

طرح نهان‌نگاری تصویر بهبودیافته ترکیبی در حوزه قیچک و موجک

حسین جوانشیری*^۱، ملیحه مردانپور^۲

۱- حسین جوانشیری، دانشگاه یزد، دانشکده علوم ریاضی، گروه ریاضی محض، h.javanshiri@yazd.ac.ir

۲- ملیحه مردانپور، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، malihe.mardanpour@ut.ac.ir

در محیط رو به‌رشد اینترنت، حفاظت از حق‌نشر و اعتبارسنجی محتواهای چندرسانه‌ای یکی از چالش‌های بزرگ است که نهان‌نگاری یکی از بهترین روش‌های تامین آن می‌باشد. تبدیل موجک به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن به‌وفور در نهان‌نگاری استفاده شده و نتایج خوبی به‌واسطه آن حاصل شده است. با توجه به عملکرد خوب موجک، انواع توسعه‌های موجک مانند موجک‌های چندجهته که اخیراً معرفی شده‌اند نیز در طرح‌های نهان‌نگاری به‌کار گرفته شده‌اند. در این مقاله یک طرح ترکیبی با استفاده از تبدیل‌های موجک و قیچک گسسته در کنار روش تجزیه ماتریسی مقادیر تکین ارائه شده است. به‌منظور امنیت بیشتر از نگاهت آرنولد جهت رمزگذاری استفاده می‌شود. در این روش تصاویر میزبان و نهان‌نگاره توسط قیچک گسسته تجزیه و سپس بهترین زیرباند از طریق آنتروپی انتخاب و توسط موجک گسسته تجزیه می‌شود. تجزیه مقدار تکین روی زیرباند فرکانس پایین اعمال و جاسازی نهان‌نگاره با افزودن مقادیر تکین نهان‌نگاره به مقادیر تکین میزبان انجام می‌گیرد. این روش روی تصاویر محک آزمایش و نتایج آن گزارش شده است. بررسی نتایج و مقایسه آن با روش‌های دیگر نشان می‌دهد که این روش ترکیبی با بهره‌گیری همزمان از ویژگی‌های موجک و قیچک توانسته است علاوه بر تامین شفافیت، در برابر طیف گسترده‌ای از انواع حمله‌های هندسی و پردازش تصویری مقاوم باشد.

کلمات کلیدی: نهان‌نگاری تصویر، تبدیل قیچک گسسته، تبدیل موجک گسسته

۱. مقدمه

رشد سریع اینترنت و در دسترس بودن داده‌های دیجیتالی (شامل تصویر، صوت و ویدئو)، همچنین توسعه انواع ابزارهای ویرایش داده، موجب شده است که اعمال انتشار، ذخیره، کپی غیرمجاز، مداخله و تغییر دادن حق‌نشر این محتواهای چندرسانه‌ای به‌سادگی صورت پذیرد. به‌منظور حفظ امنیت محتواهای چندرسانه‌ای، ارائه راهکارهایی برای حل این مشکلات ضروری است. یکی از راه‌حل‌های مناسب، نهان‌نگاری می‌باشد که به‌طور گسترده برای حفظ حق‌نشر، اعتبارسنجی محتوا، مالکیت مشروع و ارتباط امن استفاده می‌شود [۱]. نهان‌نگاری دیجیتالی به فرآیند جاسازی نهان‌نگاره، که معمولاً لوگویی به شکل امضای مالک یا لوگوی شرکت است در یک سیگنال میزبان گفته می‌شود. لازم به ذکر است که در برخی متون علمی از واژه نشانه‌گذاری به‌جای نهان‌نگاری استفاده می‌شود. عمل جاسازی باید طوری صورت گیرد که درج نهان‌نگاره هیچ اثر قابل مشاهده‌ای بر سیگنال میزبان نداشته باشد. همچنین روش نهان‌نگاری باید بتواند در مقابل انواع دستکاری‌ها از نهان‌نگاره محافظت کند. پس از مرحله جاسازی، نهان‌نگاره طی فرآیند استخراج از سیگنال نهان‌نگاری شده بازیابی می‌شود. از میان نهان‌نگاری‌های صوت، تصویر و ویدئو، نهان‌نگاری تصویر به‌دلیل استفاده بیشتر

تصاویر، رایج‌ترین نوع نهان‌نگاری است که در آن سیگنال میزبان، یک تصویر می‌باشد. نهان‌نگاری به منظور اهداف متفاوتی مانند نظارت بر چندپخش، اعتبارسنجی و تعیین مالکیت به کار گرفته می‌شود [۲].

هر سیستم نهان‌نگاری باید حداقل ویژگی‌های مقاومت، شفافیت، ظرفیت و امنیت را داشته باشد. مقاومت روش نهان‌نگاری، به توانایی تصویر نهان‌نگاری شده در حفظ نهان‌نگاره پس از اعمال انواع حمله‌ها به آن می‌باشد. روش‌های نهان‌نگاری از نظر این ویژگی به سه گروه مقاوم، شکننده و نیمه‌شکننده تقسیم می‌شوند. شباهت ادراکی میان تصویر میزبان و تصویر نشانه‌گذاری شده، شفافیت و یا نامرئی بودن نام دارد. نامرئی بودن بدین معنا است که درج نهان‌نگاره در روش‌های نشانه‌گذاری باید به گونه‌ای انجام شود که اثر قابل مشاهده‌ای بر تصویر میزبان نداشته باشد. به تعداد بیت‌های نهان‌نگاره که در تصویر میزبان جاسازی می‌شود، ظرفیت گفته می‌شود. این ویژگی‌های اساسی در تقابل با یکدیگر هستند. برای مثال، رابطه مقاومت و شفافیت که دو ویژگی مهم روش‌های نشانه‌گذاری هستند، عکس یکدیگر است. بدین صورت که با افزایش شفافیت نهان‌نگاری، مقاومت آن در مقابل حمله‌ها کاهش یافته و با کاهش آن، مقاومت بهبود می‌یابد. بنابراین روش‌های نهان‌نگاری باید به گونه‌ای طراحی شوند که میان این دو ویژگی تعادل برقرار کنند. یکی از راه‌های برقراری این توازن استفاده از ضریبی به نام ضریب مقیاس* است که در فرمول‌های جاسازی و استخراج به کار گرفته می‌شود. چالش اصلی در نشانه‌گذاری، ایجاد طرحی است که علاوه بر شفافیت، در برابر انواع حمله‌ها نیز مقاوم باشد [۳].

روش‌های نهان‌نگاری را می‌توان با توجه به نحوه استخراج نهان‌نگاره، به سه دسته کور، نیمه‌کور و غیرکور تقسیم‌بندی کرد. در روش کور برای استخراج نهان‌نگاره به تصویر اصلی و تصویر نهان‌نگاره نیازی نیست، در حالی که در دسته نیمه‌کور به اطلاعات نهان‌نگاره و اطلاعات مکمل برای استخراج نیاز است. در روش غیرکور نیز به تصویر میزبان و گاه اطلاعات نهان‌نگاره نیاز است [۲]. طبقه‌بندی دیگر روش‌های نهان‌نگاری بر اساس حوزه درج نهان‌نگاره است که آن‌ها را به دو حوزه تصویر و فرکانس تقسیم می‌کنند. در روش‌های حوزه تصویر که طرح‌های اولیه نشانه‌گذاری در این حوزه معرفی شدند، نهان‌نگاره با تغییر مقادیر پیکسل‌های تصویر میزبان به طور مستقیم جاسازی می‌شود. روش‌های حوزه تصویر از نظر محاسباتی هزینه کمتر و پیاده‌سازی ساده‌ای دارند اما ظرفیت کم و شفافیت پایینی داشته و در مقابل حمله‌ها شکننده‌اند. الگوریتم‌های حوزه فرکانس، نهان‌نگاره را به وسیله تغییر اندازه ضرایب تصویر در حوزه فرکانسی جاسازی می‌کنند. این گونه روش‌ها قابلیت جای دادن اطلاعات بیشتری داشته و مهم‌تر از آن اینکه در برابر حمله‌های پردازش تصویر و دستکاری‌های بدخواهانه مقاومت بیشتری دارند. تبدیل فوریه گسسته (DFT^۱)، تبدیل کسینوسی گسسته (DCT^۲)، تبدیل موجک گسسته (DWT^۳) و تجزیه مقدار تکین (**SVD) از تبدیل‌های پرکاربرد در حوزه فرکانس هستند [۴]

* Scaling factor

^۱ Discrete Fourier Transform

^۲ Discrete Cosine Transform

^۳ Discrete Wavelet Transform

** Singular Value Decomposition

داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد DWT مانند نمایش چندریزیگی* نسبت به سایر تبدیل‌های فرکانسی سبب شده است که از آن در اغلب تحقیقات نشانه‌گذاری و پردازش تصویر استفاده شود. نمایش چندریزیگی[†] به توانایی تجزیه یک سیگنال به جزئیات کوچک و کوچک‌تر است. ویژگی مهم دیگر DWT شباهت آن به سیستم بینایی انسان و در نتیجه مدل‌سازی بهتر آن می‌باشد [۳]. سال‌های پس از معرفی موجک، تبدیل‌های مختلفی مبتنی بر آن ایجاد شد که در واقع توسعه‌ای بر موجک کلاسیک هستند و هر یک به منظور رفع محدودیت و بهبود تبدیل موجک طراحی شده‌اند. تجزیه بسته موجک[‡]، تبدیل چندموجک[§] و تبدیل موجک گسسته افزونه[¶] نمونه‌ای از توسعه‌های موجک می‌باشند. برای آشنایی با این تبدیل‌ها می‌توان به پژوهش [۳] رجوع کرد.

