

طرح نهان‌نگاری هوشمند و مقاوم با استفاده از مقادیر بهینه ضرایب مقیاس و ضرایب کانتورلت

عین اله حاتمی^۱، دانشجوی دکتری، حمیدرضا رشیدی کنعان^۲، دانشیار، کامران لایقی^۳، استادیار، علی هارون آبادی^۴، استادیار

۱- گروه کامپیوتر - دانشکده برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال - تهران - ایران - Einolah.hatami@gmail.com

۲- گروه کامپیوتر - دانشکده مهندسی کامپیوتر - دانشگاه شهید رجایی - تهران - ایران - h.rashidykanan@sru.ac.ir

۳- گروه کامپیوتر - دانشکده برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال - تهران - ایران - k_layeghi@iaui-tnb.ac.ir

۴- گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز - تهران - ایران -

a.harounabadi@gmail.com

چکیده: طراحی یک سامانه نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال با بهبود همزمان ویژگی‌های مقاومت، شفافیت و ظرفیت از چالش‌های اصلی این حوزه می‌باشد. در این پژوهش یک طرح نهان‌نگاری هوشمند ترکیبی در حوزه فرکانس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی، تبدیل کانتورلت، تبدیل تجزیه مقادیر تکین و تبدیل آرنولد برای ارتقاء همزمان این ویژگی‌ها ارائه شده است. در این روش تصویر میزبان با استفاده از تبدیل کانتورلت به حوزه فرکانسی منتقل و مقادیر بهینه ضرایب کانتورلت و ضرایب مقیاس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی انتخاب می‌گردند. برای افزایش امنیت الگوریتم پیشنهادی، تبدیل آرنولد بر روی تصویر نهان‌نگاره انجام و به فضای آمیخته منتقل می‌شود و قبل از فرایند ادغام بر روی تصویر آمیخته و ضرایب فرکانسی منتخب تبدیل تجزیه مقادیر تکین انجام می‌گردد. نتایج آزمایشات و مقایسه تحلیلی طرح پیشنهادی نشان می‌دهد که ضمن افزایش محسوس ظرفیت نهان‌نگاره، مقدار ویژگی شفافیت به مقدار قابل توجه ۷۲ دسی‌بل ارتقاء یافته است و مقاومت نیز به میزان برجسته ای در برابر ۲۰ نوع حمله متفاوت بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال، ضرایب فرکانسی بهینه، ضرایب مقیاس بهینه، تبدیل کانتورلت، الگوریتم تکامل تفاضلی.

An intelligent and robust watermarking scheme using optimal values of scaling factors and contourlet coefficients

Einolah Hatami¹, PhD student, Hamidreza Rashidy Kanan², associate professor, Kamran Layeghi³, assistant professor, and Ali Harounabadi⁴, assistant professor

1.3-Department of Computer Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2-Department of Computer Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

4-Department of Computer Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract: Scheming a digital image watermarking system with the simultaneous improvement of robustness, imperceptibility and capacity is one of the main challenges in this area. In the present paper, it is discussed a new blind and robust hybrid intelligent technique of watermarking in the frequency domain using the differential evolution algorithm, Contourlet transform, singular value decomposition (SVD) and Arnold transform to simultaneously improve these features. In this scheme, the host image is transformed to the frequency domain by applying the Contourlet transform, and the optimal values of Contourlet coefficients and scaling factors are selected using the differential evolution algorithm. To increase the security of the proposed algorithm, the watermark image was scrambled by using an Arnold transform. Then SVD transform is performed on the scrambled image and the selected frequency coefficients before the embedding process. The experimental results and the analytical comparison of the proposed scheme show that along with the good increase in the capacity of watermark, the value of imperceptibility has been increased to a noticeable amount of 72 dB, and the robustness has also been significantly improved against 20 different attacks.

Keywords: Watermarking, Contourlet Transform, Optimal frequency coefficients, Scaling Factors, Differential evolution algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

نام نویسنده مسئول: کامران لایقی

نشانی نویسنده مسئول: تهران - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه کامپیوتر.



۱- مقدمه

داده‌های چندرسانه‌ای امروزه به سرعت و به طور گسترده از طریق اینترنت به اشکال مختلف مانند تصویر، صدا، ویدئو و متن به مقصد منتقل می‌شوند. در ارتباطات دیجیتال از طریق اینترنت، همه چیز برای هر کاربر قابل مشاهده و در دسترس است. بنابراین امنیت اطلاعات به یک وظیفه ضروری و مهم بدل شده است. روش‌های زیادی برای ایجاد امنیت در تصاویر از جمله رمزگذاری^۱، پنهان‌نگاری^۲ و نهان‌نگاری^۳ وجود دارد [۱]. در رمزگذاری، با استفاده از یک کلید مخفی، تصویر، به فرم رمزگذاری شده تبدیل می‌شود و سپس تصویر رمزگذاری شده در یک ارتباط آشکار به سمت مقصد ارسال می‌شود. در پنهان‌نگاری، پیام در تصویر میزبان پنهان می‌شود تا کاربر غیرمجاز متوجه آن نشود. در نهان‌نگاری، پیام در تصویر میزبان درج شده است که ممکن است قابل مشاهده یا پنهان باشد به گونه‌ای که حذف آن توسط کاربر غیرمجاز بدون آسیب قابل توجه به تصویر میزبان غیرممکن باشد. پنهان‌نگاری، رمزنگاری و نهان‌نگاری با یکدیگر متفاوت هستند. رمزنگاری بر مخفی نگه داشتن محتوای یک پیام متمرکز است در حالی که پنهان‌نگاری بر مخفی بودن وجود یک پیام متمرکز است و نهان‌نگاری بر حفظ پیام در برابر حملات عمدی و غیرعمدی متمرکز است.

نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال یکی از روش‌های موثر برای حفاظت از کپی‌رایت، کنترل کپی، تأیید هویت و شناسایی مالکیت می‌باشد [۲]. برای پیاده‌سازی یک طرح نهان‌نگاری باید بر روی ویژگی‌های مقاومت^۴، ظرفیت^۵، شفافیت^۶ و امنیت تمرکز نمود. اغلب این نیازمندی‌ها در تضاد با یکدیگر هستند و با توجه به کاربرد می‌بایست بین آنها مصالحه نمود، به عنوان مثال افزایش ظرفیت نهان‌نگاره سبب کاهش شفافیت می‌شود، لذا تا حدی می‌توان ظرفیت را افزایش داد که شفافیت در حوزه قابل قبول باشد [۳]. در اغلب کاربردهای نهان‌نگاری، تأمین ویژگی‌های شفافیت و مقاومت بسیار حائز اهمیت است و در تضاد بودن این ویژگی‌ها سبب چالش اساسی در طراحی سامانه‌های نهان‌نگاری می‌شود. در این سامانه‌ها برای حفظ تعادل بین شفافیت و مقاومت از پارامتری به نام ضریب مقیاس^۷ استفاده می‌شود. مقدار ضریب مقیاس بین صفر و یک است که انتخاب مقدار بزرگتر برای ضریب مقیاس مقاومت را افزایش ولی شفافیت تصویر را کاهش می‌دهد و بالعکس، بنابراین برای رسیدن به حداکثر مقاومت و حداقل تخریب تصویر نهان‌نگاره شده به دست آوردن یک مقدار مناسب برای ضریب مقیاس ضروری است. مقدار مناسب ضریب مقیاس وابسته به تصویر می‌باشد. برای پیدا کردن مقدار مناسب ضریب مقیاس در سال‌های اخیر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده است [۴-۱۰].

سامانه‌های نهان‌نگاری بر اساس روش جاسازی نهان‌نگاره به دو حوزه تقسیم می‌شوند: حوزه مکان^۸ و حوزه تبدیل^۹ [۱۱]. روش‌های حوزه مکان پیام‌ها را مستقیماً در مقادیر پیکسل پنهان می‌کنند [۱۲] و پیاده‌سازی آنها آسان‌تر است [۱۳-۱۴] اما ظرفیت کمتری دارند و در برابر حملات شکننده‌تر هستند [۱۵-۱۶]. در روش‌های حوزه تبدیل،

ابتدا تصویر به حوزه فرکانس تبدیل می‌شود و سپس پیام با تغییر مقادیر ضرایب فرکانسی جاسازی می‌شود. چنین روش‌هایی دارای توانایی جاسازی اطلاعات بیشتر و همچنین در برابر حملات پردازش تصویر و دستکاری‌های مخرب مقاوم‌تر هستند [۱۵]. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در حوزه تبدیل عبارتند از تبدیل فوریه گسسته^{۱۰}، تبدیل کسینوس گسسته^{۱۱}، تبدیل موجک گسسته^{۱۲}، تبدیل موجک بالابر^{۱۳}، تبدیل کانتورلت^{۱۴}، تبدیل کانتورلت بدون نمونه^{۱۵}، تجزیه مقادیر تکین^{۱۶} و همچنین روش‌های ترکیبی حاوی تبدیل‌های چندگانه^{۱۷} در میان تکنیک‌های حوزه تبدیل محبوب هستند.

