

نهان‌کاوی فایل‌های فشرده صوتی با استفاده از

یادگیری ماشین

محسن سلیمانی^{۱*}، مهدی چهل‌امیرانی^۲، سیدجهان‌شاه کبودیان^۳

^۱* دانشجوی دکترای، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۲ استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه رازی، کرمانشاه

چکیده

علم پنهان‌سازی پیام حاوی اطلاعات در یک رسانه حامل را نهان‌نگاری و تلاش برای تشخیص وجود یا نبود پیام نهان‌شده در شیء پوششی را تحلیل نهان‌نگاری یا نهان‌کاوی می‌نامند. فرمت فشرده‌سازی MP3 در میان داده‌های صوتی به‌عنوان میزبانی مناسب و فراگیر برای نهان‌نگاری اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته و شیوه‌های نهان‌نگاری مختلفی برای این منظور طراحی شده‌اند؛ در این پژوهش، هدف ارائه الگوریتمی برای نهان‌کاوی به‌طور خاص برای فایل‌های فشرده صوتی با قالب MP3 است که با نرم‌افزار MP3stego نهان‌نگاری شده‌اند. برای تهیه دادگان نهان‌نگاری از فایل‌های متنی با متون تصادفی استفاده شده است. ابتدا با استفاده از اطلاعات جانبی مستخرج از فایل‌های MP3، ویژگی‌های لازم استخراج شده و دادگان صوتی که شامل دو دسته فایل‌های نهان‌نگاری شده و فایل‌های نهان‌نگاری نشده است، به دو بخش دادگان آموزش و دادگان آزمون تقسیم شده و در ادامه با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (ماشین بردار پشتیبان)، سامانه تشخیص فایل‌های آلوده و فایل‌های تمیز طراحی شده و در نهایت کارایی سامانه با استفاده از دادگان آزمون اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله، یک ویژگی جدید به‌نام قله‌داربودن طیف (SPK) از اطلاعات جانبی فایل MP3 استخراج می‌شود. سامانک پیشنهادی با استفاده از دادگان جداگانه آزمون که شامل فایل‌های تمیز و فایل‌های نهان‌نگاری شده با ظرفیت‌های نهان‌نگاری متنوع است، آزمایش شده و با دقت ۱۰۰٪ و بدون خطا فایل‌های تمیز و آلوده را از هم متمایز می‌کند. نتایج حاصل حاکی از شناسایی دقیق موارد نهان‌نگاری شده در عین کاهش پیچیدگی محاسباتی و افزایش سرعت این نوع نهان‌کاوی نسبت به روش‌های ابداعی گذشته است.

واژگان کلیدی: فایل فشرده صوتی، نهان‌کاوی فایل‌های صوتی، نهان‌نگاری در فایل‌های صوتی، MP3، MP3Stego

Steganalysis of Compressed Audio Files Based on Machine Learning

Mohsen Soleimani^{1*}, Mehdi Chehel Amirani², Seyed Jahanshah Kabudian³

PhD Student, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran¹

Professor, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran²

Assistant Professor, Faculty of Electrical & Computer Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran³

Abstract

The science of hiding a message containing information in a carrier medium is called steganography, and the attempt to detect the presence or absence of a hidden message in a cover medium is called steganalysis. The MP3 compression format has been used among audio data as a suitable and comprehensive host for information encryption, and various encryption methods have been designed for this purpose. In this research, the aim is to present an algorithm for audio ateganalysis, specifically for compressed audio files in MP3 format, in which some data has been embedded using MP3stego software. To prepare encrypted data, text files with random texts have been used. First, by using the side information extracted from MP3 files, the necessary features are extracted and the audio data, which includes two categories of stego files and clean files, is divided into two parts:

* Corresponding author

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

سال ۱۴۰۳ شماره ۲ پیاپی ۶۰

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۸ • تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۶ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۸/۸ • نوع مطالعه: پژوهشی



training data and test data. And then, using machine learning techniques (support vector machine), the detection system of infected files and clean files is designed, and finally, the efficiency of the system is measured using the test data. In this paper, a new feature called spectral peakiness (SPK) is extracted from the side information of MP3 file. The proposed system was tested using separate test data, which includes clean files and stego files with various encryption capacities, and it distinguished clean and stego files with 100% accuracy and without error. The results indicate the perfect classification of stego and clean files while reducing the computational complexity and increasing the speed of steganalysis compared to other methods.

Instead of using the audio signal information stored in the MP3 file, the proposed method uses the side information of the MP3 file, which is less dependent on the audio content of the file. In this method, the MDB side information in the compressed audio file is assumed as a sequence, and then, using a feature extraction method, a new feature in the frequency domain called spectral peakiness is calculated. This simple yet powerful feature is combined with features such as temporal average and spectral average of the MDB sequence and forms a low-dimensional (three-dimensional) feature vector. This feature vector will then be classified by a support vector machine (SVM) classifier as a suspicious file or a normal file. The feature extraction method, while being simple and having very few calculations, has 100% accuracy (recognition without any error) for MP3 files, even when the amount of the hidden information in the audio file is very low.

Keywords: Compressed Audio File, Audio Steganography, Audio Steganalysis, MP3, MP3stego.

همچنین نهران کاوی خاص و عام، نهران کاوی هدفمند و غیرهدفمند از اقسام دیگر تقسیم‌بندی در موضوع نهران کاوی است.

همان‌طور که اشاره شد یکی از انواع دسته‌بندی‌های نهران کاوی، خاص و عام بودن هدف نهران کاوی است. در نهران کاوی عام، هدف شناسایی و تحلیل هر نوع نهران‌نگاری و در نهران کاوی خاص، هدف شناسایی و تحلیل یک‌نوع خاص از نهران‌نگاری است.

روشن است که در صورت شناسایی و تحلیل نهران‌نگاری‌های متنوع به‌صورت خاص می‌توان یک نهران‌کاوی عام بهینه تولید کرد؛ در صورتی‌که الگوریتم نهران‌نگاری را بدانیم، استفاده از نهران‌کاوی خاص به‌سرعت و دقت عملیات کمک می‌کند.

در بررسی‌های مختلف ثابت شده که در نهران‌نگاری فایل‌های فشرده صوتی، بسته به نوع و روش نهران‌نگاری ممکن است، ردپای نهران‌نگاری، هم در مقایسه با سیگنال صوتی اولیه و هم در مشخصات آماری پارامترهای تولیدشده در جریان فشرده‌سازی از جمله اطلاعات جانبی^۴ پدیدار شود. بسته به نوع روش‌های نهران‌نگاری، تغییراتی در اطلاعات جانبی، داده‌های اصلی و محتوای پوشاننده^۵ سیگنال رخ می‌دهد و به‌طور معمول ردپایی از نهران‌نگاری برجای می‌ماند و از این جهت است که می‌تواند مورد شناسایی قرار گیرد.

