

نهان نگاری مقاوم تصاویر دیجیتال به کمک تبدیل گراف محور و الگوریتم ژنتیک

سیدمحمد رضا موسوی^(۱) - علیرضا نقش^(۲)

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۸/۶/۲۳

خلاصه: به منظور نهان نگاری اطلاعات در تصاویر دیجیتال و همچنین مقاوم سازی آنها روش های متعددی تاکنون معرفی شده است. در این روش از تبدیل گراف محور استفاده شده است و به کمک الگوریتم ژنتیک بهترین ساختار گراف استخراج می شود به طوری که نهان نگاری با بیشترین مقاومت در برابر حملات انجام شود. یکی از روش های مرسوم در مقاوم سازی نهان نگاری استفاده از تبدیل کسینوسی گسسته است. در این تحقیق نشان داده ایم که روش پیشنهادی بسیار قدرتمندتر از تبدیل کسینوسی گسسته است برای آزمایش روش پیشنهادی از تصاویر معروف لنا، باربارا، بابون، قایق و فلفل استفاده شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی هر دو تبدیل به خوبی نشان می دهند که روش پیشنهادی مقاومت بیشتری نسبت به روش های مشابه مانند روش های مبتنی بر تبدیل کسینوسی گسسته دارد. در این شبیه سازی تصویر نهان نگار یک لوگوی تصادفی با ابعاد ۸×۸ و ۱۶×۱۶ است. نهان نگاری به کمک معیارهای نرخ خطای بیت، معیار اندازه گیری شباهت ساختاری و نسبت دامنه سیگنال به نویز و حملات نویز گاوسی با شدت های مختلف، فشرده سازی، فیلتر میانه، تاری، تغییر اندازه، چرخش و برش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نهان نگاری، تصاویر دیجیتال، تبدیل گراف محور، الگوریتم ژنتیک، مقاومت در برابر نویز، حفظ مالکیت تصاویر

Robust Digital Image Watermarking Method Using Graph-Based Transform (GBT) and Genetic Algorithm (GA)

Sayed Mohammad Reza Mousavi⁽¹⁾ - Alireza Naghsh⁽²⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

mmousavi.sr@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

naghsh.a@pel.iaun.ac.ir

Abstract: Numerous methods have been introduced for digital images watermarking as well as robusting them. In this method, with using Graph-based transform and extracts the best graph structure with genetic algorithm so that watermarking can be performed with maximum robustness. One of the common methods in watermarking robustness is the use of discrete cosine transform (DCT). In this study, we have shown that the proposed method is much more powerful than DCT. The proposed method is tested on five different color images such as Lena, Barbara, Boat, Baboon, Peppers. Watermark image (logo) is a random binary image with size 16 x 16 and 8 x 8 pixels. This simulation results show that the proposed method is more robust to similar methods such as discrete cosine transforms. Proposing Watermarking has been evaluated using Bit Error Rate (BER), Structural Similarity Index Measuring (SSIM) and Peak signal-to-noise ratio (PSNR) criteria and different strength Gaussian noise attacks, JPEG compression, median filter, blurring, rescaling, rotate and cropping attacks.

Index Terms: Watermarking, digital image watermarking, robust watermark, graph-based transform (GBT), Genetic Algorithm, ownership protection.

نویسنده مسئول: علیرضا نقش، استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران، naghsh.a@pel.iaun.ac.ir

۱- مقدمه

با گسترش تولید داده‌های دیجیتال و رسانه‌ها، امکان سواستفاده و تکثیر غیرقانونی محتواهای رسانه‌ای نیز گسترش یافته است. امروزه رشد روزافزون تکنولوژی ارتباطات و شبکه‌های کامپیوتری و عرضه‌ی محصولات چندرسانه‌ای در شبکه، باعث نگرانی تولیدکنندگان این محصولات از فعالیت‌های غیرمجازی چون دستکاری محصولات و یا عرضه‌ی مجدد آنها شده است. این موضوع نیاز به روش‌هایی برای حفظ داده‌های دیجیتال در مقابل کپی‌ها و یا دستکاری‌های غیرمجاز را بیش از پیش مطرح می‌سازد. چنین مشکلاتی برای محصولات آنالوگ مثل نوارهای صوتی و یا تصویری زیاد حاد بنظر نمی‌رسید، زیرا محصولات کپی یا دستکاری شده‌ی آنالوگ کیفیت پایین‌تری از محصولات اولیه دارند و این موضوع تا حدودی مانع عرضه‌ی تجاری مجدد این محصولات در ابعاد وسیع می‌شود [۱].

در مورد محصولات دیجیتال چنین محدودیتی وجود ندارد چون کپی یک محصول دارای کیفیتی برابر با محصول اولیه است. لذا بررسی رعایت حق کپی و شرایط استفاده از این محصولات، کاری بسیار مشکل است و عملاً هیچ مکانیسمی برای تعقیب کپی‌های غیرمجاز و یا محصولات دستکاری شده وجود ندارد. چنین مسائلی با استفاده از روش‌های موجود برای امنیت داده‌ها مثل روش‌های رمزنگاری قابل حل نیستند. یکی از راه حل‌های موجود برای حل چنین مسائلی، درج ساختارهای غیرمحسوس در درون داده‌های موجود در محصولات دیجیتال جهت نگهداری اطلاعات در مورد مالک محصول است. به چنین ساختارهایی الگوهای دیجیتال گفته می‌شود. الگوهای دیجیتال می‌توانند حاوی اطلاعاتی همچون حق کپی و یا کد اعتبار محصول باشند. وجود الگو در محصول فقط و فقط توسط تشخیص دهنده‌ی مخصوص همان الگو قابل بررسی است [۱]. یکی از این روش‌ها واترمارکینگ یا نهان نگاری اطلاعات است. در این روش، یک سری اطلاعات در محتوای دیجیتال اصلی جاسازی می‌شود تا هرگاه لازم باشد، این اطلاعات مجدداً بازیابی شده و مالکیت اثر مشخص شود.

یکی از چالش‌های اصلی نهان نگاری به ویژه نهان نگاری تصاویر دیجیتال، مقاوم سازی آن است. چرا که اعمال برخی تغییرات بر روی تصویر ممکن است باعث از بین رفتن اطلاعات جاسازی شده بشود. همچنین ممکن است برخی افراد سودجو از عمد فیلترهایی بر روی تصویر اعمال کنند که واترمارک تصاویر از بین برود. از این رو باید روش استفاده شده برای نهان نگاری از مقاومت بالایی در برابر حملات برخوردار باشد [۲]-[۴]. در بسیاری از مطالعات گذشته از تبدیل کسینوسی گسسته (DCT) به منظور مقاوم سازی نهان نگاری استفاده شده است. در این مقاله تلاش داریم روشی جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و تبدیل گراف محور ارائه کنیم و نشان دهیم که این روش در مقایسه با تبدیل کسینوسی گسسته قادر است مقاومت بیشتری به نهان نگاری بدهد.

ادامه‌ی مقاله به صورت زیر تنظیم شده است:

در بخش دوم برخی از مطالعات مرتبط با موضوع تحقیق معرفی می‌شود. در بخش سوم تبدیل گراف محور تشریح شده است. در بخش چهارم روش پیشنهادی شرح داده می‌شود و در بخش پنجم به ارائه نتایج

پردازش می‌شود. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری و جمع بندی ارائه می‌شود.