تبدیل کانتورلت توسط دو ووترلی [۱۷-۱۸] برای رفع نقایص تبدیل‌های موجک پیشنهاد شده است. تبدیل موجک دارای توانایی چند تفکیک‌پذیری، محلی بودن و نمونه برداری بحرانی است و تبدیل کانتورلت علاوه بر ویژگی‌های فوق دو ویژگی درجه بالایی از جهت‌دهی و ناهمسانگردی را نیز ارائه و مشکل اطلاعات ناکافی تبدیل موجک در ارائه اطلاعات جهت‌ی را برطرف می‌کند. تحولات موجود در تبدیل کانتورلت بازنمایی بهتری از منحنی‌ها و ویژگی‌های هندسی تصویر نسبت به تبدیل موجک ارائه می‌دهد و می‌تواند ارائه موثرتری از مرزها داشته باشد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرآیند نهان‌نگاری انتخاب مناسب محل جاسازی داده‌های نهان‌نگاره در سیگنال میزبان می‌باشد که در روش‌هایی که در حوزه تبدیل استفاده می‌شود انتخاب مناسب ضرایب فرکانسی یک عامل بسیار مهم در حفظ شفافیت تصویر نهان‌نگاره شده و افزایش قدرت مقاومت می‌باشد.

علی‌رغم پژوهش‌های فراوان در سال‌های اخیر و کسب نتایج چشم‌گیر در حوزه نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال، ولی کامل نمی‌باشند و غالباً ضمن بهبود یک ویژگی، در سایر ویژگی‌ها هنوز دچار ضعف می‌باشند. بنابراین ارائه یک طرح که بطور همزمان ویژگی‌های اصلی نهان‌نگاری را بهبود و مقاومت در برابر انواع حملات را افزایش دهد ضرورت دارد.

در این مقاله، یک روش نهان‌نگاری ترکیبی هوشمند و مقاوم تصاویر دیجیتال خاکستری ارائه شده است. یک رویکرد جدید که به طور همزمان شفافیت، مقاومت و ظرفیت را با انتخاب بهینه ضرایب کانتورلت و ضرایب مقیاس با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود بخشید. در این طرح تصویر میزبان با تبدیل کانتورلت به فضای فرکانسی تبدیل می‌شود و ضرایب کانتورلت بهینه در جهات مختلف توسط الگوریتم تکامل تفاضلی انتخاب و ماتریس ویژگی تشکیل شده است. ضرایب فرکانس در طول فرآیند بهینه‌سازی برای افزایش مقاومت در برابر حملات مختلف و افزایش شفافیت انتخاب می‌شوند سپس تصویر نهان‌نگاره از طریق تبدیل آرنولد برای امنیت بیشتر آمیخته^{۱۸} می‌شود و تبدیل تجزیه مقادیر تکین روی ماتریس ویژگی و تصویر نهان‌نگاره آمیخته انجام و تصویر نهان‌نگاره در تصویر میزبان جاسازی می‌شود. برای مصالحه مقاومت و شفافیت الگوریتم پیشنهادی، مقادیر

و تجزیه مقادیر تکین ارائه کردند. در این طرح، تصویر میزبان توسط تبدیل موجک گسسته تجزیه می‌شود و تبدیل تجزیه مقادیر تکین بر روی باندهای فرکانس پایین اعمال می‌شود. همچنین در این روش ضریب مقیاس بهینه با اعمال الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک به دست می‌آید. این طرح در برابر یک تعداد حملات محدود مقاوم است و نرخ سیگنال به نویز حدود ۵۳ دسی‌بل را ارائه می‌دهد.

مهتا و همکاران [۲۳] یک طرح نهان‌نگاری بر اساس الگوریتم‌های یادگیری ماشین در حوزه موجک پیشنهاد کردند. در این طرح، تصویر میزبان به بلوک‌های غیر همپوشانی تقسیم شده و بلوک‌های مناسب بر اساس اطلاعات آنتروپی فازی انتخاب می‌شوند. سپس تبدیل موجک بر روی آنها انجام می‌شود و ضرایب فرکانس پایین برای فرآیند ادغام انتخاب می‌شوند. مقادیر بهینه ضرایب مقیاس توسط الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. این طرح در برابر برخی حملات پردازش تصویر مقاوم است و نرخ سیگنال به نویز حدود ۴۵ دسی‌بل ارائه می‌کند، اما ظرفیت آن کم است (جاسازی یک تصویر دودویی 32×32 در یک تصویر پوششی با مقیاس خاکستری 512×512).

تاکار و همکاران [۲۴]، یک روش مبتنی بر تبدیل موجک گسسته و تجزیه مقادیر تکین برای نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال را مورد بحث قرار دادند. در این روش تبدیل تجزیه مقادیر تکین بر روی ضرایب فرکانس پایین تصویر میزبان انجام می‌شود و ضرایب مقیاس بهینه توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دست می‌آید. نتایج تجربی این طرح نشان می‌دهد که شفافیت و مقاومت تحت اکثر حملات نویز بهبود یافته است.

سیسودیه و همکاران [۲۵]، روش جدیدی را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و ماشین یادگیری حداکثر در حوزه تبدیل کسینوسی گسسته پیشنهاد کردند. تصویر پوششی ابتدا به بلاک‌های غیرهمپوشان تقسیم می‌شود و با آنتروپی شانون تحلیل می‌شود، سپس تبدیل کسینوسی گسسته روی این بلاک‌های انتخاب شده انجام می‌شود. ضرایب مقیاس توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهینه می‌شوند. این طرح مقاومت را افزایش و نرخ سیگنال به نویز را در حدود ۴۵ دسی‌بل ارائه می‌دهد و همچنین ظرفیت جاسازی یک تصویر دودویی 32×32 در یک تصویر پوششی با مقیاس خاکستری 512×512 است.

در [۲۶] عبدالعزیز و همکاران یک طرح نهان‌نگاری بر اساس تبدیل موجک بالابر و تجزیه مقادیر تکین ارائه کردند. در این طرح، تصویر پوشش با تبدیل موجک بالابر به چهار زیرباند فرعی تجزیه می‌شود، سپس تجزیه مقادیر تکین به زیرباند پایین گذر انجام می‌شود. علاوه بر این، برای بهبود امنیت، نهان‌نگاره قبل از عملیات جاسازی رمزگذاری می‌شود. برای به دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب مقیاس، از الگوریتم زنبورهای عسل مصنوعی استفاده می‌شود. این طرح نرخ سیگنال به نویز را در محدوده ۴۸ تا ۵۳ دسی‌بل داده است و در برابر

بهینه ضرایب مقیاس متفاوت با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی به دست می‌آیند.

مهمترین نوآوری‌های طرح پیشنهادی موارد زیر می‌باشد.
- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای به دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب فرکانسی و مقادیر بهینه و متفاوت ضرایب مقیاس - مصالحه و افزایش همزمان ظرفیت، شفافیت و مقاومت در طرح پیشنهادی

- استفاده از ویژگی‌های برجسته تبدیل کانتورلت از جمله جهت دهی بالا و چند تفکیک‌پذیری در فرایند انتخاب ضرایب فرکانسی ساختار مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ مروری بر کارهای پیشین ارائه شده است در بخش ۳ روش نهان‌نگاری پیشنهادی بیان شده است. نتایج آزمایشات در بخش ۴ و سرانجام نتیجه‌گیری نیز در بخش ۵ ذکر شده است.

۲- پیشینه کارهای مرتبط

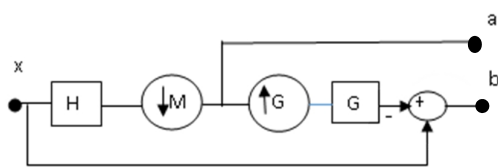
در این بخش پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه روش های نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال در حوزه فرکانس بیان می‌شود. علی و همکاران در [۱۰] یک طرح نهان‌نگاری ارائه کردند که در این طرح تصویر میزبان با استفاده از تبدیل موجک گسسته به حوزه فرکانس منتقل شده و زیر باندهای فرکانسی پایین گذر و بالا گذر از سطح سوم تبدیل موجک گسسته جهت فرآیند درج انتخاب می‌شود و مقدار بهینه ضرایب مقیاس با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی به دست می‌آید نرخ سیگنال به نویز آن پایین و در حدود ۳۵ دسی‌بل می‌باشد و ظرفیت آن کم است. (جاسازی نهان‌نگاره دودویی به اندازه 64×64 در داخل تصویر خاکستری 512×512).

