

آنالیز کیفیت رمزنگاری تصویرهای پزشکی مبتنی بر الگوریتم راین دال با کلید رمزنگاری یکسان و آشوب گونه

محمد رضا نعیم آبادی^۱، علیرضا مهری دهنوی^{۳،*}، حسین ربانی^{۳،۲}

• پذیرش مقاله: ۹۳/۷/۲۶

• دریافت مقاله: ۹۳/۶/۱۸

مقدمه: با توجه به گسترش استفاده از فن آوری های ارتباطی بی سیم در انتقال داده های حیاتی، حفظ حریم خصوصی و امنیت داده ها از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. در حال حاضر با الگوریتم های متعددی رمزگذاری داده ها انجام می شود. اغلب این الگوریتم ها مبتنی بر رمزنگاری بلوکی می باشند که از یک کلید ثابت از پیش تعیین شده استفاده می کنند که حداقل ۱۲۸ بیت طول دارد.

روش: در این پژوهش، رمزنگاری با الگوریتم راین دال (Rijndael) با کلیدهای ثابت و متغیر صورت گرفته است. در رمزنگاری با کلید متغیر که در این مقاله طراحی شده است از یک بلوک مبتنی بر سیستم آشوب گونه (Mackey Glass) در واحد موتور تولیدکننده کلید به عنوان جایگزین الگوریتم گسترش کلید در قلب راین دال استفاده شده است و توسط یک بلوک کنترل، رفتار آن بررسی و اصلاح می شود.

نتایج: روش های رمزنگاری عنوان شده، توسط ۶ معیار رمزنگاری، بررسی و ارزیابی شد. ارزیابی ها نشان داده است استفاده از کلیدهای متغیر آشوب گونه با ۲/۴۷ درصد افزایش بار محاسباتی، توانایی الگوریتم راین دال را در پنهان کردن الگو و توزیع هیستوگرام در تصویرهای پزشکی به شدت افزایش می دهد. استفاده از کلیدهای متغیر آشوب گونه به طور ذاتی تاثیری بر میزان حساسیت به کلید الگوریتم راین دال نداشته است.

نتیجه گیری: استفاده از سیستم آشوب گونه در واحد گسترش کلید برای تصویرهای پزشکی که در الگوریتم بهبود یافته راین دال عرضه شده است، امنیت داده حیاتی و حفظ حریم شخصی را به خوبی فراهم می کند.

کلید واژه ها: آنالیز کیفیت رمزنگاری، آنالیز قدرت و بهره وری رمزنگاری، رمزنگاری تصویرهای پزشکی، رمزنگاری مبتنی بر سیستم های آشوب گونه.

• **ارجاع:** نعیم آبادی محمد رضا، مهری دهنوی علیرضا، ربانی حسین. آنالیز کیفیت رمزنگاری تصویرهای پزشکی مبتنی بر الگوریتم راین دال با کلید رمزنگاری یکسان و آشوب گونه. مجله انفورماتیک سلامت و زیست پزشکی ۱۳۹۳؛ (۱): ۴۴-۳۲.

۱. کارشناس ارشد مهندسی پزشکی، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

۳. مرکز تحقیقات پردازش تصاویر و سیگنال های پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران

* **نویسنده مسؤول:** اصفهان، هزار جریب، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، دانشکده فناوری های نوین، گروه مهندسی پزشکی.

مقدمه

با گسترش فن‌آوری‌های مخابراتی و ارتباطی، به‌ویژه ارتباطات بی‌سیم، رمزنگاری و مخفی‌سازی اطلاعات، یکی از ضرورت‌های ارتباطی شده است.

در حال حاضر رمزنگاری اطلاعات تنها مختص اطلاعات نظامی و امنیتی نمی‌باشد، بلکه در بسیاری از حوزه‌های دیگر به کار می‌رود. امروزه رمزنگاری داده‌ها و پرونده‌های پزشکی، ویدیوکنفرانس‌های از راه دور، اطلاعات هویتی افراد و یا اطلاعات یک سازمان به‌طور گسترده‌ای صورت می‌گیرد. همچنین حفظ حریم خصوصی افراد به سادگی با رمزنگاری امکان‌پذیر می‌باشد.

بر اساس آمارها، در ایالات متحده، سازمان‌ها به طور متوسط بودجه تخصیص داده شده به حوزه امنیت خود را از ۴۰ درصد بودجه خدمات فن‌آوری اطلاعات در سال ۲۰۰۶ به ۵۵ درصد افزایش داده‌اند [۱،۲].

با ورود فن‌آوری‌های نوین در علم پزشکی و به خدمت گرفتن مهندسی در پزشکی، ارتقاء قابل توجهی در سطح خدمات ارائه شده در چند دهه اخیر صورت گرفته است. همچنین در دهه اخیر، فن‌آوری‌های مخابراتی و ارتباطی در پزشکی به منظور انتقال اطلاعات پزشکی و پیدایش پزشکی از راه دور و مراقبت الکترونیک، به کار گرفته شده است [۳].

پرونده‌های پزشکی بیماران دربردارنده اطلاعات بسیار حساسی می‌باشد که نباید افراد غیرمجاز به آنها دسترسی داشته باشند. قابل دسترس نبودن پرونده‌های پزشکی بیماران علاوه بر حفظ حریم شخصی، مانع تهدید و تهاجم به داده‌های بیمار می‌شود [۴،۵].

تهاجم به داده‌های حیاتی یک بیمار به دو گروه تهاجم از داخل و تهاجم از خارج تقسیم می‌شود. تهاجم از خارج با شنود و یا تغییر در پرونده‌های پزشکی به وسیله حمله‌های تحت شبکه‌های کامپیوتری مانند استراق سمع (Eavesdropping)، تزریق بسته (Packet Injection) و یا حمله شخص در وسط (Men in middle Attack)، صورت می‌گیرد [۶]. تهاجم از داخل می‌تواند توسط کلینیسین، بیمار و یا هر فردی که در محل ارائه خدمات مراقبتی حضور دارد، انجام شود. تهاجم از داخل به منظور مخفی کردن خطاهای پزشکی (malpractice) و یا کلاهبرداری از بیمه‌های درمانی صورت می‌گیرد [۷].

معمول‌ترین راه برای امنیت و حفظ حریم خصوصی، رمزگذاری پرونده‌های پزشکی می‌باشد. گرچه تا کنون روشی

اختصاصی برای رمزگذاری داده‌های حیاتی پیشنهاد نشده است [۸،۹]. ولی روش‌های متعددی برای رمزگذاری داده‌ها، مستقل از اطلاعاتی که در بردارند، ارائه شده است. Data Blowfish، IDEA، Encryption Standard (DES)، (International Data Encryption Algorithm)، RC5، RC6، Triple DES، راین‌دال (Rijndael)، Twofish، Serpent از جمله رایج‌ترین روش‌های رمزگذاری با کلید متقارن (Symmetric Key) می‌باشند [۱۰،۱۱] که سه مورد اخیر یعنی Rijndael، Serpent و Twofish موفق‌ترین آنها محسوب می‌شوند. در تمامی این روش‌ها از یک کلید باینری که عموماً ۱۲۸ تا ۲۵۶ بیتی است، استفاده می‌شود [۱۲].

سیستم‌های رمزنگار به دو دسته رمزنگار رشته‌ای (Stream Cipher) و رمزنگار بلوکی (Block Cipher) تقسیم می‌شوند. رمزنگارهای رشته‌ای سعی می‌کنند با ترکیب داده‌های ورودی با یک رشته اعداد شبه تصادفی، رمزگذاری داده‌ها را انجام دهند. الگوریتم رمزنگاری RC4 نمونه‌ای از رمزنگاری رشته‌ای می‌باشد. در رمزنگاری بلوکی، رمزنگاری داده‌ای دارای طول مشخص که بلوک نامیده می‌شوند بر اساس مجموعه‌ای از تبدیل‌های غیر خطی صورت می‌گیرد و داده‌ها در حین رمزگذاری به صورت بلوک به بلوک رمز می‌شوند. الگوریتم‌های رمزنگاری (Advanced Encryption Standard) AES، DES و Standard، متداول‌ترین رمزنگارهای بلوکی هستند.

