سال پانزدهم، شماره‌های ۵۵ و ۵۶، بهار و تابستان
۱۴۰۲
صفحات:۲۶ تا ۴۶

دو فصلنامه علمی
فناوری اطلاعات و ارتباطات ایران

# Emerging technologies in future generations of high performance computing: introduction, taxonomy and future research directions

Mahmood Nematollah zade[*],Ehsan Arianyan[*],Masoud Hayery Khyavy[**],Niloofar Gholipour[**], Abdollah Sepahvand[**]

[*]Ph.D., Information and Communication Technology Research Institute, Tehran, Iran

[**]Master's degree, Information and Communication Technology Research Institute, Tehran, Iran

## Abstract

Due to the rapid growth of science and technology, their need for high performance computing is increasing everyday. So far, the majority of the world's high performance computing needs have been based on conventional silicon-based technologies, but the end of the age of silicon-based technologies is near, and this fact has led scientists to use emerging technologies such as quantum computing, bio computing, optical computing and similar technologies. Although some of these technologies are not new and the initial introduction of some of them dates back to some decades ago, but due to the attractiveness of classical silicon-based computing and the speed of development in it, have been neglected to date. However, recently, these technologies have begun to be used to build scalable high performance computers. In this paper, we introduce these technologies and how they participate in the field of high performance computing, their current and future status, and their challenges. Also, the taxonomy related to each of these technologies from the computational point of view as well as their research topics are presented, which can be utilized for future research in this field.

**Keywords**:High performance computing, quantum computing, biological computing, neuromorphic computing, optical computing, nano computing, in-memory computing.

# فناوری‌های نوظهور در نسلهای آتی رایانش فوق سریع: معرفی، دسته‌بندی و فرصتهای تحقیقاتی پیش رو

محمود نعمت الله زاده*، احسان آریانیان*[1]، مسعود حایری خیاوی**، نیلوفر قلی پور**، عبدالله سپهوند**

*استادیار، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران.

**کارشناسی ارشد، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹

نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

با توجه به رشد سریع و همه جانبه زندگی بشری و وابستگی بیش از پیش آن به فناوری‌های دیجیتال، نیاز ما به انجام رایانش‌های فوق سریع روز به روز در حال افزایش است. تاکنون عمده پاسخگویی به نیازهای رایانش فوق سریع در دنیا مبتنی بر فناوری‌های متعارف سیلیکونی بوده است، این در حالی است که با توجه به پیش بینی گوردون مور، پایان عصر فناوری‌های مبتنی بر سیلیکون (عصر مور) نزدیک است. این واقعیت دانشمندان را به سمت استفاده از فناوری‌های نوظهوری همانند: رایانش کوانتومی، رایانش مولکولی، رایانش زیستی، رایانش نوری، رایانش نانو، رایانش حافظه ای و اقسام مشابه آن سوق داده است. در این مقاله، ضمن معرفی اجمالی این فناوری‌ها و نحوه مشارکت آنها در حوزه رایانه‌ها، به بررسی وضعیت حال و آینده آنها پرداخته شده و چالشهای موجود در آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، با ارائه دسته‌بندی مربوط به هرکدام از این فناوری ها، از جنبه رایانشی، موضوعات و چالش‌های تحقیقاتی موجود در آنها ارائه می‌گردد که می‌تواند چراغ راه تحقیق و پژوهش آتی در حوزه‌های مختلف مربوط به آنها باشد. در انتهای مقاله نیز به مقایسه میزان اقبال به این فناوریها در مراجع علمی و تحقیقاتی از طریق بررسی آمار چاپ مقالات و کتابها در حوزه‌های مذکور از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ پرداخته شده است و اینکه کدام یک از این فناوری‌ها قابلیت ارایه مدل محاسباتی نوین در رایانه های فوق سریع آینده را خواهند داشت.

**واژگان کلیدی:** رایانش فوق سریع، رایانش کوانتومی، رایانش مولکولی، رایانش زیستی، رایانش عصبگون، رایانش نوری، رایانش نانو، رایانش حافظه‌ای.

[1] نویسنده مسئول: احسان آریانیان ehsan_arianyan@itrc.ac.ir

## ۱- مقدمه

برای دهه‌ها است که «رایانش فوق سریع» (یا HPC) نه تنها جایگاه خود را در طیف وسیعی از حوزه‌های کاربردی در دانشگاه و صنعت به عنوان ابزاری اساسی جهت اکتشافات، نوآوری‌ها و گرایش‌های جدید در زمینه علوم، پژوهش و توسعه، مهندسی و کسب و کار تثبیت کرده

بلکه از دو منظر راهبردی و اقتصادی نیز کاملاً شناخته شده است. رایانش فوق سریع می‌تواند به ارایه عملکرد بهتر رایانه در کاربردهای نوآورانه، نرم‌افزار و سخت‌افزار و توانمند سازی فناوری‌ها ادامه دهد. اما طراحی سیستم‌های رایانش فوق سریع آینده، ممکن است به شدت بستگی به جهت‌گیری و انتخاب فناوری‌های کلیدی آن داشته باشد. با توجه به این موضوع، تجزیه و تحلیل تغییرات فناوری، نشانه‌هایی از چگونگی توسعه HPC در آینده را ارایه می‌دهد. با توجه به اینکه هم اکنون نیز برخی از صنایع و فناوریها از داده‌های ارسالی از تجهیزات اینترنت اشیاء استفاده می نمایند و با استفاده از ادوات «لبه[1]» این داده‌ها را پیش‌پردازش می‌کنند، نیاز به به HPC با قابلیت‌های بالای تحلیل و شبیه سازی بیش از پیش احساس می‌شود. پژوهش‌های ما بیانگر این حقیقت است که سیستم های ابررایانه سریع در آینده نمی‌توانند به عنوان سیستم‌هایی جدا از کاربردهایی که قرار است بر روی آن‌ها اجرا شود، طراحی شوند، بلکه باید به عنوان بخشی از زیر ساخت‌های کاربردهای نوین طراحی و عملیاتی شوند. لذا چنین بستری نیازمند حافظه قدرتمند، تراکنش داده‌ای بالا، قدرت پردازش سریع همراه با صرف انرژی کمتر می‌باشد. اما برای برآورده کردن این امکانات چالش‌های زیادی خصوصا در زمینه استفاده از مواد و یکپارچه‌سازی، معماری و طراحی وجود دارد. پیش بینی گوردون مور که اکنون به یک قانون بدل شده است [۱]، بیانگر این اصل است که به پایان عصر استفاده از فناوری‌های مبتنی بر سیلیکون نزدیک شده ایم [۲] و با وجود پدیده تونل زنی که در ابعاد بسیار کوچک در نیمه هادی ها اتفاق می‌افتد [۳] کار عملا برای توسعه بیشتر تراشه‌های سیلیکونی پایان یافته است و متخصصان برای تولید ابررایانه‌های آینده باید به فناوری‌های نامتعارف پناه برند [۴].

بر اساس دانش و تجربه نویسندگان مقاله و پژوهشهایی که در طول اجرای پروژه "ابررایانه ملی سیمرغ" داشتیم به این نتیجه رسیدیم که در یک نگاه کلان، نسل‌های آتی رایانش فوق سریع در دو دسته کلی قرار می‌گیرند؛ اول نسل‌های رایانشی مر سوم که به سمت و سوی سرعتهای حدود اگزا[2] در حال حرکت هستند (با توجه به آخرین فهرست ابررایانه های دنیا [۵]) و دوم نسل‌های رایانشی مبتنی بر فناوری های نوظهور (نامتعارف) نظیر رایانش کوآنتومی[3]، رایانش زیستی[4]، رایانش نوری[5] و رایانش حافظه ای[6]. بر همین اساس در این تقسیم بندیها رایانش دیگری را هم می‌توان گنجاند که با عنوان رایانش نانو[7] از آن یاد می‌شود. هرچند رایانش نانو بخش بسیار بزرگی از رایانشهای دیگر را دربر می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به رایانش کوانتومی، زیستی، مولکولی و حتی رایانشهای کلاسیک مبتنی بر سیلیکون هم اشاره کرد، لیکن بخشهای دیگری وجود دارند که در رایانش نانو قرار می‌گیرند اما در آنها ذکر نشده‌اند. به همین لحاظ است که رایانش نانو هم به عنوان یکی از رایانشهای مطرح آورده می‌شود. بر این مبنا، در این مقاله سعی کرده‌ایم با نگاهی به آینده حوزه رایانش فوق سریع در سطح جهان، فناوری های نوظهور رایانشی را معرفی و مرور نموده و چالش های مطرح در آنها و نیازمندی های آنها را تبیین نماییم. همچنین، موضوعات تحقیقاتی مطرح در هر کدام از فناوری‌های نوین رایانشی را بررسی کرده و آینده تحقیقات در این حوزه را تبیین می‌نماییم. این اطلاعات می‌تواند به سیاست‌گذاران، فعالین و محققین این حوزه در سطح کشور کمک کند که بتوانند مسیر درستی را جهت اقدامات آتی خود انتخاب نموده و گام‌های معقولی را در این زمینه بردارند، به نحوی که در نهایت منجر به نقش‌آفرینی هرچه موثرتر ایران در سطح جهان در این حوزه گردد.

### ۱.۱ بخش‌بندی مقاله

در ادامه این مقاله به موارد زیر بدین ترتیب خواهیم رسید: معرفی، دسته‌بندی و آینده فناوری‌های نوین رایانشی به ترتیب در بخشهای زیر ارائه شده اند:

- رایانش کوانتومی در بخش دوم،
- رایانش زیستی در بخش سوم،
- رایانش نوری در بخش چهارم،
- رایانش حافظه‌ای در بخش پنجم
- و رایانش نانو در بخش ششم.

در بخش هفتم به مقایسه آماری این فناوریها از دیدگاه تعدد منابع علمی هر موضوع پرداخته شده است. همچنین چرخه محبوبیت (هایپ گارتنر) نیز برای این فناوریها در همین بخش بررسی شده

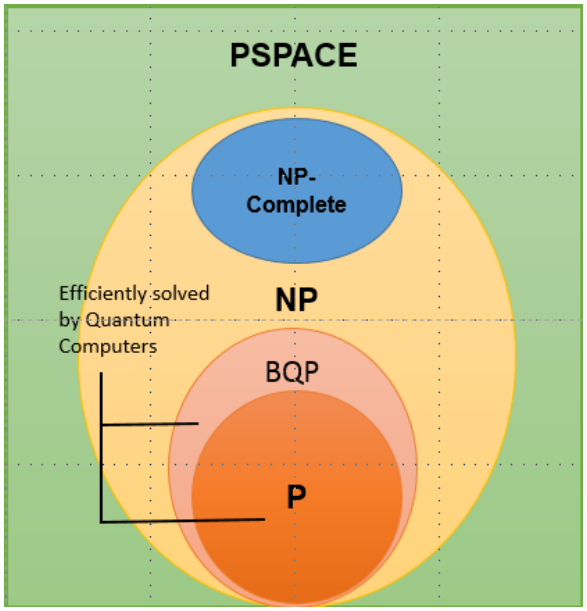
[1] Edge
[2] Exascale
[3] Q'uantum Computing
[4] Bio-inspired Computing
[5] Optical Computing
[6] Memory Computing
[7] Nano Computing

ا ست. در بخش ه شتم به قابلیتهای هرکدام از این فناوریها در ارایه مدل محا سباتی جدید ا شاره شده و درنهایت، جمع‌بندی مقاله در بخش نهم ارائه گردیده است.

## ۲- رایانش کوانتومی

به طور سنتی کامپیوترها از بیت[1] برای پردازش اطلاعات استفاده می‌کنند، اما محا سبات کوانتومی به بیتهایی بستگی دارد که دارای خصوصیات فیزیک کوانتوم هستند و کیوبیت[2] نامیده می‌شوند. بیت‌های محاسباتی سنتی یا "۰" یا "۱" هستند، اما کیوبیت‌ها می توانند همزمان در هر دو حالت باشند. این یک ویژگی کوانتومی به نام برهم نهی[3] است. ویژگی کوانتومی دیگر به نام درهم تنیدگی[4]، امکان اتصال (کوانتمی) کوبیت ها را فراهم می‌کند. را یا نه های کوانتومی برای حل مشکلات محاسباتی که قبلاً غیرممکن بود، از درهم تنیدگی و برهم نهی استفاده می‌کنند. این قابلیت باعث برتری کامپیوترهای کوانتومی بر کامپیوترهای کلاسیک می‌گردد.

این تصور که کامپیوترهای کوانتومی قادر به حل همه مسائل پیچیده هستند تصور اشتباهی است. رایانه‌های کوانتومی قرار نیست جایگزین رایانه‌های الکترونیکی شوند. دسته‌ای از مسائل که در کلاس با زمان چندجمله‌ای[5] ($\mathcal{P}$) قرار می‌گیرند، می‌توانند با توجه به چندجمله‌ای بودن زمان پردازش، توسط کامپیوترهای کلاسیک و همچنین کامپیوترهای کوانتومی در زمانی منطقی محاسبه شوند [۶]. اما دسته‌ای که در کلاس با زمان چندجمله‌ای غیرقطعی[6] ($\mathcal{NP}$) قرار دارند، با توجه به آن که زمان پردازش آن‌ها به صورت نمایی است، در کلاس پیچیده‌تری قرار خواهند گرفت که کامپیوترهای متعارف فعلی قادر نیستند آنها را در زمان مناسب حل کنند. با یک الگوریتم مناسب کوانتومی، می‌توان توسط کامپیوترهای کوانتومی برخی مسائل کلاس $\mathcal{NP}$ را از حالت نمایی به حالت چندجمله‌ای تبدیل کرد و در نتیجه این مسائل را با سرعت بسیار بالا و در زمان بسیار کمتری حل نمود. اما همچنان با توجه به محدود بودن الگوریتم های کوانتومی، این کامپیوترها نمی‌توانند مسائل پیچیده‌تر را مانند برخی مسائل کلاس $\mathcal{NP}$ و یا مسائل پیچیده‌تر کلاس $\mathcal{NP}$-Complete را به مسائل چندجمله‌ای تبدیل کرده و از عهده حل آن‌ها برآیند. شکل ۱ نمایش انواع کلاس مسائل موجود را نشان می‌دهد [۷، ۸].