ژینگ و همکاران [۱۹] برای محاسبه مقدار بهینه ضرایب مقیاس الگوریتم نهان‌نگاری پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده کردند. در این طرح جاسازی نهان‌نگاره در حوزه تبدیل با استفاده از روش تبدیل موجک گسسته و تجزیه مقادیر تکین انجام می‌گردد و میزان شفافیت آن حدود ۴۰ دسی‌بل می‌باشد. عبدالحکیم و همکاران [۲۰] یک روش نهان‌نگاری در حوزه تبدیل کسینوسی گسسته بر مبنای یادگیری ماشین برای پیدا کردن بهترین مقدار ضریب مقیاس ارائه کردند که میزان شفافیت طرح آنها نزدیک به ۴۲ دسی‌بل و مقاومت آن در برابر حملات چرخشی و فیلترینگ تصویر نیز پایین می‌باشد.

پورهادی و مهدوی‌نسب در [۲۱] یک روش نهان‌نگاری ترکیبی مبتنی بر تبدیل موجک ثابت و الگوریتم بهینه‌سازی خفاش پیشنهاد دادند. در این طرح ضریب مقیاس بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری خفاش به دست می‌آید. این تکنیک برای حملات مختلف پردازش تصویر مقاوم است و نرخ سیگنال به نویز حدود ۴۰ دسی‌بل را ارائه می‌دهد.

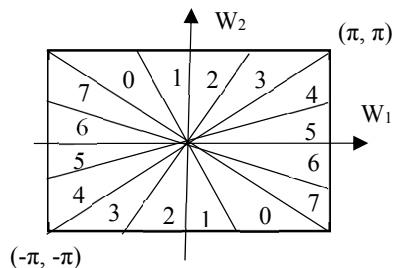
شیک و همکاران [۲۲]، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سنجاک یک طرح نهان‌نگاری ترکیبی در دامنه تبدیل موجک گسسته

بوسیله بانک فیلتر استخراج می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تجزیه هرم لاپلاس شامل تجزیه و تحلیل پایین گذر (H) و فیلترهای ساخت (G) است، که در آن هر سطح از تجزیه یک تصویر ضخمت^{۲۱} (a) و یک تصویر جزئیات^{۲۲} (b) ایجاد می‌کند [۱۷].



شکل ۱: تجزیه هرم لاپلاس

بانک فیلتر جهت‌دار شامل یک تجزیه درخت دودویی l سطحی با 2^l زیر باند است که در شکل ۲ ساختار بانک فیلتر جهت‌دار برای $l=3$ نشان داده شده است.



شکل ۲: بانک فیلتر جهت‌دار

در این مرحله از الگوریتم پیشنهادی بر روی تصویر میزبان تبدیل کانتورل در ۴ جهت و ۲ سطح انجام می‌شود.

گام ۲) تشکیل ماتریس ویژگی و انتخاب ضرایب مقیاس بهینه:

ضرایب کانتورل عمدتاً به زیر باندهای فرکانسی پایین^{۲۳}، متوسط^{۲۴} و بالا^{۲۵} دسته‌بندی می‌شوند. در این مرحله با مکانیسم هوشمندانه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی ضرایب کانتورل بهینه که باعث افزایش شفافیت و مقاومت طرح نهان‌نگاری می‌شوند انتخاب و ماتریس ویژگی تشکیل می‌گردد و همچنین ضرایب مقیاس بهینه نیز بدست می‌آید.

گام ۳) تبدیل تجزیه مقادیر تکین میزبان:

بر روی ماتریس ویژگی ($feature\ matrix_o$) ایجاد شده از مرحله قبل تبدیل تجزیه مقادیر تکین انجام می‌شود که حاصل آن براساس رابطه (۱) سه ماتریس U , S , V می‌باشد که ماتریس‌های U و V ماتریس‌های همانی و ماتریس S یک ماتریس قطری است که مقادیر تکین در مولفه‌های آن قرار گرفته است.

$$SVD(feature\ matrix_o) = U_o \times S_o \times V_o \quad (1)$$

گام ۴) تبدیل آرنولد:

برخی از انواع حملات مقاومت ایجاد می‌کند، اما برای حملات فیلتر گوسین و تیز کردن تصویر مقاومت پایین است.

در [۲۷]، یک مدل ترکیبی بر اساس تبدیل‌های چندگانه و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ارائه شده است. در این طرح، ضرایب مقیاس توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهینه‌سازی می‌شوند و تحت حملات پردازش سیگنال و هندسی مقاوم است نرخ سیگنال به نویز آن کم و در حدود ۴۱ دسی‌بل می‌باشد. علاوه بر این، ظرفیت آن نیز کم است. (جاسازی یک تصویر نهان‌نگاره دودویی 32×32 در یک تصویر میزبان با مقیاس خاکستری 1024×1024).

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی یک طرح جدید نهان‌نگاری هوشمند، شامل تبدیل کانتورل، تبدیل تجزیه مقادیر تکین، تبدیل آرنولد و الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی می‌باشد. با توجه به اینکه فرآیند ادغام در روش های نهان‌نگاری مبتنی بر فرکانس بوسیله تغییر مقادیر ضرایب فرکانسی تصویر میزبان در اثر افزودن نهان‌نگاره انجام می‌شود و حملات مختلف هندسی و غیر هندسی باعث تغییر این ضرایب می‌شود، لذا بازایی صحیح و دقیق نهان‌نگاره تحت این حملات دچار مشکل می‌شود. با این هدف برای افزایش مقاومت در مرحله ادغام باید ضرایب فرکانسی انتخاب شوند که در برابر حملات مختلف کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند و دچار تغییر می‌شوند.

در سامانه‌های نهان‌نگاری کلید موفقیت، انتخاب بهینه ضرایب فرکانسی و ضرایب مقیاس متناسب با هر تصویر می‌باشد. در طرح پیشنهادی یک الگوریتم جدید شامل مکانیسم هوشمندانه انتخاب ضرایب فرکانسی و ضرایب مقیاس مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی ارائه شده است. که در این روش جدید، بر اساس هر تصویر میزبان و متناسب با حملات مختلف، ضرایب بهینه فرکانسی با هدف افزایش مقاومت و شفافیت و همچنین ضرایب بهینه مقیاس برای بهبود و مصالحه بین این دو ویژگی بدست می‌آید. طرح پیشنهادی شامل سه فرآیند ادغام، استخراج و بهینه‌سازی است که در ادامه شرح داده می‌شوند.

۳-۱- فرآیند درج

نمودار بلوکی فرآیند درج در شکل ۴ نمایش و مراحل الگوریتم بصورت گام به گام در ادامه شرح داده شده است.

گام ۱) تبدیل کانتورل:

تبدیل کانتورل شامل یک ساختار بانک فیلتر دوگانه متشکل از هرم لاپلاس^{۲۱} و بانک فیلتر جهت‌دار^{۲۰} است. ابتدا هرم لاپلاس برای پشتیبانی از چندتفکیکی و به‌دست آوردن نقاط ناپیوستگی استفاده می‌شود، سپس از بانک فیلتر جهت‌دار برای پیوند ناپیوستگی‌های نقطه‌ای به ساختارهای خطی استفاده می‌شود. در تبدیل کانتورل در هر مرحله بوسیله تبدیل لاپلاس فرکانس‌های پایین تصویر جدا شده و به مرحله بعد فرستاده می‌شوند و لبه‌های باقی مانده عکس

$$S_{iw} = S_o + \alpha \times S_w \quad (3)$$

گام ۷) تبدیل معکوس تجزیه مقادیر تکین:

پس از اعمال رابطه (۳) و به دست آوردن ماتریس S_{iw} ، با تبدیل معکوس تجزیه مقادیر تکین، طبق رابطه (۴) ماتریس ویژگی ($feature\ matrix_{watermarked}$) بازسازی می گردد.

$$feature\ matrix_{watermarked} = U_o * S_{iw} * V_o^T \quad (4)$$

که در آن U_o و V_o ماتریس های همانی ماتریس ویژگی ضرایب کانتورلت تصویر میزبان می باشند.

گام ۸) بازسازی ضرایب کانتورلت میزبان:

ضرایب کانتورلت تصویر میزبان با توجه به مقادیر جدید ماتریس ویژگی بروز رسانی می شود.

گام ۹) بازسازی تصویر نهان نگاره شده:

با تبدیل معکوس کانتورلت بر روی مقادیر بروز رسانی شده ضرایب کانتورلت تصویر نهان نگاره شده بازسازی می شود.

۳-۲- فرایند استخراج

فرایند استخراج شامل استخراج علامت نهان نگاره از تصویر نهان نگاره شده و مقایسه آن با علامت نهان نگاره اولیه است. مراحل گام به گام الگوریتم پیشنهادی در ادامه ارائه شده است.