۲- مطالعات مرتبط

در مقاله [۵] با استفاده از جدول سودوکو 9×9 تصویر نهان نگار به ۸۱ قسمت تقسیم می‌شود و با استفاده از کم‌ارزش‌ترین بیت در تصویر میزبان جاسازی شده است، در ادامه بجای استفاده از کم‌ارزش‌ترین بیت از تبدیلات حوزه فرکانس یعنی تبدیل موجک گسسته و تبدیل کسینوسی گسسته نیز استفاده شده و مقاوم بودن روش در برابر حمله برش ۹۲ درصد محاسبه شده است.

در مقاله [۶] برای بهبود نتایج جدول سودوکو به صورت دومرحله‌ای اعمال شده است و مقاومت در برابر حمله برش به ۹۸.۸ درصد رسیده است.

در مقاله [۷] تصویر نهان نگار به چهار قسمت مساوی تقسیم شده و در بیت هفتم و بیت هشتم تصویر میزبان با ترتیب متفاوت، با استفاده از XOR قرار گرفته است. در این روش تصویر نهان نگاری شده تا ۵۰ درصد در برابر حمله برش مقاوم است.

در مقاله [۸] یک روش نهان نگاری کور با استفاده از تبدیل موجک گسسته ارائه شده است. در این روش تصویر نهان نگار به یک رشته باینری تبدیل می‌شود و پس از اعمال سه مرحله تبدیل موجک گسسته این بیت‌های باینری به وسیله یک الگوریتم در تصویر تخمینی سومین مرحله تبدیل موجک گسسته جاسازی می‌شود. در ادامه حملات چرخش، فشرده سازی JPEG، تغییر ابعاد، برش و فیلتر میانگین بررسی شده است. در مقاله [۹] نهان نگاری تصاویر متنی با استفاده از تبدیل موجک اعداد صحیح و تبدیل کسینوسی گسسته انجام شده است، در این روش از تصویر میزبان تبدیل موجک اعداد صحیح گرفته شده و در ادامه از تصویر تخمینی به دست آمده، تبدیل کسینوسی گسسته گرفته می‌شود، در این مرحله تصویر نهان نگار جاسازی می‌شود و در ادامه تبدیل کسینوسی گسسته معکوس و سپس تبدیل موجک اعداد صحیح معکوس گرفته شده و تصویر نهان نگاری شده به دست آمده است. مقاومت تصویر در برابر حملات برش، چرخش، فیلتر میانگین، کوانتیزاسیون هیستوگرام و نویز نمک و فلفل بررسی شده است. در مقاله [۱۰] تبدیل گراف محور برای کاهش همبستگی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج این مقاله حاکی از بهینه بودن تبدیل گراف محور نسبت به تبدیل کسینوسی گسسته است.

در مقاله [۱۱] از تبدیل گراف محور برای فشرده کردن صوت استفاده شده است و نتایج این مقاله بیانگر بازده بیشتر تبدیل گراف محور نسبت به تبدیل کسینوسی گسسته در فشرده کردن صوت و فایل‌های موسیقی است. در مقاله [۱۲] از تبدیل گراف محور در فشرده سازی ویدئو و کاهش عمق آن استفاده شده که پس از مقایسه نتایج با روش تبدیل کسینوسی گسسته، بهینه بودن تبدیل گراف محور مشخص شده است. ون همکاران [۱۳] یک روش نهان نگاری تصاویر دیجیتال بر اساس ترکیب تبدیل موجک دو-درختی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی احتمالی ارائه داده‌اند. در این روش ابتدا تصویر اصلی با تبدیل موجک تجزیه شده و

دوبعدی هستند. از این رو لازم از تبدیل گراف محور را بر روی هر دو بعد اعمال نماییم. برای این کار اگر تصویر ورودی را I بنامیم و تابع تبدیل گراف محور را معادل با رابطه (۵) در نظر بگیریم که بر روی I اعمال می‌شود به جای (S) ، می‌توانیم تبدیل گراف محور در دو بعد را به صورت زیر اجرا کنیم:

$$C_1 = GBT(I) \quad (۶)$$

$$C_{2D} = GBT(C_1^T) \quad (۷)$$

که C_1^T ترانهاده‌ی نتیجه‌ی یک بار تبدیل گراف محور بر روی تصویر ورودی است. با استفاده از رابطه‌ی (۶) ابتدا تبدیل گراف محور بر روی هر کدام از سطرها‌ی ماتریس تصویر اعمال شده و به کمک رابطه‌ی (۷) تبدیل گراف محور بر روی ستون‌ها نیز اعمال می‌شود. به این ترتیب تجزیه در هر دو سمت انجام می‌شود.

۴- کلیات روش

به طور کلی نهان‌نگاری پیشنهادی از نوع نامرئی و قابل بازیابی است. یعنی زمانی که اطلاعات در تصویر دیجیتال میزبان جاسازی شود، نباید با چشم انسان قابل مشاهده باشد و همچنین باید بتوان اطلاعات نهان‌نگاری شده را مجدداً از تصویر به دست آورد. واژه‌های اصلی که در روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند به شرح زیر است:

• تصویر میزبان:

تصویری است که قرار است اطلاعات (تصویر، صوت و...) در آن جاسازی شود که در این تحقیق یک تصویر از نوع دیجیتال رنگی است. • واترمارک:

همان اطلاعاتی است که قرار است در تصویر میزبان جاسازی شود که در این تحقیق یک تصویر دودویی از نوع سیاه و سفید است. • تصویر نهان‌نگاری‌شده:

پس از جاسازی واترمارک در تصویر میزبان یک تصویر به دست می‌آید که به آن تصویر نهان‌نگاری‌شده می‌گوییم.

• واترمارک بازیابی‌شده:

اطلاعاتی است که در مرحله‌ی بازیابی از تصویر نهان‌نگاری‌شده استخراج می‌شود. این مرحله در این تحقیق به منظور ارزیابی روش، معمولاً پس از اعمال حمله بر روی تصویر نهان‌نگاری‌شده انجام می‌شود [۱۶].

۱-۴- روش پیشنهادی

کلیات تحقیق را می‌توان در چهار مرحله خلاصه کرد:

۱. جاسازی واترمارک در تصویر میزبان برای به دست آوردن تصویر نهان‌نگاری‌شده
۲. اعمال حمله عمدی (نویز یا فشرده‌سازی) بر روی تصویر نهان‌نگاری‌شده
۳. بازیابی تصویر واترمارک از تصویر نهان‌نگاری‌شده‌ی نویزی یا فشرده‌شده
۴. ارزیابی نتایج

در مرحله‌ی جاسازی گام‌های زیر اجرا می‌شود:

۱. انتخاب یک تصویر دیجیتال رنگی به عنوان میزبان
۲. انتخاب کانال آبی (B) از بین سه کانال تصویر رنگی (علت استفاده از کانال آبی این است که رنگ آبی نسبت به رنگ‌های سبز و قرمز، کمتر

سپس بیت‌های تصویر واترمارک به بلوک‌های انتخابی از تصویر میزبان افزوده می‌شوند. به دلیل ظرفیت و تطابق بالای شبکه‌های عصبی، شبکه‌های آموزش دیده می‌توانند تصاویر واترمارک را بازیابی کنند. نتایج تحقیق ون و همکاران نشان می‌دهد که این روش در برابر حملات مختلف مقاومت مطلوبی دارد.