در رمزنگاری رشته‌ای هر چه رشته رمزکننده، تصادفی‌تر باشد سیستم رمزنگار قدرتمندتر می‌باشد و در رمزنگاری بلوکی هر چه عملیات رمزنگاری، غیرخطی و پیچیده‌تر باشد، الگوریتم رمزنگار قدرتمندتر می‌باشد. بنابراین رمزنگارهای رشته‌ای سریع‌تر و رمزنگارهای بلوکی قدرتمندتر هستند [۱۳،۱۴].

در این پژوهش از رمزنگاری بلوکی به روش راین‌دال با کلیدهای رمزگذاری ثابت (که در حال حاضر از این شیوه استفاده می‌شود) و رمزگذاری متغیر آشوب‌گونه، استفاده و ارزیابی شده است.

روش

در این پژوهش برای رمزنگاری تصویرهای شبکه چشم از سه الگوریتم رمزنگاری Rijndael، Serpent و Twofish استفاده شده است. تمامی الگوریتم‌های مطرح شده، در دسته

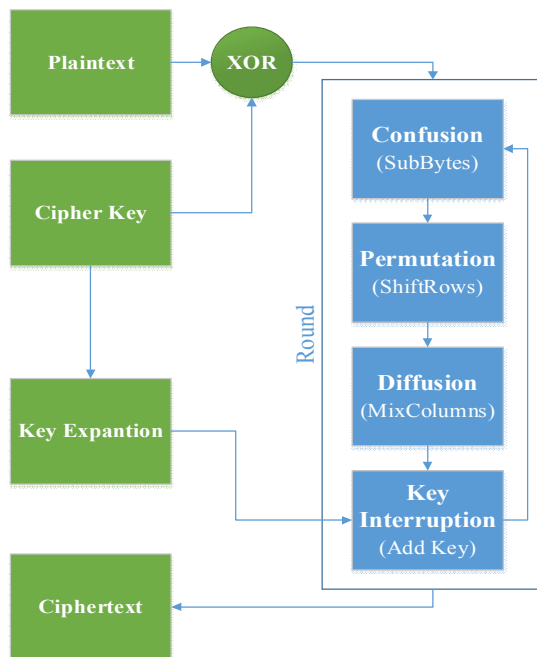
سری Mackey Glass توسط رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(ax(t-\tau))}{(1+x^n(t-\tau))} - bx(t)$$

رابطه (۱)

در رابطه ۱، a ، b و n مقادیر ثابت هستند و τ تأخیر می‌باشد رفتار آشوبناک این معادله به ازای $17^\tau >$ ایجاد می‌شود. این معادله دارای شرایط اولیه می‌باشد و همان طور که عنوان شد حساسیت شدیدی نسبت به شرایط اولیه دارد [۲۰].

در این مقاله برای a ، b ، τ و n به ترتیب مقادیر ثابت ۰/۲، ۰/۱، ۲۰ و ۱۰ و تنها شرط اولیه در این روش، متغیر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲، دو سری زمانی با اختلاف بسیار اندک در شرایط اولیه (۱۲ میلیون برابر کوچک‌تر از شرایط اولیه) به همراه اختلاف آنها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اختلاف بسیار اندک در شرایط اولیه، تفاوت قابل توجهی در نتیجه نهایی ایجاد می‌کند.



شکل ۱: الگوریتم رمزنگاری Rijndael

رمزنگارهای بلوکی متقارن قرار می‌گیرند که در ادامه هر یک مختصراً معرفی شده‌اند.

رمزگذاری به روش راین‌دال

الگوریتم رمزنگاری راین‌دال توسط دو رمزنگار بلژیکی به نام‌های Joan Daemen و Vincent Rijmen با هدف شرکت در رقابت برای انتخاب استاندارد الگوریتم پیشرفته، معرفی شد که پس از سه مرحله رقابت و تکامل، این الگوریتم انتخاب شد. طراحان الگوریتم رمزنگاری راین‌دال در آن زمان که در تعریف ساختار الگوریتم زمانی اغلب توجه‌ها به ساختار فیستل معطوف بود، با سنت‌شکنی و بنا کردن ساختار الگوریتم بر اساس شبکه جانشینی-جایگشت، خطر بزرگی کردند. این الگوریتم با توجه به شرایط تعیین شده از سوی NIST از بلوک‌های ورودی ۱۲۸ بیتی و کلیدهای ۱۲۸، ۱۹۲ و ۲۵۶ بیتی بهره می‌گیرد. همچنین تعداد دورها متناسب با طول کلیدها تغییر می‌کند و به ترتیب برای طول‌های ذکر شده ۱۰، ۱۲ و ۱۴ دور برای راین‌دال تعریف شده است. اساس کار این الگوریتم مبتنی بر عملیات مدولار و در میدان گالو GF(28) می‌باشد و پایه محاسبات در راین‌دال بر اساس محاسباتی بایتی (۸ بیتی) تعریف شده است.

الگوریتم رمزنگاری راین‌دال از سه بخش مجزا شامل دور ابتدایی، دورهای اصلی و دور نهایی تشکیل شده است. در دور ابتدایی تنها کلید دور با بلوک ورودی، XOR می‌شود و به نوعی، عمل سفیدسازی ورودی در این دور صورت می‌گیرد و به همین جهت این دور در شمارش تعداد دورها محسوب نمی‌شود. در شکل ۱ این سه بخش به صورت بلوک دیاگرامی نشان داده شده است [۱۷-۱۵].

سیستم آشوب‌گونه Mackey Glass

سیستم آشوب‌گونه‌ای که در این پژوهش برای تولید کلید متغیر استفاده شده است، سیستم آشوب‌گونه Mackey Glass می‌باشد. این سیستم آشوب‌گونه شامل یک سری آشوب‌گونه می‌باشد. لازم به ذکر است که این سیستم‌های آشوب‌گونه دارای خواص زیر می‌باشند:

- غیر خطی

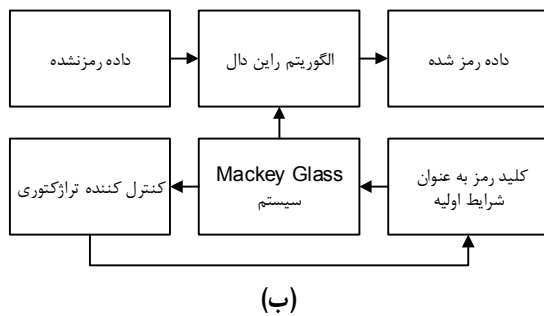
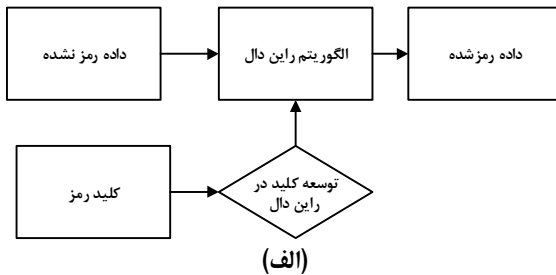
- حساسیت شدید به شرایط اولیه

- عدم تکرار مسیر حرکت (trajectory) در طول زمان

- به حالت آشوب رفتن توسط تعداد بیشماری انشعاب

- رفتار بعدیت کسری (Fractal dimension) [۱۸، ۱۹].