روش‌های نهران‌کاوی فایل‌های صوتی را نیز می‌توان در دو دسته روش‌های نهران‌کاوی عام و روش‌های نهران‌کاوی خاص قرارداد؛ در دسته نخست، فرض بر این است که هر

۱- مقدمه

امروزه اینترنت یکی از مهم‌ترین راه‌های ارتباطی بین افراد و سازمان‌هاست. گسترش اینترنت و وجود برخی افراد و نفوذگران که سعی در دستیابی به اطلاعات خصوصی افراد و سازمان‌ها را دارند و همچنین تلاش برخی از عناصر بیگانه در برقراری ارتباط با عوامل خود باعث ایجاد برخی روش‌های نهران‌نگاری شده‌است. نهران‌نگاری (استگانوگرافی)^۱ هنر و علم پنهان‌سازی پیام یا اطلاعات طبقه‌بندی‌شده در داخل یک‌سری اطلاعات بدون طبقه‌بندی است [۱]؛ از طرفی مراقبت و کنترل بسترها و شبکه‌های داخلی و شبکه‌های مرتبط با اینترنت یکی از وظایف نهادها و سازمان‌های امنیتی، نظامی و انتظامی است. سهل‌انگاری و غفلت از این مهم، بستری کم‌هزینه، مطمئن، پزرفیت و پنهان را برای سوءاستفاده‌کنندگان از این دانش و فن فراهم می‌آورد. نهران‌کاوی^۲، کشف و مقابله با عملیات نهران‌نگاری است و تحقیق و توسعه روش‌های آن می‌تواند به بهبود و ارتقای امنیت روش‌های موجود نهران‌نگاری نیز کمک کند [۲].

نهران‌نگاری و نهران‌کاوی از جهت بستر مورد استفاده، فن و الگوریتم به‌کاررفته و ویژگی‌های خاص دیگر تقسیم‌بندی و دسته‌بندی‌های متنوعی شده‌اند. نهران‌نگاری صوت، تصویر، متن، فیلم و شبکه‌ای، نهران‌نگاری^۳ LSB (بدون توجه به بستر مورد استفاده)، نهران‌نگاری در حوزه زمان و فرکانس، نهران‌نگاری در حوزه فشرده و غیرفشرده از اقسام این دسته‌بندی‌ها در موضوع نهران‌نگاری است؛

^۴ Side Information

^۵ Coverttext

^۱ Steganography

^۲ steganalysis

^۳ Least Significant Bit Matching

فشرده صوتی و از یک برنامه آنالیز فایل‌های MP3 در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین مراحل آموزش و آزمون سامانه با استفاده از ماشین بردار پشتیبان SVM² انجام شده است.

باتوجه به قدمت نرم‌افزار MP3Stego آزمایش‌هایی در گذشته برای نهان‌کاری خاص این نرم‌افزار صورت گرفته است. این نرم‌افزار هم روی اطلاعات جانبی و هم روی ضرایب MDCT³ تأثیر می‌گذارد و از این تغییرات برای کشف نهان‌کاری استفاده شده است. در آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۴] مقدار میانگین دقت آزمون در حالت استفاده از متغیر اشاره‌گر main_data_begin عدد ۹۲٪/۷ گزارش شده است.

در پژوهش دیگر انجام شده در مرجع [۵] ادعا شده است که با تحلیل آمارگان متغیر طول part2_3_length می‌توان از وجود و یا نبود داده مخفی آگاه شد؛ لیکن دقت این کار مطلوب نیست.

در گزارش ارائه شده دیگری در مرجع [۶] از تفاضل واریانس متغیر big_value فایل نهانه و فایل پوشانه برای تمایز فایل‌های تمیز و آلوده استفاده شده است.

در پژوهش انجام شده در مرجع [۷] ادعا شده که با استفاده از ضرایب MDCT نهان‌کاری در حالت نرخ پایین تعبیه با MP3Stego انجام شده است.

همچنین در مرجع [۱۵] از ویژگی‌های کپستروم استخراج شده از بانک فیلتر با مقیاس فرکانسی معکوس مل برای نهان‌کاری فایل‌های صوتی استفاده شده است.

۲- مفاهیم و مبانی نظری

۲-۱- تعریف مفاهیم و اصطلاحات

استگانوگرافی: استگانوگرافی در اصل کلمه‌ای با ریشه یونانی است که از دو کلمه Steganos به معنی پوشیده و graphy به معنی نوشتن تشکیل شده است که معادل فارسی آن نهان‌نگاری است [۱].

نهانه: به پیغامی که از درج داده‌های پیام محرمانه در داخل داده‌های پوشانه ایجاد می‌شود، «نهانه» گویند [۱].

پوشانه: پیغامی که داده‌های پیام محرمانه در داخل داده‌های آن درج می‌شوند، «پوشانه» نامیده می‌شود [۱].

نهان‌نگاری: نهان‌نگاری پنهان کردن پیام از دید دشمن است و یا دقیق‌تر هنر و علم پنهان‌سازی پیام یا

روش نهان‌نگاری به‌طور تقریبی ویژگی‌های آماری سیگنال حامل را تاحدی خراب می‌کند. در این روش‌ها اختلاف بین سیگنال نهان‌نگاری شده و سیگنال حامل اندازه گرفته می‌شود؛ مانند نهان‌کاری براساس معیارهای کیفی صوت، نهان‌کاری براساس ویژگی‌های آشوب‌گونه، نهان‌کاری مبتنی بر ویژگی‌های مستقل از محتوا و نظیر آن. در دسته دوم، الگوریتم پیشنهادی تنها برای یک روش نهان‌نگاری خاص طراحی شده است؛ مثل نهان‌کاری در فاز، نهان‌کاری در پژواک و نهان‌کاری MP3stego و غیره [۳].

در فرایند نهان‌کاری ابتدا با بررسی خصوصیات فایل حامل، در حالت تمیز و نهان‌نگاری شده، باید به دنبال ویژگی‌هایی بود که از لحاظ آماری بهترین تمایز را بین دودسته سیگنال پوشانه و سیگنال نهانه^۱ برقرار کنند؛ سپس با ویژگی‌های استخراج شده، بهترین طبقه‌بندی ممکن انجام می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای نهان‌کاری فایل‌های فشرده صوتی MP3 ارائه شد است [۳]. یکی از مهم‌ترین روش‌ها، نهان‌کاری با استفاده از اطلاعات جانبی است. اطلاعات جانبی، بخشی از فایل‌های فشرده صوتی MP3 است که در جریان فشرده‌سازی تولید می‌شود و شامل بخش‌های گوناگونی است. اصول تعبیه‌سازی در MP3Stego استفاده از توازن متغیر طول بلوک برای تعبیه است. فایل‌های کدگذاری و کدگشایی برای تعبیه اطلاعات و یا استخراج پیام تعبیه شده در دسترس است و یکی از بخش‌هایی که در حین فرایند نهان‌نگاری دچار تغییر می‌شود، متغیر اشاره‌گر main_data_begin (mdb) است.

