

## روش‌های نهان نگاری مبتنی بر درون یابی در کاربرد تصاویر سنجش از دور: مقایسه، کاربردها و ارزیابی

محمد رضا خسروی

بخش رادار، صنایع الکترونیک ایران، شیراز، ایران.

نام نویسنده مسئول:

محمد رضا خسروی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

### چکیده

این مقاله به مرور روش‌های نهان نگاری جهت انتقال تصاویر و داده‌های سنجش از دور (هوایی، ماهواره‌ای و ...) می‌پردازد. در حالت کلی روش‌های نهان نگاری می‌توانند کاربردهای متعددی در سنجش از دور داشته باشند، اما این پژوهش، مروری کوتاه بر روش‌های مبتنی بر درون یابی است. این روش‌ها تحت دو شرط انتخاب می‌شوند؛ (۱) نهان نگاری رشته بیت (مربوط به داده‌های غیر تصویری نظیر اطلاعات جغرافیایی، سایر داده‌های حسگری و ...) در تصویر/ویدئو سنجش از دور انجام دهند، و (۲) مورد کاربرد آن‌ها در انتقال بهینه اطلاعات در کانال‌های با نرخ بیت ناکافی باشد به طوری که به فشردگی چند منبعی و تجمیع نیاز باشد (امنیت اطلاعات می‌تواند یک هدف فرعی باشد). در این راستا، ابتدا کاربردها و کلیات نهان نگاری با رشته بیت بررسی می‌شوند، سپس برخی از روش‌های جدید در قالب جدول کیفی (تکسونومی) مقایسه می‌شوند و در انتها معیارهای ارزیابی نیز معرفی می‌شوند. از آنجا که امروزه پلتفرم‌های تجمیع شده (حسگری، محاسبات و مخابرات) از اولویت‌های روز پژوهش در سیستم‌های فیزیکی-مجازی، اینترنت اشیا و کاربردهای آنها در سیستم‌های صنعتی محسوب می‌شوند، یک اثر ترویجی به فارسی با محوریت نهان نگاری که بتواند خلاصه‌ای از محاسبات آگاه به محتوای حسگرها و انتقال بهینه آنها در سیستم‌های سنجش از دور را مرور کنند، برای خوانندگان داخل سودمند خواهد بود.

**واژگان کلیدی:** درون یابی، نهان نگاری، فشردگی، سنجش از دور.

## مقدمه

به دلیل تهیه گسترده تصاویر و گاهی دنباله تصاویر (ویدئوها) توسط حسگرهای تصویربرداری سنجش از دور و از طرفی نیاز به ارسال بی سیم این تصاویر و دیگر متعلقات داده‌ای مربوط به سکوه‌های سنجشی هوایی و ماهواره‌ای، حجم داده‌ها در سیستم‌های سنجش از دور معمولاً زیاد است به شکلی که نیاز داریم روش‌هایی برای فشرده سازی (درون پلتفرم) بکارگیری شود. از این رو انتقال این حجم انبوه از داده‌ها به خصوص در کاربردهای زمان حقیقی یک چالش تلقی می‌شود و نیازمند روش‌هایی برای تجمیع و انتقال بهینه و امن است. همچنین سکوه‌های سنجش از دوری اعم از هواپیما، پهپاد و ماهواره علاوه بر اطلاعات اصلی (تصاویر و فریم‌ها) باید اطلاعات دیگری که محموله<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند را نیز منتقل کنند. این اطلاعات می‌توانند شامل موارد گوناگونی از جمله اطلاعات جغرافیایی محیط، اطلاعات مربوط به مشاهدات سنجش از دور، اطلاعات خود پرنده و حسگرها و ... باشد.

اهدافی که به صورت عمده در اینجا دنبال می‌شوند، عبارت‌اند از:

- جهت تسهیل انتقال تصویر و ویدئو، فشرده سازی با تلفات قابل قبول نیاز است. این کار با حذف داده‌های با اهمیت کمتر در فضای غیریکنواخت یا بازسازی داده‌های تصویری محذوف در یک فضای یکنواخت امکان پذیر است.
- فشرده سازی بدون تلف ویدئو به عنوان یک هدف نیز می‌تواند دنبال شود. علاوه بر روش‌های مرسوم، روش‌های نهان نگاری برگشت پذیر برای مخفی کردن بیت‌های تصادفی می‌توانند چنین قابلیت‌هایی را ایجاد کنند. اما در مواردی که کمبود پهنای باند و در کل نرخ بیت مخابراتی به نسبت حجم داده ارسالی ناکافی باشد، اساساً روش‌های بدون تلف از هر نوع ناکارآمد خواهند بود.

