

کامپیوتر های DNA به عنوان مناسب ترین وسیله برای ذخیره سازی اطلاعات حجیم

مژگان خزانه داری^۱ ، مرجان خزانه داری^۲ ، احسان امیری^۳

۱ کارشناسی مهندسی نرم افزار، موسسه غیرانتفاعی اقبال لاهوری، مشهد، ایران.

۲ کارشناسی پرستاری، دانشگاه بیرجند، ایران.

۳ کارشناسی مهندسی نفت، دانشگاه مرودشت، ایران.

نام نویسنده مسئول:

مژگان خزانه داری

چکیده

با پیشرفت فناوری و نیاز به پردازش حجم بالای اطلاعات در محیطهای واقعی درحوزه علوم محاسباتی به ابزار و روش های محاسباتی جدید نیاز است . محاسبات DNA که با استفاده از قابلیت های ژن انسان توانایی پردازش موازی را به صورت فوق العاده سریعی میسر میسازد و از آنجایی که مولکول DNA دارای کد است میتوان از آن به عنوان یک کامپیوتر مولکولی که از چهار مبنای قابل پیش بینی و در ارتباط با هم تشکیل شده استفاده کرد . منطق کامپیوتر های DNA بر وجود اتصالات مهم بین کامپیوتر ها و سیستم های زنده و همچنین انجام محاسبات پیچیده استوار است . ابزار های محاسباتی DNA میتواند زمینه های دارو ، پزشکی را متحول کند در این مقاله به اهمیت کامپیوتر های DNA و روش مناسب جهت پردازش اطلاعات در آن می پردازیم.

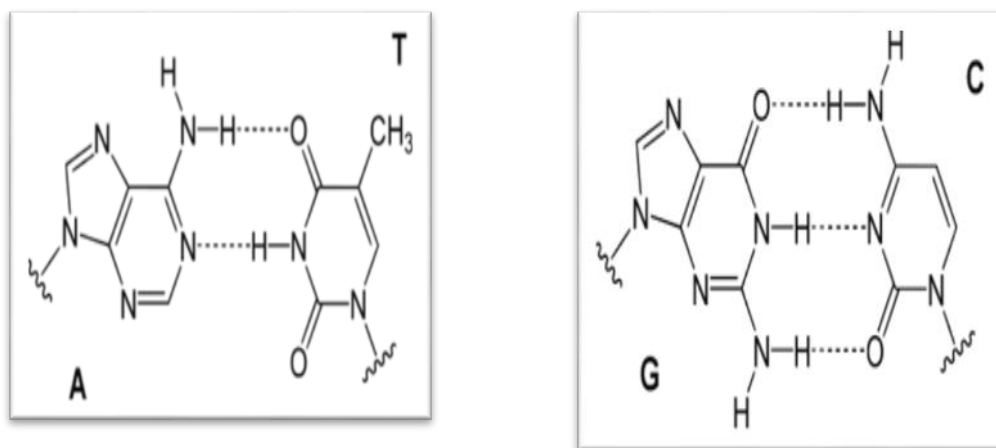
واژگان کلیدی: کامپیوتر DNA ، پردازش موازی ، ذخیره اطلاعات.