در این پژوهش، هدف ارائه الگوریتمی برای نهان‌کاری خاص فایل‌های فشرده صوتی MP3 است که با نرم‌افزار MP3stego نهان‌نگاری شده‌اند. انتخاب نوع و تعداد ویژگی‌ها و تعداد نمونه‌های آزمایشی و همچنین الگوریتم استفاده شده برای یادگیری ماشین در بهبود نتیجه‌گیری در سامانه ارائه شده بسیار مؤثر است. در این گونه پژوهش‌ها هدف بهینه‌سازی تشخیص و تفکیک نمونه‌های آزمودنی با کمترین هزینه و زمان است؛ لذا در صورتی که بتوانیم ضمن افزایش دقت آزمایش، زمان نتیجه‌گیری را کاهش دهیم، موفق‌تر عمل کرده‌ایم.

برای انجام پژوهش از نرم‌افزار MP3Stego برای نهان‌نگاری، از بانک داده دورتموند برای تأمین فایل‌های استاندارد MP3، از یک برنامه تولیدکننده فایل‌های تصادفی متنی برای تعبیه در فایل‌های

^۱ Stegotext

^۲ Support Vector Machine

^۳ Modified Discrete Cosine Transform

اطلاعات طبقه‌بندی شده در داخل یک سری اطلاعات بدون طبقه‌بندی را نهان‌نگاری گویند [۱].

نهان‌کاوی: تلاش برای تشخیص وجود یا نبود پیام نهان‌شده در شیء پوششی را تحلیل نهان‌نگاری یا نهان‌کاوی گویند [۱].

نهان‌کاوی خاص و عام: در نهان‌کاوی عام، هدف شناسایی و تحلیل هر نوع نهان‌نگاری و در نهان‌کاوی خاص، هدف شناسایی و تحلیل یک نوع خاص از نهان‌نگاری است [۲].

آب‌نشان‌گذاری: آب‌نشان‌گذاری یا نقش‌برآزنی روشی برای حفظ حق مالکیت است که توسط آن نشانه‌ای از صاحب اثر به‌گونه‌ای در اثر تعبیه می‌شود که بدون ایجاد لطمه به کیفیت اثر به‌راحتی از آن قابل‌جداکردن نباشد و مشخص‌کننده منشأ و یا صاحب اثر باشد [۹].

۲-۲- چارچوب‌های نظری

یک سامانه نهان‌نگاری دارای سه ویژگی اساسی شفافیت^۲، ظرفیت^۳ و مقاومت^۴ است. منظور از شفافیت غیرقابل‌تشخیص بودن نهانه از پوشانه از دید ناظر انسانی است؛ البته شفافیت شاخص‌های آماری نیز به‌عنوان یکی دیگر از ویژگی‌ها و ملزومات نهان‌نگاری مطرح شده است. ظرفیت مقدار داده‌ای است که می‌تواند با استفاده از یک روش پنهان‌سازی اطلاعات تعبیه شود و مقاومت به این معنی است که نهانه در مقابل تهدیدات عمدی (نظیر فیلترکردن، فشرده‌سازی و ازاین‌قبیل) و تهدیدات غیرعمدی (نظیر اعوجاج کانال، تداخل و ازاین‌قبیل) مقاوم باشد. البته نهان‌نگاری ملزومات اساسی دیگری نیز از قبیل امنیت و برگشت‌پذیری و پیچیدگی عملیات دارد [۱]. این ویژگی‌ها در تقابل با یکدیگرند و در شرایط عادی باید به تمام این ویژگی‌ها توجه کرد؛ اما در بعضی کاربردها ناچاریم به‌بعضی از ویژگی‌ها اهمیت بیشتری دهیم. نهان‌نگاری و پنهان‌سازی اطلاعات کاربردهای متنوع و زیادی دارد و می‌تواند در پوشانه‌های مختلفی از قبیل پوشانه‌های نوشتاری، صوتی، تصویری و غیره انجام پذیرد.

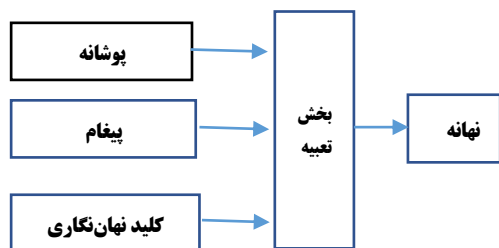
۲-۲-۱- نهان‌نگاری صوتی

به‌دلیل محدودیت‌های سامانه شنوایی انسان، صوت نیز می‌تواند بستر مناسبی برای نهان‌نگاری باشد. سامانه شنوایی انسان می‌تواند محدوده فرکانسی خاصی را درک کند؛ همچنین نسبت به پارازیت‌هایی که اضافه

می‌شود بسیار حساس است. هرگونه مزاحمتی در یک فایل صوتی قابل‌درک است حتی اگر خیلی ناچیز باشد. به‌هرحال با اینکه سامانه شنوایی انسان حساسیت زیادی دارد، اما دربرابر بعضی تغییرات حساسیت خود را از دست می‌دهد. مثلاً صداهای بلند صداهای آرام را درخود جای می‌دهند [۱۰].

برای استفاده از پوشانه صوتی برای مخفی‌کردن اطلاعات دو نکته را باید درنظر داشت: نخست باید از ضعف سامانه شنوایی انسان استفاده کرد و دوم توجه خاصی به حساسیت فوق‌العاده آن داشت [۱۱].

نهان‌نگاری صوتی در دو حوزه فشرده و غیرفشرده ممکن است؛ در حوزه غیرفشرده به‌دلیل حجیم‌بودن فایل می‌توان بدون اینکه سیگنال صوت دارای اعوجاج قابل تشخیصی باشد، اطلاعات را نهان‌نگاری کرد؛ البته به‌همین میزان تشخیص آن نیز کار آسان‌تری است؛ زیرا تغییرات عمدی در سیگنال بدون اینکه اثر انگشت آماری قابل‌ردیابی درون سیگنال بگذارد تقریباً محال است، اما در حوزه فشرده، به‌دلیل وجود ظرفیت‌های متنوع، کار نهان‌نگاری و بالطبع نهان‌کاوی پیچیده‌تر است.



(شکل-۱): شمای کلی نهان‌نگاری صوتی
(Figure-1): Overall Schematic for Audio Steganography

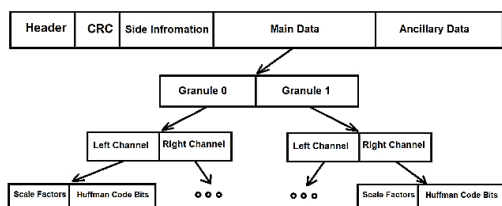
۲-۲-۲- فایل فشرده صوتی MP3

الگوریتم‌های کدگذاری صوت یا فشرده‌سازی صوت برای به‌دست‌آوردن یک نمایش دیجیتال و فشرده از سیگنال‌های صوتی باکیفیت بالا استفاده می‌شوند تا درنهایت بتوانیم انتقال یا ذخیره‌سازی صوت را با کارایی بالاتری انجام دهیم. هدف اصلی در کدگذاری صوت، نمایش سیگنال با کمینه تعداد ممکن بیت است، درعین‌این‌که بتوان بازتولید سیگنال را با وضوح بالایی انجام داد؛ یعنی صوت خروجی را طوری تولید کنیم که حتی با گوش حساس نیز قابل‌تفکیک از سیگنال اولیه ورودی نباشد. فرمت MPEG-2 و یا لایه سوم MPEG-1 که در بین کاربران با نام MP3 شناخته می‌شود، مشهورترین فرمت انتشار صوت بر روی اینترنت است که دارای نرخ فشرده‌سازی بالا و کیفیتی مطلوب است.