روش مرتب‌سازی پیشنهاد شده توسط ساچنو و همکاران [۱۴]، در موارد بسیاری سولول‌ها را به صورت صحیح مرتب‌سازی می‌کند اما در این روش تشخیص داده شده است که مواردی وجود دارد که استفاده‌ی تن‌ها از معیار واریانس محلی نمی‌تواند مرتب‌سازی دقیقی را انجام دهد. در روش ساچنو و همکاران انتظار بر این است که یک مقدار واریانس کوچک معرف یک خطای پیش‌بینی کوچک باشد و عملیات مرتب‌سازی از سلولی با کمترین مقدار واریانس آغاز شود اما در این روش با بررسی حالت‌های مختلف تشخیص داده شد که در بعضی موارد یک مقدار واریانس کوچک نشان‌دهنده‌ی یک خطای پیش‌بینی کوچک نیست.

۳- تبدیل گراف محور

تمام مراحل تبدیل گراف محور را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد: با داشتن یک بلوک از تصویر با N پیکسل، می‌توان یک گراف $G = \{V, E, S\}$ تعریف کرد به طوری که V و E گره‌ها و یال‌های گراف هستند و S سیگنال تصویر است. برای این گراف، عنصرهای ماتریس مجاورت به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$A_{ij} = \begin{cases} a_{ij} & \text{if } (i, j) \in E \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۱)$$

که a_{ij} وزن یال‌های بین گره‌ها i و j در گراف است. ماتریس درجه D نیز یک ماتریس قطری است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ij} = \begin{cases} \sum a_{ij} & \text{if } i = j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۲)$$

سپس می‌توان از A و D ماتریس گراف-لاپلاسیان را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$L = D - A \quad (۳)$$

ماتریس L یک ماتریس متقارن از مقادیر حقیقی خواهد بود و بر اساس تئوری طیفی، تجزیه‌ی مقادیر ویژه (EVD) این ماتریس دارای مجموعه‌ای از مقادیر ویژه حقیقی غیرمنفی خواهد بود که با $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ و مجموعه‌ای از بردارهای ویژه مستقل از هم و متناظر با مقادیر ویژه که با $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ مشخص می‌شود، خواهد بود [۱۵].

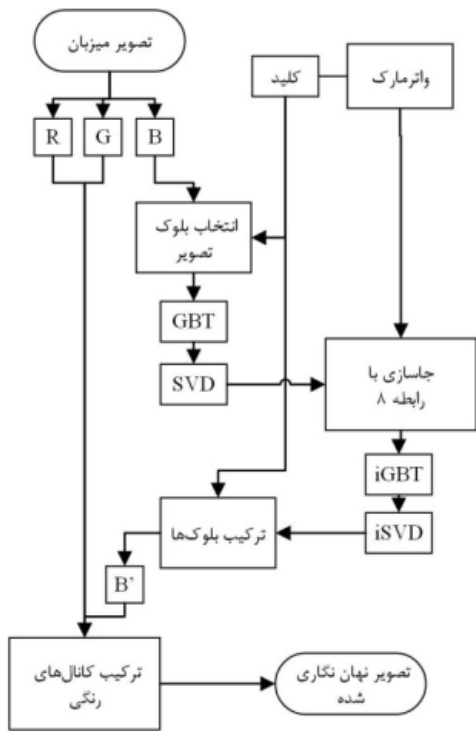
$$L = V \Lambda V^T \quad (۴)$$

سپس می‌توانیم از این بردارهای ویژه متعامد استفاده کنیم تا همبستگی بلوک تصویر ورودی را کاهش دهیم.

$$c = V^T S \quad (۵)$$

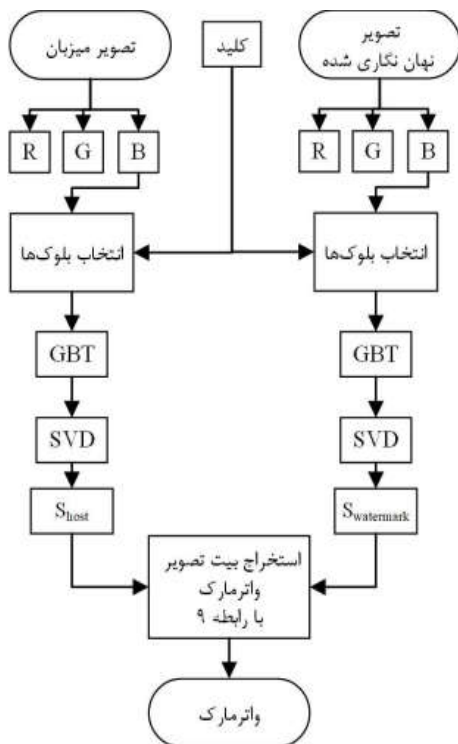
به طوری که C ماتریس ضرایب تبدیل گراف محور است و S بلوک تصویر ورودی است.

همانطور که دیده می‌شود تبدیل گراف محور برای ورودی‌های یک بعدی تعریف شده است در حالی که ورودی در این تحقیق بلوک‌های تصویر و



شکل (۱): روش جاسازی

Fig. (1): Embedding stage of the proposed method.



شکل (۲): روش بازیابی

Fig. (2): Watermark retrieval stages in the proposed method.

۲-۴- یافتن بهترین ساختار گراف به کمک الگوریتم ژنتیک (GA)

همانطور که گفته شد برای یافتن بهترین ساختار گراف از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. فلوچارت الگوریتم ژنتیک در شکل (۳) قابل مشاهده است.

توسط چشم انسان قابل تشخیص است و وقتی تغییراتی روی آن انجام شود کمتر دیده می‌شود. از این رو با انتخاب این کانال به غیرقابل رؤیت بودن واترمارک کمک کرده‌ایم [۱۷].

۳. تقسیم تصویر به بلوک‌های کوچکتر
 ۴. انتخاب تعدادی از بلوک‌ها (به اندازه‌ی بیت‌های تصویر واترمارک)
 ۵. اعمال تبدیل گراف محور بر روی بلوک‌های انتخابی با استفاده از یک ساختار مناسب گرافی
 ۶. انتخاب تعدادی از ضرایب اولیه‌ی به دست آمده از تبدیل گراف محور
 ۷. اعمال تجزیه‌ی مقادیر یکه (SVD) بر روی ضرایب انتخابی
 ۸. تولید یک ماتریس کلید که تعیین می‌کند کدام بیت از واترمارک به کدام بلوک انتخابی اضافه شود.
- انتخاب تک تک بیت‌های تصویر واترمارک بر اساس ماتریس کلید و اضافه کردن آن‌ها به بزرگترین مقدار به دست آمده از SVD برای بلوک انتخابی به صورت زیر:

$$S = \begin{cases} S - WS & \text{if } W(i) = 0 \\ S + WS & \text{if } W(i) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

که $W(i)$ برابر است با i -امین بیت از تصویر واترمارک. مقدار S نیز برابر است با بزرگترین مقدار یکه به دست آمده از SVD. مقدار WS نیز یک مقدار اختیاری است که شدت واترمارک را مشخص می‌کند.

۱. اعمال عکس SVD و عکس تبدیل گراف محور و ترکیب مجدد بلوک‌ها و کانال‌های رنگی برای به دست آوردن تصویر نهان‌نگاری‌شده. منظور از ساختار مناسب گرافی در مرحله ۵، ساختاری است که به ازای آن کمترین نرخ خطای بیت پس از بازیابی حاصل شود. روش به دست آوردن این ساختار در ادامه‌ی فصل شرح داده خواهد شد.