**شکل ۱. نمایش کلاسهای مختلف مسائل (P, NP, NPComplete, …)**

### ۲-۱- اهمیت رایانش کوانتومی

پژوهشها نشان دهنده این است که اگر چه رایانش کوانتومی تازه در ابتدای راه قرار دارد، اما آزمایش‌هایی انجام شده که در طی آنها عملیات رایانش کوانتومی روی تعداد بسیار کمی از کیوبیت‌ها اجرا شده است. تحقیقات نظری و عملی در این زمینه ادامه دارد و بسیاری از موسسات دولتی و نظامی از تحقیقات در زمینه کامپیوترهای کوانتومی هم برای اهداف غیرنظامی و هم برای اهداف امنیتی (مثل تجزیه و تحلیل رمز) حمایت می‌کنند. اگر کامپیوترهای کوانتومی در مقیاس بزرگ ساخته شوند، می‌توانند مسائل خاصی را با سرعت خیلی زیاد حل کنند. نکته مهم این است که مسائلی که توسط کامپیوترهای کلاسیک محاسبه‌پذیر نیستند توسط کامپیوترهای کوانتومی نیز قابل حل نخواهند بود. بنابراین این کامپیوترها نظریه چرچ-تورینگ را نقض نمی‌کنند. در واقع کامپیوترهای کوانتومی قادر هستند مسائلی که حل آن‌ها توسط کامپیوترهای کلاسیک زمان بسیار زیادی می‌برد و یا به صورت عملی (نه تئوری) قابل حل نیستند را در زمان بسیار کمتری حل کنند. رایانش کوانتومی کاربردهای بسیار گسترده‌ای دارد. این اعتقاد وجود دارد که این فناوری می‌تواند دنیای آینده را تغییر دهد. اثبات شده است که کامپیوترهای کوانتومی تحول شگرفی در حوزه‌های زیر ایجاد می‌کنند. (البته کاربردهای بسیار زیاد دیگری برای این کامپیوترها متصور شده‌اند، اما در اینجا به همین چند مورد بسنده می‌کنیم):

[1] bit
[2] Qbit or Qubit (both are used)
[3] Superposition
[4] Entanglement
[5] Polynomial time
[6] Nondeterministic Polynomial time

- بهینه‌یابی،
- یادگیری ماشین،
- مدل‌سازی پدیده‌ها،
- شبیه‌سازی ساختارهای مولکولی.

## ۲-۲- اصول اساسی رایانش کوانتومی

در یک کامپیوتر کوانتومی هر کیوبیت با یک بردار بصورت معادله (۱) نشان داده می‌شود:

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} \quad (۱)$$

که در آن دو مقدار $a_0$ و $a_1$ هرکدام یک عدد مختلط هستند. در این معادله $a_0$ و $a_1$ به ترتیب احتمال ۰ یا ۱ بودن است، به طوریکه:

$$|a_0|^2 + |a_1|^2 = 1 \quad (۲)$$

حال اگر یک رجیستر شامل ۲ عدد کیوبیت باشد آن را با بردار چهار تایی معادله (۳) نشان می‌دهیم:

$$\begin{pmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ a_{10} \\ a_{11} \end{pmatrix} = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle \quad (۳)$$

و در ادامه برای یک رجیستر $n$ کیوبیتی یک بردار ستونی $2^n$ خواهیم داشت. عملیات کوانتومی بوسیله ماتریس واحد $(U)$ مدل سازی می شود که دروازه‌های کوانتومی نامیده می شوند. برای تک کیوبیت ماتریس $U = 2 \times 2$ خواهد بود. برای $n = 2$ این ماتریس به صورت معادله (۴) خواهد شد:

$$U = 4 \times 4 = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{pmatrix} \quad (۴)$$

با توسعه و افزایش کیوبیتها برای هر عدد $n$، ابعاد این ماتریس $U = 2^n \times 2^n$ خواهد بود. به عنوان مثال اگر $n = 32$ باشد ابعاد ماتریس در معادله (۴) برابر $4.295 \times 10^9$ خواهد شد.

شبیه سازی یک رایانه کوانتومی ۳۰ کیوبیتی روی یک لپ‌تاپ معمولی اجرا می شود و شبیه سازی یک رایانه ۳۵ کیوبیتی نیاز به یک سرور متوسط دارد [۹]. اما برای شبیه سازی یک رایانه ۴۵ کیوبیتی به یک ابررایانه با $500\ TeraByte$ حافظه نیاز است و این نمایش قدرت کوانتومی است [۱۰].

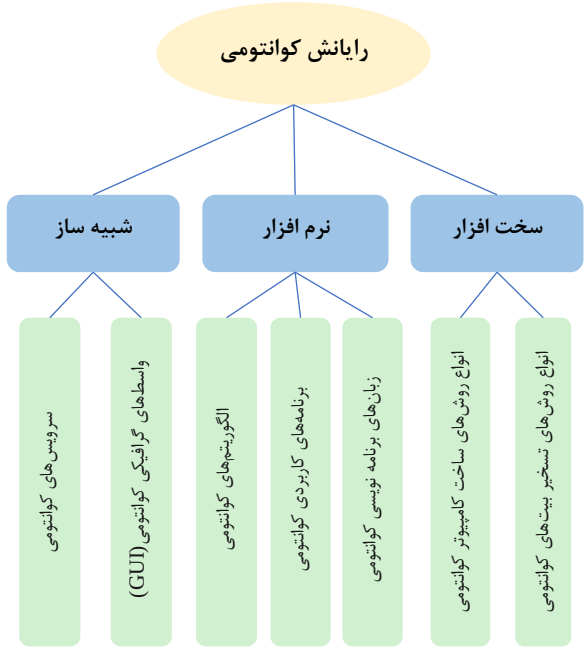
## ۲-۳- دسته‌بندی رایانش کوانتومی

آرایه بندی رایانش کوانتومی را از بسیاری لحاظ می‌توان مورد بررسی قرار داد. در این بین دو مورد سخت افزار و نرم افزار مهمترین بخشهای آرایه هستند که هرکدام موضوعات متعددی را در خود جای داده اند. در بخش سخت افزار اولین موضوعی که مورد توجه قرار می گیرد و اصلی ترین موضوع نیز هست، انواع روشهای ساخت رایانه های کوانتومی است. موضوع دیگر در این زیر شاخه آرایه بندی، موضوع روشهای تسخیر بیتهای کوانتومی است. در بخش نرم افزار کوانتومی، انواع الگوریتم های کوانتومی، زبانهای برنامه نویسی کوانتومی و برنامه های کاربردی (App) کوانتومی وجود دارند که علاقمندان در زیرآرایه نرم افزار کوانتومی روی هرکدام در حال کار هستند. مورد سومی را نیز می‌توان در این آرایه مد نظر قرار داد که می‌تواند بعنوان یک شاخه اصلی مطرح گردد. این مورد با عنوان شبیه سازی، هرچند یک بخش نرم افزاری است اما در زیر شاخه‌های نرم افزاری کوانتومی قرار نمی گیرد چرا که این بسته‌ها خود توسط زبانهای برنامه نویسی و کمپایلرهای مرسوم کلاسیک نوشته می شوند و یک موضوع جداگانه را در بر می‌گیرند. شکل ۲ این دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

## ۲-۴- آینده رایانش کوانتومی

نگاه اجمالی به حوزه رایانش کوانتومی نشان می دهد در سالهای اخیر نه تنها تحقیقات در زمینه شناخت و گسترش ابعاد ناشناخته این حوزه با چشم انداز عملیاتی و جهان شمول شدن آن با شیب بسیار تندی انجام می‌شود، بلکه تلاش برای تلفیق رایانش کوانتومی با دیگر حوزه‌ها نیز افزایش چشمگیری داشته است.

علیرغم آنکه رایانش کوانتومی در دوران طفولیت خود قرار دارد ولی استفاده روزافزون از کامپیوتر های کوانتومی، توانمندی آن در افزایش سرعت تحقیقات و حصول دستاوردهای جدید در حوزه‌های بسیاری از جمله موارد زیر را نشان می‌دهد:




**شکل ۲. دسته‌بندی رایانش کوانتومی از جنبه‌های مختلف**

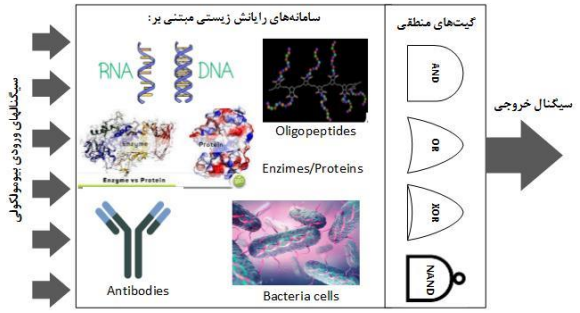
- فیزیک هسته‌ای،
- اقتصاد و امور مالی،
- شبیه‌سازی‌های پیشرفته،
- حوزه‌ی پزشکی و دارویی،
- امنیت سایبری و رمز گشایی،
- پیش‌بینی‌های دقیق آب و هوایی،
- پیشرفت‌های صنعتی حمل و نقل،
- ارائه سطح بالایی از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین،
- برر سی تغییرات و ضعیت کره زمین به منظور ر سیدن به زندگی سالم بشری و ... .

به عقیده بسیاری از محققین بزرگ در این حوزه، با رسیدن به نسل اول کامپیوترهای کوانتومی، آینده دستخوش تغییرات زیادی خواهد شد و نقش هوش مصنوعی و کامپیوترهای کوانتومی در آن بسیار پر رنگ خواهد بود[۷].

## ۳- رایانش زیستی

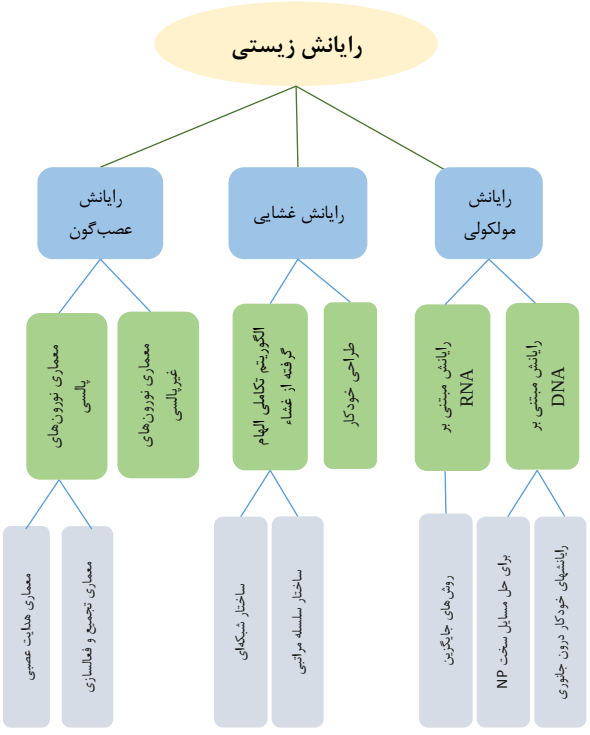
انسان از دیرباز به خاطر ماهیت ذهنی و تفکرش، توجه خاصی به طبیعت پیرامون خود از گیاهان گرفته تاپدیده‌های طبیعی و خصوصا موجودات زنده داشته و از آنها الگو می‌گرفته است. با مرور زمان و پیشرفت‌های علمی، الگوبرداری از موجودات زنده، از شکل ظاهری آنها فراتر رفته و به فیزیولوژی و بیولوژی موجودات رسیده است که خود بدن انسان را نیز شامل می‌گردد. به این تقلید از عناصر طبیعت از جمله موجودات زنده "زیست تقلید" می‌گویند. در عصر فناوری اطلاعات و پیشرفت‌های روز افزون محققان و دانشمندان خصوصا در زمینه الکترونیک و رایانه، محدودیت‌هایی از لحاظ ارسال، پردازش و ذخیره‌سازی داده بوجود آمده است که علت اصلی آن حجم عظیم داده‌ها و اطلاعات می‌باشد.