¹ Watermarking
² Transparency
³ Capacity
⁴ Robustness

می‌کنند، دوم راهکارهایی که اطلاعات را در طی مراحل فشرده‌سازی یک فایل به صورت MP3 در آن پنهان می‌کنند. گفتنی است دسته دیگری از روش‌ها نیز وجود دارند که اطلاعات را در فایل صوتی فشرده‌نشده پنهان می‌کنند، اما با توجه به اینکه مقاوم‌سازی در برابر فشرده‌سازی نیازمند محاسبات و تدابیر پیچیده‌ای است، از این روش نهان‌نگاری به ندرت استفاده می‌شود [۱۱].

یکی از روش‌های معروف و در دسترس نهان‌نگاری فایل‌های MP3، روش MP3Stego است این نرم‌افزار، نهان‌نگاری را در حین فشرده‌سازی انجام می‌دهد [۳].



(شکل-۴): سازماندهی ضرایب مقیاس در گرانول‌ها و کانال‌ها [۱۲]
(Figure-4): Structure of scale factors in granules and channels

۲-۲-۵- نرم‌افزار MP3Stego

همان‌طور که اشاره شد، این نرم‌افزار پیغام محرمانه را هم‌زمان با روند فشرده‌سازی پنهان می‌کند. داده‌ها ابتدا رمزگذاری و فشرده‌سازی می‌شوند و سپس در رشته بیت MP3 پنهان می‌شوند. روند پنهان‌سازی اطلاعات در دل فرایند کدگذاری MP3، به نام حلقه داخلی اتفاق می‌افتد. حلقه داخلی داده‌های ورودی را چندبندی‌سازی کرده و گام چندبندی‌سازی را یک واحد افزایش می‌دهد، تا اینکه داده‌های چندبندی‌سازی شده با ارقام دودویی کدگذاری شوند. همچنین یک حلقه بیرونی وجود دارد که نوفه چندبندی‌سازی را بررسی می‌کند تا از مقدار آستانه تعیین شده توسط بخش روان‌شنیداری تجاوز نکند. روش رمزگذاری فشرده شامل دو حلقه تودرتو است؛ به این ترتیب که حلقه درونی مقدار دقیق داده‌ها را تعیین کرده و کوانتایزر مناسبی را که با بودجه موجود در دسترس است، تعیین می‌کند و از سوی دیگر، حلقه بیرونی، اعوجاج^۶ فرایند رمزگذاری را کنترل می‌کند. نهان‌نگار MP3Stego وضعیت نهایی حلقه درونی را تغییر می‌دهد و پیام را در طول فرایند فشرده‌سازی پنهان می‌کند. همان‌طور که اشاره شد نهان‌نگاری با این نرم‌افزار، هم بر روی اطلاعات جانبی و هم بر ضرایب تبدیل کسینوسی گسسته اصلاح شده (MDCT^۷) تأثیر می‌گذارد.

به‌خاطر ویژگی‌های این نوع فایل‌ها می‌توان آن‌ها را یک حامل مناسب برای کاربردهای نهان‌نگاری در نظر گرفت. مهم‌ترین این ویژگی‌ها عبارت‌اند از محبوبیت و رواج بالای این فرمت، تأمین ظرفیت مناسب برای نهان‌نگاری و توجه به این مطلب که فشرده‌سازی MP3 همراه با اتلاف و افت است و این افت باعث می‌شود که سیگنال تولیدی از لحاظ آماری ویژگی‌های مشخصی نداشته باشد (البته در صورت دسترسی‌نداشتن به فایل حامل اصلی) و می‌تواند به‌عنوان یک حامل با امنیت بالا به کار رود [۸].

۲-۲-۳- آناتومی فایل فشرده صوتی MP3

تمام فایل‌های MP3 به قطعه‌های کوچکی تقسیم می‌شوند که فریم نام دارند. هر فریم تعداد ۱۱۵۲ نمونه صوتی را در خود ذخیره می‌کند و ۲۶ میلی‌ثانیه به‌طول می‌انجامد؛ علاوه بر آن، یک فریم به دو گرانول تقسیم می‌شود که هر گرانول شامل ۵۷۶ نمونه است.

هر فریم شامل پنج بخش سرایند^۱، CRC^۲، اطلاعات جانبی^۳، داده اصلی^۴ و داده کمکی^۵ است [۱۱].

Ancillary Data	Main Data	Side Information	CRC	Header
----------------	-----------	------------------	-----	--------

(شکل-۲): چیدمان یک فریم از فایل MP3 [۱۲]

(Figure-2): Information structure for one frame of MP3 file

سرایند ۳۲ بیت دارد و شامل یک کلمه هم‌زمان‌سازی به‌همراه توصیفی از فریم است. اگر بیت حفاظت در سرایند به یک تنظیم شود بخش CRC وجود دارد و امکان بررسی داده‌های با حساسیت بالا را برای خطاهای انتقال فراهم می‌کند. بخش اطلاعات جانبی فریم شامل اطلاعات موردنیاز برای کدگذاری داده اصلی است. بخش‌های متفاوت اطلاعات جانبی در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

Main_data_begin	Private_bits	scfsi	Side_info_gr. 0	Side_info_gr. 1
-----------------	--------------	-------	-----------------	-----------------

(شکل-۳): ساختار اطلاعات جانبی [۱۲]

(Figure-3): Structure of Side Information

بخش داده اصلی شامل ضرایب مقیاس، بیت‌های کدشده هافمن و بخش داده کمکی اختیاری بوده و برای ثابت‌ماندن نرخ بیت فایل MP3 استفاده می‌شود.

۲-۲-۴- نهان‌نگاری در فایل‌های MP3

شیوه‌های نهان‌نگاری در فایل‌های MP3 به دو گروه از راه‌کارها تقسیم می‌شوند: نخست راهکارهایی که اطلاعات را در حوزه فشرده و در رشته بیت MP3 پنهان

¹ Header
² Cyclic Redundancy Check(CRC)
³ Side Information
⁴ Main Data
⁵ Ancillary Data

⁶ Distortion
⁷ Modified Discrete Cosine Transform



۳-۱- استخراج ویژگی

هدف از این پژوهش، ارتقای دقت و افزایش سرعت شناسایی فایل های فشرده صوتی MP3 است که با نرم افزار MP3Stego نهران نگاری شده اند. از آنجاکه این نهران نگار تعبیه پیغام را درحین کوانتزاسیون انجام می دهد، بخش هایی از اطلاعات جانبی دچار تغییرات می شوند و می توان متناسب با روش نهران نگاری از هریک از این متغیرها برای استخراج ویژگی و آشکارکردن نهران نگاری استفاده کرد. در این پژوهش پس از بررسی ها و آزمایش های مختلف بر روی متغیرهای اطلاعات جانبی، متغیر اشاره گر main_data_begin (mdb) برای این کار مناسب تشخیص داده شد. بدین صورت که دنباله mdb ازای قاب های متوالی فایل صوتی به صورت یک سیگنال زمانی به نام $x_{\text{mdb}}[m]$ فرض می شود و یک بردار ویژگی سه بعدی FeatVec از آن استخراج می شود (m شماره قاب است). عنصر نخست از این بردار ویژگی، یعنی m_{mdb} میانگین متغیر mdb در حوزه زمان است. عنصر دوم از این