۱. مراحل بازیابی واترمارک به صورت زیر است:
 ۱. انتخاب بلوک‌های مشخص بر اساس ماتریس کلید از تصاویر میزبان و نهان‌نگاری‌شده.
 ۲. اعمال تبدیل گراف محور و همچنین SVD مشابه مرحله جاسازی بر روی هر دو تصویر
 ۳. مقایسه‌ی مقادیر یکه به دست آمده از دو تصویر و تشخیص بیت واترمارک به صورت زیر:

$$W(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } S_{\text{host}} < S_{\text{watermarked}} \\ 0 & \text{if } S_{\text{host}} > S_{\text{watermarked}} \end{cases} \quad (9)$$

که $S_{\text{watermarked}}$ و S_{host} به ترتیب بزرگترین مقادیر ویژه به دست آمده از تصاویر میزبان و نهان‌نگاری‌شده می‌باشند.

۴. الحاق بیت‌های به دست آمده و تشکیل تصویر واترمارک به منظور ارزیابی روش نیز سه نوع نویز گاوسی و همچنین فشرده‌سازی JPEG بر روی تصویر نهان‌نگاری شده اعمال شده و نتایج بر اساس معیارهای معیار اندازه‌گیری شباهت ساختاری، نرخ خطای بیت، نسبت دامنه سیگنال به نویز بررسی و مقایسه می‌شوند. روابط مربوط به هر کدام از معیارها در انتهای فصل آمده است.
- فلوچارت‌های شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب روش‌های جاسازی و بازیابی را نمایش می‌دهند.

با ابعاد 256×256 ایجاد شود که هر عنصر از آن نشان می‌دهد بین دو گره چه وزنی برقرار است. از این رو برای بلوک‌های تصویری 16×16 کروموزوم‌هایی با ابعاد 256×256 نیاز است. پس از یافتن بهترین کروموزوم، می‌توان از آن در تبدیل گراف محور و مراحل جاسازی و بازیابی استفاده کرد تا بالاترین مقاومت در برابر حملات حاصل شود.

۲-۲-۴- تابع هدف (هزینه)

برای بررسی هزینه‌ی هر ساختار گراف، چند نوع نوپز مختلف به تصویر نهان‌نگاری شده پس از استفاده از ساختار گراف موردنظر اضافه می‌شود و در حضور هر نوپز تصویر واترمارک بازیابی می‌شود. مقدار هزینه‌ی هر ساختار گرافی عبارت است از خطای نرخ خطای بیت بین واترمارک اصلی و واترمارک بازیابی شده. به این ترتیب الگوریتم ژنتیک ساختار گرافی را در پایان معرفی می‌کند که کمترین خطای نرخ خطای بیت را داشته باشد و در نتیجه روشی ارائه می‌دهد که به کمک آن بیشترین مقاومت را در برابر نوپز داشته باشیم.

۳-۲-۴- انتخاب، ترکیب و جهش

انتخاب که ساده است. در هر دور دو ساختار گرافی که بیشترین میزان صلاحیت (کمترین نرخ خطای بیت) را دارند به عنوان والدین نسل بعدی انتخاب می‌شود. برای ترکیب، وزن عنصرهای ماتریس‌های مجاورت والدین با هم جابجا شده و دو فرزند جدید ایجاد می‌شود. در روال معمول ژنتیک، نیمی از کروموزوم پدر با نیمی از کروموزوم مادر جابجا می‌شود. اما در این تحقیق برای هر ژن با احتمال 0.5% جابجایی انجام می‌شود:

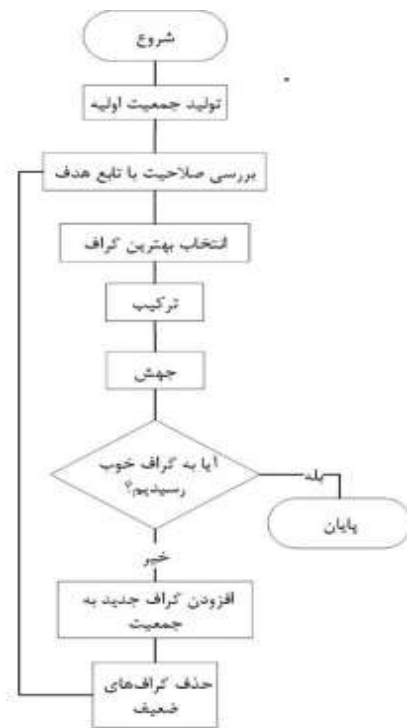
```

for i=1:N
    if rand>0.5
        child(i)=best1(i);
    else
        child(i)=best2(i);
    end
end
end
    
```

که N تعداد ژن‌های کروموزوم و rand یک عدد تصادفی با توزیع نرمال بین 0 تا 1 است. کروموزوم‌های best1 و best2 والدین انتخابی در دور جاری از ژنتیک هستند و child فرزند جدید حاصل از ترکیب والدین است. جهش نیز با یک احتمال 0.5% بر روی فرزند جدید ایجاد می‌شود. در صورتی که جهش صورت گیرد، 0.1% از ژن‌های کروموزوم تصادفی انتخاب شده و مقادیر تصادفی جدید به جای مقادیر قبلی آنها قرار می‌گیرد.

۵- نتایج تجربی

برای آزمایش روش پیشنهادی از تصاویر معروف لنا، باربارا، بابون، قایق و فلفل که در بیشتر آزمایش‌های پردازش تصویر استفاده می‌شوند استفاده شده است (شکل ۴). برای واترمارک نیز تصاویر تصادفی دودویی با ابعاد 8×8 یا 16×16 استفاده شده است. علت استفاده از این ابعاد این است که روش پیشنهادی با روش ارائه شده در [۱۷] مقایسه می‌شود و در [۱۷] از همین ابعاد برای تصاویر واترمارک استفاده شده است. گرچه محدودیتی برای انتخاب ابعاد تصویر وجود ندارد. به شرطی که ظرفیت کافی در تصویر پوشش وجود داشته باشد، این ابعاد قابل تغییر است.



شکل (۳): الگوریتم ژنتیک برای یافتن ساختار گراف بهینه

Fig. (3): Flowchart of the proposed genetic algorithm for find best graph .

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی است که با تغییر مقادیر متغیرهای مسئله، یک تابع هدف را بیشینه یا کمینه می‌کند. هر راه حل ممکن برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، در ژنتیک کروموزوم نام دارد و هر کروموزوم متشکل از تعدادی ژن است که متغیرهای مسئله را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق هر راه حل (کروموزوم) عبارت است از یک ساختار گراف که نحوه اتصال گره‌ها و وزن یال‌ها در آن مشخص است. هدف این است که ساختارهای ایجاد شده به گونه‌ای تکامل بیابند که کمترین نرخ خطای بیت بین تصویر واترمارک و تصویر واترمارک بازیابی شده در حضور حملات حاصل شود. از این رو هر ساختار گرافی که تولید می‌شود باید به گونه‌ای تعیین صلاحیت شود. این عملیات به کمک یک تابع هدف یا تابع صلاحیت انجام می‌شود.