یکی از روش های درهم آمیختن تصویر، به ویژه برای اهداف امنیتی، استفاده از روش تبدیل آرنولد [۲۸] است. تبدیل آرنولد به عنوان یک مرحله درهم آمیزی می باشد که در آن از تعداد تکرارها به عنوان کلید استفاده می شود. در این مرحله با یک کلید مطمئن بر روی تصویر نهان نگاره تبدیل آرنولد با ۳۲ تکرار اعمال می شود و تصویر آمیخته شکل ۳-ب به دست می آید.



ب: تصویر آمیخته



الف: تصویر نهان نگاره

شکل ۳: تبدیل آرنولد بر روی تصویر نهان نگاره

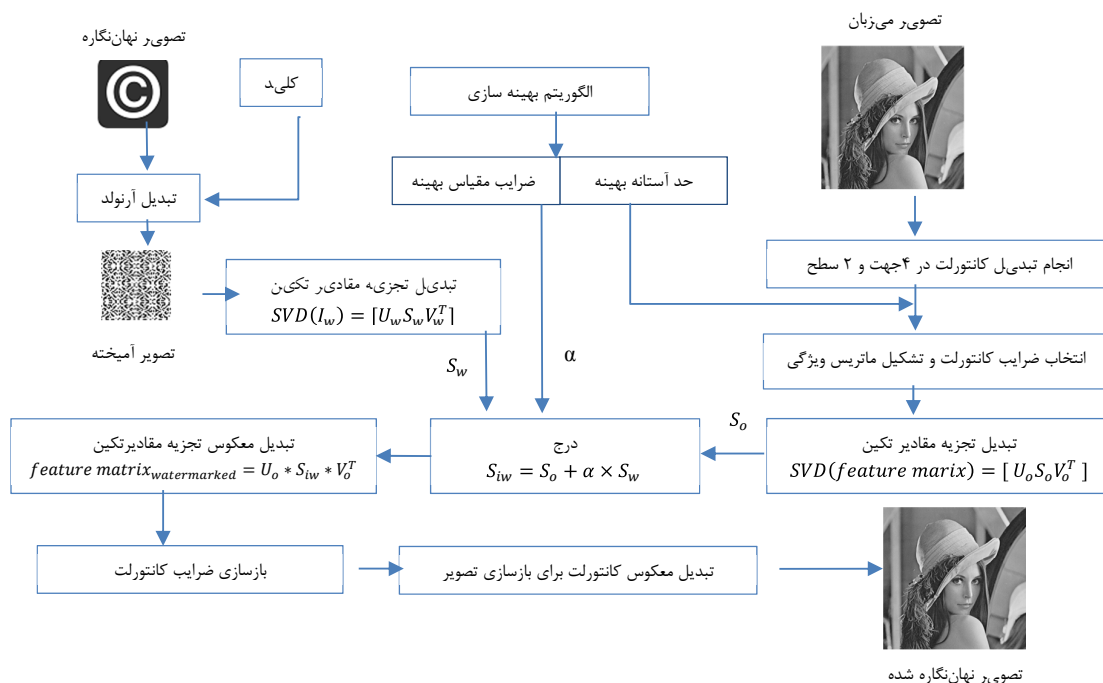
گام ۵) تبدیل تجزیه مقادیر تکین نهان نگاره:

طبق رابطه (۲) تبدیل تجزیه مقادیر تکین بر روی تصویر آمیخته (I_w) اعمال و ماتریس مقادیر تکین (S_w) به دست می آید.

$$SVD(I_w) = U_w \times S_w \times V_w \quad (2)$$

گام ۶) ادغام:

مقادیر ماتریس تکین نهان نگاره (S_w) پس از ضرب در مقادیر بهینه ضرایب مقیاس (α) به مقادیر ماتریس تکین تصویر میزبان (S_o) طبق رابطه (۳) افزوده می شود.



شکل ۴: فرایند جاسازی نهان نگاره در تصویر میزبان

(11) $I_{\text{watermark extracted}} = \text{reverse Arnold transform}$

$I_{\text{scrambled-watermark}}$

(11) **If** ($I_{\text{watermark extracted}} = I_{\text{watermark original}}$)

(12) The watermark is approved.

(13) **Else**

(14) The watermark is not approved.

(15) **End if**

Output: (matched) Yes, or (unmatched) No

۳-۳- فرآیند بهینه‌سازی

الگوریتم تکامل تفاضلی یک الگوریتم جستجوی فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که با بهبود مکرر یک راه حل کاندید بر اساس یک روند تکاملی، مسئله را بهینه می‌کند. این الگوریتم برای مسائل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته معرفی شده است و دارای مزیت‌های زیادی از جمله سادگی، همگرایی سریع، پارامترهای کم و توانایی حل مسائل غیر خطی مشتق‌ناپذیر می‌باشد. مراحل اصلی الگوریتم شامل ایجاد جمعیت اولیه، جهش، ادغام و انتخاب است [۲۹]. در طرح پیشنهادی از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی برای یافتن مقادیر بهینه ضرایب فرکانسی و ضرایب مقیاس استفاده شده است که در ادامه مراحل آن شرح داده می‌شود. گام (۱) هر عضو جمعیت مانند شکل ۵ یک بردار ۶۸ عنصری می‌باشد که ۴ عنصر اول آن مربوط به مقدار حد آستانه ضرایب کانتورلت در ۴ زیر باند فرکانسی و همچنین ۶۴ مولفه بعدی مربوط به ضرایب مقیاس می‌باشد که بصورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود.

β_1	β_2	β_3	β_4	α_1	α_2	...	α_{63}	α_{64}
-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	-----	---------------	---------------

شکل ۵: یک عضو جمعیت

گام (۲) مقدار شایستگی اعضای جمعیت براساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود و شبه کد تابع شایستگی روش پیشنهادی در الگوریتم ۲ نمایش داده شده است.

$$Fitness(X) = W_i * PSNR + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{attacki} NC_{attacki} \quad (6)$$

که در رابطه (۶)، PSNR، نرخ سیگنال به نویز^{۲۶} و بیانگر مقدار شفافیت است و براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2 \times H \times W}{\sum_{i=0}^{h-1} \sum_{j=0}^{w-1} (I(i,j) - I_w(i,j))^2} \quad (7)$$

که در آن $I(i,j)$ و $I_w(i,j)$ به ترتیب مقدار شدت روشنایی سطح خاکستری تصویر اولیه و تصویر نهان‌نگاری شده در مکان‌های (i,j) است و H و W ابعاد تصویر می‌باشند و برای محاسبه مقاومت الگوریتم پیشنهادی از ضریب همبستگی نرمال شده براساس رابطه زیر تعریف می‌شود.

گام (۱) تبدیل کانتورلت:

بر روی تصویر دریافتی تبدیل کانتورلت انجام می‌شود و با توجه به کلید، ضرایب کانتورلت مشارکت‌کننده در فرآیند ادغام انتخاب و ماتریس ویژگی تشکیل می‌شود.

گام (۲) تبدیل تجزیه مقادیر تکین:

بر روی ماتریس ویژگی استخراج شده از مرحله قبل تبدیل تجزیه مقادیر تکین انجام می‌شود.

گام (۳) استخراج مقادیر نهان‌نگاره درج شده در میزبان:

باتوجه به کلید، مقادیر افزوده شده به مقادیر تکین از ماتریس ویژگی استخراج و ماتریس S_w بازسازی می‌شود.

گام (۴) بازسازی تصویر آمیخته:

با کمک کلید و تبدیل معکوس تجزیه مقادیر تکین، تصویر آمیخته بازسازی و تولید می‌شود.

$$I_W = U_w * S_w * V_w^T \quad (5)$$

که در آن U_w و V_w ماتریس‌های همانی مربوط به تصویر نهان‌نگاره است.

گام (۵) بازسازی تصویر نهان‌نگاره:

با کمک کلید و با تبدیل معکوس آرنولد، تصویر نهان‌نگاره بازسازی می‌شود.

گام (۶) مقایسه نهان‌نگاره استخراج شده و اولیه:

تصویر نهان‌نگاره استخراج شده با تصویر نهان‌نگاره اولیه مقایسه و در صورت تطابق تأیید و در غیر اینصورت نهان‌نگاری تأیید نمی‌شود.

شبه کد فرآیند استخراج در الگوریتم (۱) نمایش داده شده است.