بردار ویژگی، یعنی μ_X میانگین اندازه طیف فوریه متغیر mdb در حوزه فرکانس است. عنصر سوم از این بردار ویژگی، یعنی SPK_{mdb} یک ویژگی ارائه شده و جدید در حوزه طیف است و میزان قله داربودن طیف یا Spectral Peakiness نامیده می شود؛ درنهایت، بردار سه بعدی FeatVec استخراج شده از روی دنباله mdb فایل صوتی mp3 به یک ماشین بردار پشتیبان (مرزی) داده می شود و فایل صوتی به دو کلاس تمیز (Plain) و آلوده (Stego) دسته بندی می شود. روابط دقیق استخراج بردار ویژگی از روی متغیر اطلاعات جانبی mdb به صورت زیر است:

$$x_{\text{mdb}}[m] = \text{Main Data Begin of } m\text{-th frame}$$

$$\mu_{\text{mdb}} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x_{\text{mdb}}[m] \quad (1)$$

$$x'_{\text{mdb}}[m] = x_{\text{mdb}}[m] - \mu_{\text{mdb}} \quad (2)$$

$$X_{\text{mdb}}[k] = \left| \sum_{m=0}^{M-1} x'_{\text{mdb}}[m] e^{-j \frac{2\pi km}{M}} \right| \quad (3)$$

$$\mu_X = \frac{2}{M} \sum_{k=1}^{M/2} X_{\text{mdb}}[k] \quad (4)$$

$$X'_{\text{mdb}}[k] = X_{\text{mdb}}[k] - \mu_X \quad (5)$$

نرم افزار Mp3stego تعبیه سازی را با تغییر طول بلوک گرانول انتخاب شده انجام می دهد. این فرایند تعبیه سازی روی متغیرهای اطلاعات جانبی مانند متغیر main_data_begin، گام چندی سازی، طول بلوک، متغیر big_value و میانگین مخزن تأثیر می گذارد [۸]. در هر حلقه تکراری که شرط تطابق توازن طول بلوک و بیت مخفی برقرار نباشد، گام چندی سازی یک واحد افزایش می یابد؛ افزایش گام چندی سازی باعث می شود ضرایب MDCT با گام درشت تر کوانتیزه شوند؛ بنابراین مقدار آن ها کوچک تر می شود و می توانند با تعداد بیت کمتری کد شوند. از طرفی سازوکار مخزن بیت در MP3 امکان ذخیره و قرض را برای فریم ها فراهم کرده است. در حالت نهران نگاری چون تعداد بیت مورد نیاز برای کد کردن ضرایب تبدیل کسینوسی گسسته اصلاح شده کاهش می یابد؛ بنابراین فضای کمتری از فریم صرف کد کردن داده اصلی می شود و مابقی بیت های در دسترس فریم جاری ذخیره می شوند. داده اصلی فریم بعدی بلافاصله بعد از داده اصلی فریم قبل تر شروع می شود [۳]؛ بنابراین متغیر اشاره گر (mdb) main_data_begin تغییر می کند.

متغیر main_data_begin که یک اشاره گر منفی است و به ابتدای داده اصلی فریم جاری اشاره می کند، در حالت نهانه درمقایسه با حالت پوشانه، دارای مقدار بزرگ تری است.

۳- روش شناسی

در این تحقیق، در ابتدا روش های فشرده سازی صوت و فشرده سازی MP3 مطالعه و بررسی شده و در ادامه معروف ترین روش نهران نگاری صوتی در دسترس Mp3stego مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. سیگنال صوت بیشتر ماهیت دوره ای دارد و می توان گفت هرگونه دست کاری و تغییر غیرمجاز می تواند ردپاهای قابل ردگیری روی سیگنال بگذارد [۳]. نهران نگار MP3stego نیز در دوبرخش اطلاعات جانبی سیگنال و اطلاعات اصلی تأثیر می گذارد که در این پژوهش نهران کاوی با استفاده از آنالیز بخش اطلاعات جانبی صورت گرفته است.

در ابتدا با بررسی و تحلیل قسمت های مختلف اطلاعات جانبی، ویژگی مناسب برای نهران کاوی انتخاب شده است و با استفاده از دانش یادگیری ماشین به آموزش

در ابتدا کلیه فایل‌های انتخاب‌شده MP به فرمت wav تبدیل‌شده و در ادامه فایل‌های wav توسط نرم‌افزار MP3Stego با درصد‌های متفاوتی از ظرفیت، نهان‌نگاری شده و پس از استخراج پارامترهای اطلاعات جانبی از هر دودسته فایل‌های MP3 آلوده و تمیز برای دو شمای کلی فاز آموزش سامانه طراحی‌شده در شکل (۵) نشان‌داده شده‌است.

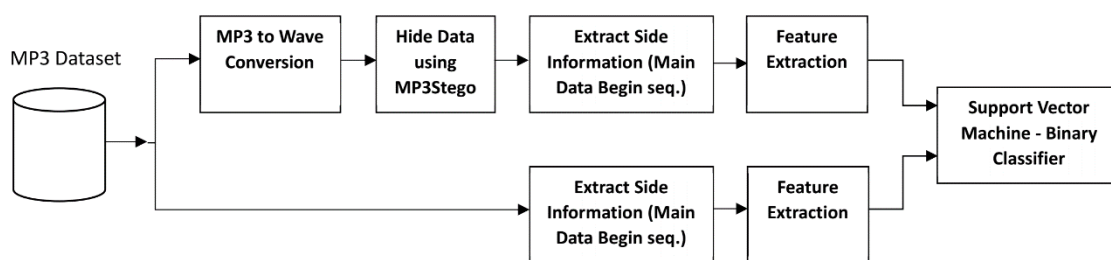
$$SPK_{\text{mdb}} = \sqrt{\frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M/2} X'_{\text{mdb}}[k]^2} \quad (6)$$

$$\text{FeatVec} = [\mu_{\text{mdb}} \mu_X \text{SPK}_{\text{mdb}}]^T \quad (7)$$

۳-۲- آموزش سامانه

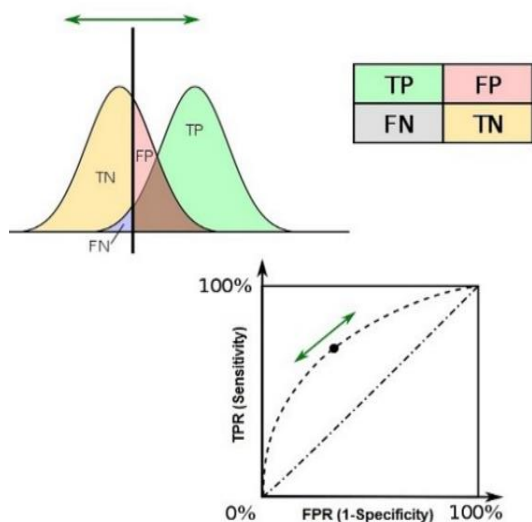
از آنجاکه هدف اصلی این پژوهش شناسایی فایل‌های نهان‌نگاری‌شده با استفاده از یادگیری ماشین است تهیه بانک‌داده برای آموزش و آزمون ضروری است. به‌این‌منظور

(شکل-۵): بلوک دیاگرام مرحله آموزش سامانه پیشنهادی
(Figure 5): Block diagram of the training stage for the proposed system



۱-۴-۳- منحنی راک^۲

منحنی راک که از آن به‌عنوان «منحنی مشخصه عملکرد سامانه» نام برده می‌شود، یک نمودار گرافیکی است که برای تشخیص و ارزیابی کارایی یک سامانه طبقه‌بند دودویی استفاده می‌شود.