تبدیل موجک چارچوب مناسبی برای تحلیل چندریزیگی می‌باشد که در ارتباط با تکین‌های نقطه‌ای کارایی بالایی دارند. اما به علت داشتن محدودیت جهت در ساختار فیلترینگ آن و اینکه در ابعاد بالاتر معمولاً انواع دیگر تکین‌ها ارائه می‌شوند، برای نمایش دقیق این‌گونه داده‌ها به عبارات‌های زیادی توسط آن نیاز است. از این‌رو در سال‌های اخیر توسعه جدیدی از موجک‌ها به نام موجک‌های چندجهته برای غلبه بر این محدودیت موجک ارائه شده‌اند که از تبدیل‌های آن می‌توان به موجک‌های پیچیده^{‡‡}، مرکز^{‡‡‡}، تیغک^{‡‡‡‡}، پیچک^{‡‡‡‡‡}، قیچک^{‡‡‡‡‡‡}، براشلت^{‡‡‡‡‡‡‡}ها و بندلت^{‡‡‡‡‡‡‡‡}ها اشاره این تبدیل‌ها در کاربردهای مختلف مانند رفع نویز، فشرده‌سازی، قطعه‌بندی، بازیابی تصویر و استخراج ویژگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تبدیل قیچک گسسته (DST****) جهت بهبود روش‌های موجود ارائه شده است و روش جدیدی از نمایش چندمقیاسه جهتی را در فضای گسسته فراهم می‌کند. توضیحات بیشتری در رابطه با موجک‌های چندجهته در [۳] بیان شده است که می‌توان به آن رجوع کرد [۳].

در جبر خطی فاکتورگیری یک ماتریس، به تجزیه یک ماتریس به حاصل ضرب چند ماتریس گفته می‌شود. روش‌های فاکتورگیری شُر، QR، LU، جردن و تجزیه مقدار تکین (SVD) نمونه‌هایی از این روش‌ها هستند. SVD یکی از روش‌های تجزیه ماتریس مبتنی بر مقادیر تکین است که در فشرده‌سازی تصویر، کاهش نویز و نشانه‌گذاری تصویر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. SVD دید کلی روی تغییرات تصویر و اطلاعات ساختاری آن فراهم می‌کند که برای پیش‌بینی کیفیت تصویر بسیار مهم می‌باشد [۳].

* Multi-resolution

† Multi-resolution

‡ Wavelet Packet Transform

§ Multiwavelet Transform

** Discrete Redundant Wavelet

†† Complex Wavelet

‡‡ Contourlet

§§ Ridgelet

*** Curvelet

††† Shearlet

‡‡‡ Brushlet

§§§ Bandelet

**** Discrete Shearlet Transform

در پژوهش قبلی مولفان [۳]، ترکیب‌های مختلف موجک سنتی و توسعه‌های آن و همچنین موجک‌های چندجهته در نهان‌نگاری مورد بررسی قرار گرفتند و طبق نتایج بدست‌آمده، دو تبدیل موجک گسسته و قیچک گسسته بهترین عملکرد را داشتند. از این رو، در این مقاله یک روش ترکیبی با مقاومت بالا براساس تبدیل‌های موجک گسسته، قیچک و تجزیه SVD ارائه کرده‌ایم. به‌منظور تامین امنیت بیشتر، روش پیشنهادی در مرحله پیش‌پردازش از نگاشت آرنولد برای نهان‌نگاره استفاده شده است. همچنین برای انتخاب بهترین زیرباند جهت درج نهان‌نگاره از روش آنتروپی استفاده شده است. نحوه جاسازی در این طرح بدین صورت است که تصاویر میزبان و نهان‌نگاره توسط DWT و DST تجزیه شده و سپس SVD روی آن‌ها اعمال می‌شود. پس از آن، مقادیر تکین بدست‌آمده تصویر میزبان از مرحله قبل در مقادیر تکین تصویر نهان‌نگاره جاسازی می‌شود. این طرح پیشنهادی روی تصاویر متعدد با خصوصیات بافتی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته و برای آزمودن مقاومت آن، طیف وسیعی از حمله‌ها به‌کار گرفته شده است.

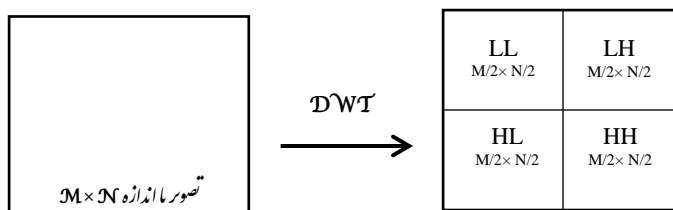
ادامه مقاله در قالب بخش‌های زیر توضیح داده خواهند شد. در بخش ۲ مفاهیم پایه‌ای تبدیل‌های موجک گسسته، قیچک به تفصیل بیان می‌شوند. الگوریتم‌های جاسازی و استخراج روش پیشنهادی در بخش ۳ معرفی SVD گسسته، آرنولد و می‌شوند. در بخش ۴ نتایج تجربی آزمایش‌ها و مقایسه آن با سایر روش‌ها نشان داده شده است و در بخش پایانی نتیجه‌گیری و ایده‌هایی برای ادامه این پژوهش توضیح داده شده است.

۲. مفاهیم بنیادی

در این بخش ابتدا DWT توضیح داده می‌شود، سپس مفهوم DST به‌همراه روابط آن تشریح می‌شود. در ادامه تعاریف SVD و نگاشت آرنولد که در روش پیشنهادی از آن‌ها استفاده شده است، بیان می‌شوند.

۱.۲ تبدیل موجک گسسته

موجک یکی از تبدیل‌های حوزه فرکانسی است که یک نمایش فرکانسی-زمان از تصویر فراهم کرده و یک طرح چندریزیگی برای نمایش تصویر به‌ازای رزولوشن‌های مختلف با استفاده از فرکانس‌های مختلف ارائه می‌دهد. شکل (۱) مثالی از اعمال DWT یک سطحی برای تصویری با اندازه $M \times N$ را نشان می‌دهد که تصویر را به چهار زیرباند LL, HL, LH, HH تجزیه کرده است. زیرباند LL ، زیرباند فرکانس پایین، زیرباندهای HL و LH زیرباندهای میان‌فرکانسی و HH زیرباند فرکانس بالا می‌باشد [۵]. برای داشتن سطوح بیش‌تر تجزیه، تبدیل موجک روی زیرباندهای فرکانس پایین مانند LL و $LL2$ اعمال می‌شود.