مقدمه

با سرعت فعلی رشد صنعت چیپ سازی، رایانه های ترانزیستوری و سیلیکونی که بیش از 40 سال است در مرکز توجه جهان محاسبات قرار داشته اند، به زودی به انتهای خط خواهند رسید. چیپ ها کوچک تر و کوچک تر شده اند، در هر 18 ماه تعداد قطعات الکترونیکی موجود روی چیپ دو برابر شده و سرعت چند برابر افزایش یافته است، اما مینیاتوری شدن چیپ ها و افزایش سرعت آنها نهایت و حدی دارد و پس از آن متوقف خواهد شد، بنابراین توجه متخصصان به میلیون ها سوپر رایانه طبیعی موجود در موجودات زنده جلب شده و ماشین ها و رایانه هایی نیز ساخته شده است. گرچه اگر به دقت نگاه کنید به جای رایانه تنها تیوپ های کوچکی می بینید که آب دارند. دانشمندان به دنبال راهی برای گذر از این مانع می باشند که راه حل را باید در جستجو برای ماده ای متفاوت برای ساخت پردازشگر بیابند. هزاران کامپیوتر طبیعی در بافت های موجودات زنده وجود دارد، DNA که ماده سازنده ژن های بدن ما است می تواند محاسباتی با حجم و سرعت بیشتر از سریع ترین کامپیوتر های ساخت بشر را انجام دهد. نکته جالب توجه در مورد کامپیوترهای ساخته شده بر اساس DNA این است که محدودیت های موجود در کامپیوترهای کوانتومی را ندارند.

DNA چیست

DNA بخشی از محیط زیست و موجود زنده است که مخفف عبارت دئوکسی ریبونوکلیک اسید، نوعی اسید نوکلئیک است که دارای دستور العمل ژنتیکی است که برای کارکرد و توسعه بیولوژیکی موجودات زنده ویروس مورد استفاده قرار میگیرد. قسمت اعظم ساختار مولکولی DNA از دو رشته پلیمری زیستی تشکیل شده است. این دو رشته به صورت حلقه دور هم پیچ خورده و به شکل یک مارپیچ دوگانه در آمده اند. دو رشته DNA به عنوان پلی نوکلئوتید شناخته شده، که از واحد های ساده تری به نام نوکلئوتید ساخته شده است. هر نوکلئوتید از یک باز آلی، گوانین (G)، یاسیتوزین (C)، یا آدنین (A)، یا تیمین (T)، و از یک قند مونوساکاریدی به نام دئوکسی ریبوز و یک گروه فسفات تشکیل شده است. نوکلئوتید ها به وسیله پیوند کوالانسی به صورت زنجیره ای به هم متصل می شوند، نوکلئوتید ها از محل قند یک نوکلئوتید با فسفات نوکلئوتید دیگر پیوند ایجاد کرده و ساختاری شبیه ستون فقرات (رشته بلند) قند و فسفاتی را ایجاد می کنند. پیام های ژنتیک دی ان ای در نهایت برای مواردی چون ساخت پروتئین و مولکول های RNA مورد استفاده قرار میگیرد.



آدنین - تیمیندر سیتوزین - گوانین

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فرایمن (Richard Feynman) ریچارد فرایمن یک ایده ذهنی برای ساختن کامپیوترهای میکروسکوپی داد. عقیده او برای عملی شدن بیست سال زمان گرفت که با دومسیر یکی محاسبات کوانتومی و دیگری محاسبات DNA مواجه شد.

ایده آدلمن و نتایج آن

لئوناردو آدلمن یکی از محققان دانشگاه کالیفورنیا جنوبی که توانایی مولکول DNA را در حل مسائل پیچیده ریاضی به اثبات رساند. او رشته های DNA را به عنوان شهر ها انتخاب کرد و در ژنتیک کد ها با حروف A, T, C, G مشخص می شوند. مشاهدات آدلمن در زیر

میکروسکوپ به این نتیجه رسید که در بین رشته‌های تولید شده تنها برخی رشته‌های حاوی یک ترتیب و طول مشخص (جواب خاص) باقی می ماند و سایر رشته ها نابود میشوند.

ایده اصلی محاسبات DNA بر این پایه است که با کدگذاری داده ها در قالب رشته های DNA میتوان با استفاده از فنهای مولکولی زیستی (عملگرهای زیستی) در یک ظرف آزمایش به شبیه سازی عملگرهای منطقی و ریاضی پرداخت. ترکیب این حروف شهر ها و مسیر های گذرا از آن را مشخص کرد و هر کدام از مولکول هایی که یک مسیر را مشخص میکند با متصل شدن به هم جواب احتمالی مسئله را نشان میدهند و جواب اشتباه طی یک واکنش شیمیایی از بین می روند .