- انتقال محموله‌های افزوده از طریق روش‌های نهان نگاری امکان پذیر است. این نکته یک کارکرد بسیار جدی در جهت صرفه جویی در پهنای باند است و به نحوی محاسبات آگاه به محتوای حسگری در جهت مخابره داده محسوب می‌گردد. این نوع پردازش‌ها در دسته فشرده سازی چند منبعی (یا تجمیع) یا ادغام اطلاعات چند حسگری جای می‌گیرند.

پردازش داده سنجش از دوری در سکوه‌های مختلف به عنوان هدف اصلی این تحقیق است. سکوه‌های فضایی هنوز نیاز به فناوری بالاتری دارند و لذا به صورت کاربردی برای کشوری مثل ایران مورد تاکید نیستند و لذا عمده طراحی‌ها به سمت سکوه‌های هواپایه است، جایی که امکان تصویربرداری زمان حقیقی مخصوصاً با پهپاد میسر می‌شود. پیش پردازش، پردازش اصلی و تکمیلی داده خام و ویدئوی تشکیل شده در سکوه‌های هوایی می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. تشکیل تصویر و ویدئو، کاهش اعوجاج بصری، بهبود وضوح مکانی و زمانی، آشکارسازی و ردگیری اهداف از مهم‌ترین موارد پردازش اطلاعات در این سکوها محسوب می‌شوند.

## مبانی نهان نگاری مبتنی بر درون یابی

نهان نگاری<sup>۲</sup> به تکنیکی گفته می‌شود که تلاش می‌کند ضمن حفظ کیفیت یک تصویر میزبان، بخشی از تصویر دیگر یا رشته بیت معینی را در میزبان جاسازی کند. این کار به دلایل مختلف انجام می‌شود که گاهی مربوط به کاهش حجم اطلاعات است، گاهی برای امنیت و گاهی صرفاً برای مدیریت بهتر اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های نهان نگاری از فضای خالی تصویر استفاده می‌کنند و در این بین روشی موفق‌تر است که بتواند فضای مناسب‌تری برای درج نهان نگاره (واترمارک<sup>۳</sup>) چنان انتخاب کند که ضمن اینکه کمترین آسیب به کیفیت تصویر دارای واترمارک وارد شود، بیشترین حجم از ماترمارک‌ها را نیز در قیاس با دیگر روش‌ها در خود جای دهد (اگر هدف نهان سازی یک رشته بیت است و حمله نیز وجود ندارد). در موضوع بحث نهان نگاری به عنوان روشی برای تجمیع اطلاعات استفاده می‌شود و الزامی به پای‌بندی کامل به تعاریف و شرایط نهان نگاری وجود ندارد. هدف ما در اینجا در درجه اول کاهش حجم اطلاعات ضمن فرایند نهان نگاری است (صورت مساله مورد نظر ابتدا انتقال محموله و تجمیع اطلاعات است و در حال بسیار خاص فشرده سازی بدون تلف ویدئو خواهد بود) و نیز بحث مدیریت

<sup>1</sup> Payload

<sup>۲</sup> نهان نگاری با محوریت تصویر مقصود است. در حالت عام‌تر ترجمه‌ای است برای Data Hiding ولی در این تحقیق، مستقیماً به روش‌های واترمارکینگ (Watermarking) باز می‌گردد. واترمارکینگ گاهی به صورت‌های دیگر نیز ترجمه شده است.

<sup>3</sup> Watermark

اطلاعات نیز ممکن است مورد نظر باشد، اما نگاه امنیتی یک بحث فرعی است که بیشتر بحث حملات و رمزنگاری را درگیر می‌کند. روش‌های نهان نگاری همواره در شرایطی که حمله‌ای وجود ندارد، موظفانداً واترمارک را بدون خطا بازیابی کنند. روش‌های نهان نگاری تنوع بالایی دارند اما آنچه که در کاربرد مورد نظر کارایی خوبی دارد، روش‌های نهان نگاری برگشت پذیر<sup>۴</sup> است که امکان نهان نگاری چندلایه‌ای را فراهم می‌آورند. دسته مهمی از این نوع روش‌ها مبتنی بر درون‌یابی هستند که یک نمونه آن در سال ۲۰۱۸ معرفی شده است و عملکرد مناسبی در تصاویر شبه تنک<sup>۵</sup> (تصویری که با یک ترشولد پایین نیز در بخش بندی دو سطحی غالب پیکسل‌های آن صفر می‌شود، و خروجی یک ماتریس باینری تنک است) نظیر تصاویر راداری دارد [۱]. در شکل ۱، هیستوگرام<sup>۶</sup> قدر مطلق خطای یک تصویر به صورت ایده‌آل رسم شده است (هیچ وقت هیستوگرام در حالت واقعی پیوسته نیست و لذا تعاریف نقاط اکسترمم می‌تواند با این شکل نمادین متفاوت باشد). مطابق معیارهای این روش، دو سطح روشنایی LM و RM که بیشترین فراوانی را دارد، مکان مناسب برای تزریق بیت‌های واترمارک (نهان نگاره یا ته نقش) است.