شکل ۱ تجزیه تصویر با اندازه $M \times N$ توسط DWT یک سطحی

۲.۲ تبدیل قیچک گسسته

بسیاری از کاربردهای پردازش تصویر از نمایش‌های تنک* تصویر بهره می‌برند. رایج‌ترین تبدیل‌های مورد استفاده در کاربردهای پردازش تصویر که از نمایش‌های تنک بهره می‌گیرند، تبدیل‌های موجک و کسینوسی گسسته هستند. تبدیل موجک علی‌رغم ویژگی‌های بهینه تخمین سیگنال‌های یک‌بعدی، برای داده‌های دوبعدی و چندبعدی چندان کارا عمل نمی‌کند. در تصاویر که سیگنال‌های صاف تکه‌ای دوبعدی هستند، نواحی صاف، توسط لبه‌ها از یکدیگر جدا شده‌اند. لبه‌ها در طول منحنی‌های صاف یعنی مرزها قرار گرفته‌اند، از این رو تصاویر به صورت ذاتی شامل ساختارهای هندسی هستند. موجک‌های دوبعدی در جداسازی ناپیوستگی‌های نقاط لبه‌ها خوب عمل می‌کنند اما همواری در طول منحنی‌های صاف را در نظر نمی‌گیرند. از آنجاکه موجک‌های دوبعدی توسط حاصل ضرب تانسوری موجک‌های یک‌بعدی بدست می‌آیند، برای بازنمایی منحنی توسط آن باید از عبارات‌های زیادی استفاده کنیم و هرچقدر این مقیاس ریزتر می‌شود، تعداد این عبارات بیشتر شده و ضعف موجک واضح‌تر می‌شود. اما نمایش این مرز و منحنی توسط موجک‌های چندجهته به صورت بهینه و تنک صورت می‌گیرد. از تبدیل‌های موجک چندجهته می‌توان به پیچک، مرزک، بندلت، براشلت و قیچک اشاره کرد [۳].

تبدیل پیچک به دلیل این که به طور مستقیم در فضای گسسته ساخته نشده است، قابلیت ارائه نمایش چندوضوحی از هندسه را ندارد و از این رو در پیاده سازی و تحلیل ریاضی کارایی کمی دارد. مرزک‌ها پایه‌هایی هستند که از امتداد توابع پایه با استفاده از ترکیب فیلتربانک چندمقیاسه و فیلتربانک جهتی ساخته شده‌اند. هم‌چنین ویژگی‌های جهتی در آن، نسبت به تبدیل پیچک وضوح کمتری داشته که سبب شده به ابزاری جهت به کارگیری در رفع نویز و فشردن سازی تبدیل گردد. DST یک نمایش چندمقیاسه چندجهته است که مدل ریاضیاتی ساده‌ای دارد و دو ویژگی مهم آن توانایی استفاده از قدرت روش‌های چندمقیاسه و ضبط هندسه داده چندبعدی می‌باشد. این تبدیل یک سیستم افاین شامل یک تابع قیچک مادر است که سه پارامتر مهم مقیاس، قیچی و انتقال دارد [۴].

تبدیل قیچک روی تابع $f \in L^2(\mathbb{R}^2)$ به شکل زیر تعریف می‌شود [۶].

$$SH_{\nu}(f)(a, s, t) = \langle f, \psi_{a, s, t} \rangle \quad (1)$$

هرگاه f یک تصویر دوبعدی باشد، عناصر تحلیلی $\psi_{a, s, t}$ قیچک نامیده شده و یک سیستم افاین با توابع خوش موضع[†] را در مقیاس پیوسته $a > 0$ مکان $t \in \mathbb{R}^2$ در راستای جهت با شیب $s \in \mathbb{R}$ در حوزه فرکانس تشکیل می‌دهند. قیچک‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\psi_{a, s, t}(x) = a^{\frac{3}{4}} \psi(A_a^{-1} S_s^{-1}(x-t)) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، A_a ماتریس مقیاس سهمی وار و S_s ماتریس قیچی است که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

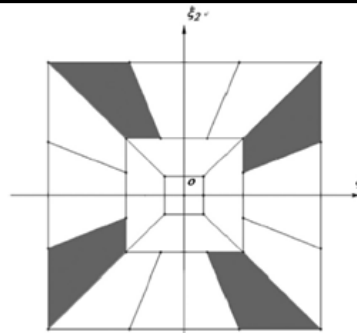
$$A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix}, \quad S_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ماتریس A_a یک تاخیر ناهمسانگرد[‡] و ماتریس قیچی S_s جهت‌ها را به واسطه متغیر s مرتبط با شیب‌ها پارامتربندی می‌کند. قیچک‌ها علاوه بر داشتن مزایای پیچک و مرزک، در فضای فرکانسی مرحله به مرحله تقسیم می‌شود که سبب بهبود کارایی آن می‌شود. همچنین تبدیل قیچک می‌تواند یک مجموعه توابع پایه‌ای را به وسیله ارسال یک تابع برای مقیاس، انتقال و چرخش تولید کند. این مورد مزیت قیچک بر تبدیل‌های موجک، پیچک و مرزک است که فاقد آن می‌باشند. هر عنصر $\psi_{a, s, t}$ روی یک جفت دوزنقه‌وار ساپورت فرکانسی دارد که این دوزنقه‌ها صفحه فرکانسی را طبق شکل زیر تقسیم می‌کنند [۶].

* Sparse

† well localized

‡ anisotropic



شکل ۲ تقسیم‌بندی ناحیه فرکانسی توسط تبدیل قیچک [۶]

۳-۲ SVD

SVD یک روش تجزیه ماتریسی مبتنی بر مقدار تکین می‌باشد که در گونه وسیعی از کاربردهای پردازش تصویر هم‌چون پنهان کردن تصویر، فشرده‌سازی تصویر، کاهش نویز و نهان‌نگاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهان‌نگاری تصویر برای داشتن کارایی بهتر، از آن در ترکیب با تبدیل‌های دیگر استفاده می‌شود. تصویر A با اندازه $M \times M$ توسط SVD به شکل رابطه (۴)، به دو ماتریس متعامد U و V و یک ماتریس قطری از مقادیر تکین $S = \text{diag}(\lambda_i)$ تجزیه می‌شود که در آن برای $i=1, \dots, m$ مقادیر تکین به صورت نزولی مرتب شده‌اند [۴].

$$A = USV^T \quad (۴)$$

دو خصوصیت مطلوب SVD که سبب می‌شود در نهان‌نگاری مورد استفاده قرار گیرد عبارتند از: (۱) زمانی که یک اختلال کوچک به یک تصویر افزوده می‌شود، مقدار زیادی از مقادیر تکین آن تغییر نمی‌کند. (۲) مقادیر تکین ویژگی‌های جبری اصلی تصویر را نمایش می‌دهند [۳].

۴-۲ تبدیل آرنولد

این تبدیل یک روش نگاشت متناوب است که برای آشفته‌سازی* تصویر استفاده می‌شود. استفاده از این تبدیل امنیت را در نهان‌نگاری تصویر افزایش می‌دهد. از آنجایی که تبدیل آرنولد از نگاشت متناوب پشتیبانی می‌کند، تصویر اصلی پس از یک مقدار ثابت تکرار به نام P بازبازی می‌شود [۱]. چگونگی این امر در شکل (۳) نشان داده شده است که در این شکل مقدار P ، ۴۸ است. پارامتر P ، تناوب تبدیل آرنولد گفته می‌شود. برای یک ماتریس مربعی اندازه M تابع نگاشت آرنولد به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} \pmod{M} \quad (۵)$$

دو متغیر p و q موقعیت عناصر ماتریس قبل از تبدیل آرنولد و p' و q' موقعیت آن‌ها پس از تبدیل آرنولد می‌باشد که مقادیر آن‌ها متعلق به بازه $\{0, 1, 2, 3, \dots, M-1\}$ بوده و N مرتبه و اندازه ماتریس تصویر دیجیتالی است [۱].

* Scrambling

$$[U_a, S_a, V_a] = SVD(LL) \quad (8)$$

۳) برای افزایش امنیت طرح، نهان‌نگاره (W) را توسط تبدیل آرنولد رمزگذاری می‌کنیم.

۴) مراحل ۱ و ۲ را برای نهان‌نگاره نگاشت‌یافته مرحله ۳، تکرار کرده و در نهایت مقادیر تکین آن به‌صورت زیر خواهد بود.

$$[U_w, S_w, V_w] = SVD(W) \quad (9)$$

۵) عمل جاسازی را با اصلاح مقادیر تکین تصویر میزبان به‌وسیله مقادیر تکین نهان‌نگاره‌ها انجام می‌دهیم.

$$S_I = S_a + \alpha \times S_w \quad (10)$$

در روابط بالا، آلفا ضریب مقیاس است که توازن میان شفافیت و مقاومت طرح را برعهده دارد.

۶) جهت بدست‌آوردن ضرایب تغییر یافته موجک گسسته، معکوس SVD را روی S_I اعمال می‌کنیم.

۷) تصویر نهان‌نگاری شده با اعمال معکوس DWT و DST به ترتیب روی ضرایب بدست‌آمده حاصل می‌شود.