الگوریتم ۱. شبه کد فرآیند استخراج

Input: I (received image), Key (secret key)

(1) Done CNT on Image I in 2 levels and 4 directions

(2) **For each** contourlet coefficient i of direction B_i

(3) **If** contourlet coefficient i participating in embedding process based on the Embedding algorithm

(4) $feature\ matrix \leftarrow contourlet\ coefficient\ i$

(5) **End if**

(6) **End for**

(7) $[U_o S_o V_o^T] = SVD(feature\ matrix)$

(8) Extract singular value matrix watermark (S_w) from singular value (S_o) using Key

(10) scrambled image reconstructs by inverse SVD

$$I_{\text{scrambled-watermark}} = U_w * S_w * V_w^T$$

(10) original watermark image reconstructs by inverse Arnold transform using Key

۴- آزمایشات و مشاهدات

آزمایش‌ها بر روی سیستم با پردازنده Core i5 و ۸ گیگابایت حافظه اصلی انجام شده است. برای ارزیابی روش پیشنهادی از تصاویر سطح خاکستری با ابعاد 256×256 به عنوان تصاویر میزبان و تصویر خاکستری با ابعاد 64×64 به عنوان نهان‌نگاره استفاده شده است. ۶ تصویر میزبان و تصویر نهان‌نگاره در شکل ۶ نمایش داده شده است.



ب



الف



ت



پ



ج



ث



چ

شکل ۶: تصاویر پوشش (الف، ب، پ، ت، ج) و تصویر نهان‌نگاره (چ) مورد استفاده برای آزمایش‌ها.

الگوریتم نهان‌نگاری پیشنهادی بر اساس ۳ پارامتر شفافیت، مقاومت و ظرفیت ارزیابی شده است.

۴-۱- شفافیت:

شفافیت به شباهت بین تصویر اصلی و تصویر نهان‌نگاره شده اشاره دارد. نسبت نرخ سیگنال به نویز که یک معیار کمی است غالباً برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده می‌شود. هر چه مقدار آن بیشتر باشد، الگوریتم از نظر شفافیت قدرتمندتر است. در این آزمایش، تصویر نهان‌نگاره در تصاویر میزبان ذکر شده در شکل ۶ درج و سپس مقدار نرخ سیگنال به نویز آنها بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود که مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است.

$$NCC(Wo, We) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Wo(i, j) - Mo)(We(i, j) - Me)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Wo(i, j) - Mo)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (We(i, j) - Me)^2}} \quad (8)$$

Wo و We مقادیر شدت روشنایی در مکان‌های (i, j) از نهان‌نگاره درج شده و استخراج شده می‌باشد و Mo و Me مقدار میانگین نهان‌نگاره قبل و پس از استخراج از تصویر دریافتی است. m و n ابعاد تصویر نهان‌نگاره می‌باشند.

الگوریتم ۲: شبه کد تابع شایستگی

Input: I(cover image), W(watermark logo), individual i

- (1) Embedding a Watermark image in the cover image based on individual parameter i and generate
- (2) Watermarked image as Iw
- (3) Evaluate The PSNR value between cover image and watermarked image as PSNRi
- (4) Sum=0
- (5) N indicate number of attack
- (6) W_{attacki} indicate the weight of attack i, w₁ indicate the weight of imperceptibility
- (7) **For each attack**
 - (8) Do attack on Iw as I_{WN}
 - (9) Extract watermark logo from I_{WN} as I_{WE}
 - (10) Calculate normalized correlation coefficient between Iw and I_{WE} as NC_i
 - (11) Sum = Sum + (W_{attacki} × NC_i)

(12) **End for**

$$(13) \text{ Fitness value} = w_1 \times \text{PSNR} + \frac{1}{N} \text{ Sum}$$

Output: Fitness for individual

گام ۳) برای هر یک از اعضای جمعیت عملیات جهش و ادغام انجام و بردار موقت ایجاد و سپس مقدار شایستگی آن محاسبه می‌گردد.

گام ۴) بردار موقت به‌دست آمده از مرحله قبل و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شده بود، بر اساس میزان شایستگی با یکدیگر مقایسه می‌شود و در صورتی که بردار موقت، ارزشی بیش از عضو هدف داشته باشد، یکی از اعضای نسل بعد قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، عضو هدف خود یکی از جمعیت نسل بعد می‌شود.

گام ۵) در طرح پیشنهادی شرایط خاتمه رسیدن به تعداد مشخص ۵۰ تکرار در نظر گرفته شده است که پس از احصاء شرایط خاتمه و توقف الگوریتم، بهترین عضو جمعیت که دارای بهترین مقدار شایستگی است به عنوان پاسخ بهینه در فرآیند ادغام استفاده می‌شود.

بیتی به عدد صفر نزدیک باشد مقاومت زیاد است. مقدار ضریب همبستگی نرمال‌شده و نرخ خطای بیتی توسط روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود.

$$BER = \frac{\text{Total number of bit errors}}{\text{Total number of bit received}} \quad (9)$$

که در آن $\text{Total number of bit errors}$ تعداد بیت‌های خطای نهان‌نگاره استخراج شده و $\text{Total number of bit received}$ تعداد کل بیت‌های نهان‌نگاره می‌باشد.

برای ارزیابی میزان مقاومت الگوریتم پیشنهادی، تصویر نهان‌نگاره شده تحت حملات نویزی شامل نویز فلفل و نمک و نویز گوسین با چگالی و واریانس‌های متفاوت، حملات تیزسازی و چرخش تصویر، حملات فیلترینگ تصویر شامل گوسین، میانگین، میانه و همچنین فشردن‌سازی تصویر با کیفیت‌های مختلف قرار می‌گیرید. سپس تصویر نهان‌نگاره از آن استخراج و میزان مقاومت در برابر حملات ارزیابی و محاسبه می‌شود که نتایج آنها در جداول ۳ تا ۶ بیان شده است. با یک بررسی مقادیر ضریب همبستگی نرمال‌شده و نرخ خطای بیتی در این جداول مشاهده می‌گردد که مقاومت طرح پیشنهادی در برابر حملات مختلف حفظ شده است.

برای مقایسه، روش پیشنهادی با سایر طرح‌های معروف که در آنها نیز از تصاویر خاکستری به عنوان تصویر میزبان استفاده شده است ما روش‌های [۱۵]، [۲۷] و [۳۳] را انتخاب کردیم. مقادیر ضریب همبستگی نرمال‌شده در جدول ۷ برای تصاویر لنا و پپر می‌باشد.

براساس نتایج جدول ۷ مقدار مقاومت طرح پیشنهادی در برابر حملات نویزی فلفل و نمک با چگالی ۰/۰۱ و گوسین با واریانس‌های ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ بر سایر طرح‌ها غلبه دارد. در برابر حمله فیلتر گوسین مرجع [۳۳] و تیزسازی تصویر مرجع [۲۷] و [۳۳] مقاومت آن از روش پیشنهادی و سایر طرح‌ها بهتر است ولی در برابر حملات فیلتر میانگین با پنجره (۳ × ۳) و میانه با پنجره‌های (۵ × ۵) و (۳ × ۳) طرح پیشنهادی از سایر طرح‌ها بهتر است همچنین در حملات فشردن‌سازی نیز در کیفیت‌های ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۵۰ مقدار ضریب همبستگی نرمال‌شده طرح پیشنهادی بالاتر از سایر طرح‌ها است. انتخاب بهینه ضرایب کانتورلت، ضرایب مقیاس و استفاده از مقادیر تکین حاصل از تبدیل تجزیه مقادیر تکین در این بهبود موثر بوده است.

چنانچه در جدول ۱ نمایش داده شده است مقدار نرخ سیگنال به نویز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

جدول ۱: مقادیر نرخ سیگنال به نویز تصاویر نهان‌نگاره‌شده

تصویر نهان‌نگاره شده	مقدار نرخ سیگنال به نویز
باربارا	۶۹/۵۴ دسی‌بل
پپر	۷۲/۰۲ دسی‌بل
لنا	۷۰/۷۶ دسی‌بل
کمران	۶۹/۰۴ دسی‌بل
بوت	۷۰/۸۷ دسی‌بل
جت پلن	۷۱/۲۱ دسی‌بل

در جدول ۲ مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های [۱۵]، [۲۷]، [۳۱] و [۳۳] برای تصاویر باربارا، لنا، بوت^{۲۷} و پپر^{۲۸} ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول نمایش داده شده است مقدار نرخ سیگنال به نویز در روش پیشنهادی بر سایر طرح‌ها غلبه می‌کند و به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است که این افزایش به دلیل انتخاب بهینه و هوشمندانه ضرایب فرکانسی مناسب با هر تصویر میزبان، انتخاب بهینه و متفاوت ضرایب مقیاس مطابق با مقادیر اطلاعات تصویر نهان‌نگاره که باید در تصویر میزبان جاسازی شود و استفاده از قابلیت برجسته تبدیل کانتورلت در شناسایی نقاط لبه در جهات مختلف می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه ویژگی شفافیت طرح پیشنهادی با سایر طرح‌ها برای تصاویر باربارا، لنا، بوت و پپر بر اساس نرخ سیگنال به نویز