۱-۲-۴- نحوه کدگذاری کروموزوم

هر کروموزوم باید یک راه حل برای حل مسئله باشد و هر راه حل عبارت است از ساختار مناسب گرافی که بتواند مقاومت نهان‌نگاری را در برابر حملات بالاتر ببرد. ساختار گرافی را می‌توان با یک ماتریس مجاورت بیان کرد از این رو هر کروموزوم معادل با یک ماتریس مجاورت تشکیل شده از اعدادی بین صفر و یک می‌باشد که برای هر تصویر باید محاسبه شود. پس کروموزوم‌های ژنتیک عبارتند از ماتریس‌های دو بعدی مجاورت که ابعاد آن متناسب با تعداد گره‌های گراف است و تعداد گره‌های گراف همان تعداد پیکسل‌های بلوک‌های میکرو تصویرهاست. در واقع هر گراف رابطه‌ی بین پیکسل‌ها را نمایش می‌دهد. به عنوان مثال اگر میکرو تصویرها ابعاد 16×16 داشته باشند، هر میکرو تصویر دارای 256 پیکسل خواهد بود و برای نمایش ارتباط بین پیکسل‌ها لازم است گرافی با 256 گره تشکیل شود. برای نمایش ارتباط گره‌ها نیاز است ماتریس مجاورتی

نتایج آزمایش بدون حمله و با حملات نویز گاوسی (شدت ۲۵ - ۳۵ - ۴۵ دسی بل)، فشرده سازی JPEG، فیلتر میانه، تاری، تغییر ابعاد، چرخش، برش در جدول های ۱ تا ۳ آورده شده است.

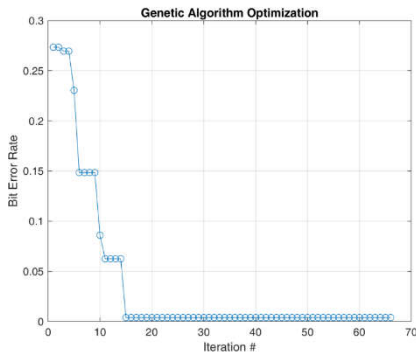


الف ب پ پ پ ث

شکل (۱): تصاویر دیجیتال استفاده شده در آزمایش ها (الف: لنا،

ب: فلفل، پ: قایق، ت: بار بار، ث: بابون)

Fig. (4): Digital images used in experiments (Baboon, Barbara, Boat, Peppers, Lena)



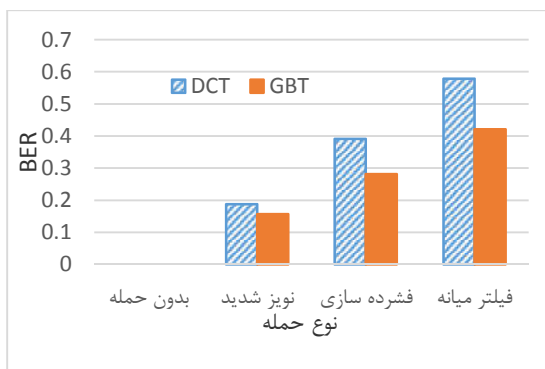
شکل (۲): همگرایی الگوریتم ژنتیک با تصویر واتر مارک ۱۶×۱۶.

Fig. (5): Converge Genetic Algorithm optimization process with 16x16 logo.

در ادامه روش پیشنهادی در مقایسه با روش ارائه شده در [۱۷] در حضور حملات نویزی مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است از آنجایی که در هر بار اجرا، یک کلید تصادفی ایجاد می شود، در هر اجرا یک گراف متفاوت توسط الگوریتم ژنتیک معرفی می شود و هر گراف متفاوت ممکن است در نهایت نرخ خطای بیت متفاوتی از دیگر اجراها داشته باشد. به همین دلیل نتایج ارائه شده در جدول حاصل میانگین گیری از ۱۰ اجرای متوالی است. در ادامه نمودارهای نرخ خطای بیت و معیار شباهت ساختاری برای مقایسه ی واضح تر روش های تبدیل گراف محور و تبدیل کسینوسی گسسته که در [۱۷] پیشنهاد شده است، قابل مشاهده است.

شدت واترمارک (WS) در این آزمایش برابر با ۱۰۰ و تعداد ضرایب انتخاب شده برای تبدیل کسینوسی گسسته و تبدیل گراف محور برابر با ۱۰ است. در جدول ۱ منظور از DCT روش ارائه شده در [۱۷] و منظور از GBT روش پیشنهادی این تحقیق است.

شکل های ۶ تا ۹ نرخ خطای بیت را برای هر کدام از تصاویر بدون حمله و در حضور حملات مختلف (نویز گاوسی ۴۵ دسی بل، فشرده سازی JPEG و فیلتر میانه) به خوبی نمایش می دهند.



شکل (۳): نرخ خطای بیت برای تصویر بار بار در حملات مختلف

Fig. (6): BER diagram of different attacks for Barbara

روش پیشنهادی در محیط برنامه نویسی Mathworks Matlab R2018b پیاده سازی شده است و تمامی اجراها توسط یک سیستم با پردازنده Intel Core i7 8800 HQ و سیستم عامل Windows 10 انجام شده است.

تنظیمات الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن بهترین گراف نیز به شرح زیر است:

• جمعیت اولیه: تعداد افراد جمعیت به طور کلی ثابت و همواره برابر با ۱۲ کروموزوم است.

• بیشترین تعداد دور: ۵۰۰ دور

• شرایط توقف: رسیدن به نرخ خطای بیت صفر، رسیدن به بیشترین تعداد دور یا رسیدن به همگرایی (در صورتی که در ۵۰ دور متوالی جواب تکراری به دست آید، بهینه سازی متوقف می شود).

• نحوه انتخاب والدین: چرخه رولت (به طوری که در هر دور بر اساس مقدار نرخ خطای بیت هر کروموزوم، یک احتمال انتخاب به هر کروموزوم نسبت داده می شود و هر کروموزومی که نرخ خطای بیت کمتری داشته باشد، احتمال انتخاب بالاتری دارد. در هر دور بر اساس احتمال های تخصیصی دو کروموزوم به عنوان والدین نسل بعدی انتخاب می شوند).

• نرخ ترکیب: ۵۰٪

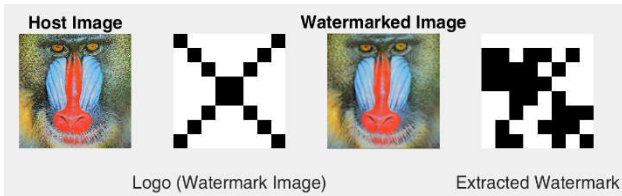
• نرخ جهش: ۱۰٪

• احتمال رخداد جهش: ۵۰٪

• نحوه جایگذاری: در هر دور دو کروموزوم که بیشترین نرخ خطای بیت را دارند از جمعیت حذف شده و فرزندان والدین انتخابی پس از ترکیب و جهش جای آنها قرار می گیرند. دو کروموزومی که کمترین نرخ خطای بیت را دارند در جمعیت باقی می مانند. دیگر کروموزومها با بهترین کروموزوم ترکیب شده و در صورتی که جواب بهتری حاصل شود، کروموزوم قبلی از بین رفته و کروموزوم جدید جای آن قرار می گیرد. در غیر این صورت یک کروموزوم تصادفی تولید شده و جای کروموزوم قبلی قرار می گیرد.