۲.۳ الگوریتم استخراج نهان‌نگاره

برای برگرداندن و بازیابی نهان‌نگاره‌ها از رویه استخراج زیر که تقریباً معکوس مراحل طی شده در فرآیند جاسازی است، استفاده می‌شود:

۱) DST را با پارامترهای مشابه فرآیند جاسازی، روی تصویر نهان‌نگاری شده (I') اعمال کرده و بهترین زیرباند را براساس ماکزیمم انرژی زیرباندها انتخاب می‌کنیم. سپس آن را توسط DWT به شکل زیر تجزیه می‌کنیم.

$$\{set\ of\ subbands\} = DST(I') \quad (11)$$

$$[LL', LH', HL', HH'] = DWT(A') \quad (12)$$

۲) مقادیر تکین زیرباند فرکانس پایین حاصل از مرحله قبل را توسط SVD محاسبه می‌کنیم.

$$[U_{LA}, S_{LA}, V_{LA}] = SVD(LL') \quad (13)$$

۳) برای بازیابی نهان‌نگاره، مقادیر تکین را توسط رابطه زیر که معکوس فرمول جاسازی (۱۰) است، بدست می‌آوریم.

$$S_R = (S_{LA} - S_w) / \alpha \quad (14)$$


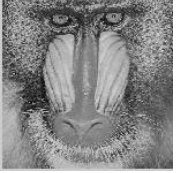







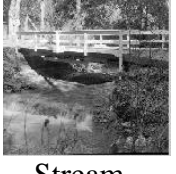
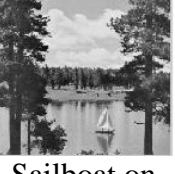

در روابط بالا، آلفا ضریب مقیاس است که در جاسازی نهان‌نگاره استفاده شد.

۴) معکوس SVD را به‌طور جداگانه روی S_R اعمال کرده و معکوس آرنولد جهت رمزگشایی آن‌ها اعمال می‌کنیم. در پایان معکوس موجک و فیچک را به ترتیب روی ضرایب حاصل اعمال کرده و نهان‌نگاره را بازیابی می‌کنیم.

۴. پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج تجربی

به‌منظور ارزیابی روش DST-DWT-SVD، آزمایش‌هایی با استفاده از پلتفرم Matlab2010a روی ۱۱ تصویر سطح خاکستری به‌عنوان تصاویر میزبان انجام شده است. این تصاویر که در اندازه‌های 256×256 پیکسل بوده، ویژگی‌های بافتی متفاوتی دارند و از پایگاه داده تصویری USC-SIPI انتخاب شده‌اند. نهان‌نگاره مورد استفاده در آزمایش‌ها تصویری با اندازه 256×256 بوده که به‌همراه تصاویر میزبان در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. به‌منظور ارزیابی مقاومت روش پیشنهادی DST-DWT-SVD، به‌ازای همه تصاویر میزبان در معرض طیف وسیعی از حمله‌ها با پارامترهای مختلف قرار داده شد و میزان مقاومت آن اندازه‌گیری شده است. حمله‌های انجام گرفته در این مقاله را به چهار دسته فیلتری، هندسی، پردازش تصویری و نویزی تقسیم‌بندی کرده و نتایج مقاومت هریک از این دسته حمله‌ها جداگانه گزارش و بررسی

می‌گردند. حمله‌های فیلتری شامل فیلترهای میانگین* (AF) با اندازه پنجره‌های 3×3 ، 5×5 و 10×10 ، پایین‌گذر گاوسی[□] (GP) با اندازه پنجره‌های 3×3 ، 5×5 و میانه[□] (MF) با اندازه پنجره‌های 2×2 ، 3×3 ، 4×4 ، 5×5 و 10×10 می‌باشد. دسته دوم حمله‌های هندسی برش‌دادن (CR) با درصدهای ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰، دوران (RO) با زوایای متفاوت ۵، ۳۰، ۴۵، ۷۰، ۱۱۰، ۱۰، ۵۰ و ۸۰- درجه، تغییر مقیاس (SC) با مقیاس‌های متفاوت ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵، ۱٫۲۵ و ۱٫۵، انتقال (TR) در راستای محورهای x و y با زوج مختصات (۱۰، ۱۰)، (۱۰، ۲۰)، (۲۰، ۳۵)، (۳۵، ۴۵) و (۵۰، ۵۰)، قیچی‌کردن[□] (SE) در راستای محورهای x و y با مختصات‌های (۰٫۲، ۰٫۲)، (۱، ۰٫۲)، (۰٫۲، ۱) و (۰٫۳، ۰٫۱) و عمل برگرداندن^{**} (FL) افقی و عمودی هستند. حمله‌های پردازش تصویری شامل محوکردن^{□□} (BL) با پارامترهای ۰٫۲، ۰٫۵، ۰٫۸، ۱ و ۱٫۱، اصلاح گاما (GC) با پارامترهای ۰٫۱، ۰٫۳، ۰٫۶، ۰٫۸ و ۰٫۹، متعادل‌سازی هیستوگرام (HE)، بلور حرکتی^{□□} (MB) با پارامترهای طول و زاویه به صورت جفت‌های (۱۵، ۲۰) و (۱۵، ۴۵)، تیزکردن^{□□} (SH) با پارامتر آلفای ۰٫۱، ۰٫۲، ۰٫۵، ۰٫۸ و ۱ و فشرده‌سازی JPEG با فاکتورهای ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۸۰ و ۹۰ می‌باشند. دسته آخر از حمله‌های اعمال‌شده در این مقاله نویزهای گاوسی^{***} (GN) با مقدار واریانس‌های ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۰۱، نقطه‌ای^{□□□} (SN) با واریانس‌های ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۰۱، و نمک‌و‌فلفل^{□□□} (SP) با چگالی‌های ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱ و ۰٫۰۰۱ هستند. از آنجا که در گزارش نتایج مقاومت مرتبط با هریک از حمله‌ها نام اختصاری آن‌ها نوشته شده است، در جدول (۱) نام کامل هریک از حمله‌ها را آورده شده است.

			
F-16	Baboon	Barbara	Fishing Boat
			
Couple	Elaine	Lenna	Man
			
Pepper	Stream and Bridge	Sailboat on lake	logo

* Average Filter

† Gaussian Lowpass Filter

‡ Median Filter

§ Shearing

** Flip

†† Blurring

‡‡ Motion Blur

§§ Sharpening

*** Gaussian Noise

††† Speckle Noise

‡‡‡ Salt&pepper Noise

شکل ۴ تصاویر سطوح خاکستری میزبان و نهان‌نگاره

جدول ۱: نام حمله‌های استفاده‌شده و نام اختصاری متناظرشان

نام اختصاری	نام حمله	نام اختصاری	نام حمله
BL	Blurring	AF	Average Filtering
GC	Gamma Correction	GP	Gaussian Lowpass Filter
HE	Histogram Equalization	MF	Median Filter
MB	Motion Blur	CR	Crop
SH	Sharpening	RO	Rotation
JPEG	JPEG Compression	SC	Scaling
GN	Gaussian Noise	TR	Translation
SN	Speckle Noise	SE	Shearing
SP	Salt&pepper Noise	FL	Flip

۱.۴ معیارهای ارزیابی

کارایی طرح‌های نهان‌نگاری براساس دو ویژگی نامرئی بودن و مقاومت صورت می‌گیرد. در این رابطه در [۳] به تفصیل بحث شده است. در ادامه فرمول‌های اندازه‌گیری این ویژگی‌ها بیان می‌شود. اندازه‌گیری شفافیت: دو معیار PSNR و SSIM برای شفافیت استفاده می‌شوند. رایج‌ترین معیار محاسبه شفافیت است که واحد آن دسی‌بل می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\max(x(i,j))^2}{MSE} \right) \quad (15)$$

در رابطه بالا، $x(i,j)$ مقدار پیکسل تصویر و MSE میانگین مربعات خطا* می‌باشد که از معادله (۱۶) بدست می‌آید.

$$MSE = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [x(i,j) - y(i,j)]^2 \quad (16)$$

در رابطه بالا، $x(i,j)$ و $y(i,j)$ مقدار پیکسل‌های تصویر می‌باشند.

* Mean Square Error

PSNR محاسبات ساده‌ای دارد اما با سیستم بینایی انسان به خوبی مطابقت ندارد. اخیراً معیاری براساس شباهت ساختاری تصاویر به نام شاخص شباهت ساختاری* (SSIM) معرفی شده است که براساس مقایسه روشنایی و کنتراست تصویر در بلوک‌های متناظر است. رابطه زیر چگونگی محاسبه آن را نشان می‌دهد.