تصاویر / روش‌ها	[۱۵]	[۳۱]	[۲۷]	[۳۳]	روش پیشنهادی
باربارا	۵۴/۴۷	-	۴۳/۸۵	۳۸/۸۴	۶۹/۵۴
لنا	۵۳/۹۰	۵۲/۳۲	۴۱/۹۷	۳۸/۸۸	۷۰/۷۶
بوت	۵۴/۱۲	۵۱/۳۳	۴۰/۸۰	۳۸/۸۰	۷۰/۸۷
پپر	۵۴/۵۷	۵۱/۲۰	۴۳/۱۱	۳۸/۹۷	۷۲/۰۲

۴-۲- مقاومت

برای ارزیابی میزان مقاومت الگوریتم نهان‌نگاری پیشنهادی از دو روش ضریب همبستگی نرمال‌شده و نرخ خطای بیتی استفاده شده است. هر چه مقدار ضریب همبستگی نرمال‌شده به عدد یک و مقدار نرخ خطای

جدول ۳: مقدار ضریب همبستگی و نرخ خطای بیتی تحت حملات مختلف نویز

حملات / تصاویر	گوسین (میانگین=۰، واریانس=۰/۰۱)		گوسین (میانگین=۰، واریانس=۰/۰۱)		فلفل و نمک (چگالی=۰/۰۰۱)		فلفل و نمک (چگالی=۰/۰۱)		فلفل و نمک (چگالی=۰/۰۱)	
	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی
باربارا	۰/۰۶۸۶	۰/۹۹۴۷	۰/۰۷۹۳	۰/۹۶۸۴	۰/۰۶۲۳	۰/۹۹۷۸	۰/۰۶۶۹	۰/۹۹۷۵	۰/۰۷۴۳	۰/۹۷۹۹
بوت	۰/۰۷۱۳	۰/۹۹۱۸	۰/۰۸۱۱	۰/۹۷۸۶	۰/۰۶۹۵	۰/۹۹۶۱	۰/۰۷۵۹	۰/۹۹۸۱	۰/۰۷۸۲	۰/۹۷۶۵
پپر	۰/۰۷۰۸	۰/۹۹۱۵	۰/۰۸۰۳	۰/۹۷۲۹	۰/۰۶۷۸	۰/۹۹۷۵	۰/۰۶۳۸	۰/۹۹۳۱	۰/۰۷۵۱	۰/۹۷۲۱
کمران	۰/۰۶۹۹	۰/۹۹۳۴	۰/۰۸۲۳	۰/۹۵۰۲	۰/۰۶۸۳	۰/۹۹۶۷	۰/۰۶۸۷	۰/۹۹۹۳	۰/۰۸۱۴	۰/۹۶۹۴

لنا	۰/۹۶۴۷	۰/۰۸۲۶	۰/۹۸۸۴	۰/۰۶۸۸	۰/۹۹۸۷	۰/۰۶۸۲	۰/۹۳۵۴	۰/۰۸۳۶	۰/۹۹۴۱	۰/۰۶۸۵
جت پلن	۰/۹۶۰۴	۰/۰۷۸۷	۰/۹۹۹۴	۰/۰۷۲۶	۰/۹۹۶۲	۰/۰۶۵۴	۰/۹۴۴۸	۰/۰۸۰۷	۰/۹۹۴۲	۰/۰۶۵۷

جدول ۴: مقدار ضریب همبستگی و نرخ خطای بیتی تحت حملات مختلف فیلترینگ تصویر

حملات / تصاویر	فیلتر گوسین (اندازه=۳×۳)		فیلتر گوسین (اندازه=۵×۵)		فیلتر میانه (اندازه=۳×۳)		فیلتر میانه (اندازه=۵×۵)		فیلتر میانگین (اندازه=۳×۳)	
	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی
باربارا	۰/۰۷۳۹	۰/۹۶۶۱	۰/۰۸۲۰	۰/۹۹۴۷	۰/۰۷۵۵	۰/۹۹۴۲	۰/۰۷۱۵	۰/۹۹۰۲	۰/۰۷۶۱	۰/۹۶۷۶
بوت	۰/۰۷۶۹	۰/۹۵۷۱	۰/۰۸۰۱	۰/۹۹۴۱	۰/۰۷۶۶	۰/۹۹۸۵	۰/۰۸۵۳	۰/۹۹۶۴	۰/۰۷۴۳	۰/۹۷۰۵
پپرز	۰/۰۷۲۱	۰/۹۹۷۱	۰/۰۸۰۲	۰/۹۹۴۳	۰/۰۸۸۵	۰/۹۹۷۹	۰/۰۶۸۶	۰/۹۹۴۳	۰/۰۷۶۱	۰/۹۶۴۲
کمرامن	۰/۰۷۵۷	۰/۹۶۱۶	۰/۰۷۸۶	۰/۹۹۹۶	۰/۰۹۶۳	۰/۹۹۴۷	۰/۰۷۸۲	۰/۹۹۳۲	۰/۰۸۶۹	۰/۹۷۵۳
لنا	۰/۰۷۸۹	۰/۹۹۷۳	۰/۰۷۷۳	۰/۹۹۶۵	۰/۰۷۴۳	۰/۹۹۲۰	۰/۰۷۶۹	۰/۹۹۸۴	۰/۰۸۶۴	۰/۹۷۲۶
جت پلن	۰/۰۷۸۷	۰/۹۵۳۳	۰/۰۸۱۸	۰/۹۸۹۹	۰/۰۸۰۴	۰/۹۹۹۲	۰/۰۸۸۳	۰/۹۹۸۲	۰/۰۷۷۵	۰/۹۷۵۲

جدول ۵: مقدار ضریب همبستگی و نرخ خطای بیتی تحت حملات مختلف فشرده سازی

حملات / تصاویر	جی پیگ (کیفیت=۵۰)		جی پیگ (کیفیت=۴۰)		جی پیگ (کیفیت=۳۰)		جی پیگ (کیفیت=۲۰)		جی پیگ (کیفیت=۱۰)	
	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی
باربارا	۰/۰۷۱۴	۰/۹۹۸۳	۰/۰۷۸۴	۰/۹۹۲۹	۰/۰۷۷۹	۰/۹۹۷۱	۰/۰۷۶۵	۰/۹۸۸۷	۰/۰۷۶۴	۰/۹۷۷۶
بوت	۰/۰۷۳۱	۰/۹۹۹۷	۰/۰۷۹۱	۰/۹۹۱۳	۰/۰۷۹۶	۰/۹۹۳۴	۰/۰۷۶۷	۰/۹۸۸۹	۰/۰۷۶۳	۰/۹۸۸۵
پپرز	۰/۰۶۵۱	۰/۹۹۹۴	۰/۰۷۸۱	۰/۹۹۵۲	۰/۰۷۹۷	۰/۹۹۴۵	۰/۰۷۷۳	۰/۹۸۳۱	۰/۰۷۵۶	۰/۹۸۲۱
کمرامن	۰/۰۶۸۹	۰/۹۹۸۹	۰/۰۷۷۹	۰/۹۹۳۵	۰/۰۷۸۳	۰/۹۹۵۸	۰/۰۷۸۹	۰/۹۹۲۲	۰/۰۷۵۳	۰/۹۸۲۳
لنا	۰/۰۸۱۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۸۰۵	۰/۹۹۱۶	۰/۰۷۹۲	۰/۹۹۵۳	۰/۰۷۹۵	۰/۹۸۸۷	۰/۰۷۸۰	۰/۹۷۵۲
جت پلن	۰/۰۷۵۳	۰/۹۹۷۲	۰/۰۷۹۳	۰/۹۹۱۲	۰/۰۷۸۴	۰/۹۹۶۲	۰/۰۷۶۲	۰/۹۹۱۶	۰/۰۸۰۷	۰/۹۸۱۵

جدول ۶: مقدار ضریب همبستگی و نرخ خطای بیتی تحت حملات مختلف جرخش و تیزسازی تصویر

حملات / تصاویر	تیزسازی		چرخش (زاویه=۵۰)		چرخش (زاویه=۷۰)		چرخش (زاویه=۴۵)		چرخش (زاویه=۵)	
	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی	نرخ خطای بیتی	ضریب همبستگی
باربارا	۰/۰۸۲۴	۰/۹۷۵۴	۰/۰۷۴۱	۰/۹۸۴۳	۰/۰۷۵۴	۰/۹۸۳۱	۰/۰۸۰۲	۰/۹۹۵۷	۰/۰۷۳۲	۰/۹۸۴۳
بوت	۰/۰۷۴۳	۰/۹۸۹۳	۰/۰۷۵۴	۰/۹۹۱۱	۰/۰۷۴۳	۰/۹۸۱۴	۰/۰۷۵۳	۰/۹۹۷۳	۰/۰۷۵۶	۰/۹۸۷۱
پپرز	۰/۰۶۸۷	۰/۹۸۷۲	۰/۰۸۴۱	۰/۹۸۷۱	۰/۰۷۷۵	۰/۹۹۱۲	۰/۰۷۳۵	۰/۹۸۸۹	۰/۰۸۰۲	۰/۹۸۸۱
کمرامن	۰/۰۸۱۹	۰/۹۹۷۵	۰/۰۷۲۹	۰/۹۸۶۱	۰/۰۸۲۳	۰/۹۸۷۳	۰/۰۷۸۹	۰/۹۹۳۲	۰/۰۷۴۲	۰/۹۹۰۵
لنا	۰/۰۸۰۱	۰/۹۹۷۷	۰/۰۸۲۳	۰/۹۸۵۶	۰/۰۸۰۶	۰/۹۷۹۴	۰/۰۷۵۲	۰/۹۸۵۳	۰/۰۷۱۸	۰/۹۸۲۵
جت پلن	۰/۰۷۵۹	۰/۹۸۶۴	۰/۰۷۳۲	۰/۹۸۲۲	۰/۰۷۰۸	۰/۹۸۷۶	۰/۰۶۹۲	۰/۹۹۲۱	۰/۰۷۰۸	۰/۹۸۶۲