### دسته بندی روش‌های نهان نگاری

روش‌های با پایه درون‌یابی متعددی وجود دارد که اغلب از محاسبات غیر وقتی برای درون‌یابی استفاده می‌کنند و گاهی نیز درون‌یابی وقتی دارند [۲]-[۷]. در ادامه مروری بر آنها خواهیم داشت. تکنیک‌های نهان نگاری مبتنی بر گسترش اختلاف<sup>۷</sup> یکی از مهم‌ترین دستاوردهای نهان نگاری هستند. یکی از کلیدی‌ترین کارهای این حوزه در [۲] بحث شده است. این روش مبنای طراحی بسیاری از روش‌های نهان نگاری جدیدتر است. از جمله در [۳]، نوع خاصی از این کلاس نهان نگاری تحت عنوان نهان نگاری برگشت پذیر مبتنی بر درون‌یابی تصویر ارائه شده است. در روش مقاله اخیر، یک تصویر میزبان از نسخه درون‌یابی شده آن کم می‌شود و یک تصویر خطا به دست می‌آید. پس از آن روی این تصویر خطا کار می‌شود تا نقاط مناسب برای نهان نگاری استخراج شود. روش موجود در [۱] در حقیقت نسخه بهبود یافته آن است که با اصلاح هیستوگرام توام با انتخاب الگوریتم‌های درون‌یابی متفاوت در داده‌های محک استاندارد و تصاویر پزشکی به نتیجه بهتری دست یافته است. تمرکز این روش بر وقتی سازی در فاز اول از هر لایه از نهان نگاری است. این دو روش اخیر، هیچکدام برای تصاویر سنجش از دور پیشنهاد نشده‌اند، با این حال نتایج تحقیقات نشان می‌دهد، به خوبی با داده‌های سنجش از دور (به خصوص راداری) سازگار هستند.

در [۴]، یک روش نهان نگاری با استفاده از درون‌یابی خطی ارائه شده است. این روش عملکرد مناسبی در مقایسه با روش‌هایی که از درون‌یابی غیرخطی استفاده می‌کنند، ندارد، زیرا فرایند درون‌یابی در آن وقتی نیست (وقتی بودن نسبت به لبه‌ها مورد نظر است، معمولاً در تکنیک‌های نهان نگاری مبتنی بر درون‌یابی، مساله تطبیق با فاصله موضوعیت ندارد یا کمتر مطرح می‌شود - در سیستم همسایگی<sup>۸</sup> مرتبه پایین که با داده‌های سنجش از دور تطابق خوبی دارند، برای سیستم مرتبه ۱ اصلاً قابل طرح نیست و در مرتبه ۲ می‌توان از آن صرف نظر کرد).