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (17)$$

در روابط بالا، X و Y بلوک‌های محلی متناظر در دو تصویر X و Y ، μ_x و μ_y مقادیر میانگین بلوک‌های x و y هستند، σ_x^2 و σ_y^2 واریانس و σ_{xy} کوواریانس میان x و y و C_1 ، C_2 و C_3 ثابتی هستند که برای جلوگیری از ناپایداری به هنگام کوچک بودن مخرج کسر استفاده می‌شوند. بیشترین مقدار این معیار یک است، که در صورت یکسان بودن دو تصویر بدست می‌آید. هرچه شفافیت یک طرح نهان‌نگاری بیشتر باشد مقدار این معیار برای آن به یک نزدیک‌تر می‌شود [۳]. اندازه‌گیری مقاومت: روش‌های نهان‌نگاری باید در برابر انواع حمله‌ها مقاوم باشند. معیار همبستگی متقاطع نرمال شده[†] (NC) که از رابطه زیر محاسبه می‌شود، یک معیار اندازه‌گیری مقاومت است که نشانگر مقدار شباهت تصاویر نهان‌نگاره اصلی و استخراج شده از تصویر نهان‌نگاری شده است [۳].

$$NC(w,w') = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [w(i,j) - \mu_w][w'(i,j) - \mu_{w'}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [w(i,j) - \mu_w]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [w'(i,j) - \mu_{w'}]^2}} \quad (18)$$

در رابطه بالا، w و w' به ترتیب نشانه اصلی و نشانه استخراج شده می‌باشند و μ_w و $\mu_{w'}$ به ترتیب میانگین نشانه‌های اصلی و استخراج شده هستند.

۲.۴. پارامترهای پیاده‌سازی

در این مقاله جهت اعمال DST روی تصاویر از توابع پیاده‌سازی شده در [۸] استفاده شده است. در [۳] توضیحات بیشتری ارائه شده است. به منظور استفاده از این تابع دو پارامتر تعداد مقیاس و سطوح قیچک باید تعیین گردد که بر اساس آزمایشات، در این مقاله مقیاس سه و سطوح قیچک بردار [۱، ۱، ۰] در نظر گرفته شده است. در نتیجه اعمال DST با این مقادیر برای پارامترها روی تصاویر، در مجموع ۲۱ زیرباند را بدست می‌دهد. در بخش (۳)، در فرمول‌های جاسازی نهان‌نگاره (۱۰) و استخراج (۱۴)، مقدار فاکتور مقیاس α که جهت توازن میان شفافیت و مقاومت استفاده می‌شود، توسط روش سعی و خطا بدست آمده است. بدین صورت که مقاردهی اولیه انجام شده و پس از آن فرآیندهای جاسازی و استخراج به‌ازای این مقدار اجرا و میزان مقاومت و شفافیت آن اندازه‌گیری می‌شود. باتوجه به مقادیر حاصل، مقدار α تا رسیدن به نتیجه موردنظر تغییر داده می‌شود. مقدار ضریب مقیاس در این مقاله با استفاده از این روش ۰/۱۵ تعیین شده است.

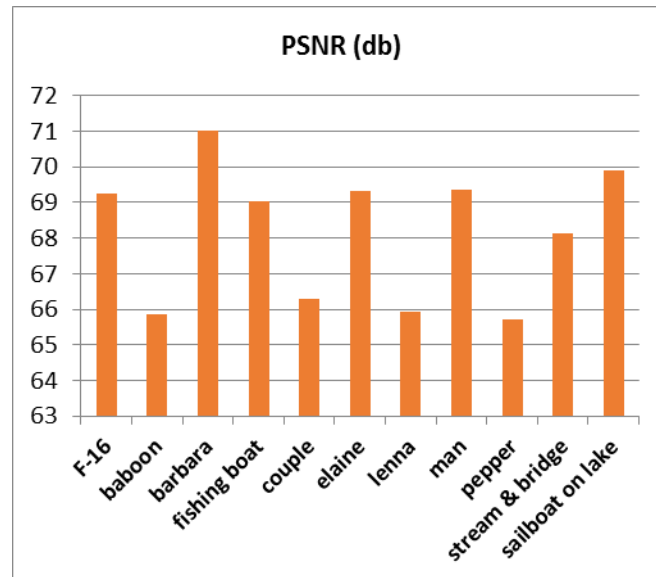
۲.۴. نتایج تجربی

نتایج شفافیت و مقاومت روش پیشنهادی و مقایسه آن با دیگر کارهای انجام گرفته در این زمینه، در این بخش گزارش شده است. شفافیت روش پیشنهادی براساس PSNR و SSIM در نمودار (۱) و جدول (۱) نشان داده شده است. نمودار (۱) مقادیر PSNR بدست‌آمده روش DWT-DST-SVD را به‌ازای همه تصاویر میزبان نشان می‌دهد. باتوجه به این نمودار، مقادیر PSNR در بازه [۷۱/۰۱، ۶۵/۷۱] دسی‌بل قرار گرفته است که نشانگر شفافیت بالای این روش برای

* Structural Similarity

† Normalized cross Correlation

تصاویر با بافت‌های متفاوت است. با محاسبه میانگین این مقادیر، متوسط مقدار برای روش پیشنهادی مقدار قابل توجه ۶۸/۱۶ دسی‌بل می‌باشد.



نمودار ۱ مقادیر PSNR روش پیشنهادی DST-DWT-SVD برای تصاویر میزبان

برای اندازه‌گیری نامرئی بودن روش، نتایج SSIM نیز در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول قابل مشاهده است، مقدار SSIM برای همه تصاویر مقدار ماکزیمم، یعنی مقدار یک به دست آمده است. نتایج این نمودار و جدول به وضوح نشان می‌دهد که روش پیشنهادی DST-DWT-SVD از شفافیت بالایی برخوردار است و جاسازی نهان‌نگاره در آن به صورت نامرئی و غیرقابل مشاهده صورت می‌گیرد.

جدول ۱ مقادیر SSIM

SSIM	تصویر	SSIM	تصویر
۱	Elaine	۱	F-16
۱	Man	۱	Baboon
۱	Pepper	۱	Barbara
۱	Stream&bridge	۱	Fishing boat
۱	Sailboat on lake	۱	Couple

حال به بررسی نتایج مقاومت روش DST-DWT-SVD در مقابل چهار دسته از حمله‌های فیلتری، هندسی، پردازش تصویری و نویز می‌پردازیم. قابل ذکر است که در جداول مربوط به مقادیر NC جهت خوانایی بیشتر و با حفظ دقت، این مقادیر تا سه رقم اعشار گرد شده‌اند. جدول (۲) میزان مقاومت را در برابر فیلترهای میانگین، گاوسی و میانه به‌ازای همه تصاویر میزبان نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود مقادیر NC به‌ازای پارامترهای مختلف فیلترها ۰/۹۹۹ و نزدیک به ۱ می‌باشد و مقادیر NC در بازه [۰/۹۹۸, ۱] قرار می‌گیرند. از این رو می‌توان گفت روش ارائه‌شده در مقابل انواع فیلترها بسیار مقاوم است.

جدول ۲ مقادیر NC برای حملات فیلتری

sailboat on lake	stream & bridge	pepper	man	lenna	elaine	couple	fishin g boat	barbara	baboon	F-16	حمله / تصویر
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	1	0.999	0.998	0.999	AF 3*3
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	AF 5*5
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	AF 10*10
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	GP 3*3
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	GP 5*5
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MF 2*2
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MF 3*3
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MF 4*4
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MF 5*5
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MF 10*10

میزان مقاومت روش DST-DWT-SVD در برابر حمله‌های هندسی برش، چرخش، تغییر مقیاس، انتقال، قیچی و برگرداندن در جدول (۳) برحسب NC آورده شده است. مقادیر جدول زیر که به‌ازای همه تصاویر میزبان و پارامترهای مختلف حمله‌ها می‌باشد، نزدیک به یک و در گستره [۰/۹۹۹، ۰/۹۹۸] قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان می‌دهند روش پیشنهادی به‌علت استفاده از DST که در خود سه پارامتر مقیاس، مکان و جهت را دارد، در مقابل حمله‌های هندسی مقاومت بالایی را از خود نشان می‌دهد و با اعمال انواع حمله‌ها مانند برش، چرخش و انتقال روی تصاویر نهان‌نگاری‌شده، می‌توان با دقت بسیار زیادی نهان‌نگاره اصلی را استخراج کرد.