جدول ۷: مقایسه ویژگی مقاومت طرح پیشنهادی با سایر طرح های معروف برای تصاویر لننا و پپرز بر اساس معیار ضریب همبستگی نرمال شده

روش ها / حملات	پپرز					لنا				
	[۱۵]	[۳۳]	[۲۷]	روش پیشنهادی	[۱۵]	[۳۳]	[۲۷]	روش پیشنهادی	نویز فلفل و نمک (چگالی=۰/۰۰۱)	نویز گوسین (میانگین=۰، واریانس=۰/۰۱)
	۰/۹۹۴۲	۰/۹۲۷۹	-	۰/۹۹۷۵	۰/۹۹۰۳	۰/۹۳۱۷	۰/۸۵۱۸	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۴۲	۰/۹۹۸۷
	-	-	۰/۷۵۷۷	۰/۹۷۲۹	-	-	۰/۷۳۶۴	۰/۹۲۵۴	۰/۹۲۵۴	۰/۹۲۵۴
	۰/۹۸۴۳	۰/۹۷۷۳	-	۰/۹۹۱۵	۰/۹۶۸۴	۰/۹۸۴۲	-	۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۴۱	۰/۹۹۴۱
	۰/۹۸۵۸	۱	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۳۹	۰/۹۸۷۰	۱	۰/۹۶۷۶	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۸۴

۰/۹۸۱۸	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۷۹	۰/۹۸۷۰	۰/۹۹۰۹	۰/۹۸۹۳	۰/۹۹۲۰	فیلتر میانه (اندازه=۳×۳)
۰/۹۶۲۶	-	۰/۸۰۷۲	۰/۹۹۴۳	۰/۹۵۰۰	-	۰/۷۴۰۴	۰/۹۹۶۵	فیلتر میانه (اندازه=۵×۵)
-	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۲۳	۰/۹۹۷۱	۰/۹۴۹۶	۰/۹۹۳۲	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۷۳	فیلتر میانگین (اندازه=۳×۳)
۰/۹۵۹۸	-	۰/۶۵۳۷	۰/۹۸۰۳	۰/۹۴۹۸	-	۰/۶۹۲۰	۰/۹۷۵۲	جی پیگ (کیفیت=۱۰)
۰/۹۷۱۰	-	۰/۸۹۴۲	۰/۹۸۲۸	۰/۹۷۰۰	-	۰/۷۳۲۰	۰/۹۸۸۷	جی پیگ (کیفیت=۲۰)
۰/۹۷۷۵	-	۰/۹۷۳۹	۰/۹۹۴۵	۰/۹۷۷۱	-	۰/۸۴۴۴	۰/۹۹۵۳	جی پیگ (کیفیت=۳۰)
۰/۹۸۱۰	-	۰/۹۹۰۳	۰/۹۹۵۲	۰/۹۸۰۸	-	۰/۸۹۵۰	۰/۹۹۱۶	جی پیگ (کیفیت=۴۰)
۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۸۶	۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۹۴	۰/۹۸۳۱	۰/۹۸۱۸	۰/۹۳۷۱	۰/۹۹۹۷	جی پیگ (کیفیت=۵۰)
۰/۹۷۱۵	۱	۱	۰/۹۸۷۵	۰/۹۲۷۰	۱	۱	۰/۹۷۹۷	تیزسازی

۴-۳- ظرفیت

ظرفیت نهان‌نگاره در واقع ارزیابی مقدار اطلاعات پنهان شده در یک تصویر دیجیتالی است [۳۴]. مقایسه بین طرح پیشنهادی و سایر طرح‌ها از نظر ظرفیت و نوع تصویر نهان‌نگاره استفاده شده در هر روش، در جدول ۸ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول می‌توان استنباط کرد ظرفیت طرح پیشنهادی بیشتر از مواردی است که در سایر مراجع [۲۰]، [۲۷]، [۳۰]، [۳۳، ۳۲] و [۳۵] ارائه شده است.

در طرح‌های نهان‌نگاری تصاویر دیجیتال، شفافیت و ظرفیت نسبت به یکدیگر ارتباط عکس دارند، بدین معنا که افزایش ظرفیت باعث کاهش شفافیت و بالعکس می‌گردد. مطابق با نتایج جداول ۲ و ۸ ویژگی‌های ظرفیت و شفافیت در این پژوهش همزمان به دلیل استفاده از ویژگی‌های برجسته تبدیل کانتورلت، تبدیل تجزیه مقادیر تکین و انتخاب مقادیر بهینه ضرایب مقیاس همزمان بهبود یافته است.

جدول ۸: مقایسه پارامترهای ظرفیت و شفافیت طرح پیشنهادی و

سایر طرح‌ها		
روش‌ها	نوع تصویر نهان‌نگاره	نسبت ظرفیت (نهان‌نگاره / میزبان)
روش پیشنهادی	خاکستری	۱/۴
روش [۲۰]	باینری	۱/۸
روش [۳۲]	باینری	۱/۱۶
روش [۳۰]	باینری	۱/۱۶
روش [۳۳]	باینری	۱/۱۶
روش [۳۵]	خاکستری	۱/۱۶
روش [۲۷]	باینری	۱/۳۲

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش جدید برای بهبود و ارتقاء ویژگی‌های اصلی سامانه نهان‌نگاری شامل شفافیت، مقاومت، ظرفیت و امنیت ارائه شده است. آزمایش‌های انجام‌شده، ثابت کرده است که نهان‌نگاری یک تصویر دیجیتال 64×64 خاکستری در یک تصویر خاکستری 256×256 با استفاده از روش پیشنهاد شده، موجب بهبود ویژگی‌های مذکور شده است.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به‌دلیل بهره‌گیری از ویژگی‌های برجسته تبدیل کانتورلت یعنی درجه بالایی از جهت‌دهی و چند تفکیک‌پذیری و همچنین انتخاب بهینه ضرایب کانتورلت و ضرایب مقیاس توسط الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی و استفاده از مقادیر تکین تصویر میزبان و نهان‌نگاره در فرآیند جاسازی دارای ویژگی شفافیت سطح بالایی در مقایسه با سایر پژوهش‌های انجام شده است و همچنین در برابر حملات مختلف نویز فلفل و نمک، نویز گوسین، فشرده‌سازی تصویر، فیلترینگ تصویر (میانه، میانگین، گوسین)، تیزسازی تصویر و چرخش دارای مقدار مطلوب مقاومت می‌باشد و به دلیل انجام تبدیل آرنولد بر روی نهان‌نگاره و تولید یک کلید منحصر به‌فرد که برگرفته از تمامی مراحل جاسازی می‌باشد دارای امنیت سطح بالایی است و میزان ظرفیت را ضمن افزایش شفافیت به میزان قابل توجهی بهبود داده است.

در روش پیشنهادی به‌دلیل استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب کانتورلت و ضرایب مقیاس در مقایسه با روش‌هایی که در آنها از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده نشده است، زمان اجرای الگوریتم اندکی افزایش یافته است. بنابراین در کارهای آینده می‌توان پیچیدگی زمان اجرا را بهبود داد و با توجه بیشتر به الگوریتم بهینه‌سازی پارامتر مقاومت را در برابر سایر حملات نیز بهینه تر کرد.