(شکل-۶): نمایش منحنی راک و حالات مختلف خروجی سامانه
(Figure-6): The ROC curve and types of system errors

منحنی راک که به‌صورت شکل زیر است، برای بیان نرخ پذیرش صحیح (TPR) در برابر نرخ پذیرش غلط (FPR) به‌کار می‌رود. محور عمودی این منحنی حساسیت و محور افقی آن همان (ویژگی - ۱) است.

۳-۳- یادگیری سامانه

برای طبقه‌بندی داده‌ها از ماشین بردار پشتیبان (SVM) که یک الگوریتم با نظارت در یادگیری ماشین است، استفاده شده‌است. ماشین بردار پشتیبان از روشی که به آن روش مبتنی بر هسته (کرنل^۱) گفته می‌شود، استفاده می‌کند. در این روش در واقع توابعی وجود دارند که فضای ورودی بعد پایین را دریافت کرده و آن را با تبدیلات غیرخطی به فضای بعد بالاتر تبدیل می‌کنند. این تبدیل، یک مسئله غیرقابل جداسازی به‌صورت خطی در فضای بعد پایین را به یک مسئله قابل جداسازی به‌صورت خطی در فضای بعد بالا تبدیل می‌کند.

۳-۴- آزمون سامانه

در مرحله آزمون یک فایل صوتی MP3 به سامانه آموزش‌دیده وارد می‌شود و از سامانه می‌خواهد که باتوجه‌به ویژگی‌های به‌دست‌آمده تشخیص دهد که این فایل، یک فایل تمیز است یا یک فایل نهان‌نگاری شده‌است. فایل‌های برچسب‌دار جدید به سامانه آموزش‌دیده داده شده و نتایج خروجی سامانه با برچسب مرجع فایل ورودی مقایسه می‌شود.

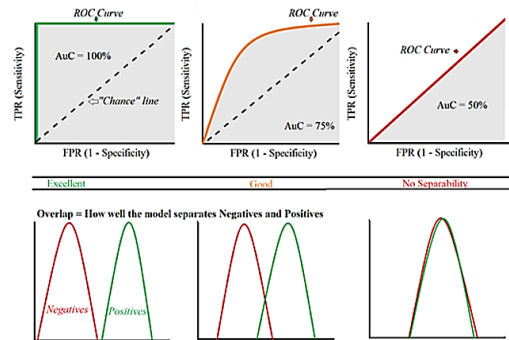
برای تبیین ارزیابی میزان موفقیت سامانه آموزش‌دیده از منحنی ROC و معیار AUC استفاده شده‌است.

² Receiver Operating Characteristics

¹ kernel

۳-۴-۲- سطح زیر منحنی راک^۱ (AUC)

مفهومی دیگر به نام سطح زیر منحنی راک که به طور معمول به اختصار AUC نامیده می شود، می تواند رفتار سامانه را ارزیابی کند. شکل (۷) ارتباط بین سطح زیر منحنی راک و میزان درستی نتایج سامانه را در حالات متفاوت نشان می دهد.



(شکل ۷): نمایش ارتباط قدرت تشخیص سامانه و منحنی راک
(Figure-7): The relation between ROC curve and recognition accuracy

برای تفسیر مقادیر AUC می توان از قوانین کلی مطابق با جدول زیر استفاده کرد:

(جدول ۱): دسته بندی قدرت تشخیص سامانه

(Table-1): Recognition ability of the system according to AUC value

قدرت تشخیص آزمون (درستی نتایج آزمون)	در AUC مقدار عددی ROC منحنی
بسیار عالی	۰/۹ تا ۱
عالی	۰/۸ تا ۰/۹
قابل قبول	۰/۷ تا ۰/۸
بدون قدرت تشخیص	۰/۵

۴- آزمایش های انجام شده

در ادامه به تشریح مراحل اجرای روش پیشنهادی می پردازیم:

۴-۱- بانک داده های فرمت MP3

برای تأمین داده های آموزشی و آزمایشی از بانک داده دورتموند^۲ [۱۳] استفاده شده است. این بانک شامل تعداد زیادی فایل های استاندارد با فرمت MP3 است که در ژانرهای مختلف دسته بندی شده اند. تمام فایل های صوتی استفاده شده در مجموعه دادگان، فایل های استریو ده ثانیه ای با نرخ فشرده سازی 128kbps و نرخ نمونه برداری 44100Hz هستند. از میان داده های این بانک تعداد دویست نمونه از سبک های مختلف موسیقی انتخاب شد.

^۱ Area Under the ROC Curve

^۲ Dortmund

از این دویست نمونه انتخاب شده صد نمونه برای آموزش و صد نمونه جهت بخش آزمون مشخص شده و از هر صد نمونه پنجاه نمونه توسط نهان نگار MP3Stego با ظرفیت های متنوع ۱٪ و ۵۰٪ و ۱۰۰٪ (بیشینه ظرفیت پنهان سازی نرم افزار MP3Stego) نهان نگاری شده و برای مراحل آموزش و آزمایش استفاده شد؛ به منظور تأمین فایل های متناسب جهت نهان نگاری از یک نرم افزار تولیدکننده متون تصادفی با ظرفیت های مورد نیاز یک درصد، پنجاه درصد و صد درصد استفاده شده است.

۴-۲- تبدیل فرمت فایل های MP3 به Wav

از آنجاکه نهان نگاری با نرم افزار MP3Stego در حین فشرده سازی انجام می شود ابتدا فایل های MP3 استخراج شده از بانک داده توسط نرم افزار مبدل [14] OGG به فرمت wav تبدیل می شوند؛ این فرایند در محیط ویندوز صورت می پذیرد.

۴-۳- تولید فایل نهان نگاری شده با فایل های متن

مجدداً فایل های غیرفشرده wav توسط نرم افزار MP3Stego نهان نگاری می شوند، MP3Stego در خط فرمان ویندوز و جداگانه برای هر فایل انجام می شود؛ به منظور اطمینان از انجام صحیح نهان نگاری، فایل های نهانه کدگشایی شده و سپس فایل های مشکل دار کنار گذاشته شده اند.