جدول ۳ مقادیر NC برای حملات هندسی

sailboat on lake	stream & bridge	pepper	man	lenna	elaine	couple	fishin g boat	barbara	baboon	F-16	حمله / تصویر
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	CR 30%
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	CR 50%
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	CR 70%
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	CR 90%
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO 5°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO 30°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO 45°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO 70°

0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO 110°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO -10°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO -50°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	RO -80°
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SC 0.25
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SC 0.5
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SC 0.75
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SC 1.25
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SC 1.5
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	TR (10,10)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	TR (10,20)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	TR (20,35)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	TR (35,45)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	TR (50,50)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SE (0.2,0.2)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SE (1,0.2)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SE (0.2,1)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	SE (0.3,0.1)
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	Flip H
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	Flip V

در جدول (۴) مقادیر NC به‌ازای همه تصاویر میزبان در مقابل حمله‌های پردازش تصویری همچون بلوری کردن، اصلاح گاما، تیزکردن و فشرده‌سازی JPEG نشان داده شده است. طبق این جدول مقادیر NC در بازه [۱, ۰/۹۹۳] قرار دارند و نزدیک به یک هستند، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی DST-DWT-SVD به‌خوبی می‌تواند نهان‌نگاره را حتی پس از در معرض قرار گرفتن انواع دستکاری‌های پردازش تصویری با کیفیت بالا استخراج کند.

جدول ۴ مقادیر NC برای حملات پردازش تصویری

sailboat on lake	stream & bridge	pepper	man	lena	elaine	couple	fishing boat	barbara	baboon	F-16	حمله/ تصویر
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	BL 0.2
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	BL 0.5
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	BL 0.8

0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	BL 1
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	BL 1.1
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.997	0.999	GC 0.1
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.997	0.999	GC 0.3
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.997	0.999	GC 0.6
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	GC 0.8
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.998	0.999	GC 0.9
1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	HE
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	MB(15,20)
0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	MB(15,45)
0.993	0.996	0.999	0.999	0.998	0.996	0.999	0.999	0.997	0.996	0.999	SH 0.1
0.993	0.996	0.999	0.999	0.998	0.996	0.999	0.999	0.997	0.996	0.999	SH 0.2
0.999	0.995	0.999	0.999	0.999	0.996	0.999	0.999	0.998	0.995	0.999	SH 0.5
0.999	0.995	0.999	0.999	0.999	0.996	0.999	0.999	0.999	0.995	0.999	SH 0.8
0.999	0.995	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.995	0.999	SH 1
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	JPEG 5
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	JPEG 10
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	JPEG 20
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	JPEG 30
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	JPEG 80
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	JPEG 90

جدول (۵) مقدار مقاومت روش DST-DWT-SVD را در برابر آخرین دسته حمله‌ها یعنی نویزها گزارش می‌دهد. در این جدول که سه نوع نویز گاوسی، نقطه‌ای و نمک‌و فلفل با پارامترهای متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، مقادیر NC مانند سه جدول قبل نزدیک به ماکزیمم مقدار NC است و در گستره [۱, ۰/۹۸۴] قرار گرفته است. در این جدول در سه مورد مقدار یک بدست آمده است که متعلق به پارامترهای با مقادیر کوچک است. در واقع با افزایش واریانس و چگالی نویزها و اثر بیشتر این نویز روی تصاویر نهان‌نگاری شده قدری از مقاومت روش کاسته شده است که بسته به نوع تصویر میزبان این مقدار متفاوت است. در مجموع روش ارائه شده در مقابل انواع نویز مقاومت خوبی دارد. مقاومت بالای DST-DWT-SVD نسبت به حمله‌های پردازش تصویری و نویزها، به دلیل به کارگیری تبدیل موجک در روش پیشنهادی است.

چراکه تبدیل موجک در مقابل اعمال پردازش تصویر مخصوصاً فشرده‌سازی JPEG و نویزها نسبت به قیچک مقاوم‌تر است. این خاصیت موجک در نهان‌نگاری، پیش‌تر در [۳] گزارش شده بود.

جدول ۵ مقادیر NC برای حمله‌های نویز

sailboat on lake	stream & bridge	pepper	man	lenna	elaine	couple	fishing boat	barbara	baboon	F-16	حمله/ تصویر
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.996	0.999	0.999	0.996	GN 0.005
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	GN 0.001
0.999	0.999	0.999	0.999	0.997	0.998	0.998	0.996	0.998	0.998	0.995	GN 0.01
0.991	0.996	0.992	0.99	0.994	0.991	0.996	0.993	0.992	0.996	0.993	GN 0.06
0.991	0.994	0.992	0.987	0.992	0.991	0.995	0.991	0.988	0.995	0.991	GN 0.1
0.988	0.992	0.988	0.985	0.989	0.986	0.991	0.987	0.987	0.992	0.987	GN 0.3
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SN 0.005
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SN 0.001
0.999	0.999	0.999	1	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.996	SN 0.01
0.997	0.997	0.997	0.996	0.996	0.993	0.999	0.994	0.99	0.998	0.994	SN 0.1
0.988	0.994	0.99	0.985	0.99	0.988	0.999	0.988	0.985	0.994	0.987	SN 0.5
1	0.999	0.999	1	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SP 0.005
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SP 0.001
0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	SP 0.01
0.998	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.996	0.998	0.997	0.995	SP 0.04
0.992	0.997	0.993	0.99	0.996	0.994	0.996	0.995	0.991	0.996	0.994	SP 0.1
0.987	0.992	0.989	0.985	0.987	0.987	0.984	0.988	0.984	0.993	0.987	SP 0.5

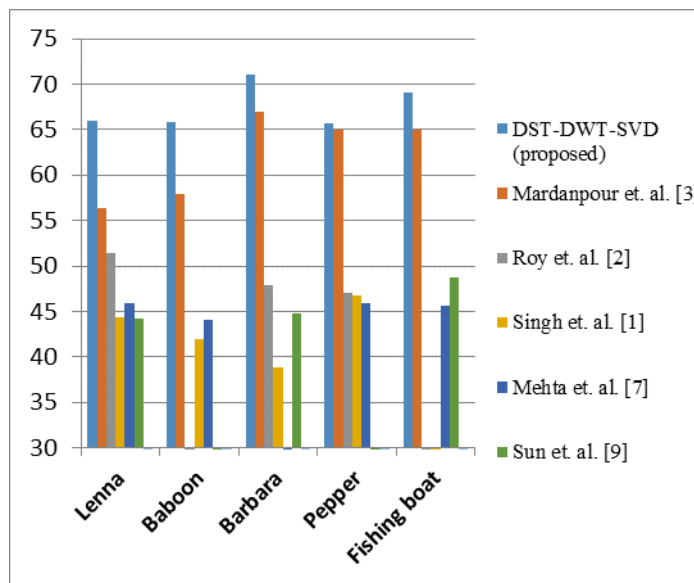
۴.۴. تحلیل مقایسه‌ای

در این بخش به منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی DST-DWT-SVD، نتایج بدست‌آمده با نتایج کارهای مشابه در این زمینه که اخیراً ارائه شده‌اند، مقایسه و تحلیل می‌شوند. ابتدا نامرئی بودن روش پیشنهادی برحسب PSNR با نتایج روش‌های روی [۲]، سینگ [۱]، مهتا [۷]، سان [۹] و مردانپور [۳] در قالب نمودار (۲) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی به‌ازای تصاویر انتخابی نسبت به سایر روش‌ها مقدار PSNR بیشتری دارد و این اختلاف در برخی تصاویر به ۳۰ دسی‌بل هم می‌رسد.