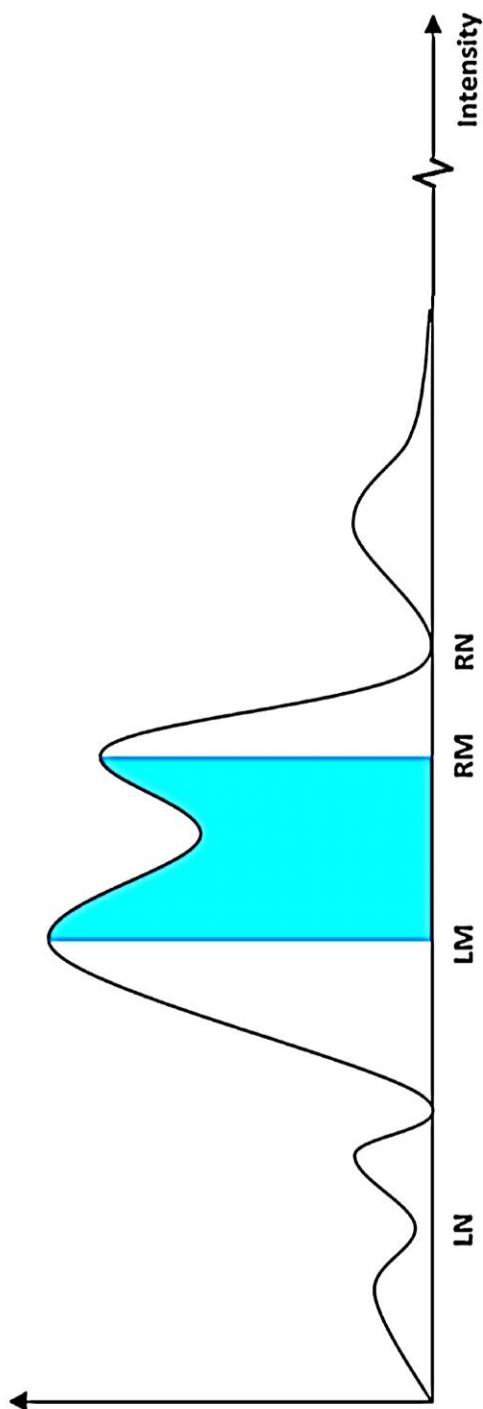
<sup>4</sup> Reversible Watermarking

<sup>5</sup> Quasi-Sparse

<sup>6</sup> Histogram

<sup>7</sup> Difference Expansion (DE)

<sup>۸</sup> مطابق تعریف سیستم همسایگی در میدان تصادفی مارکوف برای تصاویر دیجیتال که در مسایلی مثل بخش بندی تصویر کاربرد قابل ملاحظه‌ای دارد. توجه شود که به مابقی مفروضات میدان‌های مارکوف توجه نمی‌شود و اساس بحث کنونی، حداقل کردن پیش فرض‌ها و مفروضات اولیه راجع به داده ورودی است.



شکل ۱. استخراج پیکسل‌های هدف جهت تزریق بیت‌های اضافی متناظر با ۴ پارامتر توضیح داده شده در مرجع [۶]، محور بدون نام فراوانی در شدت روشنایی را نشان می‌دهد

همچنین در پژوهش گزارش شده در [۵]، یک روش نهان‌نگاری نسبتاً جدید برای تصاویر دیجیتال بر مبنای درون‌یابی سهموی<sup>۹</sup> ارائه شده است. این مقاله از جهت طرح یک درون‌یاب جدید نوآورانه است ولی در عمل برگشت پذیر نیست. عدم برگشت پذیری یک ضعف اساسی است (زمانی که صحبت از جاسازی رشته بیت است) به طوری که مانع از انجام چند لایه نهان‌نگاری می‌شود. ایراد دیگر این روش عدم پیاده‌سازی کامل درون‌یابی سهموی منجر به یک فیلتر بازسازی

<sup>۹</sup> Parabolic

خطی می‌شود، بنابراین این روش همانند همه روش‌های کلاسیک درون‌یابی چندجمله‌ای، وقتی نخواهد بود (ایراد سوم). توجه شود که در تئوری، درون‌یابی سهموی یک الگوریتم چندجمله‌ای است که از الگوریتم کانولوشن مکعبی<sup>۱۰</sup> (یا دو مکعبی) پیشرفته‌تر نیست، ولی جالب است که اخیراً توجه زیادی به آن شده است.

الگوریتم دو مکعبی قدمتی در حدود ۴۰ سال دارد و از یک چندجمله درجه ۳ استفاده می‌کند (البته دو چندجمله‌ای درجه ۳ در هم دیگر ضرب می‌شوند و ۱۶ ضریب پدید می‌آید) در حالی که درجه الگوریتم سهموی در هر راستا ۲ بوده و تعداد ضرایب آن نهایتاً ۹ است (بنابراین قدرت کمتری در تطبیق فاصله خواهد داشت) - اگر تعداد ضرائب کمتر از ۹ باشد، پیاده سازی دو بعدی ناقص تلقی می‌شود). توجه شود که هر قدر تعداد ضرائب بیشتر باشد، باید همسایه‌های دورتر را نیز در تخمین دخیل کرد. بنابراین از چندجمله‌ای درجه ۲ به بعد، روش درون‌یابی مطابق سیستم همسایگی مرتبه ۳ و بالاتر است.