همه سیستم‌های بیولوژیکی یا زیستی، از یک سلول باکتری ساده گرفته تا یک مغز پیچیده، سیگنال‌های اطلاعاتی را از محیط خارجی خود دریافت یا به عبارتی حس کرده و بعد از پردازش، اطلاعات را در حافظه ذخیره می‌کنند و در ادامه براساس آن تصمیم‌گیری کرده و وضعیت داخلی خود را در راستای اطمینان از بقا، رشد و تولیدمثل خود با محیط خارجی تطبیق می‌دهند [۱۱]. رایانش زیستی اشاره بر این موضوع دارد که براساس الگوریتم‌های ژنتیکی و شبکه‌های عصبی می‌توان سیستم‌های رایانشی را ایجاد کرد که براساس اطلاعاتی که به عنوان ورودی به آنها داده می‌شود، توانایی یادگیری و تصمیم‌گیری دارند. در رایانش زیستی می‌توان از داده‌ها و اطلاعات برای ارزیابی و یادگیری نحوه واکنش استفاده کرد. مغز انسان به طور متوسط نزدیک به ۹۰ میلیارد سلول عصبی دارد که اطلاعات را منتقل و پردازش می‌کنند. شبکه‌های عصب‌گون سیستم‌های مصنوعی هستند که بر اساس همان اصل ساخته شده‌اند. الگوریتم‌های ژنتیک از قبیل رایانش مبتنی بر $\mathcal{DNA}$ و رایانش مبتنی بر $\mathcal{RNA}$ که با عنوان رایانش مولکولی و بیولوژیکی نیز شناخته می‌شوند، توالی کدهایی می‌باشند که به رایانه کمک می‌کند تا بر اساس نتایج از پیش تعیین‌شده یا پیش‌بینی شده، در مورد یک اقدام تصمیم‌گیری کند.




**شکل ۳. نمایش گیتهای منطقی و معادل آن در سامانه‌های زیستی [۱۳]**

در شـــکل ۳ گیت‌های منطقی که در کامپیوترهای ســـنتی مورد ا ستفاده قرار می‌گیرد در کنار ساختارهای محا سباتی معادل آن‌ها در سامانه‌های زیستی نشان داده شده است. دسته‌بندی موضوعات مطرح در حوزه رایانش زیستی نیز در شکل ۴ نشان داده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود [۱۲] .

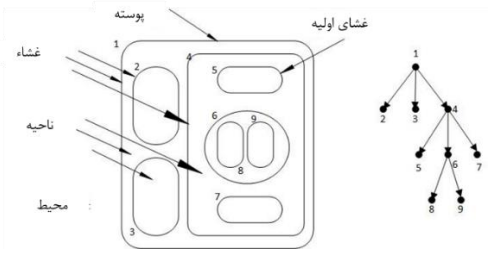



**شکل ۴. دسته‌بندی رایانش‌های مطرح زیستی**

## ۳-۱- انواع رایانش زیستی

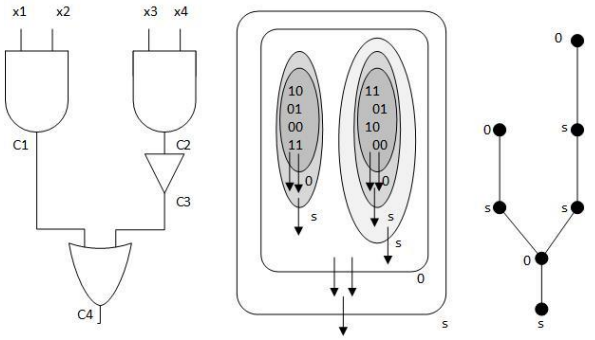
همانطور که بیان شد، منابع الهام‌بخش زیستی زیادی در پیرامون ما وجود دارند از مغز انسان گرفته تا کلونی مورچه‌ها. می‌توان سه نوع شناخته‌شده این رایانش را به شرح زیر بیان نمود [۱۱]:

رایانش غشایی[1] یا $\mathcal{P}$ : که چارچوبی جامع، دقیق و موازی توزیع‌شده‌ای را مطابق با قوانین تکامل ارایه می‌دهد. از این رایانش در علوم رایانه جهت گرافیک، رمزنگاری و حل مسائلی که از لحاظ محاسباتی مشکل و پیچیده هستند، استفاده می‌شود. این رایانش از لحاظ محاسباتی قدرتمند و کارآمد است. در شکل ۵ ساختار یک سلول غشایی را مشاهده می‌کنید.




**شکل ۵. ساختار یک سلول غشایی [۱۴]**

این مدل یا سیستم، پتانسیل خوبی برای طراحی الگوریتم‌های موازی انبوه، استفاده در روباتیک، بهینه‌سازی و مدل‌های رایانشی دارد. به طور طبع برای اجرای آن سکوهای سخت‌افزاری باید انتخاب شوند که در محاسبه دارای قابلیت موازی کاری ذاتی باشند؛ مانند $\mathcal{FPGA}$ یا $\mathcal{GPU}$ها. رایانش غشایی را می‌توان به عنوان افزونه‌ای از رایانش مبتنی بر $\mathcal{DNA}$ در نظر گرفت [۱۳]. غشاء ارتباط انتخابی بین دو منطقه را فراهم میکند.طبق نظر"جورج پائون"، جداسازی فضای اقلیدسی به یک "درون" محدود و یک "خارج" نامحدود انجام می‌شود. «ارتباط انتخابی» جایی است که محاسبه وارد می‌شود. در شکل ۶ یک مدار بولی و ساختار غشایی مرتبط با آن با شبیه سازی توسط سیستم غشایی[2] $\mathcal{AID}$ را مشاهده می‌نمایید [۱۴].

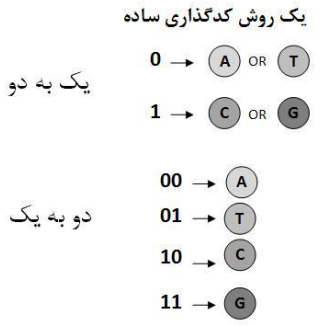



**شکل ۶. معادل ساختار غشایی یک مدار بولی [۱۴]**

رایانش مولکولی: در این رایانش که در آن مولکول‌ها به عنوان سخت‌افزار در نظر گرفته می‌شوند، داده‌ها می‌توانند به عنوان رشته‌های $\mathcal{DNA}$ و یا $\mathcal{RNA}$ کدشده و از طریق ابزار مولوکولی زیستی جهت اجرای عملیات منطقی و ریاضی مورد استفاده قرار بگیرند. $\mathcal{DNA}$ به عنوان ورودی در مدارهای منطقی مبتنی بر $\mathcal{DNA}$ جهت ایجاد سیستم‌های رایانشی پیچیده قابل برنامه‌ریزی، دقیق و موثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محاسبات $\mathcal{DNA}$، اطلاعات به جای الفبای باینری دودویی یا ۰ و ۱ مورد استفاده در رایانه‌های سنتی/رایج، با استفاده از الفبای ژنتیکی چهار کاراکتری (اسیدهای نوکلئویک) نمایش داده می‌شود که عبارتند از [۱۵]:

- $\mathcal{A}$ یا $\mathcal{Adenine}$
- $\mathcal{G}$ یا $\mathcal{Guanine}$
- $\mathcal{C}$ یا $\mathcal{Cytosine}$
- $\mathcal{T}$ یا $\mathcal{Thymine}$

در شکل ۷ یک کدگذاری ساده دوتایی مورد ا ستفاده در طرحهای ذخیره اطلاعات مبتنی $\mathcal{DNA}$ را مشاهده می‌کنید [۱۶]:



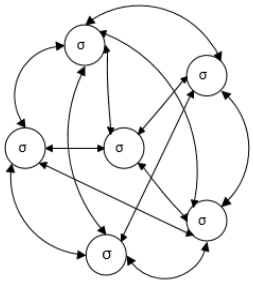

**شکل ۷. دو طرح مختلف ذخیره اطلاعات مبتنی بر DNA [۱۶]**

[1] Membrane computing

[2] Active membranes and inhibiting/de-inhibiting

سلول‌ها از مواد شیمیایی برای ذخیره و انتقال داده‌ها استفاده می‌کنند درحالی‌که رایانه‌ها برای این کار، از وسایل مغناطیسی یا الکترونیکی استفاده می‌کنند. در هر سلولی، پروتئین به‌عنوان هم برنامه و هم ماشین عمل می‌کند و این در حالی است که در رایانه، برنامه و ماشین از هم جدا بوده و برنامه‌ها بر روی ماشین اجرا می‌شوند. پروتئین‌ها خودسامان[1] هستند. اما رایانه‌ها چنین امکانی ندارند. تعداد ژن‌ها/طول بستگی به گونه آن‌ها دارد. $\mathcal{DNA}$ ممکن است به‌عنوان حافظه منطقی یا گیت $\mathcal{AND}$ در نظر گرفته شود و درواقع به‌صورت یک حافظه ذخیره‌سازی متراکم است. $\mathcal{DNA}$ در اصل یک سیستم شیمیایی و فیزیکی است. دستورالعمل‌ها در توالی یا دنباله‌ای از پایه‌های $\mathcal{DNA}$ کدگذاری می‌شوند. بخشی از $\mathcal{DNA}$ در معرض نمایش، رونویسی و ترجمه برای دستورالعمل‌ها قرار می‌گیرد. خود $\mathcal{DNA}$ به‌تنهایی هیچ کار محاسباتی انجام نمی‌دهد و بیشتر به‌عنوان یک حافظه بسیار بزرگ عمل می‌کند؛ اما باید توجه داشت که نحوه واکنش مبناهای مکمل با یکدیگر را می‌توان برای کارهای محاسباتی مورداستفاده قرار داد. در مقایسه با سریع‌ترین ابررایانه، یک رایانه مبتنی بر عملکرد $\mathcal{DNA}$ می‌تواند به $10^{14}$ عملیات در ثانیه (۱۰۰ ترافلاپس) در مقابل $10^{6}$ عملیات در ثانیه دست پیدا کند [۱۷]. برخلاف مولکول $\mathcal{DNA}$ که دو رشته‌ای و درهم‌تنیده می‌باشد، مولکول $\mathcal{RNA}$ مولکولی تک‌رشته‌ای است. رایانش $\mathcal{RNA}$ می‌توانند جایگزین رایانش $\mathcal{DNA}$برای پیاده‌سازی توابع منطقی و ایجاد شبکه‌های بولی چندلایه با گیتهای منطقی $\mathcal{AND/OR/NOT}$ شوند. یکی از بزرگترین چالش‌های مرتبط با محاسبات مبتنی بر $\mathcal{RNA}$، ناپایداری آن است. رایانش $\mathcal{DNA}$ و $\mathcal{RNA}$ نسبت به یکدیگر دارای مزایا و معایبی می‌باشند.

رایانش عصب‌گون: به دنبال پیشرفت‌های چشم‌گیر هوش مصنوعی و با بررسی چالش‌های موجود، محققان دریافتند بهترین انتخاب جهت توسعه راه‌حل‌ها و رفع چالش‌های موجود در این مسیر، الگوبرداری از ساختار طبیعی مغز انسان به عنوان پیچیده‌ترین و بهینه‌ترین ساختار پردازشی زیستی، در جهت تولید تراشه‌های پردازشی قدرتمند و بهینه می‌باشد. دو رویکرد اصلی جهت توسعه تجهیزات عصب‌گون وجود دارد. اولین رویکرد براساس مدارهای تجمیع در مقیاس بزرگ[2] ($\mathcal{VLSI}$) آنالوگ و دومین رویکرد براساس تجهیزات مبتنی بر سوئیچینگ مقاومتی می‌باشد که با عنوان $\mathcal{Memristive}$ شناخته شده و گاهی از آن با عنوان رایانش مبتنی بر $\mathcal{Memristive}$ نیز نامبرده می‌شود [۱۸]. در شکل ۸، طرح یک شبکه عصبی مصنوعی با توپولوژی دلخواه و اتصالات متقارن $(w_{ij} = w_{ji})$ را ملاحظه می‌نمایید. مبانی تئوری گراف شبکه برای اتصالات متقارن و غیرمتقارن و همینطور شبکه های جهت دار و بدون جهت را می توان در مقالات متعددی مطالعه نمود [۱۹، ۲۰].




**شکل ۸. طرح یک شبکه عصبی مصنوعی با توپولوژی دلخواه [۲۱]**

در جدول ۱ قیاس بین متغیرهای تعریف کننده گراف یک شبکه عصبی و معادلهای سیناپس الکتریکی آن را مشاهده می‌نمایید. یک شبکه عصبی بزرگ را می‌توان با مجموعه‌ای از $\mathcal{N}$ گره یا نورون در نظر گرفت که حالت هرکدام با متغیر $s_i$ بیان می‌شود.

