

## کامپیوترهای DNA

نوید علیزاده\*

### چکیده

مبنای کارکرد کامپیوترهای امروزی، کاربرد کدهای دوتایی «صفر» و «یک» همچنین روشن و خاموش شدن مدار ریزتراشه است که عملکرد کامپیوتر را از ساده‌ترین مانند جمع و تفریق تا پیچیده‌ترین آنها مانند معادلات تفارقی در برمی‌گیرد. از آنجایی که مولکول DNA دارای کد است می‌توان از آن به‌عنوان یک کامپیوتر مولکولی که از چهار مبنای قابل پیش‌بینی و در ارتباط با هم تشکیل شده استفاده کرد به‌عنوان یک ماده آلی بر مبنای ساخت ابزارهای نانوشیمیایی، ساختارهای پیچیده نانو در انجام محاسبات شناخته شده است. منطق کامپیوترهای DNA بر وجود اتصالات مهم بین کامپیوترها و سیستم‌های زنده و همچنین انجام محاسبات پیچیده استوار است. ابزارهای محاسباتی DNA می‌تواند زمینه‌های دارو و پزشکی را متحول کند اما پیش از آن، باید چالش‌های مهم در رابطه با خطاها و بعضاً مشکلات عملیاتی این کامپیوترها بررسی شود. هدف مقاله حاضر مروری بر پیشرفت‌های اخیر در محاسبات کامپیوترهای DNA و بررسی چالش‌ها و مشکلات موجود در راه پژوهشگران است.

واژگان کلیدی:

DNA کامپیوتر، جابه‌جایی اطلاعات از مولکول‌های DNA، پایه‌های شناور آزاد، مسیر همیلتونی..

### مقدمه

ریچارد فینمن (Richard Feynman) شاید اولین کسی باشد که در مورد امکان انجام محاسبات در سطح مولکولی صحبت کرده است. عقیده او برای عملی شدن بیست سال زمان گرفت. او با دو مسیر: یکی محاسبات کوانتومی و دیگری محاسبات DNA مواجه شد. پس از او لئوناردو ادلمن ایده حیرت‌آور خود را مطرح کرد؛ ایده‌ای که مدت‌ها پیش با خواندن کتاب بیولوژی مولکولی ژن (نوشته شده توسط جیمز واتسون<sup>۱</sup>) به آن دست یافت. او در حالی که نوشته واتسون در ذهنش نقش بسته بود به این نتیجه رسید که مولکول‌های DNA دارای پتانسیل محاسباتی است و حال می‌رفت تا از یک جرعه ذهنی به پروژه‌ای جدی تبدیل شود. لئوناردو ادلمن توانست توانایی مولکول DNA را در حل مسائل پیچیده ریاضی به اثبات برساند. نتایج این تحقیقات که برای اولین بار در نشریه Science (آگوست ۱۹۹۴ م.) منتشر شد، جهان را شگفت‌زده کرد. به طوری که انجام محاسبات در سطح مولکولی و با کمک مولکول حیاتی، یعنی DNA سرآغاز تحولی تاریخی در عرصه محاسبات و پیدایش نسل جدید کامپیوترها شد [۱و۲].

ادلمن به کمک تکنیکی جالب توانست برای یکی از مشهورترین مسائل محاسباتی، یعنی مسئله مسیر همیلتونی<sup>۲</sup>

\* دانشگاه تهران، تلفن: ۰۲۶۶۴۶۹۲۰۲ (۰۲۱)، ۰۹۱۲۲۲۱۸۱۶۲، پست الکترونیکی: nalizadeh@ut.ac.ir

نتیجه هر مسأله مورد نظر با استفاده از یک رشته DNA کدگذاری می‌شود که روی نوار یک ماشین تورینگ قرار داده می‌شود. هر کدام از مراحل ممکن می‌توانند به صورت شیمیایی در یک تیوپ آزمایش که توسط چند تریلیون رشته مختلف DNA بوجود آمده، قرار گیرند و سپس مراحل درست و قابل قبول با بهره‌گیری از ابزارهای مهندسی ژنتیکی از بقیه جدا شوند. پایه‌های شیمیایی مولکول DNA از نظر بیولوژیکی از قوانینی خاص پیروی می‌کند به این صورت که پایه A با T و پایه C با G پیوند برقرار می‌کند که این خواص قابلیت پردازش اطلاعات را به مولکول DNA می‌دهد.