۴-۴- استخراج اطلاعات جانبی

مقادیر متغیر اشاره گر main_data_begin (mdb) برای فایل MP3 تمیز (پوشانه) و برای فایل های آلوده (نهانه) توسط برنامه تهیه شده در محیط متلب^۳ استخراج و ذخیره می شود؛ در واقع برای هر نمونه فایل MP3 پوشانه فایل متناظر نهان نگاری شده (با ظرفیت های مختلف) ایجاد می شود.

در شکل (۸) مقادیر متغیر mdb برای یک فایل صوتی پوشانه و یک فایل صوتی نهانه نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می شود مقدار متوسط متغیر mdb برای فایل نهانه کاهش پیدا کرده است.

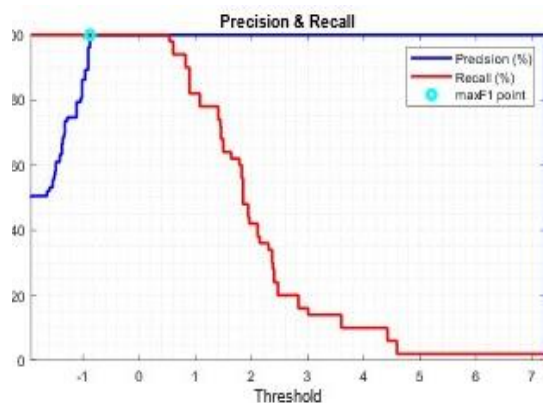
در این مرحله، تعداد صد نمونه از داده ها برای مرحله آموزش و تعداد صد نمونه دیگر برای مرحله آزمون سامانه جداسازی می شود.

^۳ MATLAB

۹۷.۶٪ گزارش شده‌است. در مرجع دیگر [۸]، حداقل خطای EER ۱.۱۱٪، حداکثر مقدار AUC برابر با ۹۹.۹۲٪ و حداکثر مقدار F-measure برابر با ۹۸.۹۹٪ بوده‌است؛ در واقع در الگوریتم پیاده‌شده تأثیر نهان‌نگاری بر روی متغیر mdb زیاد بوده و باعث ایجاد تمایز و دسته‌بندی مناسب بین سیگنال‌های آلوده و تمیز می‌شود.

باتوجه به حجم بسیار بالای استفاده از فایل‌های فشرده صوتی با فرمت MP3 و دردسترس بودن نهان‌نگار MP3stego، استفاده از ویژگی mdb در فرایند نهان‌کاری شده با این روش باشد.

جهت بررسی و ارزیابی بیشتر روش می‌توان آزمایش‌هایی را با نمونه‌های طولانی‌تر از فایل MP3 (بیشتر از ده ثانیه) انجام داد.



(شکل-۹): نمایی از منحنی دقت (Precision) در کنار منحنی یادآوری (Recall) برای سامانه پیشنهادی در حالت ظرفیت پنهان‌نگاری ۱٪ (سخت‌ترین حالت). همان‌طور که دیده می‌شود، سامانه پیشنهادی توانسته‌است به مقدار کارایی $F1=100\%$ دست یابد (دقت ۱۰۰٪).

(Figure-9): Precision versus Recall curves for the proposed system at 1% embedding capacity.

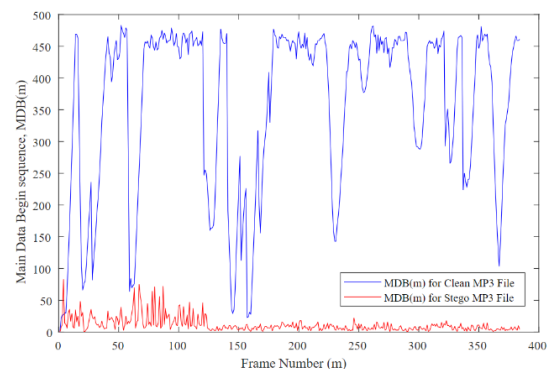
همان‌طور که در شکل (۹) منحنی راک مربوط به سامانه پیشنهادی نشان‌داده شده و باتوجه به جدول (۲) قدرت تشخیص سامانه پیشنهادی عالی ارزیابی می‌شود.

(جدول-۲): نتیجه آزمایش‌ها برای ظرفیت‌های

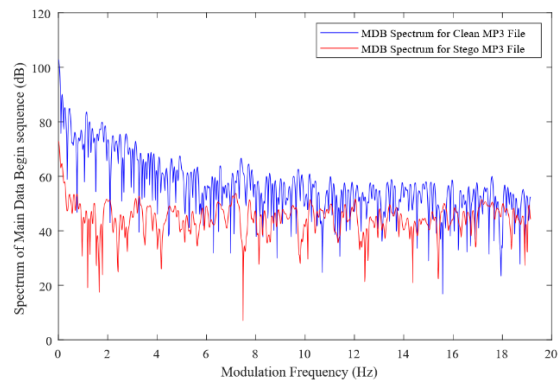
متفاوت نهان‌نگاری

(Table-2): Experimental results for different embedding rates (capacities)

ظرفیت نهان‌نگاری (%)	AUC	F-measure	EER
Mp3stego %۱ - %۵۰ - %۱۰۰	۱	%۱۰۰	%۰



(شکل - ۸ - الف)



(شکل - ۸ - ب)

(شکل-۸): مقایسه تأثیر نهان‌نگاری در شکل متغیر mdb: الف- مقایسه دنباله mdb در حوزه زمان برای فایل تمیز (آبی رنگ) و فایل آلوده (قرمز رنگ). ب- مقایسه لگاریتم طیف فوریه دنباله mdb در حوزه فرکانس برای فایل تمیز (آبی رنگ) و فایل آلوده (قرمز رنگ) (Figure-8): Effects of steganography on the shape of MDB side information - A: MDB in time domain, B: Fourier spectrum of MDB in frequency domain

۴-۵- آموزش سامانه با تکنیک‌های یادگیری ماشین

برای دسته‌بندی فایل‌های صوتی به دو دسته نهان‌نگاری شده و نهان‌نگاری نشده، از یک دسته‌بند دودویی استفاده شده‌است. دسته‌بند موردنظر ماشین بردار پشتیبان (SVM) است.

۴-۶- ارزیابی آزمون سامانه

برای آزمون سامانه طراحی شده فایل‌های جداشده آزمون به ترتیب به سامانه ارائه و صحت تشخیص برای صد نمونه برای هر ظرفیت نهان‌نگاری کنترل می‌شود. در جدول (۲) نتایج مرحله آزمون سامانه برای سه ظرفیت ۱٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ارائه شده‌است. از آنجاکه نتایج حاصله برای هر سه دسته ظرفیت مشابه است، نتایج یک‌جا ارائه شده‌است.

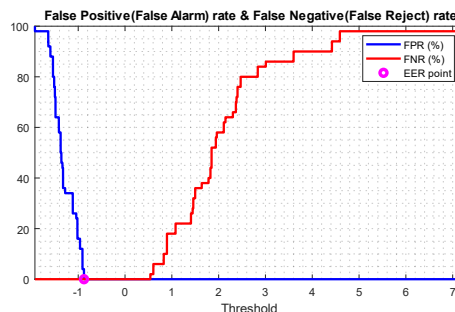
در آزمایش‌های انجام‌شده در مرجع [۴] مقدار میانگین دقت تست برای متغیر main_data_begin عدد

بدون خطا)، حتی زمانی که اطلاعات پنهان شده در فایل صوتی بسیار کم و تُنک باشد.