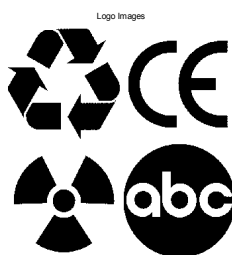
اگر سیگنال رمزگذاری شده توسط کلید ثابت، دارای خاصیت تناوبی با دوره تناوب بزرگتر از بلوک رمزگذاری باشد، سیگنال رمز شده در بازه‌هایی رفتار تناوبی از خود نشان خواهد داد. این رفتار هنگامی که داده‌ها در فریم با سرآیند (Header) و پی‌آیند (Trailer) معین قرار می‌گیرند، تشدید می‌شود. فرد اخلال‌گر می‌تواند حتی بدون در اختیار داشتن اطلاعاتی در مورد سیگنال اصلی، داده‌های رمز شده نامعتبر را ایجاد کند [۲۱].



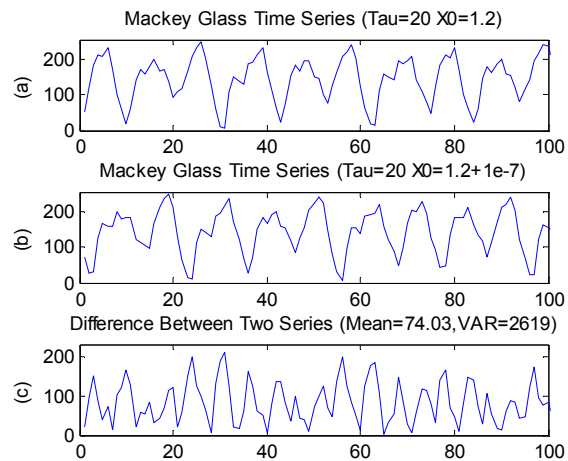
شکل ۴:

(الف) بلوک دیاگرام رمزنگاری با کلید ثابت
(ب) بلوک دیاگرام رمزنگاری با کلید متغیر آشوب‌گونه داده استفاده شده

برای ارزیابی الگوریتم از پنج دسته داده استفاده شد. دسته اول داده‌ها شامل چهار تصویر لوگو می‌باشد که در شکل ۵ نشان داده شده است. از این تصاویر بیشتر برای تشخیص و ارزیابی توانایی الگو در پنهان کردن الگوی تصویر اصلی پس از رمزگذاری و پراکنده کردن هیستوگرام، استفاده شده است. تمامی تصویرهای استفاده شده، دارای دو رنگ (تنها دو سطح رنگی سیاه و سفید) و جزئیات اندک با لبه‌های تیز می‌باشند.



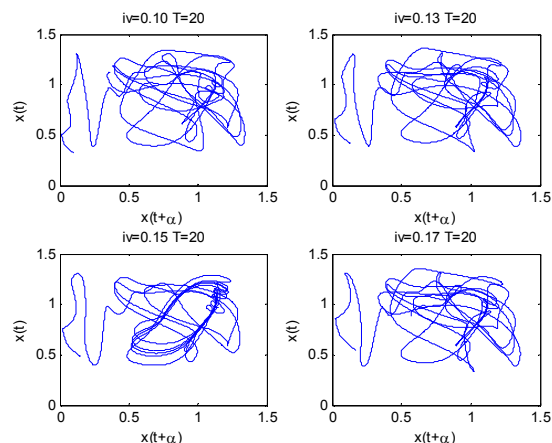
شکل ۵: تصویرهای لوگوی استفاده شده برای ارزیابی



شکل ۲:

(a) سری Macky Glass با شرط اولیه $X_0=1.2$
(b) سری Macky Glass با شرط اولیه $X_0=1.2+10^{-7}$
(c) اختلاف میان دو سری Macky Glass

شکل ۳ نیز نمودار فضای فاز مسیر چند نمونه سری را با اختلاف اندک در شرایط اولیه نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود با تغییر اندک، مسیرها به طور کلی عوض می‌شوند.

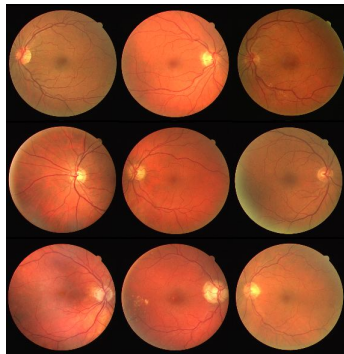


شکل ۳: سطح مقطع پوانکاره چهار مجموعه تولید شده توسط Mackey Glass به ازای تغییر اندک در شرایط اولیه

پیاده‌سازی رمزنگاری راین دال با کلیدهای متفاوت

در این پژوهش، رمزنگاری به روش راین دال توسط دو دسته کلید ثابت و کلید آشوبی صورت گرفت. در شکل ۴، بلوک دیاگرام روش‌های استفاده شده، نشان داده شده است. در الگوریتم رمزنگاری مبتنی بر سیستم آشوبی، کلید رمز، شرایط اولیه را برای سیستم تعریف می‌کند و یک کنترلر تراژکتوری بررسی می‌کند که کلید آشوبی تولید شده بعد فرکتال خود را حفظ کند و در صورت خروج از این معیار، شرط اولیه توسط آخرین عدد تولیدی، بازنشانی می‌شود.

آخرین دسته داده‌ها شامل ۹ تصویر شبکیه چشم است که خود بخشی از بانک داده Drive می‌باشند (شکل ۸). علاوه بر اولویت کلینیکی این تصاویرها، طیف رنگی، آنها را از سایر تصاویرهای قبلی متمایز نموده است [۲۷].



شکل ۸: تصاویرهای شبکیه چشم

نتایج

تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت و کارایی الگوریتم‌های رمزنگاری معرفی شده است [۲۸-۳۱]. در این مقاله رمزنگاری‌های معرفی شده، توسط معیارهای کیفیت رمزنگاری (Encryption Quality)، همبستگی متقابل (Cross Correlation)، توزیع هیستوگرام (Histogram Spreading)، پنهان کردن الگو (Pattern Hiding)، حساسیت به کلید (Key Sensitivity) و سرعت (Throughput) و مدت زمان صرف شده، ارزیابی شده است.

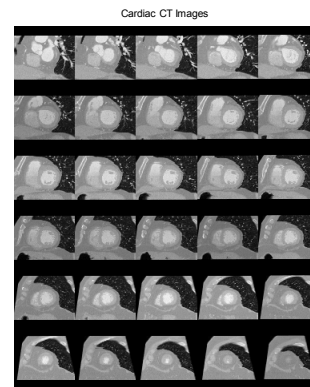
کیفیت رمزگذاری و یا فاکتور حداکثر انحراف (Maximum Deviation Factor) کیفیت رمزگذاری، متوسط اختلاف هیستوگرام داده اصلی و داده رمز شده را نشان می‌دهد. کیفیت رمزنگاری بر اساس رابطه ۲ محاسبه شده است [۳۲].

$$EQ = \frac{\sum_{L=0}^{256} |Hist(P) - Hist(C)|}{256}$$

رابطه (۲)

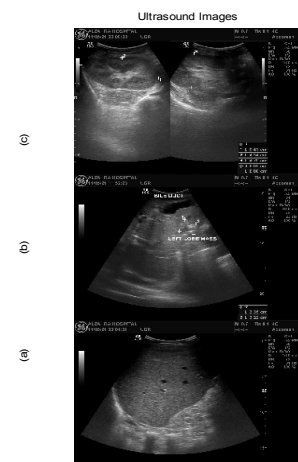
در رابطه ۲، $Hist(P)$ و $Hist(C)$ به ترتیب هیستوگرام‌های داده‌های اصلی و رمز شده می‌باشند. این پارامتر میزان تغییر ایجاد شده در هیستوگرام داده رمز شده نسبت به داده‌های اصلی را اندازه‌گیری می‌کند و هر چه این مقدار بیشتر باشد، رمزگذاری،

دسته دوم داده‌ها ۳۰ تصویر CT اسکن قلبی است که توسط دستگاه CT اسکن زیمنس مدل SOMATOM Sensation 64 Slices در بیمارستان فوق تخصصی میلاد اصفهان تهیه شده است [۲۲، ۲۳]. در شکل ۶، تصاویرهای CT اسکن قلبی استفاده شده، نشان داده شده است. هر یک از این تصاویرها، یک برش که دارای جزئیات زیاد، همراه با لبه‌های تیز می‌باشد را نشان می‌دهد.