$G^+$ ، AT به عنوان مثال درون سلول مولکولی وجود دارد که اندازه‌اش تنها ۴ نانومتر مربع است اما می‌تواند در حالی که هر کدام از پایه‌های A، T، C، G را می‌خواند از یک رشته DNA پایین برود. یک رشته مکمل از DNA پایه‌های شناور آزاد را به عنوان حاصل کار و سپس آن نمونه را قابل دسترسی قرار می‌دهد.

### استفاده از DNA به عنوان پروسسور

مسأله‌ای که اولین بار ادلمن توسط DNA موفق به حل آن شد تنها این نکته را مشخص کرد که DNA قابلیت محاسبات پیچیده را دارند اما هنوز نمی‌توان از آنها به عنوان جانشین کامپیوترهای امروزی یعنی کامپیوترهای الکترونیکی استفاده کرد زیرا در انجام محاسبات نیازمند کمک انسان است.

هدف محققان ساخت کامپیوتری است بی‌نیاز از کمک انسان. در حالی که در آزمایش ادلمن بر روی مسأله همیلتون به دخالت مستقیم انسان نیاز بود. به این صورت که با وجود حرکت سریع مولکول‌های DNA که توانست ترکیبات ممکن را ایجاد کند، او خود وقت صرف کرد تا بتواند ترکیباتی را که در جواب مسأله صدق نمی‌کرد از طریق واکنش‌های شیمیایی از

(HP/Hamiltonation Path Directed) یا همان مسأله فروشنده دوره‌گرد (TSP/Traveling Salesman Problem) راه‌حلی پیدا کند.

مسئله از این قرار بود که یک فروشنده فرضی سعی داشت تا بهترین مسیر را در عبور از چند شهر انتخاب کند. به طوری که می‌بایست از هر شهر تنها یک بار عبور کند و البته از همه شهرهای مورد نظر نیز بگذرد. ادلمن این مسئله را برای هفت شهر مورد نظر حل کرد. اگرچه حل این مسئله با هفت شهر به آسانی و حتی بر روی کاغذ قابل اجراست اما در صورت افزایش تعداد شهرها مسئله دشوار می‌شود و در نهایت برای حل مسئله به چندین سال زمان نیاز خواهیم داشت.

### نتایج ایده ادلمن

– تشریح امکان استفاده از مولکول DNA در حل مسائل کلاسیک ریاضی که به کمک روش‌های مرسوم محاسباتی غیرممکن می‌باشد؛

– انجام محاسبات در سطح مولکولی و رفع موانع کوچک‌سازی قطعات الکترونیکی در صنعت نیمه‌هادی؛

– اثبات جنبه منحصر به فرد بودن اپد به عنوان یک ساختمان داده‌ای؛

– اثبات این که DNA به روش پردازش موازی محاسبات را انجام می‌دهد؛

– حل مسأله همیلتون توسط DNA.

### نحوه عملکرد

هر مولکول DNA شامل ۴ پایه<sup>۲</sup> Cytosine(C) و Adenine(A), Thymine(T) و Guanine(G) است که به یکدیگر پیچیده شده‌اند. زبانی که DNA با آن عمل می‌کند با چهار حرف G, C, T, A کدگذاری می‌شود و عملیات محاسباتی را انجام می‌دهد. با استفاده از این سیستم چهار پایه‌ای،

بقیه رشته‌ها جدا کند و به جواب‌های قابل قبول دست یافت. [۳ و ۵].