در بسیاری از مدل‌های شبکه‌های عصبی، نورون‌ها به عنوان عناصر دوتایی در نظر گرفته شده‌اند که حالت آنها با معادله (۵) تعریف می شود:

$$s_i = +1, -1 \qquad (۵)$$

(که معمولا کد ۱- و ۱+ نامیده می‌شوند). در اینجا متغیر دیگری نیز تعریف می‌کنند با عنوان $\sigma_i$ به صورت معادله (۶):

$$\sigma_i = \frac{1 + S_i}{2} = 0 \; or \; 1 \qquad (۶)$$

**جدول۱. قیاس متغیرهای سیناپس الکتریکی شبکه عصبی**

| متغیرهای معادل سیناپسی شبکه | متغیرهای گراف یک شبکه عصبی |
|---|---|
| $V_i$ (پتانسیل غشایی) | $\sigma_i$ (حالت گره) |
| $G_{ij}(t)$ (رسانایی سیناپسی) | $w_{ij}(\xi).D_j(t).F_j(t)$ نورون‌ها با لبه‌ها یا سیناپس‌ها متصل می‌شوند که حالت و یا وزن آن‌ها توسط یک متغیر حقیقی $w_{ij}$ (وزن یادگیری) نشان داده می‌شود. $F_j$ و $D_j$ متغیرهای اضافی هستند |

[1] Self-assembly

[2] Very Large Scale Integration

| | |
|---|---|
| که حداکثر رسانایی را تنظیم می‌کنند. | |
| $\theta_i$ | $V_{th}$ (آستانه شلیک) |
| $h_i(t)$ | $I_i^{syn}$ (t) (کل جریان سیناپسی به نورون i) |
| $m(\sigma) = \frac{1}{N}\sum_i \sigma_i$ | V (نرخ شلیک متوسط در شبکه) |

در مدل‌های شبکه‌های عصبی تحریک شده، هر یک از این دو مقدار موجود در معادلات (۵ و ۶) ممکن است نشان دهنده یک نورون در حالت خاموش (زیر آستانه شلیک) یا نورونی باشد که پتانسیل نوسانات الکتریکی کوچک منظم همراه با فعالیت فیزیولوژیکی عضله یا عصب را دارد. هر گره $\sigma_i$ اطلاعات را از همسایه‌های خود ( نورونی که به طور مستقیم به آن متصل هستند) به صورت معادله (۷) دریافت می‌کند [۲۱]:

$$h_i(\sigma, t) = \sum_{i \neq j} w_{ij}(\xi)\, \sigma_i(t) \qquad (۷)$$

که در رابطه فوق (معادله ۷)، پارامتر $\xi$ شامل $M$ حالت شبکه است:

$$\xi^{\upsilon} = \{\xi_i^{\upsilon}, i = 1, \dots, N), \upsilon = 1, 2, \dots, M \qquad (۸)$$

در فرمول فوق و در غیاب سایر عامل‌های خارجی، زمانیکه وضعیت نود بزرگتر از آستانه $\theta_i$ باشد، نورون $i$ شلیک می‌شود. می‌توان وضعیت جاری یک نورون خاص را با فرض اجرای یک زنجیره مارکوف زمان گسسته [۲۲]، به صورت زیر به‌روز نمود:

$$\sigma_i\,(t+1) = \Theta\,[h_i(\sigma, t) - \theta_i] \qquad (۹)$$

که $\Theta(X)$ یک تابع پله‌ای (واحد) می‌باشد (این تابع، تابعی‌ناپیوسته و چندضابطه‌ای‌است که مقدارش برای اعداد منفی، صفر و برای اعداد نامنفی یک است). به این صورت و با استفاده از معادلات فوق‌الذکر وضعیت گراف شبکه عصبی نشان داده شده در شکل ۸ تغییر می‌نماید که اینها همه می توانند نمایشی از نحوه اجرای رایانش در شبکه های عصبی باشند [۲۳].

## ۳-۲- کاربردهای رایانش زیستی

پژوهشهای ما نشان دهنده این موضوع است که ابررایانه‌های امروزی عمدتا در کاربردهای خود با دو مانع روبرو هستند: اول اینکه مصرف انرژی الکتریکی آنها بالا است. بطوریکه در توسعه رایانه‌های قدرتمندتر از جمله استفاده از آنها در ابررایانش فوق سریع، با محدودیت در قابلیت خنک‌سازی پردازنده‌ها روبرو می‌شوندو دوم این که ابررایانه‌ها نمی‌توانند همزمان دو چیز را بطور هم‌زمان و بصورت موثر و کارآمد انجام دهند. این دو مورد باعث می‌شود که طراحی تراشه‌ها و نرم‌افزارهای بدون خطا و استفاده موثر از منابع در کاربردهای محاسباتی در ابررایانه‌ها با با مانع روبرو شود [۲۴]. رایانش زیستی می‌تواند در رفع موانعی از جمله موارد ذکر شده کمک شایانی بنماید. محققی با نام لئونارد آدلمن در سال ۱۹۹۴، امکان اجرای محاسبات تعریف‌شده توسط انسان را با سخت‌افزار مولکولی(ژنتیکی) نشان داد. او موفق شد یک مسأله ریاضی در تئوری گراف با عنوان " مسأله راه همیلتون یا فروشنده دوره گرد" را با هفت شهر از این طریق حل کند [۲۵]. منطق بولی مرکز اصلی در حوزه رایانش است و بنابراین طراحی و پیاده‌سازی توابع منطقی بولی در سلول‌ها که معمولا در متریال ژنتیکی کد می‌شوند، کلید توسعه رویکردهای بیولوژی مصنوعی است که ریشه در رایانش زیستی دارد. آدلمن از طریق رایانش مبتنی بر $\mathcal{DNA}$ توانست مساله فروشنده دوره گرد با هفت شهر مسیر را حل کند. رایانش زیستی دارای کاربردهای متنوع زیادی از جمله هوش محاسباتی، انفورماتیک زیستی، پردازش زبان طبیعی، یادگیری ماشین، نظریه الگوریتم، داده‌کاوی، ذخیره‌سازی، امنیت، علم رمز و غیره دارد.

## ۳-۳- آینده رایانش زیستی

پژوهشها نشان دهنده این است که در حوزه سیستم‌های رایانش فوق سریع، مواردی از قبیل در دسترس بودن سطوح سخت‌افزار و برنامه‌های کاربردی، مراکز داده، زیرساخت‌های رایانش ابری، دسترسی داده‌های کلان و تجسم‌سازی، معماری چندهسته‌ای و هسته ترکیبی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، خصوصا در راه رسیدن به دو هدف اصلی مقیاس‌پذیری و دسترس‌پذیری مطرح هستند. طبعاً در این مسیر و رسیدن به پیشرفت در زمینه‌های فوق الذکر، چالش‌های زیادی از جمله محدودیت‌های شدید در عملکرد (مانند زمان پردازش) و معیارهای هزینه وجود دارند [۲۶]. به عنوان نمونه تمرکز فناوری غشایی (حداقل از لحاظ تئوری) اجرا بر روی سخت افزار می‌باشد و بررسی این موضوع که طراحی سخت‌افزار خاص (سیلیکونی) مناسب سیستم‌های $\mathcal{P}$چگونه است و چگونه باید باشد از اهمیت زیادی برخوردار است. رایانش مبتنی بر $\mathcal{DNA}$ در ابتدای راه قرار دارد و به نظر می‌رسد کاربری آن در آینده بر روی درمان با سیستم‌های نانوروبوتیک پردازش اطلاعات $\mathcal{DNA}$ در داخل بدن و سیستم‌های بزرگ ذخیره‌سازی داده باشد. به هرحال مطالعات انجام‌شده و در حال انجام نشان می‌دهد که رایانش زیستی

علی رغم داشتن بعضی معایب، می‌تواند در راه رسیدن ابررایانه‌های فوق سریع در مقیاس اگزا و بالاتر کمک شایانی بنمایند. خصوصا تاثیر آنها در صرفه‌جویی در انرژی، حفظ محیط زیست، ساختن سخت‌افزارهای با قابلیت یالا اما در مقیاس کوچک، ذخیره‌سازی عظیم و ... مشهود خواهد بود.

## ۴- رایانش نوری

محاسبات نوری یا رایانش نوری بر مبنای فوتون‌هایی کار می‌کنند که توسط یک نور قابل رؤیت، پرتوهای مادون قرمز، لیزر ودیودها به جای جریان الکتریسته برای انجام محاسبات دیجیتال استفاده می‌کنند[۲۷]. یک جریان الکتریکی چیزی در حدود ۱۰ درصد سرعت نور را در اختیار دارد. این محدودیت سرعت باعث شده است تا نرخ تبادل داده‌ها در مسافت‌های طولانی با مشکلاتی روبرو شوند. مشکلاتی که زمینه‌ساز تکمیل و پیشرفت فیبرهای نوری شده‌اند. با استفاده از یکسری ویژگی‌های نمایان در یک دستگاه، می‌توان کامپیوتری را طراحی کرد که بر پایه این فناوری بتواند عملیات محاسباتی را ده‌ها بار سریع‌تر از یک کامپیوتر الکترونیکی معمولی انجام دهد. کامپیوترهای مدرن امروزی بر پایه ترازیستورها کار می‌کنند. بیشتر پروژه‌های تحقیقاتی بر روی جایگزین کردن مؤلفه الکتریکی با نمونه مشابه نوری آن‌ها هستند تا در نهایت بتوانند یک کامپیوتر نوری طراحی کنند.از آنجایی که اجزای نوری می‌توانند بصورت ترکیبی با کامپیوترهای فعلی استفاده شوند این رویکرد بهترین چشم انداز برای محاسبات نوری را فراهم می‌آورد. دستگاه‌های نوری الکتریکی ۳۰ درصد از انرژی مصرف شده را صرف تبدیل انرژی الکتریکی به نور و برعکس می‌کنند که باعث کند شدن انتقال اطلاعات نیز می‌شود. در کامپیوترهای تماما نوری این تبدیل انرژی الکتریکی به نور و برعکس حذف می‌شود و در نتیجه مصرف انرژی کمتر می‌شود. محاسبات نوری یک فیلد چند رشته‌ای است که شامل طیف وسیعی از تخصص در فیزیک نوری، علوم مواد، مهندسی نوری، مهندسی برق، معماری کامپیوتر و نظریه کامپیوتر است [۲۸].

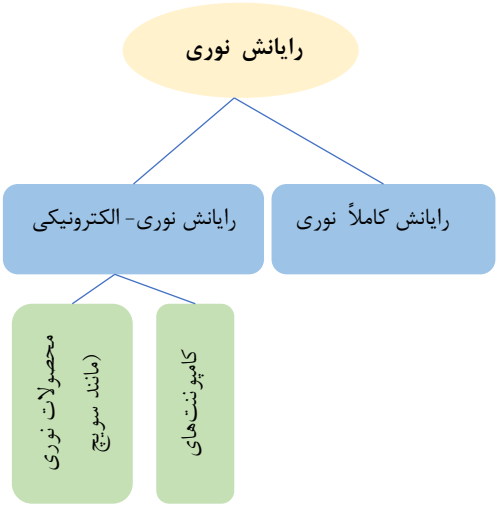
یکی از بنیادی ترین اجزای کامپیوترهای مدرن الکترونیکی ترانزیستور می‌باشد. برای جایگزین کردن اجزای الکترونیکی با اجزاری نوری، به ترانزیستور نوری نیاز می‌باشد. از ترانزیستورهای نوری برای ساخت گیت‌های نوری منطقی استفاده می‌شود [۲۹، ۳۰] که با سوار کردن آنها بر اجزای نوری به واحد پردازنده مرکزی میرسیم. در تولید اجزای نوری از مواد مختلفی استفاده می‌شود که مهمترین آنها سیلیکون فوتونیک می‌باشد [۳۱، ۳۲]. جهت تولید پردازنده‌های نوری از سیلیکون فتونیک نیازمند تولید گیت‌های منطقی با استفاده از سیلیکون فوتونیک هستند. یولان و همکاران نشان دادند که گیت‌های منطقی تماماً نوری از جمله گیت‌های XOR-OR-NOT-XNOR-NAND از نظر تئوری در کریستال فوتونیک سیلیکون در فضای دو بعدی با استفاده از اثر تداخل پرتو نور تحقق می‌یابند [۳۳]. سینگ و همکاران در [۳۴] تولید گیت‌های منطقی تماما نوری را که با مواد متفاوت ساخته شده اند، بررسی کرده و از نظر عملکردی به مقایسه آنها پرداخته است. از آنجا که طراحی پردازنده‌های نوری هزینه بر استو یکی از گلوگاه‌های اصلی در انتقال اطلاعات و انجام محاسبات سرعت انتقال اطلاعات بین مراکز داده و همچنین انتقال اطلاعات بین حافظه و پردازنده‌ها می‌باشد، لذا محققان سعی در استفاده از سیلیکون فوتونیک در کنار اجزای الکترونیکی دارند تا بصورت ترکیبی از این فناوری استفاده کنند که مقرون به صرفه باشد [۳۵].

### ۴-۱- دسته‌بندی رایانش نوری

بر اساس دانش نویسندگان این مقاله رایانش نوری به دو دسته رایانش کاملا نوری و رایانش نوری-الکترونیکی تبدیل می‌شود. در رایانش نوری-الکترونیکی از نور برای ارتقاء سرعت پردازش و ارتباط بین بخشها در کنار سایر اجزای الکترونیکی استفاده می‌شود و یا در تولید محصولات نوری مانند سوییچ‌ها و انتقال دهنده‌های نوری برای بهبود سرعت استفاده می‌شود. شکل ۹ دسته‌بندی رایانش نوری را نشان می‌دهد.

### ۴-۲- کاربردهای رایانش نوری

بر اساس دانش و تجربه ما برای بهره برداری از تفاوت بین فوتون‌ها و الکترون‌ها، محاسبات نوری در زمینه‌های مختلفی به کار گرفته شده است که در این بخش به بعضی از کاربردهای آن اشاره می‌کنیم.




**شکل ۹. دسته‌بندی رایانش نوری**

**• ارتباطات نوری**

محاسبات نوری باعث ایجاد ارتباطات فیبر نوری، شبکه‌های محلی فیبر نوری و ارتباطات دیجیتالی شده است، بطوری که انتقال داده‌های فیبر نوری به امری عادی تبدیل شده است. فیبرهای نوری اتصال نوری بین دستگاه‌ها را برآورده می‌کند که جایگزینی ایمن برای سیم‌های مسی هستند.