نتایج ایده آدلمن:

- امکان استفاده از DNA در انجام ذخیره اطلاعات شباهت زیادی به هاردیسک کامپیوتری دارد .
- انجام محاسبات در سطح مولکولی و رفع موانع کوچک سازی قطعات الکترونیکی در صنعت نیمه هادی .
- DNA به روش موازی محاسبات را انجام می دهد.
- حل مساله همیلتون توسط DNA
- DNA قابلیت محاسبات دارد اما برای حل مساله نیاز به دخالت انسان بوده است که هنوز نمیتوان آن را جایگزین کامپیوتر های الکترونیکی دانست .

ایده واتسون و کریک

مدل واتسون و کریک نشان داد که اطلاعات ژنتیکی به نحوی در ردیف بازهای مولکول DNA رمز شده است همانند آن در کامپیوتر اتفاق می افتد. یعنی ذخیره داده ها به صورت رشته های دو تایی (BINARY) است . یک رقم دو تایی ، یک بیت (bit) خوانده می شود و اطلاعات در کامپیوتر های دیجیتال به وسیله گروه هایی از بیت نشان داده میشود . با استفاده از تکنیک کد گذاری، بیت ها نه تنها برای نمایش اعداد دوتایی بلکه برای سایر سمبل های گسسته همچون ارقام ده دهی و یا حروف الفبا نیز به کار برده می شود. با اسفاده صحیح از مجموعه های دوتایی و به کارگیری روش های مختلف کد گذاری ، میتوان گروه بیت ها را برای ساهت مجموعه های کامل دستور العمل ها جهت انجام محاسبات به کاربرد. یک رشته دی ان ای رمز گذاری شده یکساختمان داده منحصر به فرد است . از سوی دیگر تراکم داده ای DNA یا همان حجم اطلاعاتی که می تواند در خود ذخیره کند در مقایسه با کامپیوتر های امروزی فوق العاده است .

نتایج ایده واتسون و کریک

- DNA در واقع در شیوه ذخیره سازی اطلاعات ثابت روی زن انسان بسیار شبیه هاردیسک عمل می کند .
- DNA ارگانسیم سلولی است و در همه موجودات زنده است،
- دردسترس بودن DNA باعث ارزان شدن آن به عنوان منبع ساخت کامپیوتر میباشد .
- DNA حجم بسیار زیادی از اطلاعات را می تواند در خود نگهداری کند.

کامپیوتر DNA (در یک قطره آب)

درسال ۲۰۰۱ کامپیوتری که در یک قطره آب جای دارد و از مولکولهای DNA و آنزیم ها به عنوان ورودی ، خروجی، نرم افزار و سخت افزار استفاده میکند ابداع شد و در سال ۲۰۰۳ یک منبع تغذیه نیز به این کامپیوتر اضافه شد که این منبع انرژی خود را از شکسته شدن مولکول های DNA ، تامین میکند که همینطور در DNA آنزیم هایی وجود دارد که عمل Repair، Copy، paste، و واحد پردازش مرکزی cpu و یکسری عملیات انتقال بیت و عملیات منطقی را انجام میدهد. و این کامپیوتر به وسیله کنترل ترکیب مولکول های نرم افزاری DNA کار میکند و با چشم غیر مسلح مثل یک محلول شفاف آب در لوله آزمایش به نظر می رسد و یک قطره آب میتواند یک تریلیون ابزار زیست مولکولی را در خود جای دهد و کامپیوتر DNA برای حل مسائل منطقی فازی که تعداد زیادی راه حل ممکن نسبت به منطقی دوتایی در کامپیوتر های باینری دارد وسیله ای مناسب است .