روش‌های نهان نگاری برگشت پذیر اشاره شده در [۶]-[۷] که کاملاً جدید هستند، هر دو بر مبنای درون‌یابی سهموی ارائه شده‌اند و می‌توان آن‌ها را نسخه‌های بهبود یافته روش موجود در [۵] دانست. این دو روش، درون‌یابی سهموی را به طریقه کاملاً درستی در دو بعد پیاده کرده‌اند، با این حال فرایند تخمین تصویر دوم، وقتی نیست و علی‌رغم همه اصلاحات، هنوز دستاوردهای غیروقتی هستند. به علاوه، این دو مطابق سیستم‌های همسایگی مرتبه ۱ و ۲ نیز نیستند و ممکن است در بازسازی تصاویر راداری تاثیر منفی ایجاد نمایند.

جدول ۱ مقایسه کیفی چند مورد از کارهای نهان نگاری اخیر در کاربردهای مختلف را مشخص می‌کند. در انتخاب روش‌ها مهم‌ترین دلیل داشتن پایه درون‌یابی است. علاوه بر روش‌های مرور شده در بالا، روش‌های دیگری در همین رابطه در جدول ۱ دیده می‌شود [۸]-[۱۴]. تقریباً می‌توان ادعا کرد اکثر استراتژی‌های بهبود روش‌های نهان نگاری مبتنی بر درون‌یابی، نوعی اصلاح هیستوگرام هستند، هر چند که اصلاحات دیگری نظیر شیفت هیستوگرام نیز معمولاً انجام می‌شود.

این روش‌ها از طرق مختلفی به این تصحیح دست می‌زنند که شامل تصحیحات مستقیم در هیستوگرام (تنظیم، شیفت و ...) و بهبود کیفیت درون‌یابی است (زیرا این مورد نیز منجر به تغییرات مناسب در هیستوگرام تصویر خطا می‌شود). در همین اخیراً یک استراتژی سوم به نام تغییر هیستوگرام را نیز ارائه شده است که نوعی خاص از تصحیحات هیستوگرام است ولی چون منجر به افت شدید شاخص‌های شباهت سنجی در فریم تبدیل یافته و/یا عدم برگشت پذیری (بدون تلف) فریم میزبان می‌شود، یک روش موردی در کاربرد به خصوص تجمیع در انتقال است و در حالت کلی در هر نوع داده تصویری قابل استفاده نیست (مثلاً تسهیم سازی داده در اینترنت). از همین منظر، این دسته به عنوان یک استراتژی مجزا بحث می‌شود. نکته جالب این است که می‌توان این سه دسته استراتژی پردازش هیستوگرام اشاره شده را همزمان نیز استفاده کرد و همین نکته منشاء توسعه‌های زیادی در توسعه انتقال داده مبتنی بر استفاده از نهان نگاری در سیستم‌های سنجش از دور بوده و خواهد بود، مخصوصاً در انتقال تصاویر چند طیفی، فراطیفی و راداری.

### معیارهای ارزیابی

در جدول ۲ خلاصه‌ای از متداول‌ترین معیارهای ارزیابی جهت بررسی کیفیت روش‌های نهان نگاری در کاربرد مورد نظر آورده شده است. این معیارها مربوط به ارزیابی کیفیت بصری و نیز سنجش میزان بیت تزریق شده در هنگام فرایند تجمیع است که غالباً در ادبیات نهان نگاری چندرسانه‌ای استفاده می‌شوند. برخی ویژگی‌های آنها نیز ذکر گردیده است.

## جدول ۱. مقایسه توصیفی برخی روش‌های نهان نگاری

(این روش‌ها لزوماً در کاربرد انتقال داده بهینه بکارگیری نشده‌اند ولی عمدتاً قابلیت آن را دارند)

روش	کاربرد	سال انتشار	مبتنی بر درون - یابی	نوع درون‌یاب (در صورت وجود)	برگشت پذیری
روش ارائه شده در [۱]	تصاویر پزشکی	۲۰۱۸	بله	غیر خطی (وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۳]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۱۰	بله	غیر خطی (وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۴]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۱۶	بله	خطی (غیر وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۵]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۱۷	بله	خطی (غیر وفقی)	خیر
روش ارائه شده در [۶]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۱۹	بله	خطی (غیر وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۷]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۱۹	بله	خطی (غیر وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۸]	تصاویر پزشکی	۲۰۲۰	بله	خطی (غیر وفقی)	بله
روش ارائه شده در [۱۱]	تصاویر محک استاندارد	۲۰۲۰	بله	خطی (غیر وفقی)	خیر
روش ارائه شده در [۱۲]	تصاویر سنجش از دور (اپتیکی)	۲۰۱۸	بله	خطی (غیر وفقی)	خیر
روش ارائه شده در [۱۳]	تصاویر سنجش از دور (سار)	۲۰۱۶	خیر	-	خیر
روش ارائه شده در [۱۴]	تصاویر سنجش از دور (سار)	۲۰۱۴	خیر	-	خیر