**• دستگاه‌های خاص منظوره نوری**

دستگاههای خاص منظوره، مانند رادار دیافراگم مصنوعی[1] و همبستگی نوری[2] و موشک‌های ضد بالستیک از اصول محاسبات نوری استفاده میکنند.

**• حل مسائل $\mathcal{NP}$-Complete**

از جمله کاربردهای غیرمتعارف محاسبات نوری استفاده از آنها برای حل مسائل $\mathcal{NP}$-Complete می‌باشد که مسائل دشواری هستند و توسط کامپیوترهای امروزی در زمان چندجمله‌ای حل نمی شوند. به عنوان مثال مسئله جمع زیرمجموعه‌ها توسط محاسبات نوری در مقاله [۳۶] ارائه شده است. از جمله مسائل دیگری که توسط محاسبات نوری حل شده است، مسئله مسیرهمیلتونی و $3SAT$ می‌باشد [۳۷].

**• استفاده در کامپیوترهای الکترونیکی-نوری**

پژوهشها نشان دهنده این موضوع است که از آنجایی که هزینه ساخت کامپیوترهای کاملا نوری بسیار زیاد می‌باشد و مقرون به صرفه نمی باشد از ترکیبی از سیستم‌های الکترونیکی – نوری استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای محاسبات نوری می‌توان پردازش‌های موازی و مسائل پزشکی را نام برد.

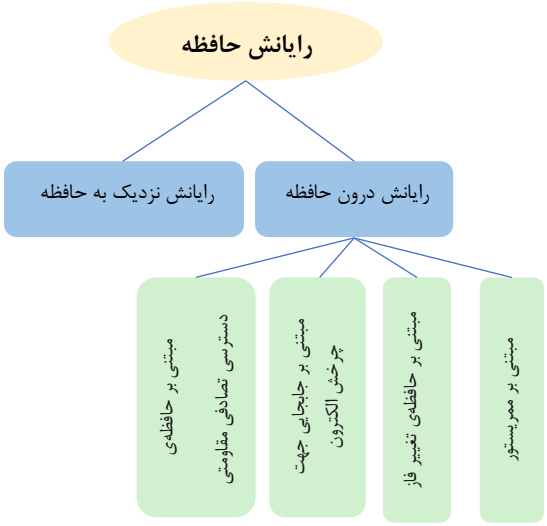
## ۴-۲- آینده رایانش نوری

بر اساس دانش و تجربه ما سیستم‌های محاسباتی نوری کاملا با سیستم‌های الکترونیکی متفاوت هستند. محاسبات نوری امکان معماری غیر ون نیومن با مکانیسم‌های مختلف برای ارتباطات و ارتباطات را ارائه می‌دهند که به دلیل هزینه بالا، از نظر اقتصادی فعلا جایگزین مناسبی برای مدارات $CMOS$ نمی باشند. از آنجایی که یکی از چالش‌های اصلی نسل آینده کامپیوترها سرعت انتقال داده بین سرورها، درون یک سرور و ارتباط بین اجزای پردازشی می باشد، بیشترین استفاده از محاسبات نوری بصورت ترکیبی در دستگاه‌های الکترونیکی نوری و انتقال دهنده‌ها برای حل مشکل سرعت انتقال داده می‌باشد.زیرا یکی از اصلی ترین کاربردهای استفاده از فوتون بجای الکترون، سرعت و پهنای باند بالا در انتقال اطلاعات می‌باشد.

## ۵- رایانش حافظه ای

با گذشت سال‌ها، فناوری حافظه نتوانست با پیشرفت فنّاوری پردازنده ازنظر تأخیر و مصرف انرژی همگام باشد که این پدیده دیوار حافظه[3] نامیده می‌شود. حافظه دسترسی تصادفی پویا[4] ($DRAM$) یک عنصر بسیار مهم در تمام سیستم‌های رایانشی مانند سرورها، پلتفرم‌های ابری و ابزارهای تعبیه‌شده محسوب می‌شود. نیاز به پردازش سریع داده‌ها در حال افزایش است؛ بنابراین، $DRAM$ به دلیل مصرف انرژی زیاد و تأخیر ناشی از انتقال داده‌ها به یک تنگنای مهم تبدیل می‌شود. هزینه انتقال داده‌ها یک مسئله اساسی در رویکرد سیستم‌های محاسباتی پردازنده محور است که $CPU$ جز اصلی در سیستم به شمار می‌آید و محاسبه فقط در پردازنده انجام می‌شود. همان طور که دسته‌بندی روش‌های مطرح در رایانش حافظه‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای غلبه بر این محدودیت‌ها دو رویکرد در نظر گرفته‌شده است:

۱. محاسبه در نزدیکی محل ذخیره داده‌ها،
۲. محاسبه درون محل ذخیره‌سازی داده‌ها.




**شکل ۱۰. دسته‌بندی رایانش حافظه ای**

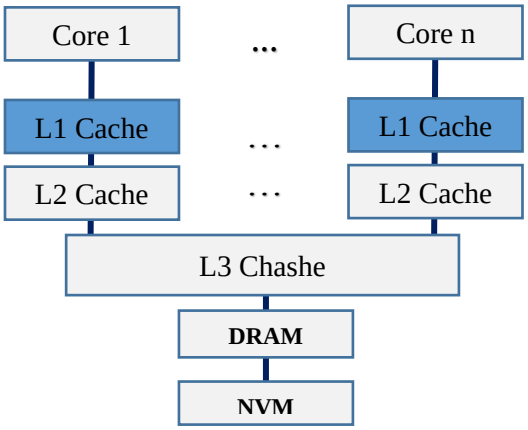
دستگاه‌های جاسازی‌شده خودکار هوشمند بخشی از زندگی روزمره شده‌اند. این دستگاه‌ها معمولاً برنامه‌های کاربردی سبک مانند تشخیص تغییرات محیطی را اجرا می‌کنند. بااین‌حال، تغذیه چنین ابزاری به دلیل خرابی‌های مکرر یا قطع برق به دلیل ماهیت غیرقابل‌پیش‌بینی منبع انرژی، یک چالش اساسی محسوب می‌شود.

[1] Synthetic Aperture Radar
[2] Optical Correlators
[3] Memory-Wall
[4] Dynamic Random Access Memory

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های حافظه غیر فرار[1] (NVM)، سیستم‌های محاسباتی غیر فرار در حال حاضر به‌عنوان یک فناوری پیشرو برای طراحی دستگاه‌های بدون باتری[2] در نظر گرفته می‌شوند.این سیستم‌ها قادرند رایانش را تحت توان منبع تغذیه ی ناپایدار حفظ کنند، زیرا به‌سرعت حالت کل سیستم را به شیوه‌ای غیر فرار ذخیره می‌کنند [۳۸]. رایانش درون حافظه‌ای تکنیکی مبتنی بر ذخیره و نمایه‌سازی داده‌های RAM است که توسط گروه تحقیقاتی MIT پیشنهادشده است و هدف اصلی آن تسریع رایانش پیچیده است.

## ۵-۱- رایانش کلاسیک: رویکرد پردازنده محور[3]

رایانش کلاسیک که از چندین هسته استفاده می‌کند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. حافظه نهان سطح ۱، یک حافظه SRAM است که به لحاظ مکانی بسیار نزدیک به CPU می‌باشد. حافظه نهان سطح ۲ روی تراشه کمی دورتر است. حافظه نهان L2 بسیار بزرگ‌تر است، زیرا حالت‌های بیشتری به این حافظه اختصاص داده می‌شود. در پردازنده‌های چندهسته‌ای مدرن، هسته‌ها حافظه نهان L3 را که معمولاً بین ۸ تا ۱۲ مگابایت است، به اشتراک می‌گذارند. حافظه نهان دو مشکل عمده دارد و به همین دلیل است که کل ذخیره‌سازی در رایانه در حافظه نهان انجام نمی‌شود. در مقایسه با حافظه DRAM، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کند (یک فلیپ فلاپ حدود ۱۶ ترانزیستور دارد؛ درحالی‌که سلول DRAM فقط از یک ترانزیستور استفاده می‌کند). این بدان معناست که در صورت استفاده از حافظه نهان بیشتر، هزینه کامپیوتر به دلیل هزینه توان و خنک‌کننده‌ها به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد.




**شکل ۱۱. محاسبات کلاسیک: چندهسته‌ای**

## ۵-۲- رایانش نزدیک به حافظه: رویکرد داده محور[4]

حافظه اصلی[5] مؤلفه‌ای مهم در تمام سیستم‌های محاسباتی است، بنابراین برای حفظ رشد کارآیی باید ازلحاظ بهره‌وری مقیاس‌پذیر شود. کاربردها و فناوری‌های اخیر نیازمند الزامات جدیدی برای حافظه اصلی ازجمله ظرفیت بیشتر، پهنای باند بیشتر، مصرف برق کمتر و رایانش در نزدیکی حافظه هستند؛ زیرا انتقال داده‌ها نسبت به رایانش آن‌ها مصرف انرژی بسیار بیشتری می‌طلبد [۳۹]. حافظه‌های DRAM و فلش همه این الزامات را برآورده نمی کنند و با چالش‌هایی مواجه هستند. تعداد هسته‌ها هر ۲ سال دو برابر می‌شود و ظرفیت DRAM هر ۳ سال دو برابر می‌شود. علاوه بر این، زمانی که از DRAM استفاده نمی‌شود، توان مصرف می‌کند. بنابراین، نیاز به بهبود فناوری فعلی یا توسعه فناوری های در حال ظهور مانند معماری‌های جدید حافظه (حافظه سه‌بعدی که رایانش در نزدیکی حافظه را امکان‌پذیر می‌کند)، فناوری‌های جدید حافظه غیر فرار یا راه‌حل‌های ترکیبی احساس می‌شود [۴۰]. رایانش نزدیک حافظه[6] (NMC)، پهنای باند بالا و بهره‌وری بیشتر انرژی با انجام محاسبات در حافظه، نه در پردازنده را فراهم می‌کند، به‌طوری‌که انتقال داده‌ها حذف می‌شود. مدارهای مجتمع سه‌بعدی[7] (3-DICs) یک راه‌حل نویددهنده برای پیاده‌سازی NMC است، بطوریکه منطق رایانش را می‌توان در یک‌لایه و آرایه حافظه را در لایه دیگر پیاده‌سازی کرد. هدف کاهش انتقال داده‌ها بین حافظه و پردازنده است که منجر به کاهش تأخیر و توان می‌شود، زیرا انتقال داده‌ها انرژی بیشتری نسبت به محاسبات مصرف می‌کند.

[1] Non-Volatile Memory
[2] Self-powered or Battery-less
[3] Processor-Centric
[4] Data-Centric
[5] Main Memory
[6] Near Memory Computing
[7] 3-D Integrated Circuits

سعی می‌کند با پردازش بخشی از داده‌ها در/نزدیکی حافظه، این مشکل را برطرف کرده و نیاز به انتقال همه داده‌ها به واحد پردازش را حذف کند [۴۱]. محاسبه نزدیک‌به حافظه (NMC) باهدف پردازش نزدیک به محل استقرار داده‌ها انجام می‌شود، این رویکرد داده محور نیز نامیده می‌شود که برخلاف رویکرد CPU محور است که در آن داده‌ها باید برای پردازش به هسته اصلی انتقال داده شوند.

## ۵-۳- رایانش درون حافظه‌ای[1]: رویکرد داده محور

رایانه‌های معمولی مبتنی بر معماری ون‌نیومن نیاز به انتقال داده‌ها بین پردازنده و واحدهای حافظه دارند. این انتقالات، کارآیی و به‌خصوص بهره‌وری انرژی را محدود می‌کند. برای از بین بردن چالش معماری ون‌نیومن، باید حافظه و ابزارهای محاسباتی را در یک مکان فیزیکی یکپارچه کرد. به‌منظور محقق شدن رایانش در حافظه ابزارهای الکتریکی جدیدی معرفی‌شده‌اند که قابلیت پردازش دارند شامل ممریستورها[2]، حافظه تغییر فاز[3] (PCM)، گشتاور انتقال اسپین RAM[4] (STT-RAM) و حافظه دسترسی تصادفی مقاومتی[5] (ReRAM). در ادامه به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت.

## ۵-۴- رایانش درون حافظه‌ای مبتنی بر ممریستور

ممریستور که شامل حافظه و مقاومت می‌شود، یک ابزار حافظه الکترونیکی غیر فرار است که برای اولین بار توسط لئون اونگ چوا در سال ۱۹۷۱ به‌عنوان چهارمین عنصر اصلی دو ترمینالی پس از مقاومت، خازن و القاگر معرفی‌شده است. ممریستورها می‌توانند با محرک‌های خارجی مانند ولتاژ تنظیم شوند و به دلیل سرعت سوئیچ سریع، انرژی سوئیچینگ پایین و مقیاس‌پذیری بالا برای راه‌حل‌های PIM[6] متراکم و سریع مناسب می‌باشند که در آن هر سلول قادر به پردازش و ذخیره‌ی اطلاعات می‌باشد. عملکرد رایانش در ممریستورها به این صورت است که ابتدا داده‌های ذخیره‌شده از حافظه خوانده می‌شود، سپس از مدارهای مبتنی بر ترانزیستور برای پردازش داده‌ها استفاده می‌شود و نتایج دوباره در حافظه ذخیره می‌شود. ممریستور یک جزء دو پایانه است که مقاومت آن عمدتاً به مقدار، ولتاژ اعمال‌شده و قطبیت بستگی دارد. ممریستور از دی‌اکسید تیتانیوم ($TiO_2$) مانند یک ماده مقاوم استفاده می‌کند که این ماده عملکرد بهتری از انواع دیگر مواد مانند دی‌اکسید سیلیکون دارد [۴۲].