مراجع

- [1] Razzaq, Mirza Abdur, Riaz Ahmed Shaikh, Mirza Adnan Baig, and Ashfaque Ahmed Memon. "Digital image security: Fusion of encryption, steganography and watermarking." International Journal of Advanced Computer Science and Applications 8, no. 5 2017.
- [2] Yusof, Yusnita, and Othman O. Khalifa. "Digital watermarking for digital images using wavelet transform." In 2007 IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, pp. 665-669. IEEE, 2007.
- [3] Lin, Y-T., C-Y. Huang, and Greg C. Lee. "Rotation, scaling, and translation resilient watermarking for images." IET Image Processing, vol. 5, no. 4, pp. 328-340, 2011.
- [4] Hatami, Einollah, Hamidreza Rashidy Kanan, Kamran Layeghi, and Ali Harounabadi. "An optimized robust and invisible digital image watermarking scheme in Contourlet domain for protecting rightful ownership." Multimedia Tools and Applications, pp.1-31, 2022.

- [21] Pourhadi, Ali, and Homayoun Mahdavi-Nasab. "A robust digital image watermarking scheme based on bat algorithm optimization and SURF detector in SWT domain." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 29, pp. 21653-21677, 2020.
- [22] Shaik, Ayesha, and V. Masilamani. "A novel digital watermarking scheme using dragonfly optimizer in transform domain." *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, pp. 106923, 2021.
- [23] Mehta, Rajesh, Keshav Gupta, and Ashok Kumar Yadav. "An adaptive framework to image watermarking based on the twin support vector regression and genetic algorithm in lifting wavelet transform domain." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 25, pp. 18657-18678, 2020.
- [24] Thakkar, Falgun, and Vinay Kumar Srivastava. "An adaptive, secure and imperceptible image watermarking using swarm intelligence, Arnold transform, SVD and DWT." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 8, pp. 12275-12292, 2021.
- [25] Sisaudia, Varsha, and Virendra P. Vishwakarma. "Copyright protection using KELM-PSO based multi-spectral image watermarking in DCT domain with local texture information based selection." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 6, pp. 8667-8688, 2021.
- [26] Abdulazeez, A. Mohsin, Dilan M. Hajy, Diyar Qader Zeebaree, and D. Asaad Zebari. "Robust watermarking scheme based LWT and SVD using artificial bee colony optimization." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 21, no. 2, pp. 1218-1229, 2021.
- [27] Kang, Xiaobing, Yajun Chen, Fan Zhao, and Guangfeng Lin. "Multi-dimensional particle swarm optimization for robust blind image watermarking using intertwining logistic map and hybrid domain." *Soft Computing*, vol. 24, no. 14, pp. 10561-10584, 2020.
- [28] Min, Li, Liang Ting, and He Yu-jie. "Arnold transform based image scrambling method." In *3rd International Conference on Multimedia Technology (ICMT-13)*, pp. 1302-1309. Atlantis Press, 2013.
- [29] Storn, Rainer, and Kenneth Price. "Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces." *Journal of global optimization* 11, no. 4 (1997): 341.
- [30] Fan, Di, Ying Wang, and Chunwei Zhu. "A blind watermarking algorithm based on adaptive quantization in Contourlet domain." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 7, pp. 8981-8995, 2019.
- [31] Salehnia, Taybeh, and Abdolhossein Fathi. "Fault tolerance in LWT-SVD based image watermarking systems using three module redundancy technique." *Expert Systems with Applications*, vol. 179, pp. 115058, 2021.
- [32] Tian, Cheng, Ru-Hong Wen, Wei-Ping Zou, and Li-Hua Gong. "Robust and blind watermarking algorithm based on DCT and SVD in the contourlet domain." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 11, pp. 7515-7541, 2020.
- [33] Kazemivash, Behnam, and Mohsen Ebrahimi Moghaddam. "A predictive model-based image watermarking scheme using regression tree and firefly algorithm." *Soft Computing*, vol. 22, no. 12, pp. 4083-4098, 2018.
- [34] Najafi, Esmaeil, and Khaled Loukhaoukha. "Hybrid secure and robust image watermarking scheme based on SVD and sharp frequency localized contourlet transform." *Journal of information security and applications*, vol. 44, pp. 144-156, 2019.
- [35] Wu, Jun-Yun, Wei-Liang Huang, Wei-Ming Xia-Hou, Wei-Ping Zou, and Li-Hua Gong. "Imperceptible digital watermarking scheme combining 4-level discrete wavelet transform with singular value decomposition." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 31, pp. 22727-22747, 2020.
- [5] Papakostas, George A., E. D. Tsougenis, and Dimitris E. Koulouriotis. "Moment-based local image watermarking via genetic optimization." *Applied Mathematics and Computation*, vol. 227, pp. 222-236, 2014.
- [6] Tsai, Hung-Hsu, Yen-Shou Lai, and Shih-Che Lo. "A zero-watermark scheme with geometrical invariants using SVM and PSO against geometrical attacks for image protection." *Journal of Systems and Software*, vol. 86, no. 2, pp. 335-348, 2013.
- [7] Abdelhakim, Assem Mahmoud, Hassan Ibrahim Saleh, and Amin Mohamed Nassar. "A quality guaranteed robust image watermarking optimization with Artificial Bee Colony." *Expert Systems with Applications*, vol. 72, pp. 317-326, 2017.
- [8] Ansari, Irshad Ahmad, Millie Pant, and Chang Wook Ahn. "Robust and false positive free watermarking in IWT domain using SVD and ABC." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 49, pp. 114-125, 2016.
- [9] Mishra, Anurag, Charu Agarwal, Arpita Sharma, and Punam Bedi. "Optimized gray-scale image watermarking using DWT-SVD and Firefly Algorithm." *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 17, pp. 7858-7867, 2014.
- [10] Ali, Musrrat, Chang Wook Ahn, and Patrick Siarry. "Differential evolution algorithm for the selection of optimal scaling factors in image watermarking." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 31, pp. 15-26, 2014.
- [11] Huynh-The, Thien, Oresti Banos, Sungyoung Lee, Yongik Yoon, and Thuong Le-Tien. "Improving digital image watermarking by means of optimal channel selection." *Expert systems with applications*, vol. 62, pp. 177-189, 2016.
- [12] Ariatmanto, Dhani, and Ferda Ernawan. "An improved robust image watermarking by using different embedding strengths." *Multimedia Tools and Applications*, vol. 79, no. 17, pp. 12041-12067, 2020.
- [13] Zear, Aditi, Amit Kumar Singh, and Pardeep Kumar. "A proposed secure multiple watermarking technique based on DWT, DCT and SVD for application in medicine." *Multimedia tools and applications*, vol. 77, no. 4, pp. 4863-4882, 2018.
- [14] Solachidis, Vassilios, and Ioannis Pitas. "Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain." *IEEE transactions on image processing*, vol. 10, no. 11, pp. 1741-1753, 2001.
- [15] Vali, Mohammad Hassan, Ali Aghagolzadeh, and Yasser Baleghi. "Optimized watermarking technique using self-adaptive differential evolution based on redundant discrete wavelet transform and singular value decomposition." *Expert Systems with Applications*, vol. 114, pp. 296-312, 2018.
- [16] Verma, Vivek Singh, and Rajib Kumar Jha. "An overview of robust digital image watermarking." *IETE Technical review*, vol. 32, no. 6, pp. 479-496, 2015.
- [17] Do, Minh N., and Martin Vetterli. "Contourlets." In *Studies in computational mathematics*, vol. 10, pp. 83-105, 2003.
- [18] Do, Minh N., and Martin Vetterli. "The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation." *IEEE Transactions on image processing*, vol. 14, no. 12, pp. 2091-2106, 2005.
- [19] Zheng, Zhigao, Nitin Saxena, K. K. Mishra, and Arun Kumar Sangaiah. "Guided dynamic particle swarm optimization for optimizing digital image watermarking in industry applications." *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, pp. 92-106, 2018.
- [20] Abdelhakim, Assem Mahmoud, and Mai Abdelhakim. "A time-efficient optimization for robust image watermarking using machine learning." *Expert Systems with Applications*, vol. 100, pp. 197-210, 2018.

زیر نویس ها

-
- | | |
|--|--|
| ^{۱۵} Nonsubsampled Contourlet Transform | ^۱ Encryption |
| ^{۱۶} Singular Value Decomposition | ^۲ Steganography |
| ^{۱۷} multiple transforms | ^۳ Watermarking |
| ^{۱۸} Scramble | ^۴ Robustness |
| ^{۱۹} Laplacian Pyramid | ^۵ Capacity |
| ^{۲۰} Directional filter bank | ^۶ Imperceptibility |
| ^{۲۱} Coarser image | ^۷ Scaling factor |
| ^{۲۲} Detailed image | ^۸ Spatial domain |
| ^{۲۳} low frequency | ^۹ Transform domain |
| ^{۲۴} Intermediate frequency | ^{۱۰} Discrete Fourier transform |
| ^{۲۵} High frequency | ^{۱۱} Discrete cosine transform |
| ^{۲۶} Peak signal to noise ratio | ^{۱۲} Discrete wavelet transform |
| ^{۲۷} Boat | ^{۱۳} Lifting wavelet transform |
| ^{۲۸} Peppers | ^{۱۴} Contourlet Transform |