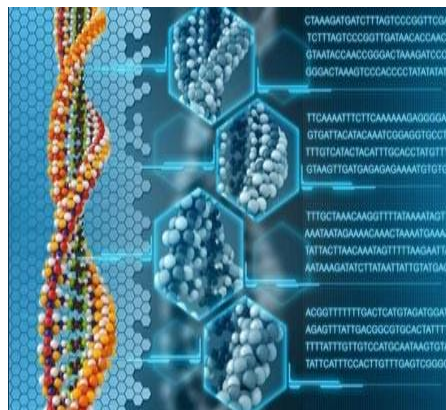
استفاده از DNA در ذخیره سازی اطلاعات و قابلیت پردازش

نوکلئیک اسیدها به خاطر چگالی و تاثیر گذاری و سرعتهشان مورد استفاده قرار میگیرند . مولکول های دی ان ای میتواند حجم بسیار بالایی از اطلاعات را ذخیره کنند. DNA چگالی ترین ماده ای است که در تمام جهان هستی وجود داشته و این توانایی را دارد که تمام اطلاعات جهان ما را در خود جای دهد. بیشتر رایانه های الکترونیکی به صورت سری می کنند و اطلاعات یک بلاک از حافظه را بعد از یک بلاک دیگر و همینطور به دنبال هم پردازش می کنند اما واکنش های شیمیایی کاملا موازی هستند. یک قسمت از فعالیت شیمیایی میتواند روی تریلیون ها رشته DNA به صورت همزمان انجام شود. آخرین تحقیقات انجام شده که در دانشگاه کلمبیا و مرکز ژن نیویورک انجام شده است ذخیره ۲۱۴ پتابایت داده را روی یک گرم DNA ذخیره سازی کردند که مراحل انجام طرح به شرح ذیل میباشد :

یک میلی متر مکعب DNA قادر است :

۱،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰ بایت

را درخود نگه دارد .



در این فرآیند دانشمندان ابتدا همه دادهها را فشرده کردند و در ادامه آن‌ها را درون یک فایل آرشیو قرار دادند. در ادامه این فایل به رشته‌های کوچکی از مقادیر باینری تقسیم شد. مقادیری که ما به عنوان صفرها و یک‌ها آن‌ها را می‌شناسیم. در مرحله بعد از طریق الگوریتم اصلاح‌کننده- پاک‌کننده (erasure-correcting) که به نام کدهای فوران از آن نام برده می‌شود، رشته‌ها به شکل تصادفی درون قطره‌هایی وارد می‌شوند. هر قطره حاوی بارکدی است. این بارکدها به دانشمندان اجازه می‌دهند در آینده به بازبازی مجدد فایل‌ها پردازند در مرحله بعد دانشمندان هر کدام از صفرها و یک‌های درون این قطره‌ها را به یکی از چهار بازهای نوکلئوتیدی (Nucleobase) موجود در DNA نگاهاشت کردند. این پروسه در نهایت با تهیه یک فهرست دیجیتالی از ۷۲ هزار رشته DNA که داده‌های کد شده درون آن‌ها قرار گرفته‌اند خاتمه پیدا کرد. در مرحله آخر خروجی کار برای مرکز زیست‌شناسی Twist Biosciences ارسال شد تا این اطلاعات درون DNAهای زیستی قرار بگیرد و هفته بعد دانشمندان محفظه‌ای را از مرکز فوق دریافت کردند که حاوی مولکول‌های DNA بود. برای بازبازی فایل‌های درون این محفظه، آن‌ها از فناوری خواندن ترتیبی رشته‌های DNA همراه با نرم‌افزاری که قادر به ترجمه کدهای ژنتیکی به باینری بود استفاده کردند. آن‌ها موفق شدند فایل‌های خود را با خطای تقریبا نزدیک به صفر بازبازی کنند.