## ۵-۵- رایانش درون حافظه‌ای مبتنی بر حافظه تغییر فاز

حافظه تغییر فاز (PCM) یک حافظه غیر فرار با دسترسی تصادفی در مقیاس نانو است که مبتنی بر ژرمانیوم (Ge)، آنتیمونی (Sb)، تلوریوم (Te) یا (GST) یک ماده تغییر فاز که در دیسک‌های نوری قابل بازنویسی و برنامه‌های حافظه تغییر فاز استفاده می‌شود وبسته به آرایش اتمی آن‌ها ویژگی‌های الکتریکی بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در فاز بی‌شکل و بی‌نظم، این مواد دارای مقاومت بسیار بالا هستند، درحالی‌که در فاز کریستالی منظم، مقاومت بسیار پایینی دارند. یک دستگاه PCM شامل یک حجم نانو-متریک از این مواد تغییر فاز است که بین دو الکترود قرارگرفته است [۴۳]. امکان رایانش درون حافظه با داده‌های ذخیره‌شده در دستگاه‌های PCM وجود دارد. ایده اساسی این نیست که با حافظه به‌عنوان یک المان ذخیره‌سازی غیرفعال برخورد شود، بلکه باید از ویژگی‌های فیزیکی دستگاه‌های حافظه استفاده کرد و بدین ترتیب محاسبات را دقیقاً در محلی که داده‌ها ذخیره می‌شوند انجام داد.

## ۵-۶- رایانش درون حافظه‌ای مبتنی بر جابجایی جهت چرخش الکترون

حافظه‌های مبتنی بر جابجایی جهت چرخش الکترون (STT-MRAM) به دلیل داشتن چندین ویژگی مطلوب مانند غیرفرار بودن، چگالی بالا و نشت نزدیک به صفر به عنوان یک کاندید بالقوه و نویددهنده برای حافظه‌های نهان پردازنده محسوب می‌شود. به طور خاص، RAM مبتنی بر جابجایی جهت چرخش الکترون با نمایش نمونه‌های اولیه و پیشنهادات تجاری اولیه مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از فناوری STT-MRAM می‌توان برای محاسبات تقریبی بااستفاده از تنظیم پارامترهای فناوری آن برای دستیابی به سطح قابل قبولی از صحت استفاده کرد و همزمان به بهبود قابل‌توجهی در بهره وری توان دست یافت. STT-RAM در مقایسه با SRAM و DRAM تاخیر بیشتری دارد. STT-MRAM از مقاومتهای مغناطیسی تونلی دو حالته در

[1] In-memory Computing
[2] Memristors
[3] Phase Change Memory (PCM)
[4] Spin-Transfer Torque RAM
[5] Resistive Random Access memory (ReRAM)
[6] Process In-Memory (PIM)

یک اتصال تونل مغناطیسی[1] (MTJ) برای ذخیره سازی داده‌ها استفاده می‌کند، همچنین از دو لایه فرومغناطیسی تشکیل شده است که توسط یک لایه نازک تونل اکسید فلزی از هم جدا شده اند. برای ذخیره سازی داده‌ها از تکانه زاویه‌ای نسبی یا اسپین دو لایه فرومغناطیسی استفاده می‌شود. لایه‌ها می‌توانند در دو جهت ممکن باشند: یکی که در آن هر دو لایه دارای اسپین‌های یکسان یا موازی هستند و دیگری که در آن هر دو لایه دارای اسپین‌های مخالف یا ناموازی هستند [۴۴].

## ۵-۷- رایانش درون حافظه‌ای مبتنی بر حافظه‌ی دسترسی تصادفی مقاومتی

از دیگر معماری‌های نوظهور غیرفرار میتوان به معماری حافظه‌ی دسترسی تصادفی مقاومتی (ReRAM) اشاره کرد که مزایای متمایزی نسبت به طرح‌های معمولی مبتنی بر CMOS دارد. ReRAM یک حافظه غیر فرار با انرژی نشت تقریباً صفر، چگالی بالا، سرعت بالا و هزینه پایین است. همچنین، از عملیاتی مانند ضرب بردار ماتریس آنالوگ، جستجو و عملیات بیتی در حافظه پشتیبانی می‌کند که طراحی‌های کارآمد انرژی را فراهم می‌کند. ReRAM شامل یک لایه عایق است که بین دو الکترود فلزی قرار گرفته است. در برخی از عایق‌ها، تغییر مقاومت تحت میدان الکتریکی اعمال شده رخ می‌دهد. این ویژگی تغییر مقاومت، اخیراً برای توسعه حافظه‌های غیر فرار مورد بررسی قرار گرفته است. ReRAM جهت خوبی برای توسعه فناوری حافظه در آینده است. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های مستمر و بررسی‌های عمیق در حوزه ی مواد و مکانیزم‌های سوئیچینگ الکتریکی، پیشرفتی را در عملکرد ReRAM نشان داده‌اند. علاوه بر این، به دلیل سازگاری عالی با مدار مجتمع[2] (IC) و قابلیت مقیاس پذیری، ReRAM پتانسیل بالایی برای تجاری‌سازی و تولید دارد. برای فرآیند تولید ReRRAM، ابتدا الکترود پایینی با فرآیند لیتوگرافی رسوب می‌کند و الگوبرداری می‌شود. سپس، لایه عایق (بیشتر SiOx) رسوب می‌کند و از فرآیند لیتوگرافی برای الگوبرداری از اندازه سلول و منطقه فعال از طریق حفره استفاده می‌شود. پس از آن، لایه سوئیچینگ با استفاده از فرآیند رسوب بخار شیمیایی (CVD) یا رسوب بخار فیزیکی (PVD) رشد می‌کند. در نهایت، الکترود بالایی با فرآیند لیتوگرافی رسوب و الگوبرداری می‌شود [۴۵].

## ۵-۸- چالش‌ها و حوزه‌های تحقیقاتی آینده محاسبات حافظه ای

آینده فناوری‌های جدید حافظه‌های غیرفرار مانند PCM، ReRAM و MRAM به پیشرفت‌هایی در پایداری، قابلیت اطمینان، هزینه و چگالی متکی است.پشته سه بعدی نیز به راه حل‌های حرارتی و دمایی منحصر به فردی نیاز دارد، زیرا اگر بخواهیم محاسبات بیشتری را به حافظه اضافه کنیم، فناوری‌های سنتی کافی نیست. موضوع تحقیقاتی دیگر که محققان میتوانند به آن بپردازند، کاوش در حوزه‌ی شبکه‌های میان ارتباطی واحدهای محاسباتی نزدیک به حافظه و همچنین بین سیستم محاسباتی نزدیک به حافظه و میزبان است. همچنین، در سطح برنامه کاربردی، میتوان به ارائه ی الگوریتم‌هایی برای هم‌مکانی کدها و داده‌ها به منظور پردازش کارآمدتر انرژی پرداخت [۴۶]. موضوع دیگری که میتوان به آن اشاره کرد، بررسی و ارائه‌ی مجموعه‌ای از ابزارها و تکنیک‌های منبع باز برای سیستم‌های جدید محاسباتی می‌باشد، زیرا اغلب محققان باید زمان و تلاش قابل توجهی را برای ساختن محیط شبیه‌سازی مورد نیاز صرف کنند.

## ۶- رایانش نانو

فناوری نانو حوزه وسیعی از مطالعات و تحقیقات را که کاربردهای بی پایانی در جهان واقعی دارند، به خود اختصاص داده است [۴۷، ۴۸]. نانو کامپیوتر اصطلاح موضوعی است که در آن برای نمایش و دستکاری داده ها توسط کامپیوترهای کوچکتر از میکروکامپیوتر استفاده می‌شود. دستگاه‌های فعلی در حال حاضر از ترانزیستورهایی با کانال‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر استفاده می‌کنند. هدف فعلی تولید کامپیوترهای کوچکتر از ۱۰ نانومتر است.پیشرفت‌های آتی در نانو محاسبات، راه‌حل‌هایی را برای مشکلات کنونی شکل‌گیری فناوری محاسباتی در مقیاس نانو ارائه خواهد کرد. به عنوان مثال، ترانزیستورهای اندازه نانو فعلی، اثر تونل زنی کوانتومی را ایجاد می کنند که در آن الکترون ها از طریق موانع "تونل" می‌کنند و آنها را برای استفاده به عنوان یک سوئیچ استاندارد نامناسب می‌کند. افزایش قدرت محاسباتی که توسط نانوکامپیوترها ایجاد می‌شود، امکان حل مسایل دشوار دنیای واقعی را فراهم می‌کند. نانو محاسبات همچنین این مزیت را دارد که به گونه‌ای تولید می‌شود که با هر محیطی از جمله بدن انسان سازگار باشد، در حالی که با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیست. اندازه کوچک دستگاه ها اجازه می دهد تا قدرت پردازش بین هزاران نانوکامپیوتر به اشتراک گذاشته شود. رایانش نانو بخشی نوظهور در فناوری نانو است. فناوری نانو در سال‌های اخیر

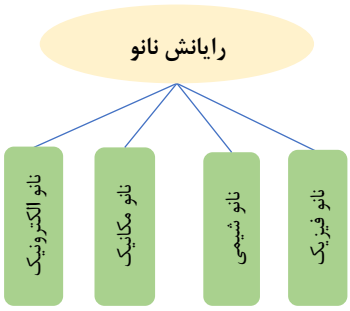
[1] Magnetic Tunnel Junction

[2] Integrated Circuit

باعث تکامل در عصر کنونی کاربردهای مختلف شده است. همچنین، ۴ نوع نانو رایانه توسط محققان و آینده‌پژوهان کامپیوتر پیشنهادشده است که دسته‌بندی آن‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در ادامه، این ۴ دسته از نانو رایانش و کاربردهای مهم آن‌ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد [۴۹].

## ۶-۱- رایانش نانو الکترونیک و کامپیوترهای نانو الکترونیکی

رایانش نانو الکترونیک یکی از مباحث اصلی محاسبات است، زیرا تجهیزات الکترونیکی از نسل اول تاکنون با تغییرات شدیدی روبرو بوده‌اند که منجر به فناوری‌های پیشرفته‌تری شده است. تفاوت اصلی نسل اول با نسل حاضر تغییرات مقیاس فیزیکی می‌باشد، امروزه اکثر ترانزیستورها در تراشه‌های سیلیکونی منفرد درحالی‌که ظرفیت ذخیره‌سازی و توان پردازشی آن‌ها افزایش‌یافته است، فشرده می شوند. نانو رایانه‌های الکترونیکی عملکردی مشابه به عملکرد رایانه‌های کوچک امروزی دارند ولی مقیاس فیزیکی آن‌ها متفاوت است. هرسال تعداد ترانزیستورهای بیشتری در تراشه‌های سیلیکونی فشرده می‌شوند که این امر موجب می‌شود شاهد تکامل مدارهای یکپارچه ($\mathbf{IC}$) که قادر به افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و قدرت پردازشی هستند، باشیم. محدودیت نهایی تعداد ترانزیستورها در واحد حجم توسط ساختار اتمی ماده اعمال می‌شود. اکثر مهندسان موافق‌اند که فناوری هنوز به این حد نزدیک نشده است. در مفهوم الکترونیکی، عبارت نانو کامپیوتر نسبی است. بر اساس استانداردهای دهه ۱۹۷۰، ریزپردازنده‌های معمولی امروزی را می‌توان دستگاه‌های نانو نامید.




**شکل۱۲. دسته‌بندی رایانش نانو**

## ۶-۲- رایانش نانو شیمی و نانو کامپیوترهای شیمیایی

رایانش نانو شیمی از دیگر روش‌های محاسباتی است که اطلاعات حوزه‌ی شیمی را که شامل ساختارها و فعل‌وانفعالات شیمیایی می‌شود، ذخیره و پردازش می‌کند. شیمیدانان فعال در حوزه‌ی رایانش به دلیل کمک به تولیدکنندگان برای طراحی فرآیندهای پربازده و کارآمد و تکنیک‌های جهت شناسایی ویژگی‌های مواد جدید، جایزه نوبل دریافت کرده‌اند. شیمی محاسباتی همچنین برای مطالعه خواص اتم‌ها، مولکول‌ها و واکنش‌های شیمیایی مختلف با استفاده از ترمودینامیک و کوانتوم شناخته‌شده است. تحقیقات رایانش نانو شامل جنبه‌های مهم ساخت مولکولی و معماری ابزارهای الکترونیکی است که می‌تواند از خواص الکتریکی موروثی استفاده کند و بنابراین شناسایی موفقیت‌آمیزی از ساختارها و سایر خواص آن‌ها ازجمله کوانتوم داتس[1]، ساختارهای الکترونیکی و مولکولی را فراهم می‌کند. کوانتوم داتس شبیه اتم‌ها و مولکول‌های مصنوعی هستند، از الکترون‌های ساکن فقط می‌توان برای نمایش اطلاعات منطقی استفاده کرد. نانو رایانه‌های شیمیایی می‌توانند اطلاعات را ازنظر ساختار شیمیایی و فعل‌وانفعالات ذخیره و پردازش کنند. نانو کامپیوترهای بیوشیمیایی از قبل در طبیعت وجود داشتند. آن‌ها در همه موجودات زنده آشکار می‌شوند. توسعه یک کامپیوتر نانو شیمیایی واقعی احتمالاً در مسیرهایی مشابه مهندسی ژنتیک پیش خواهد رفت. مهندسان باید دریابند چگونه اتم‌ها و مولکول‌ها را مجبور به انجام رایانش قابل‌کنترل و ذخیره‌سازی داده‌ها کنند.