## DNA چیست و چه ارتباطی با سیستم‌های کامپیوتری دارد؟

همان‌گونه که اشاره شد ادلمن، ریاضی‌دان و دانشمند علوم کامپیوتر با مطالعه کتاب بیولوژی مولکولی واتسون و بررسی ساختار DNA در مدل واتسون - کریک توانست به عملکرد مشابه مولکول DNA و سیستم‌های کامپیوتری پی ببرد. نکات برجسته مدل واتسون - کریک را در عبارات زیر می‌توان خلاصه کرد:

- DNA، مولکولی مارپیچی و دوگانه است و برای تجسم این مارپیچ، «ستون فقرات» متناوبی از گروه‌های فسفات و قند را دارد که حول یک استوانه فرضی بلند پیچیده شده باشد؛ این یکی از رشته‌های مارپیچ دوگانه است. در مارپیچ DNA دو رشته وجود دارد که توسط بازهایی که بیرون از رشته‌ها به سمت مولکول قرار دارند با تشکیل پیوندهای شیمیایی ضعیف یکدیگر را نگه می‌دارند؛

در رابطه با - چهار نوع نوکلئوتید (واحدهای ساختاری DNA) که عبارتند از آدنین (A)، تیمین (T)، سیتوزین (C) و گوانین (G) میزان آدنین و تیمین برابر است زیرا بازهای آدنین در یکی از دو رشته به تیمین رشته مقابل می‌پیوندد. به طور مشابهی میزان گوانین با سیتوزین نیز برابر است زیرا دو باز در مولکول DNA همواره به هم پیوند می‌خورند. از این رو اگر دو رشته مولکول DNA با شکستن پیوندهای بین بازها جدا شوند هر رشته، تمام اطلاعات لازم جهت سنتز رشته مقابل را فراهم می‌کند.

مدل واتسون - کریک نشان داد که اطلاعات ژنتیکی به نحوی در ردیف بازهای مولکول DNA رمز شده است همانند آن در کامپیوترها اتفاق می‌افتد؛ یعنی ذخیره داده‌ها به صورت

رشته‌های دوتایی (Binary) است.

یک رقم دوتایی، یک بیت (Bit) خوانده می‌شود. اطلاعات در کامپیوترهای دیجیتال به وسیله گروه‌هایی از بیت نشان داده می‌شود. با استفاده از تکنیک‌های کدگذاری، بیت‌ها نه تنها برای نمایش اعداد دوتایی بلکه برای سایر سمبل‌های گسسته همچون ارقام ده‌دهی و یا حروف الفبا نیز به کار برده می‌شود. با استفاده صحیح از مجموعه‌های دوتایی و به‌کارگیری روش‌های مختلف کدگذاری، می‌توان گروه بیت‌ها را برای ساخت مجموعه‌های کامل دستورالعمل‌ها جهت انجام محاسبات به کار برد. جالب است بدانیم که یک رشته DNA رمزگذاری شده با چهار پایه A, T, C, G و با فاصله‌ای حدود ۰/۳۵ نانومتری نوکلئوتیدها از هم، یک ساختمان داده‌ای<sup>۴</sup> منحصر به فرد است.

از سویی دیگر تراکم داده‌ای DNA یا همان حجم اطلاعاتی که می‌تواند در خود ذخیره کند در مقایسه با کامپیوترهای امروزی فوق‌العاده است. این در حالی است که بیش از ۱۰ تریلیون مولکول DNA در یک سانتی‌متر مکعب جای می‌گیرد. با این حجم از DNA می‌توان ۱۰ ترا بیت<sup>۵</sup> اطلاعات را ذخیره کرد و ۱۰ تریلیون محاسبه را در یک لحظه به انجام رساند. همچنین یک گرم DNA خشک که تقریباً به اندازه نصف یک حبه قند است می‌تواند اطلاعات یک تریلیون CD را در خود ذخیره کند. تراکم مؤثر DNA حدود ۱۰۰۰۰۰ بار بیشتر از حافظه‌های جانبی<sup>۶</sup> کامپیوترهای مدرن است [۷ و ۶]. ادلمن پی‌برد که DNA در طبیعت، همانند ماشین تورینگ عمل می‌کند. حافظه موقت ماشین تورینگ<sup>۷</sup>، نوار است. این نوار به سلول‌هایی تقسیم شده است که هر یک قادر به نگه‌داری یک علامت است. در ارتباط با نوار، یک هد خواندن و نوشتن وجود دارد که می‌تواند به راست و چپ حرکت کند و در هر حرکت، یک علامت بخواند. ماشین تورینگ فایل ورودی و یا مکانیزم خروجی مشخصی ندارد و هر نوع ورودی