DNA یک رسانه ذخیره‌ساز کامل بوده که در عین حال کاملا جمع‌وجور است، DNA بالاترین تراکم را در میان تمامی دستگاه‌های ذخیره‌سازی که تا به امروز ساخته شده است در اختیار دارد. کامپیوترهای DNA با قابلیت اجرای روند های موازی به عنوان یک پردازنده موازی جهت پردازش اطلاعات ، آن را یک روش بسیار کارا در برخورد با حجم بالای اطلاعات در مقابل سرعت پایین کامپیوترهای سنتی میدانیم. پردازش موازی به معنی به کارگیری تکنیک‌های متنوع در پردازش همزمان داده‌ها است که به منظور افزایش سرعت و محاسبات سیستم‌های کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یک سیستم پردازش موازی قادر است پردازش همزمان داده‌ها را برای رسیدن به سرعت پردازش بیشتر انجام دهد

کاربرد محاسبات DNA در یادگیری ماشین

یادگیری قوانین از ترکیب خصیصه ارزشهای متفاوت/ استقراء سازنده با استفاده از محاسبات DNA / حل مسائل با داده‌های جریان‌ی به عبارت دیگر، هدف از پردازش موازی، بالا بردن سرعت پردازش کامپیوتر و افزایش دفعات پردازش در طول بازه معینی از زمان است. افزایش سرعت بالای روندهای با قابلیت موازی بودن روندها در کامپیوترهای DNA با توانایی اجرای میلیون ها روند موازی میتوان از کامپیوترهای DNA برای پیدا کردن راه حل های رام شدنی در مسائل رام نشدنی استفاده کرد.

ارتباط دما با ذخیره سازی اطلاعات

یکی از مسائل بسیار مهم در ذخیره سازی اطلاعات، دماست. اگر دی ان ای در دمای 4 درجه سلسیوس نگهداری شود، در 80 درصد رشته های متوالی حداقل دارای یک خطا وجود خواهد داشت و حدود 8 درصد از کل توالی ها نیز به طور کامل از دست رفتند. با این حال با زهم میتوان داده ها را بدون هیچ گونه خطایی رمز گشایی کرد. اگر داده ها در دماهای پایینی نظیر 18- درجه سلسیوس نگهداری شوند، میتوان آنها را میلیون ها سال نگه داری کرد. در جدید ترین تحقیق در زمینه ذخیره سازی اطلاعات روی DNA از سوی موسسه فناوری فدرال سوئیس (SWISS Federal Institute of Technology) نشان می دهد کل اطلاعات جهان را میتوان روی یک دی ان ای به اندازه یک قاشق چایخوری کد گذاری کرد. تاکنون کد گذاری اطلاعات روی دی ان ای آسان بوده، ولی کد گشایی و بازیابی اطلاعات ذخیره شده روی دی ان ای چالش انگیز است و اطلاعات بازیابی شده مخدوش و دارای شکاف بودند چون دی ان ای با محیط و دمای پایین اتاق واکنش نشان می دهد و تغییر میکند اما رابرت گراس، رهبر تیم تحقیقاتی موسسه علوم و فناوری فرانسه (SFIT) میگوید روشی جدید برای حفظ اطلاعات روی دی ان ای پیدا کردند. آن ها با دی ان ای رفتاری مشابه یک فسیل می کنند. دی ان ای نمونه را بعد از کد گذاری اطلاعات، درون یک پوسته و روکش ساخته شده از جنس سیلیکا قرار دادند (همانند یک استخوان فسیل شده) و در دکای 140 درجه فارنهایت برای چندین هفته نگهداری کردند. این روکش از دی ان ای محافظت می کند و اجازه واکنش با محیط و تغییر ساختار یافتن را نمی دهد. سیلیکا یکی از مواد اصلی تشکیل دهنده شیشه است. آنها بعد از چند هفته که به سراغ دی ان ای رفتند توانستند اطلاعات کد گذاری شده را بخوانند. گراس می گوید اگر دی ان ای در دکای زیر صفر نگهداری شود برای میلیون ها سال میتواند اطلاعات کد گذاری شده را در خود نگهداری و ذخیره کند. سی دی و دی وی فقط 25 سال عمر مفید دارند. اخیراً میکروسافت خبر از همکاری با شرکت توئیست بیوساینس (Twist Bioscience) برای ساخت دستگاهی داد که به صورت بالقوه میتواند شیوه ی ذخیره سازی اطلاعات دیجیتال را دستخوش تغییر کند. شرکت توئیست بیوساین اولیگونوکلوئیدهایی از مولکول DNA با طول رشته 10 میلیون را در اختیار غول ماکرو سافت قرار داده است تا مایکروسافت به وسیله ی آن بتواند ذخیره سازی اطلاعات روی این رشته انجام دهد. هدف از پروژه فناوری مابقل تاریخ ذخیره سازی ایمن اطلاعات مهم به مدت بسیار طولانی است.