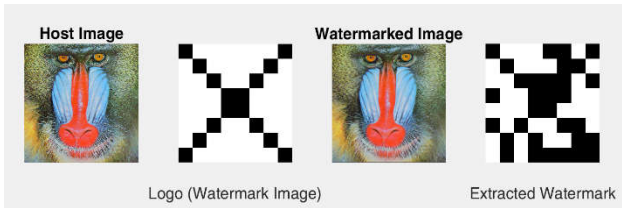
کار الگوریتم ژنتیک یافتن بهترین گراف است به طوری که مقدار نرخ خطای بیت پس از استخراج تصویر واترمارک از تصویر نهان نگاری شده حداقل یا صفر شود. ابتدا بررسی می کنیم که آیا الگوریتم ژنتیک قادر به کم کردن نرخ خطای بیت در طول بهینه سازی می باشد یا خیر؟

شکل ۵ یک آزمایش دیگر با تصویر میزبان لنا و یک تصویر واترمارک تصادفی ۱۶×۱۶ را نمایش می دهد. همانطور که دیده می شود پس از ۱۵ دور الگوریتم ژنتیک توانسته گرافی بیابد که نرخ خطای بیت برابر با صفر داشته باشد.



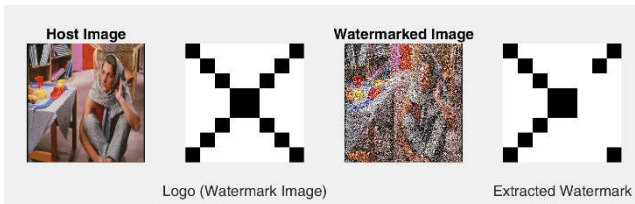
شکل (۱۱): استخراج واترمارک در حضور حمله فیلتر میانه در تصویر بابون با روش پیشنهادی

Fig. (11): Watermark extraction in the median filter in the Baboon image by the proposed method.



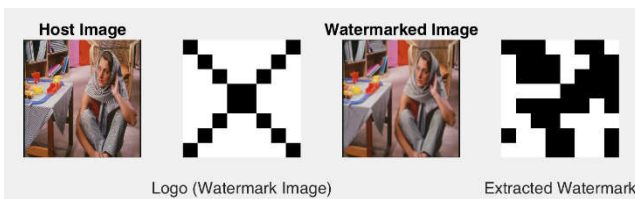
شکل (۱۲): استخراج واترمارک در حضور حمله فشرده‌سازی در تصویر بابون با روش پیشنهادی

Fig. (12): Watermark extraction in the Jpeg compression in the Baboon image by the proposed method.



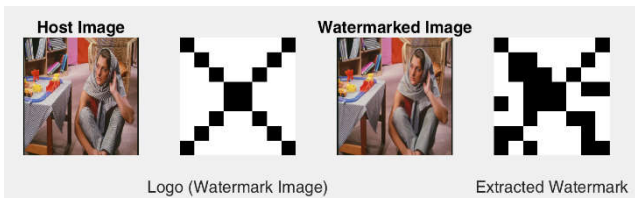
شکل (۱۳): استخراج واترمارک در حضور حمله نویز شدید در تصویر باربارا با روش پیشنهادی

Fig. (13): Watermark extraction in the presence of severe Gaussian noise in the Barbara image by the proposed method.



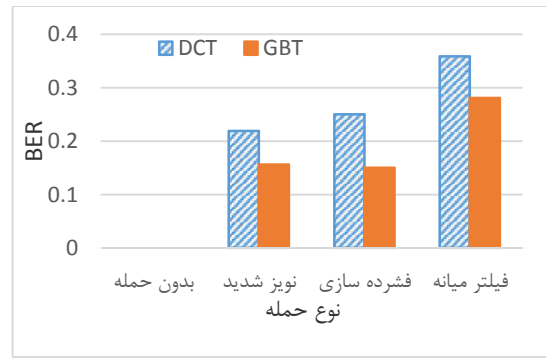
شکل (۱۴): استخراج واترمارک در حضور حمله فیلتر میانه در تصویر باربارا با روش پیشنهادی

Fig. (14): Watermark extraction in the median filter in the Barbara image by the proposed method.



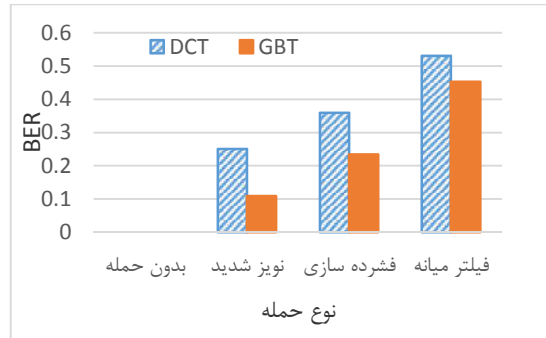
شکل (۱۵): استخراج واترمارک در حضور حمله فشرده‌سازی در تصویر باربارا با روش پیشنهادی

Fig. (15): Watermark extraction in the Jpeg compression in the Barbara image by the proposed method.



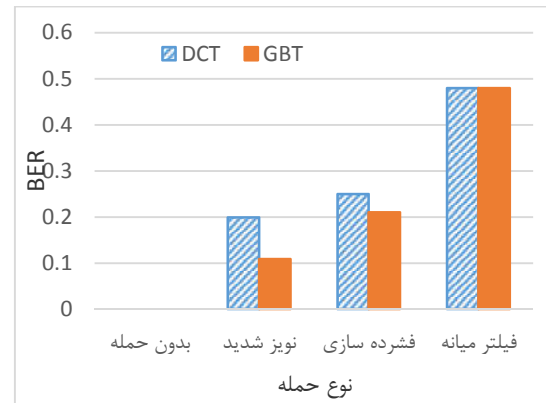
شکل (۷): نرخ خطای بیت برای تصویر قایق در حملات مختلف

Fig. (7): BER diagram of different attacks for Boat



شکل (۸): نرخ خطای بیت برای تصویر فلفل در حملات مختلف

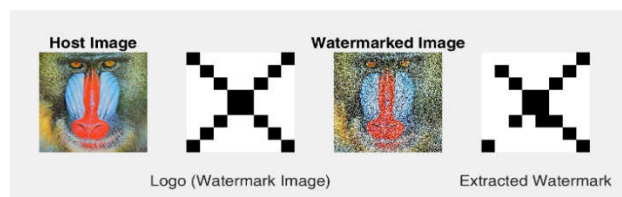
Fig. (8): BER diagram of different attacks for Peppers



شکل (۹): نرخ خطای بیت برای تصویر لنا در حملات مختلف

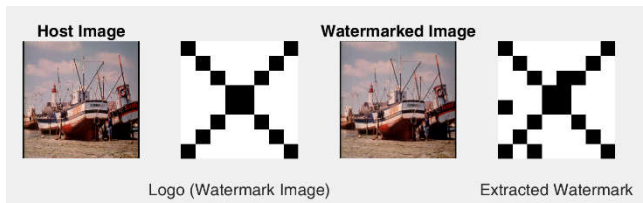
Fig. (9): BER diagram of different attacks for Lena

شکل‌هایی که در ادامه می‌آیند تصاویر مربوط به نهان‌نگاری به روش پیشنهادی را در حضور حملات مختلف نمایش می‌دهد. برای درک بهتر نرخ خطای بیت، لوگو به صورت یک کاراکتر X با ابعاد ۸×۸ در نظر گرفته شده است.