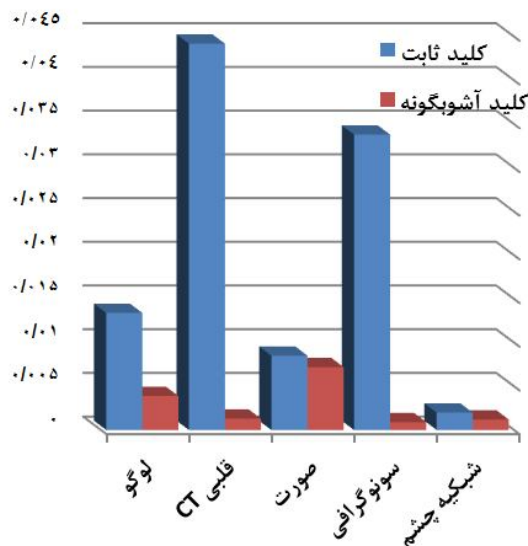


شکل ۶: ۳۰ تصویر Cardiac CT استفاده شده برای ارزیابی دسته سوم داده‌ها ۴۰ تصویر صورت از مجموعه تصاویرهای صورت ORL می‌باشد. این تصاویرها همگی در ابعاد ۹۶×۱۱۲ پیکسل و سیاه و سفید با رزولوشن ۸ بیتی [۲۴] و همگی دارای جزئیات متوسط و لبه‌های نرم می‌باشند که فرض شده، بخشی از مشخصات بیمار در پرونده الکترونیک وی باشد.

چهارمین دسته از تصاویرها، شامل سه تصویر می‌باشد که توسط دستگاه اولتراسوند GE LOGIQ S6 در بیمارستان الزهراء اصفهان گرفته شده و در شکل ۷ نشان داده شده است [۲۵، ۲۶]. این تصاویرهای سونوگرافی همگی با فرمت DICOM و بدون فشرده‌سازی، به صورت سیاه و سفید ذخیره شده و بیشترین جزئیات و تیزترین لبه‌ها را در تصاویرهای مورد ارزیابی دارند.



شکل ۷: تصاویرهای اولتراسوند استفاده شده

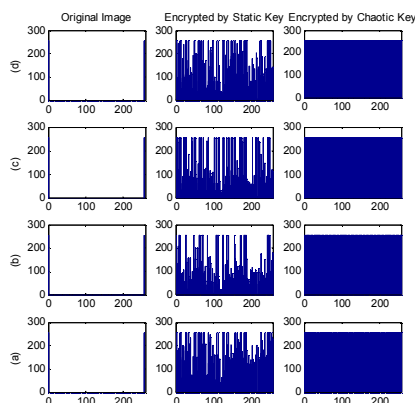


نمودار ۱: هیستوگرام همبستگی متقابل داده‌ها

کیفیت رمزنگاری در الگوریتمی بالاتر می‌باشد که در آن هیستوگرام داده رمز شده نسبت به داده اصلی به کلی تغییر پیدا کند و سیستم رمزنگار بتواند هیستوگرام را بر تمامی اعداد به صورت یکسان پخش کند. با مشاهده هیستوگرام تصویر اصلی و هیستوگرام تصویر رمز شده می‌توان کیفیت رمزنگاری را ارزیابی کرد.

همان طور که انتظار می‌رفت با توجه به این نکته که هیستوگرام مجموعه داده اول کاملاً مجزا بود، بهره‌گیری از کلید متغیر تنها در این دسته موثر واقع شده است.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که رمزنگاری با کلید ثابت در توزیع هیستوگرام تصویرهای با جزئیات اندک، ناموفق بوده است ولی در روش‌های کلید آشوب‌گونه، هیستوگرام تصویر رمزگذاری شده، به خوبی توزیع شده است.



شکل ۹: هیستوگرام‌های تصویرهای لوگو قبل و بعد از رمزنگاری با کلیدهای متفاوت (ستون‌ها به ترتیب از سمت چپ، تصویر رمز نشده، رمز شده با کلید ثابت و رمز شده با کلید آشوب‌گونه)

قدرت بیشتری دارد. جدول ۱ کیفیت رمزگذاری داده‌های ارزیابی شده را نشان می‌دهد. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود برای تصویرهایی که دارای جزئیات زیادی می‌باشند، اختلاف این پارامتر اندک است (برای تصویرهای اولتراسوند و Cardiac CT که دارای جزئیات زیادی هستند، با هم برابر هستند) ولی با کاهش جزئیات، اختلاف دو روش به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد.

جدول ۱: مقادیر کیفیت رمزنگاری به ازای کلید ثابت و متغیر

داده‌ها	کلید ثابت	کلید آشوب‌گونه	درصد بهبود
سونوگرافی	۶۱/۸۱	۶۱/۸۱	۰
صورت	۳۰/۵۰	۳۰/۵۲	۰/۰۷
CT قلبی	۸۰/۶۹	۸۰/۶۹	۰
شبکیه	۱۴۳/۵۲	۱۴۳/۵۲	۰
لوگو	۱۰۵/۲۳	۲۵۳/۰۱	۱۴۰/۴۴

فاکتور ضریب همبستگی متقابل

فاکتور ضریب همبستگی متقابل در واقع همبستگی متقابل بین داده‌های رمز نشده و رمز شده می‌باشد. هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد همبستگی سیگنال‌ها بیشتر خواهد بود و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد داده‌ها همبستگی کمتری دارند. همبستگی کمتر نشان‌دهنده بالاتر بودن کیفیت رمزنگاری می‌باشد. همبستگی متقابل بین دو سیگنال توسط رابطه‌های ۳ محاسبه شده است [۳۳].

$$R_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x) \times D(y)}}$$

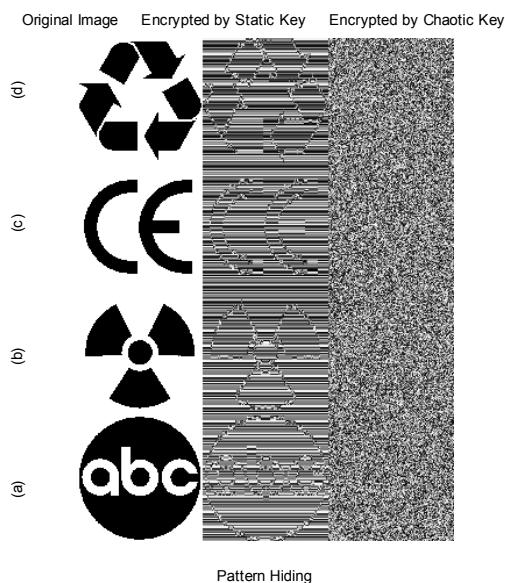
$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x)) \times (y_i - E(y))$$

$$D(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))^2$$

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

رابطه‌های (۳)

همبستگی بین داده‌های اصلی و رمز شده برای هر یک از الگوریتم‌های رمزنگاری در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود برای تصویرهایی که دارای لبه تیز می‌باشند، رمزنگاری با استفاده از کلید آشوب‌گونه نسبت به رمزنگاری با کلید ثابت به مقدار قابل توجهی همبستگی میان دو تصویر را کاهش داده است ولی این برتری برای تصویرهایی که لبه‌های نرم‌تری دارند (مانند تصویرهای صورت) بسیار کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱: تصویرهای لوگوها قبل و پس از رمزنگاری با کلیدهای متفاوت (ستون‌ها به ترتیب از سمت چپ، تصویر رمز نشده، رمز شده با کلید ثابت و رمز شده با کلید آشوب گونه)

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود رمزگذاری با استفاده از کلید ثابت در حذف الگوی تصویر، به کلی ناموفق بوده است و الگوی تصویر پس از رمزگذاری شدن، به سادگی قابل تشخیص می‌باشد، در صورتی که در رمزنگاری با کلید آشوب گونه، الگوی تصویر به طور کامل پنهان می‌شود.