توئیست بیوساینس در بسایت خود در این بازه مینویسد با استفاده از روش های ارزان قیمت تعیین توالی DNA و روش های سنتز جدید، و مایکروسافت و توئیست بیوساینس خواهند توانست تئوری ذخیره ی اطلاعات بر روی DNA را عملی کنند. در بیان پروسه ذخیره اطلاعات و بازخوانی پس از وارد کردن کلمات مورد نظر در نرم افزار تهیه شده، یک مولکول DNA معادل آن را طراحی کرده و پس از معادل سازی کلمات، الگوی مولکولی را به دستگاه سازنده DNA منتقل کرده و در این حالت با چند میلیون زنجیره مولکولی مواجه هستیم چون این زنجیره در حالت محلول، پایداری زیادی ندارند، آنها را توسط سانتریفوژهای خلاء دار خشک می کنیم که در شرایط عادی آزمایشگاهی پایداری طولانی مدتی خواهند داشت، پس از ذخیره اطلاعات، مولکول ها را روی پلیت ها و دیسک های خاصی قرار می دهیم که با تعیین توالی زنجیره DNA مجدداً با نرم افزار اولیه اطلاعات را از حالت مولکولی به صفر و یک و بعد به حروف الفبا تبدیل می کنیم که این کار توسط دستگاه بازخوانی DNA انجام می شود.

نتیجه گیری

به کارگیری مؤثر کامپیوترهای DNA در کشف سرطان های ریه و پروستات، در نمونه های آزمایشگاهی انستیتو weizmann و تلاش های Ehud Shapiro سرپرست تیم متخصصان کامپیوتر و بیوشیمی انستیتو، نویدبخش آینده ای روشن برای درمان انواع سرطان و سایر بیماری های ناشناخته گردید. به زودی وسایلی با ابعاد مولکولی و با ترکیبی از مولکول DNA و آنزیم های لازم، برای تشخیص علائم شیمیایی بیماری و سپس پمپاژ دارو به موضع مورد نظر، طراحی خواهد شد.

John reif سازنده کامپیوتر مولکولی شخصی در سال 2000 میلادی در این زمینه می گوید: در آینده ممکن است پزشک به بدن بیمار، تریلیون تعداد کامپیوتر تزریق کند. کامپیوترهای مذکور به نحوی طراحی شده اند که به وسیله تمرکز بر مولکول های معین، به کشف بیماری پرداخته، سپس اقدام به رهاسازی مولکول های دیگری خواهد نمود؛ مولکول هایی که در فعالیت سلول های سرطانی مداخله کرده و آنها را تخریب می کنند. این کامپیوترها به صورت خودکار بوده و نیازی به افزاینده های شیمیایی نخواهند داشت. دانشمندان بر این باورند که پیچیدگی ساختار مولکول های بیولوژیک این اجازه را خواهد داد که کامپیوتر های DNA بدون نیاز به بخش های الکترونیکی اعمال خود را انجام دهند. کاربرد دیگر DNA تخصص در آنالیز ژن و به عبارتی محاسبه ترکیبات DNA، اجرای واکنش های شیمیایی و جست و جو و استخراج نتایج مورد نظر است. کامپیوتر های DNA نوید بخش روز هایی خواهند بود که در آن اثری از بیماری های لاعلاج و کشنده نیست با توجه به حجم پایین ذخیره اطلاعات در کامپیوتر های DNA این کامپیوتر ها می توانند با رشته های ژنتیکی خود در برخورد با داده های جریانی بسیار کار آمد باشند.