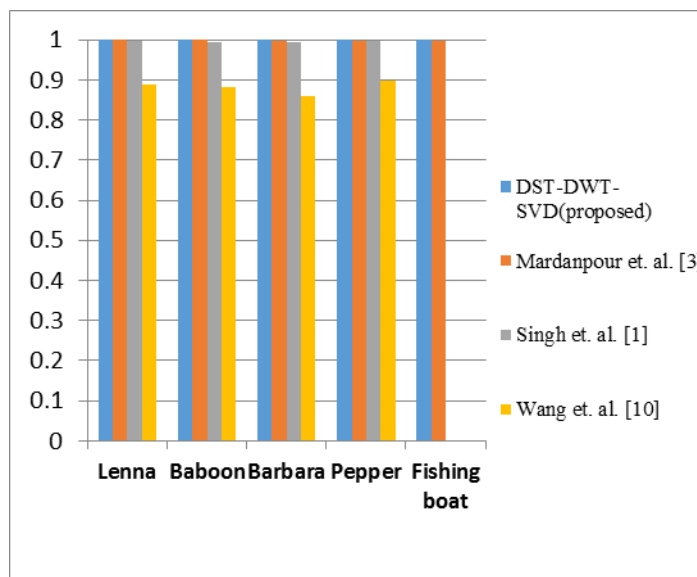
مقایسه شفافیت روش پیشنهادی با برحسب SSIM نیز ابتدا نامرئی بودن روش پیشنهادی برحسب PSNR با نتایج روش‌های مردانپور [۳]، سینگ [۱]، وانگ [۱۰] در قالب نمودار (۳) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش

پیشنهادی به‌ازای پنج تصویر lenna, baboon, barbara, pepper, fishing boat و نسبت به سایر روش‌ها مقدار SSIM بیشتری دارد.

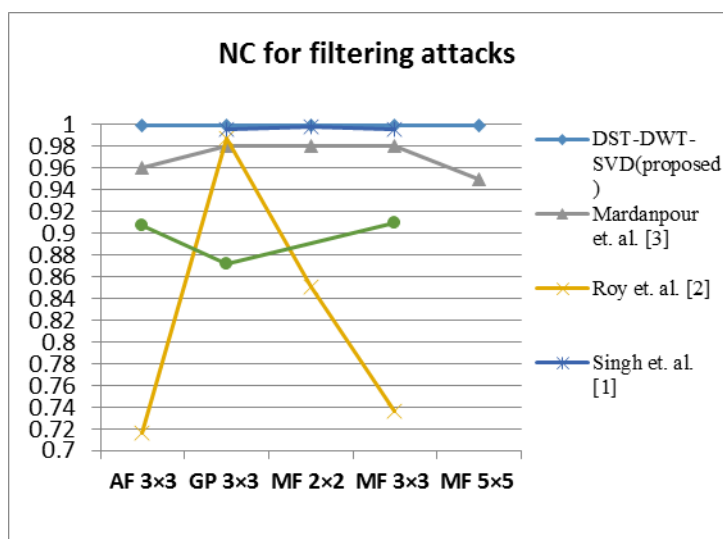
کارهایی که PSNR آن‌ها با روش پیشنهادی در نمودار بالا مقایسه شد، این‌بار براساس SSIM در نمودار (۳) نیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با بررسی این نمودار درمی‌یابیم از نظر SSIM نیز روش پیشنهادی شفافیت بهتری دارد. با در نظر گرفتن دو نمودار (۲) و (۳) می‌توان گفت روش پیشنهادی توانسته است شفافیت خوبی را فراهم سازد و نسبت به سایر کارها کارایی بهتری دارد.



نمودار ۲ مقایسه شفافیت روش پیشنهادی بر حسب PSNR با سایر کارها



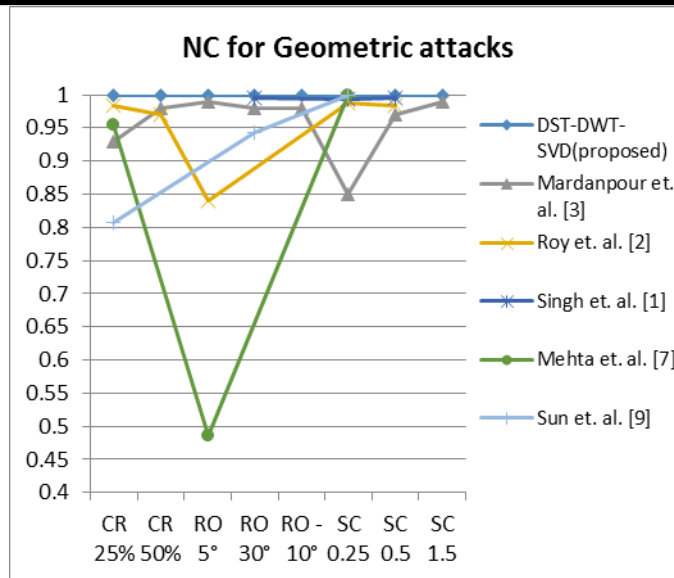
نمودار ۳ مقایسه شفافیت روش پیشنهادی بر حسب SSIM با سایر کارها



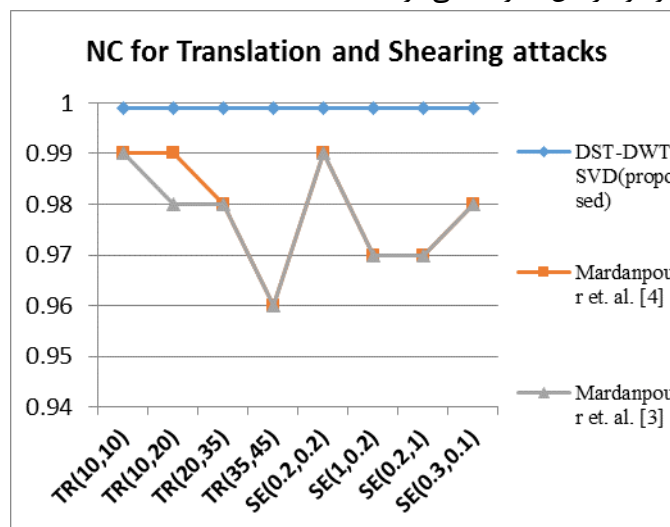
نمودار ۴ مقایسه مقاومت روش پیشنهادی بر حسب NC برای حمله فیلتر

در این قسمت روش DST-DWT-SVD با کار محققان روی [۲]، سینگ [۱]، مهتا [۷] و مردانپور [۳] از نظر مقاومت و به‌زای تصویر Lenna مقایسه می‌شود. نمودار (۴) میزان مقاومت این روش‌ها را در مقابل حمله‌های فیلتری به تصویر می‌کشد. همان‌گونه که در نمودار قابل مشاهده است مقاومت روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها بالاتر است و برای سه فیلتر گاوسی و میانه نتایج روش سینگ [۱] به روش پیشنهادی نزدیک است. در نمودار (۵)، مقدار NC روش‌ها برای حمله‌های هندسی برش، چرخش و تغییر مقیاس مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با بررسی این نمودار متوجه می‌شویم روش DST-DWT-SVD به‌دلیل استفاده از قیچک در برابر حمله‌های هندسی مقاومت بسیار زیادی نسبت به سایر کارها دارد. این اختلاف در کارهای روی [۲] و مهتا [۷] که در طرح‌های خود از موجک افزونه و موجک بالابرنده* استفاده کرده‌اند، بسیار مشهود است. چراکه در این نوع موجک‌ها برخلاف قیچک که موجک چندجهته می‌باشد، در مقابل حمله‌های هندسی چندان مقاوم نیستند.

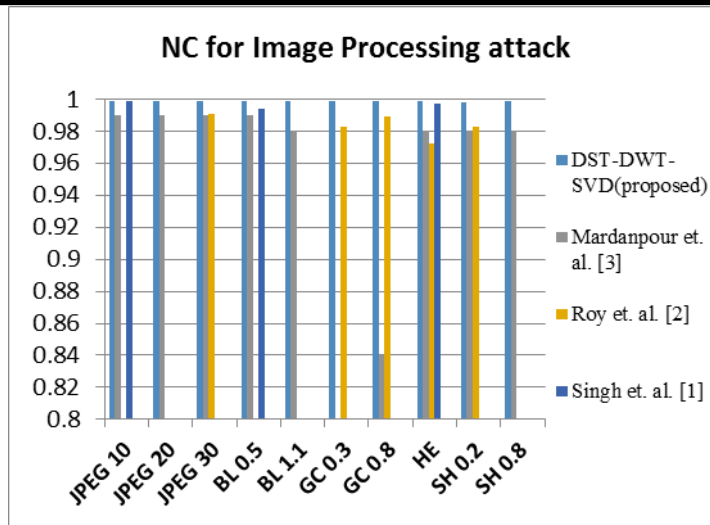
* Lifting Wavelet



نمودار ۵ مقایسه مقاومت روش پیشنهادی بر حسب NC برای حمله‌های هندسی برش، دوران و تغییر مقیاس در نمودار بالا به دلیل اینکه کارهایی که روش پیشنهادی با آن‌ها مقایسه می‌شد، دو حمله هندسی انتقال و قیچی مورد آزمایش قرار نگرفته بودند، در نمودار (۶) مقاومت روش DST-DWT-SVD در برابر این حمله‌ها با روش مردانپور [۳ و ۴] مقایسه شده است. با مشاهده این نمودار درمی‌یابیم که روش پیشنهادی مقابل انتقال و قیچی مقاومت بیشتری از دو روش دیگر دارد. این برتری نشان می‌دهد ترکیب دو تبدیل موجک و قیچک سبب بهبود و افزایش مقاومت می‌شود.