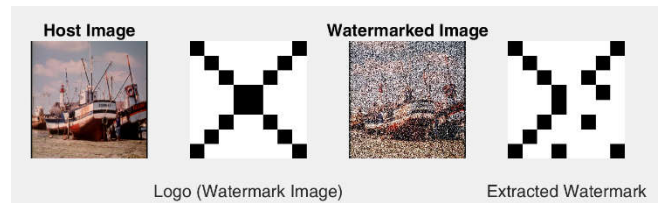
شکل (۱۰): استخراج واترمارک در حضور نویز شدید در تصویر بابون با روش پیشنهادی

Fig. (10): Watermark extraction in the presence of severe Gaussian noise in the Baboon image by the proposed method.



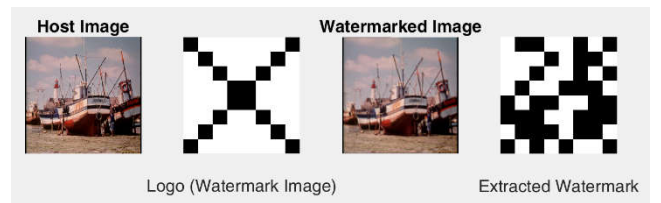
شکل (۱۸): استخراج واترمارک در حضور حمله فشرده سازی در تصویر قایق با روش پیشنهادی

Fig. (18): Watermark extraction in the Jpeg compression in the Boat image by the proposed method.



شکل (۱۶): استخراج واترمارک در حضور حمله نویز شدید در تصویر قایق با روش پیشنهادی

Fig. (16): Watermark extraction in the presence of severe Gaussian noise in the Boat image by the proposed method.



شکل (۱۷): استخراج واترمارک در حضور حمله فیلتر میانه در تصویر قایق با روش پیشنهادی

Fig. (17): Watermark extraction in the median filter in the Boat image by the proposed method.

Table (1): Run results of the proposed method schema [17] against different intensity of gaussian noise, JPEG compression and median filter

جدول (۱): نتایج روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۷] در برابر شدت مختلف نویز گاوسی و فشرده سازی JPEG و فیلتر میانه



فیلتر میانه	فشرده سازی JPEG/۵۰		نویز ۴۵ دسی بل		نویز ۳۵ دسی بل		نویز ۲۵ دسی بل		بدون حمله		معیار ارزیابی	تصویر		
	GBT	DCT	GBT	DCT	GBT	DCT	GBT	DCT	GBT	DCT				
	۲۲.۱۷	۲۲.۱۶	۲۴.۸۱	۲۴.۸۱	۱۰.۲۱	۱۰.۲۱	۱۳.۸۴	۱۳.۸۴	۲۲.۸۶	۲۲.۸۶	۳۳.۴۸	۳۳.۴۸	PSNR	 Baboon
	۰.۷۵	۰.۷۴۸	۰.۸۸۳۶	۰.۸۸۳۶	۰.۲۶۷۴	۰.۲۶۷۴	۰.۴۶۷	۰.۴۶۷	۰.۸۴۶	۰.۸۴۶	۰.۹۸۴۵	۰.۹۸۴۵	SSIM	
	۰.۴۲۱	۰.۵۷۸	۰.۲۸۱۳	۰.۳۹۰۶	۰.۱۵۶	۰.۱۸۷	۰.۰۳۱۳	۰.۰۷۸۱	.	.	.	.	BER
	۲۶.۱۸	۲۶.۱۸	۳۰.۷۱	۳۰.۷۰	۱۰.۲۴	۱۰.۲۴	۱۳.۸۸	۱۳.۹۰	۲۲.۹۱	۲۲.۹۱	۳۴.۵۴	۳۴.۵۴	PSNR	 Barbara
	۰.۸۳۸	۰.۸۳۸	۰.۹۴۳	۰.۹۴۳	۰.۱۶۸	۰.۱۶۷	۰.۳۳۲	۰.۳۳۲	۰.۷۴۲	۰.۷۴۲	۰.۹۶۸	۰.۹۶۸	SSIM	
	۰.۴۳۷	۰.۵۶۲	۰.۲۱	۰.۲۸۱	۰.۱۷۱	۰.۲۶۵	۰.۰۳۱۳	۰.۱۰۹	.	.	.	.	BER
	۳۰.۵۲	۳۰.۵۲	۳۳.۱۶	۳۳.۱۶	۱۰.۲۱	۱۰.۲۱	۱۳.۸۵۴	۱۳.۸۵۵	۲۳.۰۲	۲۳.۰۲	۳۴.۱۸	۳۴.۱۸	PSNR	 Boats
	۰.۹۲۸	۰.۹۲۸	۰.۹۴۴	۰.۹۴۴	۰.۱۱۳	۰.۱۱۳	۰.۲۲۸	۰.۲۲۹	۰.۵۸۸	۰.۵۸۸	۰.۹۴۲	۰.۹۴۲	SSIM	
	۰.۲۸۱	۰.۳۵۹	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۱۵۶	۰.۲۱۸	.	۰.۰۳۱۳	.	.	.	.	BER
	۳۴.۲۳	۳۳.۲۳	۲۹.۲۱	۲۹.۲۱	۱۰.۳۹	۱۰.۳۸	۱۴.۱۶	۱۴.۱۶	۲۳.۱۲	۲۳.۱۲	۳۶.۲۱	۳۶.۲۱	PSNR	 Peppers
	۰.۸۷۳	۰.۸۷۳	۰.۹۷۲	۰.۹۷۲	۰.۳۳۰	۰.۳۳۰	۰.۵۵۴	۰.۵۵۴	۰.۸۹۲	۰.۸۹۲	۰.۹۸۹	۰.۹۸۹	SSIM	
	۰.۴۵۳	۰.۵۳۱	۰.۲۳۴	۰.۳۵۹	۰.۱۰۹	۰.۲۵۰	.	۰.۰۶۲۵	.	.	.	.	BER
	۳۱.۵۲	۳۱.۵۲	۳۶.۵۲	۳۶.۵۲	۱۰.۳۳	۱۰.۳۴	۱۳.۹۲	۱۳.۸۶	۲۰.۷۳	۲۰.۰۷	۲۴.۳۴	۲۲.۱۰	PSNR	 Lena
	۰.۹۵	۰.۹۵	۰.۹۷	۰.۹۷	۰.۱۷۱	۰.۱۷	۰.۳۴	۰.۳۴	۰.۶۸	۰.۶۷	۰.۸۲	۰.۷۸	SSIM	
	۰.۴۸	۰.۴۸	۰.۲۱	۰.۲۵	۰.۱۰۹	۰.۱۹۹	۰.۰۴۶	۰.۲۷۷	.	۰.۳۷	.	.	BER	

Table (2): Run results of the proposed method schema [17] against Re-scale and Blurring attack

جدول (۲): نتایج روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۷] در برابر حمله تاری و تغییر اندازه