زمان صرف شده و نرخ خروجی

سرعت رمزگذاری و مدت زمان صرف شده برای رمزگذاری یکی از مهم‌ترین شاخص‌های روش‌های رمزنگاری می‌باشد. مدت زمان صرف شده وابسته به محاسبات و عملیاتی است که در حین رمزنگاری صورت می‌گیرد.

آن دسته از روش‌های رمزنگاری دارای قدرت بیشتری هستند که با استفاده از محاسبات کمتر، امنیت بالایی را ارائه دهند. رمزنگاری‌هایی که امنیت آنها ناشی از پیچیدگی و محاسبات بسیار سنگین باشد، رمزنگاری مناسبی نمی‌باشند [۳۲].

باتوجه به اینکه در هر دو روش از یک الگوریتم رمزگذاری استفاده شده، با این تفاوت که در روش دوم از یک سری آشوب گونه برای تولید کلید استفاده شده است، عملیات تولید کلید متغیر مقداری به بار محاسباتی رمزنگاری می‌افزاید، بنابراین هنگامی که از کلید متغیر در رمزنگاری استفاده می‌شود انتظار می‌رود محاسبات بیشتر و به دنبال آن مدت زمان بیشتری نسبت به حالتی که رمزنگاری توسط کلید ثابت انجام می‌گیرد، صرف شود. رمزنگاری توسط یک کامپیوتر Desktop با پردازنده

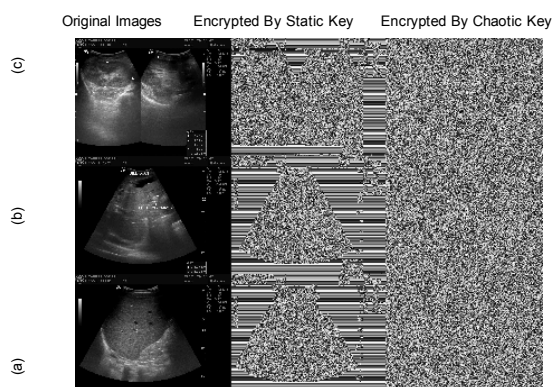
پنهان کردن الگو

الگو عموماً برای تصویرها تعریف می‌شود و پنهان شدن الگوی تصویر پس از رمزنگاری، نشان دهنده قدرتمندی الگوریتم رمزنگاری می‌باشد.

پنهان کردن الگو مانند هیستوگرام با مشاهده قابل ارزیابی است. این امر در تصویرها، به ویژه آنهایی که سطوح رنگی کمی را پوشش می‌دهند (الگوی واضح‌تری دارند)، ساده‌تر قابل مشاهده می‌باشد.

ارزیابی پنهان کردن الگو برای پنج گروه تصویرهای معرفی شده نشان داده است که استفاده از کلید ثابت در رمزنگاری راین دال باعث می‌شود که این الگوریتم در پنهان کردن الگوهای بارز، عملکرد ضعیفی داشته باشد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برجسته‌ترین اختلاف عملکردی را در این مورد نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰ تصویرهای رمزنگاری شده با کلید ثابت و کلید آشوب گونه برای تصویرهایی که دارای جزئیات زیاد هستند (اولتراسوند)، نشان داده شده است. با کمی دقت می‌توان به ضعف الگوریتم راین دال در پنهان کردن اطلاعات در این گروه پی برد.



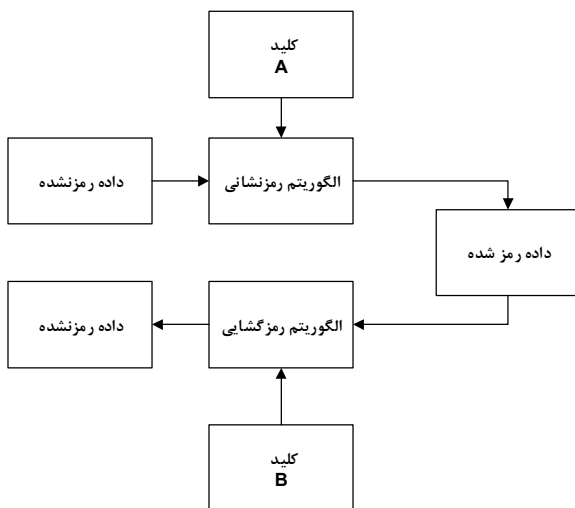
شکل ۱۰: تصویرهای اولتراسوند قبل و پس از رمزنگاری با کلیدهای متفاوت (ستون‌ها به ترتیب از سمت چپ، تصویر رمز نشده، رمز شده با کلید ثابت و رمز شده با کلید آشوب گونه)

در شکل ۱۱ توانایی پنهان کردن الگو در تصویرهای الگوی سیاه و سفید (لوگوها) نشان داده شده است. با توجه به اینکه الگوهای مورد استفاده دارای ناحیه‌هایی به رنگ سیاه و سفید و همچنین دارای لبه‌های تیز در تصویر می‌باشند، تشخیص الگو در آنها ساده‌تر صورت می‌گیرد.

الگوریتم راین دال از یک کلید ۱۲۸ بیتی برای رمزنگاری بهره می‌گیرد.

حساسیت به کلید یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم‌های رمزنگاری است. در یک رمزنگاری قوی، با تغییر اندک در کلید، رمزگشایی آن غیر ممکن می‌شود. در صورتی که رمزگشایی با کلیدی که اختلاف بسیار اندکی با کلید رمزگذاری داشته باشد صورت گیرد، تفاوت با داده اصلی بسیار زیاد خواهد شد.

به منظور ارزیابی حساسیت به کلید در الگوریتم‌های رمزنگاری، ابتدا یک مجموعه داده توسط کلید A (KEY1) رمزگذاری شده است و سپس توسط کلید B (KEY2) که تنها یک بیت با کلید قبلی تفاوت دارد رمزگشایی می‌شود. از نقطه نظر ایده‌آل تفاوت بین داده اصلی و داده رمزگشایی شده با کلید اشتباه باید حداکثر باشد. شکل ۱۲ بلوک دیاگرام روش استفاده شده برای ارزیابی حساسیت به کلید را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: بلوک دیاگرام ارزیابی حساسیت به کلید

برای اندازه‌گیری اختلاف دو تصویر از معیارهای میانگین مربع خطا (Mean Square Error: MSE)، میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error=MAE) و نسبت پیک سیگنال به نویز (Peak Signal to Noise Ratio=PSNR) استفاده شده است. الگوریتمی قدرتمندتر است که با تغییر اندک در کلید، اختلاف و یا خطای زیادی را ایجاد کند. بنابراین مطلوب است که مقادیر میانگین مربع خطا و میانگین خطای مطلق برای ارزیابی حساسیت کلید، حداکثر و نسبت پیک سیگنال به نویز، حداقل مقدار ممکن باشد.