و یا خروجی به واسطه نوار انجام می‌شود و داشتن این فایل‌ها تغییری در نتیجه به وجود نمی‌آورد. طبق ایده ادلمن و تحقیقات گسترده شاپیرو، مولکول DNA همانند ماشین تورینگ اطلاعات را پردازش کرده و آنها را به صورت یک رشته و یا فهرستی از علائم ذخیره می‌کند. از این رو دانشمندان برای ساخت نانوکامپیوتر<sup>۸</sup> در پی جایگزینی ریز پردازنده‌های سیلیکونی با مولکول DNA هستند.

### DNA جایگزینی برای سیلیکون

مطابق قانون مور هر ۱۸ ماه، تعداد قطعات الکترونیکی موجود در تراشه‌های کامپیوتری (Chip) دو برابر می‌شود و سرعت نیز چند برابر افزایش می‌یابد. از طرفی هر روز شاهد کوچک‌تر شدن وسایل الکترونیکی هستیم. اما در نهایت سرعت فیزیکی و کوچک‌سازی ریز پردازنده‌های سیلیکونی (نیمه‌هادی به کار رفته در ساخت مدارهای الکترونیکی) به پایان می‌رسد؛ به طوری که از نظر تولید کارخانه‌ای با مشکل روبه‌رو خواهیم شد. تراشه‌سازان سال‌هاست که به دنبال جایگزینی برای سیلیکون هستند و این جایگزین همان مولکول DNA موجود در سلول‌های ارگانیسم زنده است. منبعی فراوان و ارزان که از نظر مسائل زیست‌محیطی بر خلاف مواد سمی ریز پردازنده‌های رایج منبعی پاک محسوب می‌شود. از طرفی مطابق نظریه دانیل ایلی، مولکول DNA همانند یک سیم مولکولی، هادی جریان الکترون‌هاست. [۹].

### کامپیوترهای DNA

در سال ۲۰۰۲ میلادی، از یک ماشین محاسبه قابل برنامه‌ریزی مولکولی پرده برداری شد. این کامپیوتر مولکولی به جای تراشه‌های سیلیکونی از ترکیب آنزیم‌ها و مولکول‌های DNA تشکیل شده بود. تیم سازنده این کامپیوتر مولکولی پس از یک سال موفق به اجرای گام بعدی پروژه خود شد. در دستگاه جدید مولکول منفرد DNA که بخش اصلی کامپیوتر است از طریق جریان ورود اطلاعات، انرژی لازم را برای فعالیت کامپیوتر فراهم می‌کند. این طرح گامی بزرگ در ساخت کامپیوترهای DNA محسوب

کامپیوترهای DNA از سری کامپیوترهای در ابعاد نانو هستند که از مولکول DNA به همراه آنزیم‌های پردازش مولکول و چند قطره آب تشکیل شده‌اند. ورودی، خروجی و برنامه نرم‌افزاری ماشین مذکور همگی از مولکول DNA ساخته شده‌اند. در طبیعت آنزیم‌هایی وجود دارد که مولکول DNA را قطعه می‌کند. آنزیم‌هایی نیز وجود دارند که عمل [Paste] را انجام می‌دهند و آنزیم‌هایی برای [Copy] و همچنین آنزیم‌هایی برای تعمیر [Repair] مولکول DNA وجود دارد و حتی چیزی فراتر مانند واحد پردازش مرکزی کامپیوتر (CPU) وجود دارد که دارای یک سری از اعمال پایه، نظیر عملیات جمع [Add]، انتقال بیتی [Bit-shifting] و عملگرهای منطقی (AND-OR-NOT-NOR) است که باعث می‌شود DNA قادر به انجام محاسبات پیچیده باشد. نکته حائز اهمیت این است که اعمال فوق تنها در یک لحظه و به صورت موازی انجام می‌شود [۸].