## ۶-۳- رایانش نانو مکانیک و نانو کامپیوتر مکانیکی

رایانش نانو مکانیکی[2] یکی دیگر از زمینه‌های محاسباتی جذاب است که برخلاف رایانش نانو الکترونیکی بر روی قطعات متحرک میکروسکوپی تمرکز دارد. سوئیچ‌های دودویی، یک و صفرهایی را محاسبه می‌کنند که منجر به تکنیک‌های جدیدی برای کامپیوترهای مدرن می‌شوند. فناوری نانو شاخه‌های مختلفی را در برگرفته است و مفید بودن آن تقریباً در هر بخش از علم، مهندسی و سایر زمینه‌ها ثابت‌شده است. ایده اساسی رایانش نانو وابسته به این است که فناوری نانو به زمینه‌های تحقیقاتی پیچیده‌ای بپردازد و برای آن‌ها راه‌حلی ارائه دهد، بنابراین فناوری و رایانش نانو برای دستیابی به خروجی موفق و کارآمد به یکدیگر وابسته هستند.

کامپیوترهای مکانیکی بجای ترانزیستورهای حالت جامد و اجزای دیگر به میلیون‌ها قطعه متحرک میکروسکوپی وابسته هستند تا الکترون‌ها را برای انجام محاسبات تحت‌فشار قرار دهند. گیت‌ها، ستون‌ها، اهرم‌ها و پیستون‌ها سوئیچ‌های دودویی ایجاد می‌کنند که یک و صفرهایی را که رایانه‌های مدرن را هدایت می‌کنند محاسبه می‌کند. دانشمندان می‌گویند ازآنجاکه آنها مقاوم‌تر هستند و می‌توانند در دمای بسیار بالاتری نسبت به تراشه‌های معمولی سیلیکون عمل کنند، طیف وسیعی از کاربردها را در "محیط‌هایی

[1] Quantum dots

[2] Mechanical nanocomputing

مانند فضا، موتورهای خودرو، میدان‌های نبرد و اسباب‌بازی‌های کودکان" خواهد داشت. مزیت دیگر: آن‌ها برای کار کردن به توان کمتری نیاز دارند، به این معنی که آن‌ها نیازی به سیستم‌های خنک‌کننده با مصرف انرژی بالا که موردنیاز رایانه‌های معمولی است، ندارند.

## ۶-۴- رایانش نانو فیزیک یا نانو کامپیوترهای فیزیکی

فیزیک در مقیاس نانو یکی دیگر از جنبه‌های مهم رایانش نانو می تواند باشد جاییکه در آن قوانین فیزیک متفاوتی برای اجرای عملیات رایانشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهمترین این قناوریها استفاده از قوانین فیزیک کوانتوم برای انجام محاسبه و عملیات رایانش است. همانطور که در بخش ابتدایی این مقاله توضیح داده شد برای توضیح اینکه کامپیوتر کوانتومی چیست، ابتدا باید نگاهی دقیق‌تر به اساسی‌ترین بخش داده‌ها، یعنی یک بیت، داشته باشیم. ازنظر فیزیکی، بیت یک سیستم فیزیکی است که می‌تواند در یکی از دو حالت مختلف که نشان‌دهنده دو مقدار منطقی است قرار بگیرد - نه یا بله، غلط یا درست، یا به‌سادگی ۰ یا ۱. یک بیت اطلاعات نیز می‌تواند کدگذاری شود با استفاده از دو قطب متفاوت نور یا دو حالت الکترونیکی متفاوت یک اتم. بااین‌حال، اگر یک اتم را به‌عنوان بیت فیزیکی انتخاب کنیم، مکانیک کوانتومی به ما می‌گوید که جدا از دو حالت الکترونیکی متمایز، اتم را می‌توان در ترکیب فوقانی منسجم این دو حالت نیز آماده کرد. این بدان معناست که اتم هم در حالت ۰ و هم در حالت ۱ قرار دارد، در مورد ایده برهم‌نهی اعداد کمی عمیق‌تر می‌شویم. ثباتی را در نظر بگیرید که از سه بیت فیزیکی تشکیل‌شده است. هر ثبات کلاسیک از آن نوع می‌تواند در یک‌لحظه معین هشت عدد مختلف را ذخیره کند، یعنی مقدار ثبات می‌تواند تنها یکی از هشت پیکربندی ممکن مانند ۰۰۰، ۰۰۱، ۰۱۰، ... ۱۱۱ باشد. درحالی‌که یک ثبات کوانتومی متشکل از سه کیوبیت می‌تواند در یک‌لحظه معین هر هشت عدد را در یک برهم‌نهی کوانتومی ذخیره کند.

## ۶-۵- چالش‌ها و حوزه‌های تحقیقاتی آینده محاسبات نانو

فناوری نانو و تولید در اندازه نانومتر این امکان را فراهم میکند که از محدودیت‌های ابعادی طبیعی عبور کرده و مستقیماً در سطح مولکولی و اتمی، جایی که خواص قابل تغییر هستند، برروی مواد کار شود. نانوالکترونیک و علم نانو به‌عنوان بلوک‌های سازنده سیستم‌های محاسباتی آینده، یعنی دستگاه‌های نانو و مواد بکاررفته در ابررایانه‌ها با اندازه‌های نانومتر مورد استفاده قرار خواهند گرفت [۵۰]. همگرایی هوش مصنوعی و محاسبات نانواز دیگر موضوعات تحقیقاتی ناگزیر آینده میباشد، این همگرایی می‌تواند تحقیقات را در این رشته‌ها تقویت کند و نسل جدیدی از فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی را ارائه دهد که تأثیر زیادی بر جامعه ما خواهد داشت و احتمالاً ابزارهایی را برای ادغام فناوری و زیست‌شناسی فراهم کند [۵۱]. پیشرفت‌های قابل‌توجهی در ساختار نانومواد از طریق ادغام آنها با فناوری نانو مدرن تقریباً در هر سطح از جامعه حاصل شده است. در میان نانومواد، نانوالماس‌ها[1] (NDs) به دلیل ویژگی‌های جذابشان (به عنوان مثال، قطر زیاد، رسانایی حرارتی بالا، سختی، مقاومت در برابر اصطکاک، غیرسمی بودن و ...) به موضوع تحقیقاتی فعال و داغ تبدیل شده اند [۵۲]. اینترنت نانواشیا، موضوع تحقیقاتی دیگری است که محققان میتوانند در آینده به آن بپردازند. اتصال نانوحسگرها و نانوابزارها به اینترنت، منجر به توسعه نسل بعدی استانداردهای مبتنی بر اینترنت اشیا به نام «اینترنت نانو اشیا[2]» (IoNT) میشود [۵۳].

## ۷- مقایسه فناوری های نوظهور در آمار انتشارات و چرخه هایپ گارتنر

در این بخش به مقایسه میزان اقبال به فناوریهای نوظهور در مراجع علمی و تحقیقاتی از طریق بررسی آماری تعداد مقالات و کتابهای چاپ‌شده در این حوزه در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ میلادی در پایگاه استنادی اسکوپوس (Scopus) پرداخته شده است. برای مقایسه آماری، تعداد کلیه مستندات شامل مقالات مجلات پژوهشی، مقالات کنفرانسی، کتاب ها و بخش کتاب‌های منتشرشده برای هر یک از فناوری های نوظهور در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ در پایگاه استنادی اسکوپوس (Scopus) بررسی شده اند. همانطور که نتیجه بررسی‌ها در (جدول ۲) نشان می‌دهد، دو محدوده‌ی زمانی را در نظر گرفتیم، ابتدا مستندات را از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ بررسی کردیم. سپس سال ۲۰۲۱ را بطور جداگانه مورد بررسی قرار داده ایم تا اهمیت هریک از این موضوعات را در سال ۲۰۲۱ نسبت به ۴ سال گذشته نشان دهیم.

با توجه به مقالات ارائه شده در سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ دو حوزه رایانش کوانتومی و زیستی بیشترین توجه را در میان محققان به خود اختصاص داده است. با توجه به نزدیک شدن به پایان قانون عصر مور فناوری کوانتومی نسبت به سایر فناوری های ذکر شده

[1] Nano Diamond

[2] Internet of Nano Things

بیشترین پتانسیل برای ارائه یک روش محاسباتی نوظهور را دارد که جایگزین روش های محاسبات فعلی شود.

همچنین فناوری‌های حافظه‌ای، نوری و نانو به ترتیب در رده-های بعدی توجه محققان را به خود جلب کرده اند و فناوری نانو کم اهمیت ترین فناوری در بین فناوری های نوظهور در نسلهای آتی رایانش فوق سریع در سال های اخیر می باشد.

جهت ارائه درک کاملتر نسبت به اقبال به این فناوری‌های نوظهور، همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، در این بخش چرخه محبوبیت فناوری‌ها که توسط شرکت گارتنر در هر سال منتشر می‌شود (چرخه هایپ گارتنر[1]) نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. چرخه مذکور از پنج مرحله اصلی مشتمل بر ظهور نوآوری در فناوری، بیشینه تورم انتظاری، سرازیری سرخوردگی، سراشیبی روشنگری، فلات بهره‌وری، تشکیل شده است. نتیجه بررسی و تحلیل فناوری‌های نوظهور در این چرخه مؤید نتیجه بررسی آماری انتشارات پژوهشی در جدول ۲ است که نشان می‌دهد، فناوری کوانتوم (شامل رایانش کوانتومی) به عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های نوظهور مورد توجه جامعه صنعتی و دانشگاهی است.

[1] Gartner Hype Cycle

**شکل۱۳. چرخه محبوبیت فناوری‌های گارتنر**

**جدول ۲. مقایسه آماری فناوری‌های نوظهور**

| نام فناوری | #مقالات | | #کنفرانس | | #کتاب | | #بخش کتاب | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۲۰۲۰-۲۰۱۷ | ۲۰۲۱ | ۲۰۲۰-۲۰۱۷ | ۲۰۲۱ | ۲۰۲۰-۲۰۱۷ | ۲۰۲۱ | ۲۰۲۰-۲۰۱۷ | ۲۰۲۱ |
| کوانتومی | ۱۶۸۵ | ۹۵۸ | ۱۷۸۶ | ۸۴۶ | ۳۰ | ۰ | ۹۹ | ۳۷ |
| زیستی | ۱۰۷۸ | ۴۳۵ | ۹۷۶ | ۲۰۷ | ۱۱ | ۰ | ۸۶ | ۲۰ |
| حافظه ای | ۳۸۵ | ۲۰۷ | ۷۲۸ | ۲۷۵ | ۷ | ۳ | ۲۱ | ۳ |
| نوری | ۱۰۴ | ۳۹ | ۱۷۶ | ۵۴ | ۳ | ۰ | ۵ | ۱ |
| نانو | ۴۶ | ۶ | ۴۵ | ۶ | ۰ | ۰ | ۲ | ۰ |

## ۸- مقایسه کلی فناوری‌های نوظهور رایانشی

در حالی که نزدیک شدن به محدودیت های قانون مور از نظر برخی به عنوان یک چالش یا بحران در انتظار تلقی می شود، فرصت‌های متعددی توسط پژوهشگران و فناوران صنعت و دانشگاه در حال بررسی است و در عین حالیکه پیشرفت‌ها به سرعت در هر زمینه اتفاق می‌افتند، هیچ یک به اندازه کافی پیشرفته نیستند که پاسخی واضح به این سوال ارائه کنند که الگوی محاسباتی نسل بعدی پس از رسیدن به پایان عصر مور چیست.

در حال حاضر، رایانه های ساخته شده با استفاده از فناوری کوانتومی توانایی‌های بالایی را در حل برخی مسائل از خود نشان داده اند. این درحالی است که هنوز این رایانه‌ها به طور کامل در کنترل قرار نگرفته‌اند و ساخت آنها نیز به گونه‌ای مقیاس پذیر نیست که بتوان از آن در ابعاد کاربردی استفاده نمود. با این حال پژوهشگران کاملاً امیدوارند که با حل مسائل تکنیکی و جنبی، این نوع رایانه‌ها می‌توانند دست‌آوردهای خارق العاده‌ای در پردازش فوق سریع داشته باشند و این فضا را به طور کلی دگرگون خواهند نمود.

از طرفی فناوری‌های رایانش نوری مزایای زیادی برای توسعه دستگاه‌های یکپارچه دارند و کاندیدای قوی برای رایانش نسل بعدی هستند. فوتونیک با اجازه دادن به پهنای باند بالا و انتقال با تأخیر کم بین تراشه‌های پردازش و حافظه اصلی، این پتانسیل را دارد که نقش مهمی در محاسبات آینده داشته باشد و در نتیجه به کاهش تنگناهای حافظه اصلی کمک نماید. با اینکه امکان ارئه یک مدل محاسباتی جدید در این فناوری وجود دارد ولی تا کنون، هیچ راه حل اقتصادی که قابل پیاده سازی باشد ارائه نشده است.

