییر جهت گیری لایه های مغناطیسی درون پیوند می نویسد. خواندن داده ها شامل اندازه گیری مقاومت MTJ است که بر اساس جهت گیری نسبی لایه های مغناطیسی (موازی یا ضد موازی) متفاوت است.

PRAM داده ها را با تغییر فاز یک ماده چالکوژنید (معمولاً ترکیبی مانند  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ) ذخیره می کند. با اعمال گرما از طریق پالس های الکتریکی، بین حالت آمورف (مقاومت بالا) و حالت بلوری (مقاومت پایین) تغییر فاز می دهد.

از مزایای اصلی MRAM می توان به:

۱. زمان خواندن و نوشتن سریع، قابل مقایسه با SRAM.
  ۲. دوام بالای نوشتن، قادر به تحمل تعداد زیادی چرخه نوشتن.
  ۳. غیر فرار بودن
  ۴. در مقایسه با DRAM مصرف انرژی کمی دارد زیرا مانند DRAM ها نیازی به آپدیت داده ندارد.
- اشاره کرد. همچنین از مزایای PRAM نیز می توان موارد زیر را نام برد:

۱. چگالی ذخیره سازی بالاتر نسبت به ، نزدیک به حافظه فلش NAND.
  ۲. غیر فرار بودن
  ۳. قابلیت مقیاس پذیری بالا به دلیل ساختار ساده و استفاده از موادی که می توانند به ابعاد کوچکتر مقیاس شوند.
  ۴. سرعت خواندن سریع تر نسبت به حافظه فلش NAND سستی.
- از محدودیت های این دو حافظه می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. در حال حاضر هزینه تولید MRAM آن نسبت به سایر حافظه های غیر فرار مانند فلش NAND گران تر است.
۲. MRAM چگالی ذخیره سازی پایین تری نسبت به PRAM و فلش NAND دارد.
۳. سرعت نوشتن در PRAM عموماً کندتر از MRAM و DRAM، که ممکن است برای برخی کاربردهای با سرعت بالا محدودیت ایجاد کند.

بنابر این می توان گفت هر دو حافظه MRAM و PRAM مزایای قابل توجهی برای دستگاه های مصرفی آینده و سیستم های نهفته دارند. MRAM در سرعت و دوام برتری دارد و PRAM چگالی بالاتر و مقیاس پذیری بهتری ارائه می دهد. انتخاب بین آن ها بستگی به نیازهای خاص کاربرد، از جمله سرعت، دوام، چگالی و ملاحظات مصرف انرژی دارد.

۹. نقش فناوری SSD را در تغییر مسیر از هارد دیسک (HDD) به سمت ذخیره سازی حالت جامد، به ویژه در حوزه لوازم الکترونیکی مصرفی و زیرساخت های سازمانی، تجزیه و تحلیل کنید.

تغییر از HDD ها به SSD ها در هر دو حوزه الکترونیک مصرفی و زیرساخت های سازمانی به دلیل عملکرد برتر، دوام، بهره وری انرژی و مزایای اندازه، سرعت بالا صورت گرفته است. دسترسی سریع تر به داده ها، مقیاس پذیری بهتر و کاهش هزینه های عملیاتی را امکان پذیر کرده اند. با پیشرفت فناوری و کاهش قیمت ها، SSD ها به احتمال

زیاد به راه حل ذخیره سازی اصلی تبدیل می شوند و کاهش استفاده از HDD ها در اکثر کاربردها را تسریع می کنند. اما همچنان به دلیل وجود بازار برای HDD ها این فناوری هنوز از رده خارج نشده است و مورد استفاده قرار می گیرد.

۱۰. پروتکل رابط NVMe و برتری آن را نسبت به رابط های معمولی مرتبط با HDD مانند SATA، با تاکید بر معیارهای عملکرد مانند نرخ انتقال، توضیح دهید.

رابط پروتکل NVMe به طور قابل توجهی برتر از رابط های سنتی مانند SATA است، به ویژه از نظر نرخ انتقال داده و تأخیر. NVMe با استفاده از پهنای باند بالا و قابلیت های چند مسیر PCIe، سرعت های خواندن و نوشتن بسیار بالاتر و تأخیر کمتری را ارائه می دهد. این مزایا، همراه با بهینه سازی های بهره وری CPU و کاهش مصرف انرژی، NVMe را به انتخاب اصلی برای حافظه های غیر فرار مدرن تبدیل کرده است، که نیازهای عملکردی بالای سیستم های امروزی را برآورده می کند.

۱۱. بین یک ترانزیستور فلوتینگ گیت و یک ماسفت مسطح استاندارد از نظر ترکیب ساختاری آنها تفاوت قائل شوید. اهمیت عدم اتصال مستقیم دروازه شناور به پایانه های خارجی را توضیح دهید.