ادلمن می‌گوید: در آینده با توجه به محاسبات و پردازش‌های DNA علاوه بر استفاده در سیستم‌های شیمیایی و بیولوژیکی حتی می‌توان از آنها برای اهداف غیر بیولوژیکی هم بهره برد. آنها ماشین‌های مولکولی کوچکی هستند و می‌توانند اطلاعات و انرژی را ذخیره کنند و عمل تکه برداری «ضمیمه و کپی کردن» را انجام دهند. ادلمن مدعی است: آنها در طی ۳ میلیون سال دگرگونی به وجود آمده‌اند و ما اخیراً از پتانسیل موجود در آنها برای اهداف غیر بیولوژیکی

به طور همزمان به دست می‌دهد. این روش باعث می‌شود که کامپیوتر، DNA برای حل مسائل منطق فازی که تعداد زیادی راه حل ممکن نسبت به منطق دوتایی در کامپیوترهای باینری دارد وسیله‌ای مناسب باشد. در آینده ممکن است از کامپیوترهای دورگه (پیوندی) استفاده شود. این کامپیوترهای دورگه برای وظایف محاسباتی معمول از تراشه‌های سیلیکونی سنتی و برای انجام وظایف محاسباتی خاص از کمک پردازنده‌های DNA استفاده می‌کنند [۱۱].

## نتیجه‌گیری

به‌کارگیری مؤثر کامپیوترهای DNA در کشف سرطان‌های ریه و پروستات نویدبخش آینده‌ای روشن برای درمان انواع سرطان و سایر بیماری‌های ناشناخته است. به‌زودی وسایلی با ابعاد مولکولی و با ترکیبی از مولکول DNA و آنزیم‌های لازم برای تشخیص علائم شیمیایی بیماری و سپس پمپاژ دارو طراحی خواهد شد.

ژان ریف، سازنده کامپیوتر مولکولی شخصی در سال ۲۰۰۰ میلادی در این زمینه می‌گوید: در آینده ممکن است به بدن بیمار ترلیون‌ها کامپیوتر تزریق شود. این کامپیوترها به وسیله تمرکز بر مولکول‌های معین به کشف بیماری پرداخته و مولکول‌های دیگر را رها می‌کنند؛ مولکول‌هایی که در فعالیت سلول‌های سرطانی مداخله کرده و باعث تخریب‌شان می‌شود. این کامپیوترها خودکار هستند و نیازی به افزایش‌دهنده‌های شیمیایی نخواهند داشت.

دانشمندان بر این باورند که پیچیدگی ساختار مولکول‌های بیولوژیک این اجازه را خواهد داد که کامپیوترهای DNA بدون نیاز به بخش‌های الکترونیکی اعمال خود را انجام دهند. [۱۱].

کاربرد دیگر کامپیوترهای DNA، تخصص در آنالیز ژن و به عبارتی محاسبه ترکیبات DNA، اجرای واکنش‌های

می‌شود. گرچه تولید کامپیوترهای DNA در مرحله ابتدایی به سر می‌برد اما می‌تواند آینده کامپیوتر را متحول کند به خصوص در زمینه‌های دارویی و زیست‌کامپیوترها.

از آن زمان چند گروه پژوهشی طرح‌های مختلفی برای کامپیوترهای DNA پیشنهاد کرده‌اند، اما تأکید آنها بر ATP، مولکول دارای انرژی به‌عنوان سوخت لازم بوده است. طراحی مجددی انجام شده است تا دستگاه از جریان ورودی داده به‌عنوان منبع انرژی استفاده کند. در این دستگاه باید DNA را به‌عنوان نرم‌افزار و آنزیم‌ها را به‌عنوان سخت‌افزار در نظر گرفت. آنها را در یک لوله آزمایش می‌ریزیم، این مولکول‌ها با هم واکنش شیمیایی نشان می‌دهند. [۱۰].