۷-۴-۱- کلید ثابت

در این بخش در تمامی رمزگذاری‌ها به روش راین دال با کلید، از کلیدهای ۱۲۸ بیتی زیر استفاده شده است که تنها در

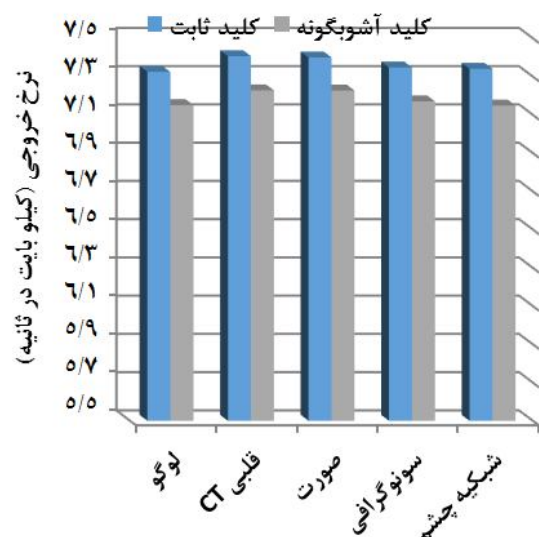
Q6600 Intel و حافظه در دسترس 4GB، در سیستم عامل Windows 7 64bit و تحت نرم‌افزار Matlab2011a و 64bit صورت گرفته است.

همان طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود استفاده از کلید متغیر به‌طور متوسط ۲/۴۷ درصد، مدت زمان رمزنگاری را افزایش می‌دهد. سرعت رمزگذاری یا نرخ خروجی با مدت زمان صرف شده رابطه عکس دارد.

جدول ۲: درصد زمان صرف شده افزوده در روش کلید متغیر نسبت به کلید ثابت

داده‌ها	درصد
شبکیه	۲/۶۲
سونوگرافی	۲/۴۶
صورت	۲/۳۹
سی تی اسکن قلبی	۲/۴۶
لوگو	۲/۴۳

در نمودار ۲ سرعت خروجی برحسب کیلوبیت در ثانیه برای روش‌های مختلف رمزنگاری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نرخ رمزنگاری در حالت‌های رمزنگاری با کلید متغیر اندکی از حالت کلید ثابت کمتر می‌باشد.



نمودار ۲: هیستوگرام سرعت رمزگذاری برای روش‌های مختلف رمزگذاری

حساسیت به کلید

قدرت کلید در رمزگذاری دارای اهمیت زیاد و متناسب با طول کلید می‌باشد. همان طور که پیش از این عنوان شد

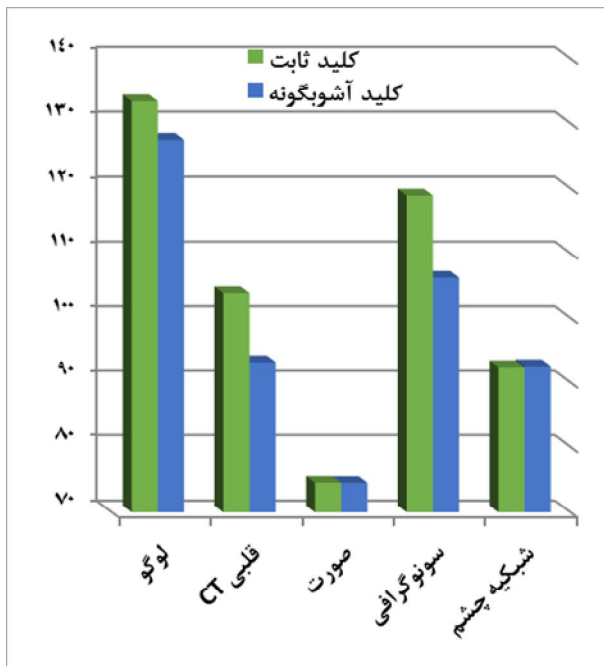
جدول ۳: مقایسه حساسیت به کلید در روش های مختلف رمزنگاری بر اساس معیار میانگین مربع خطا

داده ها	کلید ثابت	کلید آشوب گونه	درصد تغییر
لوگو	۲۳۲۰۰	۲۱۷۳۵	-۶/۷
سی تی اسکن قلبی	۱۵۷۴۶	۱۲۸۹۱	-۲۲/۲
صورت	۸۱۷۴	۸۱۶۱	-۰/۱۵
سونوگرافی	۱۹۷۳۴	۱۶۲۶۴	-۲۱/۳
شبکیه	۱۲۶۹۸	۱۲۷۳۶	۰/۳

میانگین خطای مطلق نیز مشابه میانگین مربع خطا می باشد، با این تفاوت که در میانگین مربع خطا، خطای کوچک، کوچک نمایی و خطاهای بزرگ، بزرگ نمایی می شود، در صورتی که در معیار میانگین خطای مطلق، خطاها بدون بزرگ-نمایی و یا کوچک نمایی نشان داده می شود. میانگین مطلق خطای ناشی از رمزگشایی با کلید نادرست اضافه شده پس از رمزگذاری در داده رمزگشایی، بر اساس رابطه ۵ محاسبه شده است که در نمودار ۳ آمده است.

$$MAE = \frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |P(i, j) - P'(i, j)|$$

رابطه (۵)



نمودار ۳: میانگین خطای مطلق میان دو تصویر رمز نشده و رمزگشایی شده توسط کلید نادرست توسط الگوریتم های رمزنگاری راین دال با کلید ثابت و متغیر آشوب گونه

کم ارزش ترین بیت اختلاف دارند. از کلید اول برای رمزگذاری و از کلید دوم برای رمزگشایی استفاده شده است.

KEY₁=2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C

KEY₂=2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3B

۴-۷-۲- کلید متغیر Mackey Glass

همان طور که عنوان شد از سیستم آشوب گونه Mackey Glass برای تولید کلید آشوب گونه استفاده شده است. در رابطه ۱، مقادیر متغیرهای a, b, n و τ مقادیر ثابت و به ترتیب برابر $0.2, 0.1, 10$ و 20 است و شرط اولیه توسط یک متغیر 32 بیتی اعشاری (float) تعیین می شود. شرط اولیه را نیز می توان توسط یک متغیر 64 بیتی (double) با دقت بالاتری در نظر گرفت. طول کلید در این روش می تواند بین 32 تا 208 بیت باشد که در این پژوهش از حداقل طول کلید و همچنین از شرط 32 بیتی یعنی حداقل قدرت سیستم تولید کننده کلید استفاده شده است.

در تمامی ارزیابی هایی که با کلید متغیر Mackey Glass صورت گرفته از کلیدهای 32 بیتی زیر به عنوان شرایط اولیه سری Mackey-Glass استفاده شده است. اختلاف این دو کلید نیز در کم ارزش ترین بیت می باشد و از کلید اول برای رمزگذاری و از کلید دوم برای رمزگشایی استفاده شده است [۳۴].

(3F99999A)_{Hex}=(1.2000000)_{Dec} KEY₁=

(3F99999B)_{Hex}=(1.2000002)_{Dec} KEY₂=

۴-۳-۴- نتایج خطای ایجاد شده ناشی از کلید اشتباه

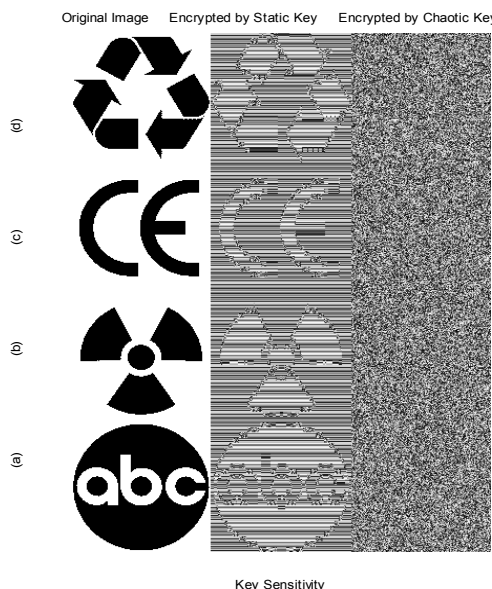
معیار میانگین مربع خطاها توسط رابطه ۴ محاسبه شده است که در آن $P(i, j)$ تصویر اصلی و $P'(i, j)$ تصویر رمزگشایی شده با کلید نادرست می باشد. M و N طول ابعاد تصویر را تعیین می کند.