از نظر حوزه‌های فرعی در رایانش زیستی، بحث در مورد پتانسیل رایانش مبتنی بر $\mathcal{DNA}$برای جایگزینی محاسبات سنتی وجود دارد. در حالی که برخی معتقدند رایانش مولکولی می تواند با محاسبات الکترونیکی رقابت کند، برخی دیگر یک پردازنده مشترک $\mathcal{DNA}$را پیش بینی می کنند که از سیلیکون برای پردازش عادی و از $\mathcal{DNA}$برای مشکلات سخت محاسباتی استفاده می کند. در رابطه با رایانش عصب گون، چالش‌ها در درک و تقلید از عملکرد مغز انسان به این معنی است که رایانش عصب گون هنوز مزیت قابل‌توجهی نسبت به معماری‌های محاسباتی معمولی ارائه نمی‌کند. در حالی که این پتانسیل در رایانش عصب گون برای تغییر شکل نهایی صنعت محاسبات، پس از شناخت کامل آن وجود دارد.

**جدول ۳. قابلیت فناوریهای نوظهور رایانشی**

| نام فناوری | قابلیت ارائه مدل محاسباتی جدید | مسائلی که در آن قابلیت دارند |
|---|---|---|
| کوانتومی | دارد | مناسب برای حل مسائل NP و مسائل دشوار |
| زیستی | دارد | مناسب برای حل مسائل NP و مسائل دشوار |
| نوری | دارد | مناسب برای حل مسائل کلاسیک و بعضی مسائل NPCخاص |
| حافظه‌ای | ندارد | مناسب برای حل مسائل کلاسیک |
| نانو | ندارد | مناسب برای حل مسائل کلاسیک |

جدول ۳ قابلیت فناوریهای نوظهور و نامتعارف، برای ارایه مدل محاسباتی جدید در رایانش فوق سریع آینده را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول فناوری کوانتوم، زیستی و نوری، پتانسیل ارائه یک مدل محاسباتی جدید که جایگزین مدل محاسباتی جان ون نیومن بشود را دارند. از این رو این فناوری ها توانایی حل مسائلی که کامپیوترهای فعلی توانایی حل آنها را ندارند، دارا می‌باشند، ولی در فناوری نانو و حافظه‌ای هدف اصلی بیشتر ارتقای سرعت و عملکرد کامپیوترهایی است که بر مبنای مدل محاسباتی ماشین تورینگ کار میکنند.

## ۹- جمع‌بندی

در این مقاله باتوجه به نزدیک شدن به پایان عصر مور و متعاقب آن، نیاز به فناوری‌های نوظهور جهت پاسخ به نیازهای جدید رایانشی، فناوری‌های نوین مورد استفاده در نسلهای آتی رایانش فوق سریع از جمله، رایانش کوانتومی، رایانش زیستی، رایانش نوری، رایانش حافظه‌ای و رایانش نانو مورد مطالعه، بررسی و دسته‌بندی قرار گرفت. برای هریک از فناوری‌های مذکور، دسته‌بندی مختص آن ارائه شد که جنبه‌های گوناگون آن فناوری را بیان نموده و ادامه مسیر تحقیقاتی و چالشهای موجود را برای محققان علاقمند به این حوزه‌ها تفکیک می‌نماید. رایانش کوانتومی از سه منظر سخت‌افزار، نرم‌افزار و شبیه ساز دسته‌بندی شد. دسته‌بندی برای رایانش زیستی شامل سه بخش رایانش غشایی، رایانش مولکولی و رایانش عصبگون معرفی شد. همچنین، دسته‌بندی رایانش حافظه‌ای ازدو منظر درون حافظه و نزدیک به حافظه، مورد بررسی قرار گرفت و روش‌هایی که رایانش درون حافظه‌ای را محقق می‌کنند، معرفی شد. درنهایت، دسته‌بندی ارائه شده رایانش نانو به چهار بخش کامپیوترهای شیمیایی، فیزیکی، الکترونیکی و مکانیکی تقسیم و موضوعات

تحقیقاتی مطرح و چالش‌های آن ارائه شد. در این مقاله تعداد مقالات و کتابهای تخصصی که بین سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ در حوزه نسل‌های آتی رایانشی منتشر شده است در یک جدول ارایه شد و آمار آنها با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد که بیشترین اقبال جامعه علمی و پژوهشی به فناوری های رایانش کوانتومی و زیستی است و به دنبال آن فناوریهای نوظهور دیگری مانند حافظه ای، نوری و نانو قرار دارند. در بخش دیگری یک مقایسه کلی بین فناوریهای نوظهور ذکر شده انجام شد. این مقایسه در یک جدول به ترتیب ارایه شده است و به تفکیک به این موضوع پرداخته شده که کدام یک از این فناوریها قابلیت ارایه مدل محاسباتی جدید را دارا می باشند.

## مراجع


[1] Moore, Gordon. "Moore’s law." Electronics Magazine 38.8 (1965): 114.

[2] Mack, Chris. "The multiple lives of Moore's law." IEEE Spectrum 52.4 (2015): 31-31.

[3] Burstein, Elias, and Stig Lundqvist, eds. Tunneling phenomena in solids. New York: Plenum Press, 1969.

[4] retrieved on July 04, 2023.

[5] retrieved on June, 2023.

[6] Aaronson, Scott. "The limits of quantum." Scientific American 298.3 (2008): 62-69.

[7] Hartnett, Kevin. "Finally, a Problem That Only Quantum Computers Will Ever Be Able to Solve.", Quanta Magazine, 2018.

[8] Lucas, Andrew. "Ising formulations of many NP problems." Frontiers in physics 2, 2014.

[9] Markov, Igor L., et al. "Quantum supremacy is both closer and farther than it appears." arXiv preprint arXiv:1807.10749 (2018).

[10] Häner, Thomas, and Damian S. Steiger. "5 petabyte simulation of a 45-qubit quantum circuit." Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. 2017.

[11] E. Wiseman, "Next Generation Computing," National Research Council of Canada / Government of Canada, Montreal, 2016.

[12] "computersciencedegreehub,"[Online], Available: retrieved on June 04, 2023.

[13] Gexiang Zhang; Zeyi Shang; Sergey Verlan ET AL, "An Overview of Hardware Implementation of Membrane Computing Models," ACM Computing Surveys, vol. 53, no. 4, p. 1–38, 2020.

[14] Ionescu, Armand-Mihai. “Membrane computing: traces, neural inspired models, controls”, Universitat Rovira i Virgili, (2009).

[15] M. Amos, "DNA computing," Encyclopedia Britannica, Agust 2021. [Online], Available:, retrieved on June 04, 2023.

[16] Ping, Zhi; Ma, Dongzhao; Huang, Xiaoluo et al, "Carbon-based archiving: current progress and future prospects of DNA-based data storage," GigaScience, vol. 8, no. 6, (2019).

[17] Katz, Evgeny. "DNA Computing: Origination, Motivation, and Goals–Illustrated Introduction." DNA-and RNA-Based Computing Systems (2021): 1-14.

[18] Im, In Hyuk; Kim, Seung Ju; Jang, Ho Won, "Memristive Devices for New Computing Paradigms," Advanced Intelligent Systems, vol. 2, no. 11, (2020).

[19] S. M. Nematollahzadeh, S. Ozgoli, A. Jolfaei and M. S. Haghighi, "Modeling of Human Cognition in Consensus Agreement on Social Media and Its Implications for Smarter Manufacturing," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 4, pp. 2902-2909, April (2021).

[20] S. M. Nematollahzadeh, S. Ozgoli, M. Sayad Haghighi, 'Parameter Identification Method for Opinion Dynamics Models: Tested via Real Experiments', Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI), 7(1), pp. 123-133, (2018).

[21] V. P. Torres J.J., "Modeling Biological Neural Networks," in Handbook of Natural Computing, Berlin, Heidelberg, Springer, (2012), pp. 533-564.

[22] S. M. Nematollahzadeh, S. Ozgoli, M. S. Haghighi and A. Jolfaei, "Learning Influential Cognitive Links in Social Networks by a New Hybrid Model for Opinion Dynamics," in IEEE Transactions on Computational Social Systems, vol. 8, no. 5, pp. 1262-1271, Oct. (2021).

[23] Sarwar, Syed Shakib, et al. "Energy efficient neural computing: A study of cross-layer approximations." IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems 8.4 (2018)

[24] "PARALLELNETWORK-BASED BIOCOMPUTATION," [Online], Available: retrieved on June 04, 2023.

[25] Angel Goñi-Moreno; Pablo I. Nikel, "High-Performance Biocomputing in Synthetic Biology–Integrated Transcriptional and Metabolic Circuits," frontiersin, (2019).

[26] Sandro Fiore; Mohamed Bakhouya; Waleed W. Smari, "On the road to exascale: Advances in High Performance Computing and Simulations—An overview and editorial," Future Generation Computer Systems, vol. 82, pp. 450-458, (2018).
retrieved on June 04, 2023.
[27] Naughton, Thomas J., and Damien Woods. "Optical computing." (2015): 1-26.
[28] Jain, K., and G. W. Pratt Jr. "Optical transistors and logic circuits embodying the same." US Pat 4 (1983).
[29] Rao, Dalai G. Sankar, Sandip Swarnakar, and Santosh Kumar. "Performance analysis of all-optical NAND, NOR, and XNOR logic gates using photonic crystal waveguide for optical computing applications." Optical Engineering 59.5 (2020): 057101.
[30] Lacava, Cosimo, et al. "Si-rich silicon nitride for nonlinear signal processing applications." Scientific Reports 7.1 (2017): 1-13.
[31] Bowers, John E., and Alan Y. Liu. "A comparison of four approaches to photonic integration." Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, (2017).
[32] Fu, Y., Hu, X., & Gong, Q. "Silicon photonic crystal all-optical logic gates", Physics Letters A, 377(3), (2013) 329–333.
[33] Singh, Jeevan Jot, Divya Dhawan, and Neena Gupta. "All-optical photonic crystal logic gates for optical computing: an extensive review", Optical Engineering 59.11 (2020), 110901.
[34] Sun, Chen, et al. "Single-chip microprocessor that communicates directly using light." Nature 528.7583 (2015), 534-538.
[35] Oltean, Mihai, and Oana Muntean. "Solving the subset-sum problem with a light-based device." Natural Computing 8.2 (2009), 321-331.
[36] Oltean, Mihai. "A light-based device for solving the Hamiltonian path problem." International Conference on Unconventional Computation. Springer, Berlin, Heidelberg, (2006).
[37] Hybrid Mem. Cube. Tech. Rep. Revis. 1.0, HMC (2013), www.hybridmemorycube.org.
[38] H. Asghari-Moghaddam, A. Farmahini-Farahani, K. Morrow, J.H. Ahn, N.S. Kim, Near-DRAM Accel. with single-ISA Heterog. Process. Stand. Mem. Modul. IEEE Micro 36, (2016), 24–34.
[39] S. Ghose, K. Hsieh, A. Boroumand, R. Ausavarungnirun, O. Mutlu, "Enabling the Adoption of Processing-in-Memory: Challenges, Mechanisms, Future Research Directions", arXiv Prepr. arXiv 1802, 00320, (2018).
[40] K Choi, J Ahn, S Yoo, "Method and apparatus for processing instructions using processing-in-memory", US Patent 10,860,323, (2020).
[41] Mohsen Imani et al., "Stochastic Computing for Reliable Memristive In-Memory Computation", Proceedings of the Great Lakes Symposium on VLSI (2023), 397-401.
[42] A. Sebastian, et al. ,"Optimization of Projected Phase Change Memory for Analog In-Memory Computing Inference", Advanced Electronic Materials 9, (2023).
[43] Vincent, Adrien F., et al. "Spin-transfer torque magnetic memory as a stochastic memristive synapse for neuromorphic systems." IEEE transactions on biomedical circuits and systems 9.2 (2015): 166-174.
[44] Chang, T. C., Chang, K. C., Tsai, T. M., Chu, T. J., & Sze, S. M. "Resistance random access memory", Materials Today, 19 (5), (2016), 254-264.
[45] Singh, G., et al, "Near-memory computing: Past, present, and future Microprocessors and Microsystems", 71, (2019). 102868.
[46] Weissig V., Pettinger T.K., Murdock N. Nanopharmaceuticals (part 1) Prod. Mark. Int.J. Nanomed. (2014), 94357–4373.
[47] retrieved on June 04, 2023.
[48] RE Formigoni, RS Ferreira, JAM Nacif, "A survey on placement and routing for field-coupled nanocomputing", Journal of Integrated Circuits and Systems 16 (1), (2021), 1-9
[49] Gund, S. N., Bansod, S. G., Chavan, D. S., & Tarwadi, D. K. "Applications of Nanotechnology in Computers", International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), (2020). 11(9).
[50] Behgounia, F., & Zohuri, B. "Artificial Intelligence Integration with Nanotechnology", Jour of Nanosciences Research & Reports, SRC/JNSRR (2020), 116 (3).
[51] Kumar, Sandeep, et al. "Nanodiamonds: Emerging face of future nanotechnology." Carbon 143, (2019) 678-699.
[52] Nikhat, Akhtar, and Perwej Yusuf. "The internet of nano things (IoNT) existing state

and future Prospects." GSC Advanced Research and Reviews 5.2 (2020): 131-150.