دانشمندان اعلام کرده‌اند که این دستگاه‌ها به وسیله کنترل ترکیب مولکول‌های نرم‌افزاری DNA کار می‌کنند. این روند با آنچه که در کامپیوترهای امروزی می‌بینیم متفاوت است و به وسیله گردش الکترون‌ها درون یک مدار خشک رخ می‌دهد. با چشم غیر مسلح یک کامپیوتر DNA مثل یک محلول شفاف آب در لوله آزمایش به نظر می‌رسد. در یک کامپیوتر DNA هیچ‌گونه ابزار مکانیکی وجود ندارد. یک قطره آب قادر است یک ترلیون ابزار زیستی مولکولی را در خود جای دهد. نتایج در این کامپیوترها در عوض ظاهر شدن بر صفحه مانیتور به وسیله تکنیکی که به دانشمندان اجازه می‌دهد طول مولکول‌های خروجی DNA را ببینند، آنالیز می‌شود. تاکنون کامپیوترهای DNA تنها قادر به انجام محاسبات ابتدایی بوده‌اند و هنوز کاربردی نشده‌اند. درست زمانی که دانشمندان در مورد اینکه تراشه‌های سیلیکونی توانایی فشرده‌سازی بیشتر را ندارند، بحث می‌کنند، مولکول‌های اپ‌ڈر هسته هر سلول دارای توانایی ذخیره اطلاعات بیش از یک ترلیون CD موسیقی تنها در یک سانتیمتر مکعب هستند! یک کامپیوتر، DNA مدت زمانی را که یک کامپیوتر شخصی صرف انجام یک محاسبه می‌کند، بیلیون‌ها پاسخ را

شیمیایی و جست و جو و استخراج نتایج مورد نظر است. کامپیوترهای DNA، دروازه‌هایی حیرت‌انگیز از ناشناخته‌های ترکیب علم ژنتیک و دانش مهندسی را فراروی ماگشوده‌اند و نویدبخش روزهایی خواهند بود که در آن اثری از بیماری‌های لاعلاج و کشنده نیست. ظهور کامپیوترهای DNA به معنی تحولی تاریخی در صنعت کامپیوتر و پیدایش نسل جدیدی از کامپیوترها است با ابعاد و شکلی بسیار

متفاوت با کامپیوترهای متداول امروزی. هرچند ممکن است این کامپیوترها برای انجام بازی‌ها و یا اجرای یک فایل صوتی چندان کاربردی نداشته باشد اما به طور حتم توانایی حل مسائل منطقی، استدلالی، مسائل امنیتی و پنهان‌سازی را دارند. قدم بعدی در استفاده از کامپیوترهای DNA بررسی برنامه‌نویسی ژنتیکی، الگوریتم‌ها، آتاماتا (ماشین‌های خودکار) و طراحی زبان‌های سیستم است.