منابع و مراجع

- [1] L.M.Adleman, "Molecular computation of solutions to combinatorial problems" Sciences, Vol.266, No.5187, 1021-1024, (1994).
- [2] R.P. Feynman, "Miniaturization", New York, Reinhold, 282-296, (1991).
- [3] Mamta Rani & Sandeep Jain, "DNA Computing and Recent Developments", International Journal of Computer Sciences and Engineering(JCSE), Vol-2, Issue-4, 16-19, (2014).
- [4] Grasha Jacob, "An Encryption Scheme with DNA Technology and JPEG Zigzag Coding for Secure Transmission of Images", arXiv preprint arXiv:1305.1270, (May 2013).
- [5] Junzo Watada, Rohani binti abu Bakar, "DNA Computing and Its Applications", Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 288-294, (2008).
- [6] L.Kari, "From micro-soft to bio-soft: Computing with DNA", Biocomputing and emergent computation: Proceedings of BCEC97. World Scientific 1997, Skovde, Sweden, 146 – 164, (1997).
- [7] J.C.Adams, "On the application of DNA based computing", <http://publish.uwo.ca/~jadams/dnaapps1.html>, Last reviewed 14th January 2008.
- [8] Pierre Baldi & Soren Brunak, "Bioinformatics: The Machine Learning Approach", 2th Edition, The MIT Press, (2011).
- [9] Mitchell, Tom M. "Machine learning. 1997." Burr Ridge, IL: McGraw Hill 45, (1997).
- [10] Zhang Hongyan & Liu Xiyu, "A Data Streams Clustering Algorithm Using DNA Computing Techniques Based on Mobile Agent", Pervasive Computing (JCPC), 623 – 626, (2009)
- [11] Ming-yang YU, "Image Encryption Based on Improved Chaotic Sequences", IEEE Trans. Academy Publisher Journal of Multimedia, Vol.8, No.6, PP. 802-808, 2013.
- [12] J.M. Amigó and L. Kocarev and J. Szczepanski, "Theory and practice of chaotic cryptography", IEEE Trans. Elsevier Physics Letters A, vol. 366, No. 3, PP.211-216, 2007..
- [13] University – Computer and Information Sciences Vol.29, No.4, PP. 499-504, 2017.
- [14] Bonny B Raj, Panchami, "DNA Based Cryptography Using Permutation and Random Key Generation Method" International Journal of Innovative Research Science, Engineering and Technology, Vol.3, No.5, PP. 263-267, 2014.
- [15] Cox, J., C., Cohen, D., S., and Ellington, A., D. The Complexities of DNA Computation. Trends in Biotechnology. 17, 4, 151-154, (1999).
- [16] 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)
- [17] Rambidi, N., G. Biomolecular Computer: Roots and Promises. Biosystems. 44, 1, 1-15. (1997).
- [18] Kazic, T. Elements of a More Comprehensive Theory of Computing. Biosystems. 52, 1-3, 111-1222. (1999).
- [19] 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).
- [20] 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).
- [21] Ito, Y. Fukusaki, E. DNA as a nanomaterial. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic-28, 4-6, 155-166. (2004).
- [22] 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).
- [23] Xian, Xu, Xiaojun, D., Yuxi, F. A model in K for DNA Addition. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 171, 2, Pages 209-222. (2007).
- [24] 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).
- [25] *Pharmacology*, 32, 18, 2801-2808. (1983).
- [26] 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).