ترانزیستور فلوتینگ گیت و ماسفت استاندارد دارای تفاوت های ساختاری عمده ای هستند که به کاربردهای مختلف آنها منجر می شود. عدم اتصال مستقیم گیت شناور به ترمینال های خارجی، قابلیت های ذخیره سازی غیر فرار و حفظ داده ها را به ترانزیستور فلوتینگ گیت می دهد، که آن را برای حافظه های فلش و دیگر کاربردهای حافظه های غیر فرار مناسب می سازد.

## ۵ سوالات سناریوای

۱۲. توسعه یک سیستم کامپیوتری برای یک ماموریت فضایی عمیق گسترده با هدف کاوش در یک سیاره فراخورشیدی از راه دور به شما اختصاص داده شده است. این ماموریت شامل کسب و تجزیه و تحلیل داده های علمی قابل توجه در یک دوره طولانی، با پهنای باند محدود برای انتقال داده ها به زمین خواهد بود. این فضاپیما به انواع حسگرها، دوربین ها و دستگاه های علمی برای جمع آوری اطلاعات در مورد شرایط جوی سیاره فراخورشیدی، ویژگی های زمین شناسی و نشانه های احتمالی حیات مجهز خواهد شد.

چالش اول:

یک معماری برای سیستم کامپیوتری ابداع کنید که از یک سلسله مراتب حافظه ساختاریافته استفاده می کند، که انواع مختلف حافظه غیر فرار را در خود جای می دهد تا داده های به دست آمده در طول ماموریت فضایی عمیق را مدیریت کند. واحد حافظه بهینه را برای هر ردیف از سلسله مراتب با در نظر گرفتن عوامل زیر انتخاب کنید:

۱. نیاز به خاطرات غیرفرار قابل اعتماد و سخت شده در فضا که می توانند در محیط شدید فضایی مقاومت کنند.

۲. رویکردهایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش ظرفیت ذخیره سازی، با توجه به محدودیت های قدرت و اندازه فضاپیما.

۳. تکنیک هایی برای حفظ یکپارچگی داده ها و کاهش احتمال از دست دادن داده ها یا خراب شدن در طول مدت ماموریت

۴. ادغام ویژگی های تحمل پذیر خطا برای رسیدگی به نقص های احتمالی سخت افزار یا خطاهای ناشی از تشعشع

۵. روش هایی برای دسترسی و پردازش مؤثر داده ها، با در نظر گرفتن قابلیت های محاسباتی محدود فضاپیما

۶. هماهنگ سازی سیستم های حافظه غیر فرار با سایر عناصر سیستم کامپیوتری مانند CPU ها، رابط های ارتباطی و واحدهای کنترل قدرت.

چالش دوم:

برای هر بخش از سلسله مراتب حافظه (به عنوان مثال، حافظه پنهان، حافظه اولیه، حافظه ثانویه)، مناسب ترین نوع حافظه غیر فرار (به عنوان مثال، NOR flash، NAND flash، حافظه تغییر فاز، حافظه با دسترسی تصادفی مقاوم) را شناسایی کنید. در مورد ویژگی های آن و خواسته های منحصر به فرد ماموریت. با توضیح اینکه چگونه هر نوع حافظه با جنبه های حیاتی فوق الذکر مطابقت دارد، از انتخاب های خود حمایت کنید.

چالش سوم:

پیشنهاد یک استراتژی احتمالی و تکراری برای زیرسیستم حافظه غیر فرار برای تضمین حفاظت از داده های ضروری در صورت بروز نقص شدید یا بی نظمی پیش بینی نشده در طول ماموریت. مناسب ترین روش افزونگی (به عنوان مثال، تکرار، برابری، RAID) و پروتکل پشتیبان (به عنوان مثال، تکرار منظم داده ها در یک واحد ذخیره سازی پشتیبان، کدهای تصحیح خطا) را برای هر سطح سلسله مراتب حافظه تعیین کنید. توضیح دهید که چگونه استراتژی شما خطرات را به حداقل می رساند و به موفقیت ماموریت کمک می کند.

پاسخ:

برای طراحی این حافظه جنبه های مختلفی را باید بررسی کنیم. از آنجایی که قرار است این حافظه در محیطی غیر معمول مورد استفاده گیرد ابتدا می بایست چالش های طراحی را پیدا کنیم. برای این مسئله چالش های زیر مطرح است:

۱. محیط فضا دماهای بسیار بالا (یا بسیار پایین) و سطوح بالای تابش را ارائه می دهد که می تواند به قطعات الکترونیکی معمولی آسیب برساند.

برای حل این مشکل می توان از فناوری های حافظه ای استفاده نمود که به طور خاص برای مقاومت در برابر چنین شرایط جوی ای طراحی شده است. این حافظه ها شامل نسخه های خاص از NOR و NAND Flash، و همچنین فناوری های جدیدتری مانند حافظه PCM و RAM مقاوم (ReRAM) که به طور ذاتی در برابر تابش مقاوم تر هستند.

۲. مشکل دوم مسئله محدودیت های برقی و توانی در فضاپیماست.