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N [P(i, j) - P'(i, j)]^2$$

رابطه (۴)

جدول ۳، میانگین مربع خطا محاسبه شده بین دو داده اصلی و رمزگشایی شده با کلید نادرست را نشان می دهد.

رمزنگاری راین دال با کلید ثابت، الگوی تصویر حفظ می شود که این مسئله نقطه ضعفی برای راین دال محسوب می شود.



شکل ۱۳: نمایش حساسیت به کلید با رمزگشایی با کلید نادرست

به طور کلی می توان نتیجه گیری کرد که اگر داده اصلی دارای الگوی مشخص و واضحی باشد، استفاده از کلیدهای متغیر، حساسیت به کلید را افزایش می دهد. در غیر این صورت تاثیر چندانی بر حساسیت به کلید ندارد.

بحث و نتیجه گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی و بررسی استفاده از کلید متغیر آشوب گونه در رمزنگاری تصاویر، با الگوریتم رمزنگاری راین دال صورت گرفت.

پنج دسته تصویر که دارای خصوصیات و ویژگی های متفاوت بودند، برای ارزیابی انتخاب شدند. بخشی از تصاویر دارای جزئیات زیاد و لبه های تیز (تصاویرهای اولتراسوند و CT اسکن قلبی) می باشند؛ بخشی دیگر جزئیات متوسط و لبه های نرم دارند (تصاویرهای صورت و شبکیه چشم) و بخشی دارای جزئیات اندک و لبه تیز (لوگوه) می باشند.

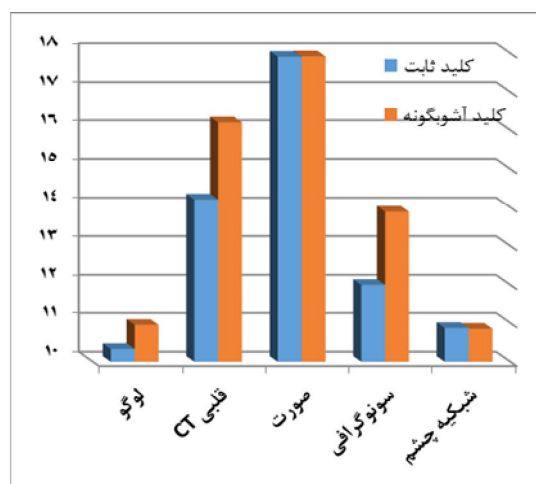
از شش معیار برای ارزیابی کارایی و کیفیت رمزنگاری استفاده شده است. از معیار کیفیت رمزنگاری و یا فاکتور حداکثر انحراف که معرف میزان انحراف از میانگین هیستوگرام های دو تصویر اصلی و رمز شده می باشد و فاکتور همبستگی متقابل دو تصویر، به عنوان معیارهایی با اهمیت بیشتر، استفاده شده است. از توزیع هیستوگرام و پنهان کردن الگو عمدتاً برای ارزیابی

نسبت پیک سیگنال به نویز، معیاری است که نسبت حداکثر توان ممکن سیگنال به توان نویز تخریبی را نشان می دهد. باتوجه به اینکه توان سیگنال می تواند شامل محدوده گسترده ای باشد، معمولاً در مقیاس لگاریتمی دسیبل محاسبه می شود.

نسبت پیک سیگنال به نویز عموماً به عنوان معیاری از کیفیت بازسازی تصاویر از کدکندهای فشرده سازی با اتلاف استفاده می شود [۵،۳۵].

بر اساس رابطه ۶، نسبت پیک سیگنال به نویز میان دو تصویر رمز نشده و رمزگشایی شده با کلید نادرست برای روش های رمزگذاری راین دال، با کلید ثابت و متغیر، محاسبه و در نمودار ۴ نشان داده شده است

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{\max(P)}{MSE} \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$



نمودار ۴: نسبت پیک سیگنال به نویز میان دو تصویر رمز نشده و رمزگشایی شده توسط کلید نادرست توسط الگوریتم های رمزنگاری راین دال با کلید ثابت و متغیر آشوب گونه

نتایج به دست آمده نشان می دهد که حساسیت به کلید نیز وابسته به هسته الگوریتم است و مستقل از متغیر یا ثابت بودن کلید می باشد. تفاوت خطای به دست آمده در هر دو حالت اندک است.

در شکل ۱۳، تصویر الگوهای سیاه و سفید توسط الگوریتم های راین دال با کلیدهای ثابت و متغیر، رمزگذاری شده است و در مرحله رمزگشایی از کلید دوم (کلید نادرست) استفاده شده است. این شکل نشان می دهد اگر در رمزگشایی با استفاده از کلید متغیر آشوب گونه از کلید نادرست حتی با اختلاف بسیار اندک استفاده شود، الگوی تصویر به کلی پنهان می شود ولی در

نتایج ارزیابی حساسیت به کلید، نشان‌دهنده بی تأثیر بودن به‌کارگیری کلیدهای متغیر آشوب‌گونه می‌باشد و استفاده از کلید آشوب‌گونه هیچ تأثیری در حساسیت به کلید الگوریتم ندارد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از رمزنگاری با کلید متغیر آشوب‌گونه، پنهان کردن الگو و کیفیت رمزنگاری (به‌ویژه برای تصاویرهای دارای جزئیات اندک یا با الگوی تصویر بارز) بالاتری را با حدود ۲ درصد افزایش بار محاسباتی تضمین می‌کند. بنابراین استفاده از کلیدهای آشوب‌گونه در رمزنگاری راین‌دال تصویرها، امنیت اطلاعات را افزایش می‌دهد.

تصویرهای با الگوی باز و از نرخ خروجی و حساسیت به کلید نیز به عنوان معیار جانبی، استفاده شده است. ارزیابی‌ها نشان داده است که استفاده از کلید متغیر آشوب‌گونه، کیفیت رمزنگاری و همبستگی متقابل دو تصویر رمز شده و اصلی را به شدت کاهش می‌دهد. برای تصویرهایی که دارای جزئیات اندک می‌باشند کیفیت رمزنگاری، توزیع هیستوگرام و پنهان کردن الگو بسیار قوی‌تر صورت می‌گیرد.