6-References

۶- مراجع

- [۱] شیخزادگان، جواد، آشنایی با نهننگاری و پنهان سازی اطلاعات، تهران، انتشارات پژوهشکده پردازش هوشمند علائم، ۱۳۹۲.
- [2] H. Ghasemzadeh, and M. H. Kayvanrad, "Comprehensive review of audio steganalysis methods", IET Signal Processing, vol. 12, pp. 673-687, 2018.
- [۳] دالوند، الهام، «نهن کاوی فایل های صوتی MP3 با روش های مبتنی بر اطلاعات جانبی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ۱۳۹۴.
- [4] R. Kuriakose, and P. Premalatha, "A novel Method for MP3 Steganalysis", Proceedings of Intelligent Computing, Communication and Devices, ICCD, New Delhi, India, 2015, pp. 605-611.
- [5] H. Song, T. Hu, Y. Huang, and M. Guo, "Detecting MP3Stego and Estimating the Hidden Size", in WSEAS International Conference on Computers, Athens, Greece, 2003, pp. 2881-2884.
- [6] X. Yu, R. Wang, D. Yan, and J. Zhu, "MP3 Audio Steganalysis Using Calibrated Side Information Feature", Journal of Computational Information Systems, vol. 8, pp. 4241-4248, 2012.
- [7] C. Jin, R. Wang, D. Yan Ma, P. and K. Yang, "A Novel Detection Scheme for MP3stego with Low Payload", in IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing, ChinaSIP, Xi'an, China, 2014, pp. 602-606.
- [۸] دارابی، علیرضا، «نهن یابی فایل های صوتی MP3 با تاکید بر روش های پردازش سیگنال»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ۱۳۹۵.
- [۹] گروه واژه‌گزینی انجمن رمز ایران، واژه‌نامه و فرهنگ امنیت فضای تولید و تبادل اطلاعات، ویرایش دوم، تهران، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۴.
- [۱۰] مهدوی جعفری، سمیه، "نهننگاری اصوات دیجیتال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ۱۳۸۸.
- [۱۱] سلیمیان ریزی، عاطفه، "روش های مخفی سازی اطلاعات در فایل های صوتی MP3"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۹۳.



(شکل-۱۰): نمایشی از منحنی نرخ خطای پذیرش اشتباه (FPR) در کنار منحنی نرخ خطای رد اشتباه (FNR) برای سامانه پیشنهادی در حالت ظرفیت پنهان نگاری ۱٪ (سخت ترین حالت). همان طور که دیده می شود، سامانه پیشنهادی توانسته است به مقدار خطای $EER=0\%$ دست یابد (بدون خطا).
(Figure-10): FPR versus FNR curves for the proposed system at 1% embedding capacity.

۵- نتیجه گیری

در سال های اخیر نهننگاری اطلاعات در فایل های چندرسانه ای توجه زیادی را در میان پژوهشگران به خود جلب کرده است. از دید امنیت فضای تولید و تبادل اطلاعات، بالتبع انجام نهن کاوی و آشکارسازی و کشف محتویات چندرسانه ای که اطلاعاتی در آن پنهان شده است، اهمیت بسیار فراوانی دارد؛ در این مقاله یک روش نهن کاوی جدید برای فایل های صوتی با قالب MP3 که در آن با استفاده از الگوریتم مشهور MP3Stego اطلاعاتی پنهان شده، ارائه شده است. روش پیشنهادی به جای اینکه از اطلاعات سیگنال صوت ذخیره شده در فایل MP3 استفاده کند، از اطلاعات جانبی فایل بهره می گیرد که وابستگی کمتری به محتویات صوتی فایل دارد؛ در این روش، اطلاعات جانبی MDB در فایل صوتی فشرده به عنوان یک دنباله فرض می شود و سپس با استفاده از یک روش استخراج ویژگی، یک ویژگی جدید در حوزه فرکانس به نام قله دار بودن طیف محاسبه می شود. این ویژگی ساده و درعین حال قوی با ویژگی هایی همچون میانگین زمانی و میانگین طیف دامنه دنباله MDB تلفیق شده و یک بردار ویژگی با ابعاد کم (سه بعدی) را تشکیل می دهد. این بردار ویژگی سپس به وسیله یک دسته بند از نوع ماشین بردار پشتیبان (SVM) به عنوان فایل نهننگاری شده (مشکوک) یا فایل عادی (فاقد اطلاعات) شناخته خواهد شد. روش استخراج ویژگی درعین ساده بودن و داشتن محاسبات بسیار کم، برای نهن کاوی فایل های MP3 دقت ۱۰۰٪ دارد (بازشناسی

پردازش سیگنال‌های آکوستیکی، صوت، موسیقی و گفتار، داده‌کاوی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و الگوریتم‌های فراابتکاری.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

kabudian@razi.ac.ir

- [12] R. Raissi, "The Theory behind MP3", Personal Report, Dec. 2002.
- [13] Music Audio Benchmark Data Set, Dortmund University, [Online], Available: <https://www-ai.cs.tu-dortmund.de/audio.html> [Accessed: Sept. 2, 2024]
- [14] Ogg MP3 converter, [Online], Available: <http://www.ogg-mp3.net> [Accessed: Sept. 2, 2024]

[۱۵] اشعری، فاطمه، ریاحی، نوشین، «نهان‌کاوی صوت مبتنی بر همبستگی بین فریم و کاهش بازگشتی ویژگی»، پردازش علائم و داده‌ها، دوره ۱۵، شماره ۳، صفحات ۱۱۳-۱۲۲، ۱۳۹۷.



محسن سلیمانی مدرک

دکترای خود را در سال ۱۴۰۰

در رشته مهندسی برق-

مخابرات از دانشگاه ارومیه

دریافت کرد. زمینه‌های

پژوهشی موردعلاقه ایشان

عبارت‌اند از: امنیت اطلاعات، نهان‌نگاری، نهان‌کاوی.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

mohsen1soleimani@gmail.com



مهدی چهل امیرانی مدرک

دکتری خود را در سال ۱۳۸۸ در

رشته مهندسی برق-مخابرات از

دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران دریافت

کرد. ایشان هم‌اکنون استاد دانشکده

مهندسی برق و کامپیوتر در دانشگاه

ارومیه هستند. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان

عبارت‌اند از: پردازش سیگنال، پردازش تصویر و

پردازش سیگنال‌های زیست‌پزشکی.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

m.amirani@urmia.ac.ir



سیدجهانشاه کبودیان مدرک

دکترای خود را در سال ۱۳۸۹ در رشته

مهندسی کامپیوتر-هوش مصنوعی و

رباتیک از دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت کرد. ایشان هم‌اکنون استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر در

دانشگاه رازی کرمانشاه هستند. زمینه‌های پژوهشی

موردعلاقه ایشان عبارت‌اند از: پردازش سیگنال دیجیتال،