### یادداشت‌ها:

- ۱- کسی که مولکول‌های DNA را در سال ۱۹۵۳ کشف کرده بود.
- ۲- مسئله همیلتونی  
تهیه رشته‌هایی از DNA که هر کدام نمایانگر یک شهرند و همان طور که می‌دانیم کدهای ژنتیکی با حروف نمایش داده می‌شود. تعدادی از ردیف‌های متشکل از این چهار حرف نمایانگر هر شهر و مسیرهای ممکن بین آن شهرها است - این مولکول‌ها در یک تیوپ آزمایش با هم ادغام می‌شوند که تعدادی از این رشته‌ها به یکدیگر می‌چسبند و زنجیره‌ای از این رشته‌ها با یکدیگر یکی از جواب‌های ممکن را نمایش می‌دهد.
- ۳- حل مسئله همیلتونی  
در عرض چند ثانیه، تمام ترکیبات ممکن از رشته‌های DNA که نمایانگر جواب‌ها هستند، درون تیوپ آزمایش ساخته می‌شوند - حال او، مولکول‌های غیر قابل قبول را از طریق یک سری واکنش‌های شیمیایی حذف می‌کند. در پایان تنها رشته‌هایی که نشان‌دهنده مسیرهای درست و قابل قبول مسأله هستند در تیوپ آزمایش باقی می‌مانند که توسط میکروسکوپ قابل رؤیت هستند.
- ۴- چهار نوع نوکلئوتید (واحد ساختاری DNA)
- ۵- در مباحث علوم کامپیوتر، داده‌ها را به طرق مختلفی سازماندهی می‌کنند. مدل منطقی یا ریاضی یک سازمان معین داده‌ها را اصطلاحاً ساختمان داده‌ها می‌نامند. ساختمان داده‌ها در واقع به گونه‌ای است که می‌توان داده‌ها را در چارچوب آن ساختمان پردازش کرد.
- ۶- ۱۰۲۴ گیگابایت (Gb)
- ۷- Hard disk, Cool Disk, CD's, DVD's, Blu-Ray Disk
- ۸- ماشین تورینگ که به اسم ریاضی‌دان انگلیسی Turing Alan نام‌گذاری شده، یک آتاماتون است و آتاماتون یک مدل انتزاعی از کامپیوتر است
- ۹- نانوکامپیوتر، عبارت است از یک کامپیوتر با مدارهای بسیار کوچک که تنها توسط یک میکروسکوپ دیده می‌شود. نانوکامپیوترها می‌توانند به صورت‌های زیر طراحی شوند:
  - الکترونیکی: که در آن از فناوری نانو تکنولوژی برای ساخت مدارهای میکروسکوپی استفاده می‌شود؛
  - ارگانیک یا بیوشیمیایی: همانند کامپیوترهای DNA؛
  - کوانتومی: کامپیوترهای کوانتومی.

## منابع و مآخذ:

- [1]-Cox, J., C., Cohen, D., S., and Ellington, A., D. The Complexities of DNA Computation. *Trends in Biotechnology*. 17, 4, 151-154, (1999).
- [2]- Ferretti, C., Mauri, G., Kobayashi, S., and Yokomori, T. On the Universality of Post and Splicing Systems. *Theoretical Computer Science*. 231, 2, 157-170. (2000).
- [3]- Rambidi, N., G. Biomolecular Computer: Roots and Promises. *Biosystems*. 44, 1, 1-15. (1997).
- [4]-Kazic, T. Elements of a More Comprehensive Theory of Computing. *Biosystems*. 52, 1-3, 111-1222. (1999).
- [5]-Lin, C., H., Cheng, H., P., Yang, C., B., Yang, C., N. Solving Satisfiability Problems using a Novel Microarray-Based DNA Computer. *Biosystems*, 90,1, 242-252. (2007).
- [6]-Danny, V., N., Zhongliang, T., Landweber, L., F. Fully Controllable Microfluidics for Molecular Computers. *Journal of the Association for Laboratory Automation*, 9, 5, 285-290. (2004).
- [7]-Ito, Y., Fukusaki, E. DNA as a nanomaterial. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*. 28, 4-6, 155-166. (2004).
- [8]- Kahan, M., Gil, B., Adar, R., Shapiro, E., Towards Molecular Computers that Operate in a Biological Environment. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 237, 9, 1165 - 1172. (2008).
- [9]- Xian, Xu, Xiaoju, D., Yuxi, F. A model in K for DNA Addition. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 171, 2, Pages 209-222. (2007).
- [10]- Islam, S., A., Neidle, S., Gandecha, B., M., Brown, J., R. Experimental and computer graphics simulation analyses of the dna interaction of 1,8-bis-(2-diethylaminoethylamino)-anthracene-9, 10-dione, a compound modelled on doxorubicin. *Biochemical Pharmacology*, 32, 18, 2801-2808. (1983).
- [11]-Boneh, D., Dunworth, C., Lipton, R., J., Sgall, J. On the computational power of DNA. *Discrete Applied Mathematics*, 71, 1-3, 5, 79-94. (1996).