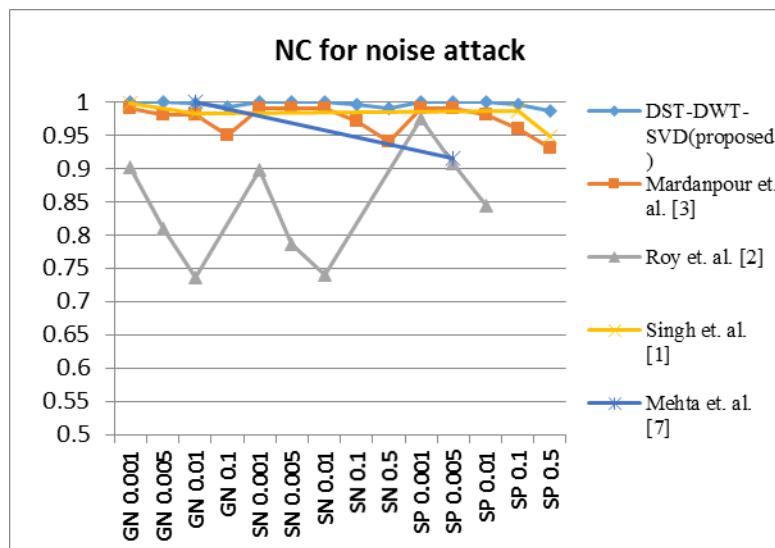


نمودار ۶ مقایسه مقاومت روش پیشنهادی بر حسب NC برای حمله هندسی انتقال و قیچی مقایسه مقاومت روش‌ها مقابل حمله‌های پردازش تصویری در نمودار میله‌ای (۷) نشان داده شده است. با بررسی این نمودار می‌بینیم که روش ارائه شده DST-DWT-SVD در برابر حمله‌های پردازش تصویری نیز مقاوم‌تر بوده و در مقایسه با روش سینگ [۱] برتری نسبی دارد. قابل ذکر است که ترکیب قیچک و موجک توانسته است در اصلاح گاما نسبت به پژوهش [۳] بهبود بسیار زیادی دهد.



نمودار ۷ مقایسه مقاومت روش پیشنهادی بر حسب NC برای حمله پردازش تصویر

نمودار (۸) مقادیر NC روش‌های مختلف را به‌ازای حمله‌های نویز گاوسی، نقطه‌ای و نمک‌و‌فلفل مقایسه می‌کند. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، روش DST-DWT-SVD در برابر نویز نیز همچون سایر انواع حمله‌ها مقاومت بیشتری دارد و در مقایسه با روش روی [۲] و سپس روش مهتا [۷] بسیار بهتر بوده است. این روش حتی نسبت به [۴] که در آن تنها از قیچک استفاده شده، نیز بهتر عمل کرده است. علت آن نیز همان‌گونه که قبلاً گفته شد به‌دلیل استفاده از تبدیل موجک در ترکیب با قیچک می‌باشد چراکه موجک مقاومت بیشتری در برابر نویز دارد.



نمودار ۸ مقایسه مقاومت روش پیشنهادی بر حسب NC برای حمله نویز

با بررسی نمودارهای (۴) تا (۸) که مقاومت روش‌های مختلف را مقابل انواع حمله‌ها مقایسه می‌کنند، می‌توان مشاهده کرد نسبت به سایر روش‌ها، حتی روش سینگ [۱] مقاومت بیشتری دارد. این DST-DWT-SVD که روش پیشنهادی برتری در مقاومت و شفافیت نشان‌دهنده کارا و موثر بودن ایده ترکیب موجک و قیچک در روش پیشنهادی می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای کارهای آینده

با توسعه سریع اینترنت و در دسترس بودن ابزارهای پردازش تصاویر چالش‌هایی همچون حفظ حق‌نشر و اعتبارسنجی پدید آمده است که نهان‌نگاری یکی از راه‌حل‌های مناسب جهت پاسخ به این مشکلات می‌باشد. در نهان‌نگاری دو خصوصیت متعامد مقاومت و شفافیت از اهمیت زیادی برخوردارند که باید بین این دو توازن برقرار شود. در اغلب روش‌های نهان‌نگاری تبدیل موجک استفاده شده است و کارایی آن اثبات شده است. در سال‌های اخیر تبدیل قیچک که در دسته موجک‌های چندجهته قرار دارد، معرفی شده است که یک نمایش چندمقیاسه و چندجهته را ارائه می‌دهد. در این مقاله یک روش نیمه‌کور ترکیبی مبتنی بر تبدیل‌های موجک و قیچک در کنار تجزیه ماتریسی مقدار تکین ارائه شده است. از تبدیل آرنولد به منظور تامین امنیت روش نهان‌نگاری بهره گرفته شده است. این روش بر روی تصاویر محک اجرا شده و برای سنجش مقاومت آن، طیف گسترده‌ای از حمله‌ها روی آن آزمایش شده است. نتایج بدست‌آمده و مقایسه آن‌ها با سایر روش‌ها، نشان از اثربخشی و کارایی این روش دارد. مقاومت زیاد روش پیشنهادی به این دلیل است که با ترکیب موجک و قیچک، ویژگی‌های خوب این دو تبدیل در هم ادغام شده و هریک می‌توانند ضعف دیگری را پوشش دهند. این روش روی تصاویر سطوح خاکستری آزمایش شدند، حال اینکه امروزه تصاویر رنگی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. می‌توان در آینده این روش را روی تصاویر رنگی و هم‌چنین برای استفاده در پزشکی، روی تصاویر پزشکی آزمایش کرد. در کارهای آتی می‌توان مقدار فاکتور مقیاس را که در این مقاله به صورت سعی و خطا مقداردهی شده است و را به وسیله الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید تعیین کرد و به بهترین توازن میان شفافیت و مقاومت دست پیدا کرد.

۶. مراجع

- [1] Singh, Siddharth, et al. "Hybrid semi-blind image watermarking in redundant wavelet domain." *Multimedia Tools and Applications* (2017): 1-25.
- [2] Roy, Soumitra, and Arup Kumar Pal. "A robust blind hybrid image watermarking scheme in RDWT-DCT domain using Arnold scrambling." *Multimedia Tools and Applications* 76.3 (2017): 3577-3616.
- [۳] مردانپور، زارع چاهوکی، جوانشیری. "مقایسه تحلیلی اثربخشی انواع تبدیل‌های توسعه یافته موجک بر شفافیت و مقاومت نشانه‌گذاری تصویر مبتنی بر تجزیه ماتریسی." *مجله ماشین بینایی و پردازش تصویر* ۴۱(۲۰۱۷): ۷۱-۸۷.
- [4] Mardanpour, Malihe, and Mohammad Ali Zare Chahooki. "Robust transparent image watermarking with Shearlet transform and bidiagonal singular value decomposition." *AEU-International Journal of Electronics and Communications* 70.6 (2016): 790-798.
- [5] Tsai, Hung-Hsu, Yu-Jie Jhuang, and Yen-Shou Lai. "An SVD-based image watermarking in wavelet domain using SVR and PSO." *Applied Soft Computing* 12.8 (2012): 2442-2453.
- [6] Li, Biyuan, et al. "Shearlet transform for phase extraction in fringe projection profilometry with edges discontinuity." *Optics and Lasers in Engineering* 78 (2016): 91-98.
- [7] Mehta, Rajesh, Navin Rajpal, and Virendra P. Vishwakarma. "LWT-QR decomposition based robust and efficient image watermarking scheme using Lagrangian SVR." *Multimedia Tools and Applications* 75.7 (2016): 4129-4150.
- [8] ShearLab, version 1.1, August 2017, www.shearlet.org/



- [9] Sun, Lin, et al. "A robust image watermarking scheme using Arnold transform and BP neural network." *Neural Computing and Applications*(2016): 1-16.
- [10] Wang, Xiang-yang, et al. "Blind optimum detector for robust image watermarking in nonsubsampling shearlet Domain." *Information Sciences* 372 (2016): 634-654.