## جدول ۲. معیارهای ارزیابی برای سنجش عملکرد فرایندهای تجمیع، فشرده سازی و بازسازی

معیارهای ارزیابی	کاربرد	نیاز به مرجع	نوع معیار	هم خانواده
PSNR	معیار ارزیابی کیفیت (شباهت) در تصویر / فریم ویدئو	دارد	Objective	MSE, RMSE, SNR, E-PSNR
SSIM	معیار ارزیابی کیفیت (شباهت) در تصویر / فریم ویدئو	دارد	Subjective	دیگر نسخه‌های SSIM
EPI	معیار بررسی لبه تصاویر / فریم ویدئو (در اصل در نويز زدائي سار کاربرد دارد)	دارد	Objective	-

BPP	خطی	-	شاخص سنجش ظرفیت تجمیع در ویدئو (حجم کلی نهان نگاره)	TEC
TEC	خطی	-	شاخص سنجش ظرفیت تجمیع در ویدئو (حجم کلی نرمال شده بازای هر پیکسل)	BPP

### نتیجه گیری

این تحقیق به اختصار مروری بر برخی از رویکردهای نهان نگاری در سیستم‌های سنجش از دور داشته است که به تحقق سیستم‌های فیزیکی-مجازی صنعتی کمک می‌کند. روش‌های اصلی مورد بحث، روش‌های برگشت پذیر مبتنی بر دورن یابی هستند که در جهت حمل داده (محموله) هوایی یا فضایی استفاده می‌شوند. همچنین علاوه بر دسته بندی‌های صورت گرفته، معیارهای ارزیابی مهم نیز مرور شده است. موضوع ارائه شده در اینجا یکی از موضوعات مشترک بین چند دانش مختلف اعم از علوم سنجش از دور، دانش نظامی، مهندسی مخابرات و علوم کامپیوتر است.

## منابع و مراجع

- [1] M. R. Khosravi, et al., "A lossless data hiding scheme for medical images using a hybrid solution based on IBRW error histogram computation and quartered interpolation with greedy weights", *Neural Computing and Applications*, 2018.
- [2] J. Tian, "Reversible data embedding using a difference expansion", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003.
- [3] L. Luo, et al., "Reversible Image Watermarking Using Interpolation Technique", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010.
- [4] A. Malik, et al., "An image interpolation based reversible data hiding scheme using pixel value adjusting feature", *Multimedia Tools and Applications*, 2016.
- [5] X. Zhang, et al., "High capacity data hiding based on interpolated image", *Multimedia Tools and Applications*, 2017.
- [6] A. Shaik, et al., "High capacity reversible data hiding using 2D parabolic interpolation", *Multimedia Tools and Applications*, 2019.
- [7] M. A. Wahed, et al., "High capacity reversible data hiding with interpolation and adaptive embedding", *PLoS ONE*, 2019.
- [8] R. Geetha, et al., "Embedding electronic patient information in clinical images: an improved and efficient reversible data hiding technique", *Multimedia Tools and Applications*, 2020.
- [9] W. F. Qi, et al., "Reversible data hiding using multiple histogram modification and dynamic programming", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2019.
- [10] F. Peng, et al., "Reversible data hiding based on RSBEMD coding and adaptive multi-segment left and right histogram shifting, left and right histogram shifting", *Signal Processing: Image Communication*, 2020.
- [11] M. Jana, et al., "An Image Data Hiding Scheme Through Image Interpolation", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020.
- [12] M. R. Khosravi, et al., "Enhancing the Binary Watermark-Based Data Hiding Scheme Using an Interpolation-Based Approach for Optical Remote Sensing Images", *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 2018.
- [13] M. E. Abdulmunim, et al., "SAR Images Watermarking Based on Multi-wavelet and Curvelet Transforms", *Eng. & Tech. Journal*, 2016.
- [14] B. Lei, et al., "Watermarking with refined perceptual masking tuned for synthetic aperture radar images", *Journal of Electronics (China)*, 2014.