تاری		تغییر اندازه		معیار ارزیابی	تصویر
GBT	DCT	GBT	DCT		
۱۹.۴۹	۱۹.۴۹	۲۳.۰۳	۲۳.۰۳	PSNR	 Baboon
۰.۵۷۴۷	۰.۵۷۴۷	۰.۸۰۶۱	۰.۸۰۶۱	SSIM	
۰.۳۷۵۰	۰.۴۹۱۹	۰.۱۲۵	۰.۲۵۰	BER	
۲۴.۸۸	۲۴.۹۰	۲۷.۸۹	۲۷.۸۸	PSNR	 Barbara
۰.۷۹۶۹	۰.۷۹۶۵	۰.۸۷۹۹	۰.۸۷۹۹	SSIM	
۰.۳۵۹۴	۰.۵۱۵۶	۰.۰۳۱۳	۰.۱۴۰۶	BER	
۲۶.۳۵	۲۶.۳۵	۳۰.۲۲	۳۰.۲۱	PSNR	 Boats
۰.۸۸۳۲	۰.۸۸۳۲	۰.۹۴۴۷	۰.۹۴۴۱	SSIM	
۰.۲۰۳	۰.۲۵۰	۰.۰۳۱۳	۰.۱۲۵۰	BER	
۲۴.۷۰	۲۴.۷۰	۳۰.۴۵۶	۳۰.۴۴۹	PSNR	 Peppers
۰.۹۳۸۶	۰.۹۳۸۶	۰.۹۸۰۸	۰.۹۸۰۷	SSIM	
۰.۲۹۶۹	۰.۴۳۷۵	۰.۰۳۱۳	۰.۱۸۷۵	BER	

Table (3): Run results of the proposed method schema [17] against rotate and Cropping attack

جدول (۳): نتایج روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۱۷] در برابر حمله چرخش و برش

برش		چرخش (۲۰ درجه)		معیار	تصویر
GBT	DCT	GBT	DCT		
۲۴.۳۴	۲۲.۱۰	۲۴.۳۴	۲۲.۱۰	PSNR	 Lena
۰.۸۲	۰.۷۸	۰.۸۲	۰.۷۸	SSIM	
۰.۴۹	۰.۵۴	۰.۴۸	۰.۴۲	BER	

در واقع آدرس مکان‌هایی که بیت‌های واترمارک افزوده می‌شود، از بین می‌رود و در واقع الگوریتم تمام بیت‌های واترمارک را شانس حدس می‌زند.

همانطور که نتایج نشان می‌دهند روش تبدیل گراف محور جایگزین بسیار مناسبی برای تبدیل کسینوسی گسسته یا تبدیل کسینوسی گسسته است. مسئله‌ی اصلی یافتن ساختار مناسب گراف است که این مسئله نیز در این تحقیق به کمک الگوریتم ژنتیک حل شده است. نتایج به خوبی نشان می‌دهند که در صورت وجود ساختار مناسب گراف، نتایج به طور قابل توجهی بهتر از تبدیل کسینوسی گسسته خواهد بود به طوری که در حضور حملاتی نظیر نویز بازیابی و استخراج واترمارک با خطای کمتری انجام می‌شود.

روش پیشنهادی نسبت به حمله فیلتر میانه حساس است؛ اما نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که روش پیشنهادی خطای کمتری از روش قدرتمند تبدیل کسینوسی گسسته دارد؛ اما نسبت به دیگر حملات مانند نویز حتی در شدت بالا، روش پیشنهادی نسبتاً مطلوب عمل می‌کند. برای ارزیابی بیشتر روش پیشنهادی در جدول ۲، یک واترمارک 16×16 تصادفی در چهار تصویر پوشش مختلف (بابون، باربارا، بوت، پپر) جاسازی شده و در حضور حملات تاری و تغییر ابعاد، استخراج واترمارک انجام شده و ارزیابی می‌شود. در جدول ۳ نیز نتایج نرخ خطای بیت واترمارک تصویر لنا برای واترمارک 8×8 در برابر حملات برش و چرخش را نمایش می‌دهد؛ از آنجایی که باعث تغییر آدرس پیکسل‌ها و همچنین بلوک‌های انتخابی در تصاویر دیجیتال می‌شود، نرخ خطای بیت را بسیار بالا می‌برد.

References

- [1] V. Potdar, E. Chang, “A survey of digital image watermarking techniques”, Proceeding of the IEEE/INDIN, Perth, WA, Australia, Australia, Aug. 2005 (doi:10.1109/INDIN.2005.1560462).
- [2] S. M. Mousavi, A. Naghsh, A. A. Manaf, S. A. R. Abu-Bakar, “A robust medical image watermarking against salt and pepper noise for brain MRI images”, Multimedia Tools and Applications, Vol. 76, No. 7, pp. 10313-10342, April 2017 (doi:10.1007/s11042-016-3622-9).
- [3] S. M. Mousavi, A. Naghsh, S. A. R. Abu-Bakar, “A heuristic automatic and robust ROI detection method for medical image watermarking”, Journal of Digital Imaging Vol. 28, No. 4, pp. 417–427, Mar. 2015 (doi: 10.1007/s10278-015-9770-z).
- [4] S. Saneie, A. Naghsh, “Introducing a new method of robust digital image watermarking against cropping and salt and pepper noise using sudoku”, Majlesi Journal of Multimedia Processing, Vol. 4, No. 4, pp. 9-15, Dec. 2015.
- [5] S. Saneie, A. Naghsh, “Robust digital image watermarking against cropping using sudoku puzzle in spatial and transform domain”, Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. ۱, No. ۲, pp. ۲۶-۳۳, Nov 2016.
- [6] M. S. Goli, A. Naghsh, “Introducing a new method robust against crop attack in digital image watermarking using two-step sudoku”, Proceeding of the IEEE/IRRIA, Shahrekord, Iran, April 2017 (doi:10.1109/PRIA.2017.7983054).
- [7] B. Behravan, A. Naghsh, “Introducing a new method of image reconstruction against crop attack using sudoku watermarking algorithm”, Proceeding of the IEEE/IRRIA, Shahrekord, Iran, April 2017 (doi:10.1109/PRIA.2017.7983042).
- [8] E. Najafi, “A robust embedding and blind extraction of image watermarking based on discrete wavelet transform”, Mathematical Sciences, Vol. 11, No. 4, pp 307–318 2017. Dec 2017, (doi:10.1007/s40096-017-0233-1)
- [9] R. A. Alotaibi, L. A. Elrefaei, “Text-image watermarking based on integer wavelet transform (IWT) and discrete cosine transform (DCT)”, Applied Computing and Informatics vol. 15 , No. 2, pp. 191-202, July 2019 (doi:10.1016/j.aci.2018.06.003)
- [10] J. Hou, H. Liu, L. Chau, “Graph-based transform for data decorrelation”, Proceeding of the IEEE/DSP, Beijing, China, Oct 2016. (doi: 10.1109/ICDSP.2016.7868540).
- [11] M. Farzaneh, M. Asgari, R. Toroghi, “Audio compression using graph-based transform”, Proceeding of the IEEE/ISTEL, Dec. 2018 (doi:10.1109/ISTEL.2018.8661027).
- [12] W. Kim, S. K. Narang, “Graph based transforms for depth video coding, acoustics”, Proceeding of the IEEE/ICASSP, Kyoto, Japan, Mar 2012 (doi:10.1109/ICASSP.2012.6288008).
- [13] X. Wen, H. Zhang, X. Xu, J. Quan, “A new watermarking approach based on probabilistic neural network in wavelet domain”, Soft Computing , Vol. 13, No. 4 pp. 355–366, Feb 2009 (doi:10.1007/s00500-008-0331-y).
- [14] V. Sachnev, H.J. Kim, S. Sundaram S, Y.Q. Shi., “Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction”, IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 19, No. 7, pp. 989 – 999, Apr 2009 (doi: 10.1109/TCSVT.2009.2020257).
- [15] A. Ansari, S. Hong, G. Saavedra, B. Javidi, M. Martinez-Corral, “Ownership protection of plenoptic images by robust and reversible watermarking”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. ۱۰۷, No. ۱, pp. 325-334 Aug. 2018 (doi:10.1016/j.optlaseng.2018.03.028).