References

1. Richardson R. CSI Survey 2007. The 12th Annual computer crime and security survey. Computer security institute; 2007.
2. Richardson R. CSI computer crime and security survey. Computer Security Institute; 2008. P.1-30.
3. Machkour M, Khamlichi YI, Afdel K. Data security in medical information system. Multimedia computing and systems, 2009. ICMCS '09. International Conference on; 2009 Apr 2-4; Ouarzazate: IEEE; 2009. P. 391- 4.
4. Kovacevic S, Kovac M, Knezovic J. System for secure data exchange in telemedicine. 9th International Conference on Telecommunications; 2007 Jun 13-15; Zagreb: IEEE; 2007. P. 267-74.
5. Bouslimi D, Coatrieux G, Roux C. A joint encryption/watermarking algorithm for verifying the reliability of medical images: application to echographic images. Comput Methods Programs Biomed. 2012; 106(1):47-54.
6. Andersen J, Lo B, Yang GZ. Experimental platform for usability testing of secure medical sensor network protocols. 5th International summer school and symposium on medical devices and biosensors; 2008 June 1-3; Hong Kong: IEEE; 2008. P.179-82.
7. Lin CC, Lin PY, Lu PK, Hsieh GY, Lee WL, Lee RG. A healthcare integration system for disease assessment and safety monitoring of dementia patients. IEEE Trans Inf Technol Biomed. 2008; 12(5):579-86.
8. Dunnebeil S, Kobler F, Koene P, Krcmar H, Leimeister JM. Encrypted NFC emergency tags based on the German telematics infrastructure. 3th International workshop on near field communication. Hagenberg, Austria; 2011.p.50-5.
9. Yu WD, Jothiram V. Security in wireless mobile technology for healthcare systems. E-Health Networking, Application and Services. 9th International Conference on; 2007 Jun 19-22; Taipei: IEEE; 2007.p. 308 -11.
10. Kaufman C, Perlman R, Speciner M. Network security: private communication in a public world. 2th ed. New York: Prentice Hall Press; 2002.
11. Kahate A. Cryptography and network security. 2th ed. Tata McGraw-Hill Education; 2008.
12. Tanenbaum AS. Computer networks. 4th ed. India:Prentice Hall; 2003.
13. Menezes AJ, Van Oorschot PC, Vanstone SA. Handbook of applied cryptography discrete mathematics and its applications). 1th ed. London: Crc Press; 1997.
14. Lian S. A block cipher based on chaotic neural networks. Neurocomputing. 2009; 72(4-6):1296-301.
15. Daemen J, Rijmen V. AES proposal: Rijndael. 1th advanced encryption standard (AES) candidate Conference; 1998 Aug 20-22; Ventura California: 1998.
16. Daemen J, Rijmen V. The design of Rijndael: AES-the advanced encryption standard (Information Security and Cryptography). Berlin- NewYork: Springer; 2002.
17. Daemen J, Rijndean V. Advanced encryption standard (AES) algorithm- Rijndael as the design [M]. Tsinghua University Press; 2003.
18. Wu Q, Cao Y. An equivalent stochastic system model for control of chaotic dynamics. Decision and Control, 1995, Proceedings of the 34th IEEE Conference on; 1995 Dec 13-15; New Orleans, LA: IEEE; 1995.p. 2898 - 903.
19. Wang D, Yu J. Chaos in the fractional order Mackey-Glass system. Communications, Circuits and Systems, 2008. ICCAS 2008.

- International Conference on; 2008 May 25-27; Fujian: IEEE; 2008. P. 641- 5.
20. Kyrtsou C, Terraza M. Is it possible to study chaotic and ARCH behaviour jointly? Application of a noisy Mackey–Glass equation with heteroskedastic errors to the Paris Stock Exchange returns series. *Computational Economics*. 2003; 21(3):257-76.
 21. Naeemabadi M, Chomachar N, Zabihi M, Ordoubadi BS, Khalilzadeh M, Ordoubadi MS. Encryption based on variable chaotic key for wireless medical data transmission. *Application of information and communication technologies (AICT)*, 2011 5th International Conference on; 2011 Oct 12-14; Baku: IEEE; 2011. p.1-5
 22. Isfahan: Milad General Hospital [cited]. Available from: www.isfahanmiladhospital.ir.
 23. Siemens Global Website. Somatom Sensation, Siemens ag. [cited 2014 Dec 3] Available from: <http://www.medical.siemens.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?catalogId=1&catTree=12781&langId=1&productId=143945&storeId=10001>.
 24. Samaria FS, Harter AC. Parameterisation of a stochastic model for human face identification. *Applications of Computer Vision*, 1994, Proceedings of the 2th IEEE Workshop on; 1994 Dec 5-7; Sarasota, FL: IEEE;1994. p.138- 42.
 25. GE Health care Product Features, LOGIQ S6. General Electric Company: [cited 2011 Dec 3] Available from: <http://www.gehealthcare.com/euen/ultrasound/products/general-imaging/logiq-s6/index.html>.
 26. Tehran: Alzahra University Hospital, Isfahan University of Medical Science [cited]. Available from: www.alzahra.mui.ac.ir
 27. Staal J, Abramoff MD, Niemeijer M, Viergever MA, Ginneken BV. Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina. *IEEE transactions on medical imaging*. 2004; 23(4):501-9.
 28. Ahmed HE-dH, Kalash HM, Farag Allah OS. Encryption efficiency analysis and security evaluation of RC6 block cipher for digital images. *African Journal of Information and Communication Technology*. 2007; 3(1):1-7.
 29. Elkamchouchi H, Makar M. Measuring encryption quality for bitmap images encrypted with Rijndael and kamkar block ciphers. *Radio Science Conference, 2005 NRSC 2005 Proceedings of the 22th National*; 2005 Mar 15-17; Cairo, Egypt: IEEE; 2005.p. 277-84.
 30. Ziedan IE, Fouad MM, Salem DH. Application of data encryption standard to bitmap and JPEG images. *Radio Science Conference, 2003 NRSC 2003 Proceedings of the 20th National*; 2003 Mar 18-20: IEEE; 2003. P.1-8.
 31. Ahmed HE, Kalash HM, Farag Allah OS. Encryption quality analysis of the RC5 block cipher algorithm for digital images. *Opt Eng*. 2006; 45(10):107003-7.
 32. El-Fishawy N, Abu Zaid OM. Quality of encryption measurement of bitmap images with RC6, MRC6, and Rijndael block cipher algorithms. *International Journal of Network Security*. 2007; 5(3):241–51.
 33. Krishnamurthy GN, Ramaswamy V. Encryption quality analysis and security evaluation of CAST-128 algorithm and its modified version using digital images. *International Journal of Network Security & its Applications*. 2009; 1(1):28-33.
 34. Krishnamurthy GN, Ramaswamy V. Performance analysis of blowfish and its modified version using encryption quality, key sensitivity, histogram and correlation coefficient analysis. *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009; 1(2):1-4.
 35. Huynh-Thu Q, Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment. *Electronics letters*. 2008; 44(13):800-1.

Statistical Analysis of Encryption Quality for Medical Images Based on Rijndael Encryption Algorithm Using Both Static and Chaotic Cipher Key

Mohammadreza Naeemabadi¹, Alireza Mehri Dehnavi^{2,3*}, Hossein Rabbani^{2,3}

• Received: 9 Sept, 2014 • Accepted: 18 Oct, 2014

Introduction: Growing application of medical information systems and various digital communication channels to transfer and share vital and medical information demonstrate the significance of medical data security and privacy policy. Nowadays several block cipher encryption algorithms secure information have done by encrypting them. Most of these algorithms are based on a block cipher that use a predetermined fixed/constant key with at least 128 bits length.

Method: In this study encryption performed by Rijndael encryption algorithm using conventional constant and variable cipher key. Mackey Glass, known as chaotic system, attached in key expansion block of Rijndael and play role in place of its conventional key expansion procedure. Mackey Glass generates series of chaotic cipher key, monitored and modified by controlling block.

Results: Both methods were evaluated by 6 individual criteria. Results have shown that variable chaotic keys are significantly successful to hide medical image pattern and histogram distribution with 2.47 percent increase in computational time where conventional Rijndael failed. Moreover this modification does not lead to considerable changes in sensitivity.

Conclusion: Employing chaotic system in Rijndael key expansion block for medical images improves security of medical information and privacy policy.

Key words: Encryption quality analysis, Encryption robustness and efficiency analysis, Medical images encryption, Chaotic encryption

• **Citation:** Naeemabadi M, Mehri Dehnavi AR, Rabbani H. Statistical Analysis of Encryption Quality for Medical Images based on Rijndael Encryption Algorithm Using both Static and Chaotic Cipher Key. *Journal of Health and Biomedical Informatics* 2014; 1(1): 32-44

1. M.Sc Student, Medical Engineering Department, Isfahan University of Medical sciences, Isfahan, Iran.

2. Associate Professor, Medical Engineering Department, Isfahan University of Medical sciences, Isfahan, Iran.

3. Medical Image & Signal Processing Research Center, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

* **Correspondence:** Medical Engineering Department, New technologies school, Isfahan university of medical sciences, Hezar Jarib st, Isfahan, Iran.

• **Tel:** 03195016498

• **Email:** mehri@med.mui.ac.ir