پیاده سازی یک سلسله مراتب حافظه که در هر سطح تعادل بین مصرف برق، ظرفیت و عملکرد را حفظ کند. با استفاده از فناوری های حافظه کم مصرف و اعمال تکنیک هایی مانند فشردگی داده و مدیریت کارآمد برق می توان این چالش را حل نمود

۳. مشکل بعد، اطمینان از اینکه داده ها در طول مدت طولانی دقیق و بدون خطا باقی می ماند.

برای حل این مشکل استفاده از کدهای تصحیح خطا (ECC) و پیکربندی های RAID برای تشخیص و تصحیح خطاها استفاده نمود.

۴. خرابی های سخت افزاری و خطاهای ناشی از تابش.

برای حل این مشکل، می توان با گنجاندن افزونگی و اصول طراحی مقاوم در برابر خطا مانند سیستم های حافظه دوگانه افزونه، تایمرهای نگهبان، و پروتکل های بازیابی خطا استفاده نمود.

۵. مشکل بعدی قابلیت های محاسباتی محدود در فضاپیماست. برای حل این مشکل می بایست از الگوریتم های پردازشی Quantized شده استفاده نمود تا با کمترین تغییر دقت حافظه کمتری مصرف کنیم.

در چالش دوم، سلسله مراتب حافظه را به صورت زیر پیشنهاد می دهیم:

۱. استفاده از SRAM در کش. زیرا SRAM سریع است و برای حافظه کش مناسب است به دلیل تأخیر کم آن. اگرچه فرار است، اما استفاده از نسخه های مقاوم در برابر تابش می تواند قابلیت اطمینان را حفظ کند.

۲. استفاده از PCM و MRAM برای حافظه اصلی. زیرا این دو حافظه غیر فرار هستند، زمان دسترسی سریعی دارند همچنین مقاومت خوبی نیز دارند. PCM به ویژه در برابر تابش و دماهای بالا مقاوم است.
۳. در حافظه ثانویه می توان از Nans flash استفاده کرد. زیرا ظرفیت ذخیره سازی بالایی را فراهم می کند و همچنین غیر فرار است. نسخه های مقاوم در برابر تابش آن نیز موجود است.
۴. در حافظه بلندمدت می توان از ReRAM ها استفاده کرد. زیرا بسیار مقاوم است، مصرف برق کمی دارد و می تواند داده ها را برای مدت طولانی نگه دارد، که آن را برای ذخیره سازی بلندمدت در محیط های سخت مناسب کرده است.

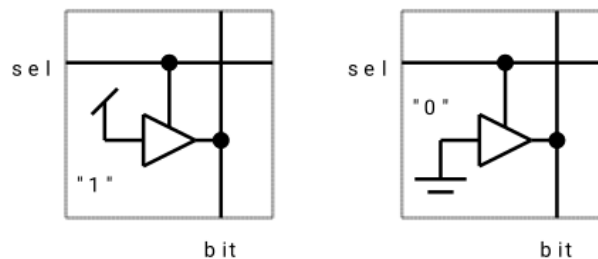
برای حل چالش سوم و در هر سطح حافظه پیشنهادات زیر را ارائه می دهم.

۱. در کش ها می توان از روش DMR برای بررسی خطا به صورت Real-time استفاده نمود
۲. در حافظه اصلی نیز می توان برای بررسی و تصحیح خطاها از DMR استفاده نمود. زیرا در اینجا نیز پیدا و تصحیح خطاها باید به صورت Real time انجام شود.
۳. در حافظه ثانویه می توان از RAID استفاده نمود. RAID تحمل خطا را با توانایی بازایی از دو خرابی دیسک همزمان فراهم می کند. تکثیر منظم داده ها اطمینان می دهد که همیشه یک نسخه ثانویه در دسترس است.
۴. در حافظه بلندمدت می توان حافظه را به صورت دوره ای بررسی نمود.

## ۶ سوالات طراحی

۱۳. هدف شما در این کار ایجاد مدار برای یک ROM دو پورت است که ۴ بیت عرض و ۴ کلمه عمق دارد. این ROM دارای دو پورت مجزا است که هر کدام مجهز به یک گذرگاه آدرس ۲ بیتی و یک گذرگاه داده ۴ بیتی است که امکان دسترسی همزمان به هر یک از چهار کلمه داده ذخیره شده را فراهم می کند. فرآیند طراحی را با تطبیق سلول های ROM تک پورت اولیه ارائه شده آغاز کنید. پس از آن، یک طرح شماتیک مدار برای کل ROM دو پورت، که شامل تمام مدارهای ضروری است، ترسیم کنید. محتویات رام در زیر به تفصیل آمده است.

address	Value
00	0101
01	1010
10	0101
11	1010



مدار طراحی پیشنهادی به صورت زیر است:

در این طراحی، هر بلوک آدرس نشان دهنده سلول های ROM است که کلمات ۴ بیتی را ذخیره می کند. دیگر در آدرس، کلمه مناسب را بر اساس آدرس ورودی انتخاب می کنند، و مالتی پلکسرها اطمینان حاصل می شود که داده های صحیح به گذرگاه های داده خروجی برای هر پورت هدایت می شود یا خیر

